

POLITECNICO DI MILANO
FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Dipartimento di Meccanica
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



**OTTIMIZZAZIONE DEL TAGLIO AWJ PER SCHIUME
METALLICHE**

Relatore: Chiar.mo Prof. Michele MONNO

Correlatore: Ing. Massimo GOLETTI

Tesi di Laurea di:

Alessandra PIGHI
Matr. 720683

Anno Accademico 2009 - 2010

*A mio marito Filippo
e ai miei fratelli
Francesco ed Emanuele*

Ringraziamenti

Terminato il mio lavoro di tesi desidero esprimere con deferenza la mia gratitudine al Prof. Michele Monno per la competente professionalità e la cordiale collaborazione dimostrate nei miei confronti; ringrazio inoltre con particolare cortesia l'Ing. Massimo Goletti per avermi seguita e l'Ing. Valerio Mussi per il vivo interesse e i preziosi consigli fornitimi nelle fasi più critiche del lavoro.

Un gentile ringraziamento al Sig. Corrado Buroni che ha messo a disposizione la sua grande esperienza per la realizzazione della fase sperimentale, e a tutti coloro che lavorano al MUSP che mi hanno sempre dimostrato una costruttiva e amichevole assistenza.

Al termine del percorso di studi e di questa ricerca il più sentito ringraziamento a Riccardo per aver condiviso con serietà e impegno ogni mia fatica, nonché per il sostegno e per la sua sincera amicizia. Ringrazio inoltre i miei compagni di corso: Eugenia, Nicola, Alessandro, Davide e Marco.

Un grazie di cuore a Martina, collega esemplare e amica straordinaria, per avermi sempre incoraggiata in questi anni di forte impegno; ringrazio Sabrina per essere stata sempre presente e per aver reso unici questi anni. Un grazie affettuoso a Francesco e Antonio per la stima e l'amicizia di sempre.

Ai miei genitori rivolgo tutto il mio affetto per aver sempre appoggiato le mie scelte e avermi sostenuta nel mio percorso di studi.

Ringrazio, infine, i miei fratelli Francesco ed Emanuele per aver seguito con interesse e curiosità la mia formazione come ingegnere, e mio marito Filippo che mi ha dato sostegno e fiducia per il raggiungimento di questo traguardo: a loro dedico questo lavoro.

Indice Generale

Capitolo 1: Introduzione alla tecnologia AWJ.....	1
1.1 Caratteristiche della Tecnologia Water jet.....	1
1.2 Processo di taglio	2
1.3 Elementi dell'impianto.....	3
1.3.1 Intensificatore.....	4
1.3.2 Sistema di adduzione dell'abrasivo.....	8
1.3.3 Impianto di trattamento e depurazione dell'acqua	10
1.3.4 Testa di taglio.....	13
1.3.5 Il sistema di movimentazione e vasca di raccolta	16
Capitolo 2: Ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ.....	17
2.1 Procedura generale per l'impostazione e risoluzione del problema di ottimizzazione.	17
2.1.1 Selezione dei parametri di input tecnici ed economici.....	19
2.1.2 Selezione dei modelli	21
2.1.3 Risoluzione del problema.....	21
2.2 Stato dell'arte per modelli di costo per tecnologia AWJ	25
2.2.1 J Jeng e T. Kim.....	26
2.2.2 V. N. Pi.....	28
2.2.3 Calcolo dei costi per impianti a recupero di abrasivo	36
2.3 Scelta del modello di costo	41
2.4 Scelta del modello di usura per la stima della vita utile dell'ugello focalizzatore	44
2.4.1 Analisi del fenomeno di usura dell'ugello focalizzatore.....	44
2.4.2 Parametri di influenza sull'usura dell'ugello	47
2.4.3 Modelli di usura per la stima della vita utile dell'ugello	50
Capitolo 3: Schiume metalliche, caratteristiche e applicazioni	55
3.1 Definizione di schiuma metallica.....	56
3.2 Generalità sulle schiume metalliche.....	57
3.3 Tecniche di preparazione	58

3.3.1	Formazione di metalli cellulari da stato liquido	61
3.3.2	Formazione di metalli cellulari da stato solido: compattazione di polveri metalliche	66
3.3.3	Tecniche di deposito	71
3.4	Proprietà delle schiume metalliche	73
3.4.1	Capacità di assorbimento di energia meccanica	73
3.4.2	Smorzamento delle vibrazioni	75
3.4.3	Proprietà acustiche	76
3.4.4	Mappe caratteristiche	77
3.5	Applicazione delle schiume metalliche	78
3.5.1	Applicazioni strutturali delle schiume metalliche	81
3.6	Lavorazione delle schiume metalliche	89
3.6.1	Tecniche di saldatura per schiume metalliche	89
3.6.2	Tecnologie di taglio	92
3.7	Taglio di pannelli in schiuma di alluminio	93
Capitolo 4: Finalità e caratteristiche della sperimentazione		95
4.1	Obiettivo della sperimentazione	95
4.2	Parametri di interesse	97
4.3	Prove preliminari	100
4.3.1	Taratura del sistema	100
4.3.2	Prove di intasamento	103
4.4	Analisi dello spessore tagliabile	106
4.4.1	Sistema di serraggio	106
4.4.2	Pannelli 10 mm	107
4.4.3	Pannelli 30 mm	117
4.5	Analisi della qualità del taglio	132
4.5.1	Piano fattoriale per lo studio della qualità del taglio	132
4.5.2	Preparazione dei provini	134
4.5.3	Sistema di serraggio	135
Capitolo 5: Analisi dello spessore tagliabile, selezione dei parametri ottimali		137
5.1	Stato dell'arte nell'ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ	138

5.1.1 Stato dell'arte nell'ottimizzazione tecnica del processo di taglio con tecnologia AWJ	139
5.2 Ottimizzazione economica per il taglio delle schiume metalliche: ricerca del minimo costo	143
5.3 Stima della vita del focalizzatore: applicazione del modello di usura	145
5.3.1 Calcolo vita dell'ugello: pannelli 30 mm.....	147
5.3.2 Calcolo vita dell'ugello pannelli 10 mm.....	152
5.4 Selezione dei parametri ottimali per pannelli in schiuma di 10 e 30 mm di spessore	154
5.4.1 Selezione dei parametri ottimali per pannelli a 30 mm di spessore.	155
5.4.2 Risultati ottenuti, pannelli 30 mm	158
5.4.3 Calcolo del costo minimo per pannelli a 30 mm di spessore.....	159
5.4.4 Conclusioni, pannelli 30 mm	162
5.4.5 Selezione dei parametri ottimali per pannelli a 10 mm di spessore.	164
5.4.6 Risultati ottenuti, pannelli 10 mm	166
5.4.7 Calcolo del costo minimo per pannelli a 10 mm di spessore.....	167
5.4.8 Conclusioni, pannelli 10 mm	170
5.4.9 Costo di taglio senza abrasivo.....	171
5.5 Analisi di sensibilità.....	173
5.5.1 Applicazione della vita media dell'ugello focalizzatore	174
5.5.2 Applicazione del modello di usura.....	176
Capitolo 6: Analisi della qualità del taglio, selezione dei parametri ottimali ...	179
6.1 Qualità del taglio nei materiali omogenei	179
6.1.1 Ampiezza del solco di taglio	179
6.1.2 Conicità del solco di taglio.....	180
6.2 Qualità del taglio nelle schiume metalliche	184
6.2.1 Analisi della densità dei provini.....	186
6.2.2 Analisi dell'immagine.....	190
6.2.3 Analisi dei dati	197
6.2.4 Valutazione dell'incertezza di misura.....	218
6.3 Selezione dei parametri ottimali.....	220
6.4 Calcolo dei costi.....	221

Capitolo 7: Conclusioni e sviluppi futuri	225
Appendice A	231
Appendice B	261
Appendice C	265
Appendice D	275
Appendice E.....	277
Appendice F.....	297
Appendice G	305
Appendice H.....	315
Bibliografia	325

Indice delle figure

Figura 1. 1 Elementi principali dell'impianto [Ann99]	3
Figura 1. 2 Intensificatore di pressione in uso presso il laboratorio MUSP	4
Figura 1. 3 Schema di pistone a singolo effetto	5
Figura 1. 4 Intensificatore a doppio effetto (a) e a singolo effetto (b) [Ann99] ...	5
Figura 1. 5 Cilindri oleoidraulici che costituiscono l'intensificatore utilizzato....	6
Figura 1. 6 Schema funzionamento pompa diretta Omax.....	7
Figura 1. 7 Spaccato di pompa elettrica Tecnocut	8
Figura 1. 8 Serbatoio per il contenimento dell'abrasivo	9
Figura 1. 9 Particolare della testa di taglio: tramoggia	9
Figura 1. 10 Addolcitore	11
Figura 1. 11 Dosatore polifosfati	11
Figura 1. 12 Serbatoio raccolta acqua	12
Figura 1. 13 Autoclave	12
Figura 1. 14 Esploso della testa di taglio [Ann99].....	13
Figura 1. 15 Sistema di movimentazione assi con vasca di raccolta	16
Figura 2. 1 Approccio generale per la selezione dei parametri di taglio ottimo.	17
Figura 2. 2 Fasi principali del problema di ottimizzazione.....	18
Figura 2. 3 Parametri di taglio.....	20
Figura 2. 4 Schema illustrativo del coefficiente di efflusso nell'ugello primario [Pi05].....	31
Figura 2. 5 Effetto della pressione P_w sul coefficiente c_d [Hash 89].....	35
Figura 2. 6 Effetto della pressione [Cla98] e dell'alta pressione [Has97] sul coefficiente di efflusso	35
Figura 2. 7 Capacità di recupero dell'abrasivo G_{dc} e costo totale per il recupero dell'abrasivo [Pi07].....	38
Figura 2. 8 Componenti di costo: costo orario della manodopera rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07].....	39
Figura 2. 9 Componenti di costo: costo orario della macchina rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07].....	39
Figura 2. 10 Componenti di costo: costo orario dell'energia rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07].....	40
Figura 2. 11 Calcolo della vita utile dell'ugello.....	42
Figura 2. 12 Fenomeno di usura dell'ugello primario [Nan00]	44
Figura 2. 13 Effetto dell'angolo d'impatto [Has94].....	45
Figura 2. 14 Sezione longitudinale e calco di focalizzatore dopo 3 h di utilizzo [Nan02]	46
Figura 2. 15 Profilo longitudinale dell'ugello focalizzatore dopo 3 h di utilizzo [Nan00]	46

Figura 2. 16 Aumento del diametro di uscita (a) e diminuzione del peso dell'ugello (b) [Nan00]	47
Figura 2. 17 Effetto della lunghezza del focalizzatore sull'usura	47
Figura 2. 18 Effetto dell'angolo d'imbecco sull'usura [Nan02]	48
Figura 2. 19 Effetto del diametro iniziale del focalizzatore sull'usura [Nan02]	48
Figura 2. 20 Effetto del diametro dell'ugello primario sull'usura [Nan02]	49
Figura 2. 21 Effetto della portata di abrasivo sull'usura [Nan02]	49
Figura 2. 22 Effetto della pressione sull'usura [Nan02].....	50
Figura 2. 23 Costi di usura del focalizzatore e vita utile dell'ugello, Cf=70 €/pezzo [Pi05].....	51
Figura 2. 24 Vita utile dell'ugello e andamento del diametro di uscita [Pi05]...	52
Figura 3. 1 a) schiuma di alluminio, b) metallo cellulare a base di ferro, c) spugna metallica da bronzo sinterizzato, d) spugna di alluminio, e) spugna di nichel.....	56
Figura 3. 2 (a) Struttura a celle aperte: spugne metalliche [Ash00]; (b) Struttura a celle chiuse :schiume metalliche [Ash00].....	57
Figura 3. 3 Schema dei principali metodi di produzione delle schiume metalliche [Ber07].....	59
Figura 3. 4 Schiumatura mediante iniezione di gas.....	61
Figura 3. 5 a) Schiuma Alporas [Ash00]; b) Schiumatura con aggiunta di agente schiumogeno "Alporas"-process [Ban01]	62
Figura 3. 6 schema di produzione per la solidificazione dell'eutettico gas-metallo [Ash00]	63
Figura 3. 7 Produzione di materiali metallici cellulari tramite solidificazione in stampo [Ban01].....	64
Figura 3. 8 Rappresentazione della struttura della spugna di alluminio Duocel	65
Figura 3. 9 Produzione di materiali metallici cellulari tramite matrici granulari	65
Figura 3. 10 Micrografia di schiuma <i>Alulight</i> [Ban01]	66
Figura 3. 11 schema di decomposizione di particelle che rilasciano gas in semi solidi, schiume <i>Alulight</i> [Ash00]	67
Figura 3. 12 Rappresentazione dell'espansione del precursore all'aumentare del tempo di permanenza all'interno del forno mantenuto alla temperatura di 750°C [Ban01]	68
Figura 3. 13 Esempio di struttura sandwich [Ber07].....	69
Figura 3. 14 Bronzo poroso sinterizzato da granuli di diametro di circa 100 µm [Ban01]	69
Figura 3. 15 Tecnica a "intrappolamento di gas" Ban[01]	70
Figura 3. 16 Processo di sinterizzazione per strutture a sfere cave [Ban01]	71
Figura 3. 17 Tecnica del deposito elettrico per la produzione di schiume metalliche.....	72
Figura 3. 18 "Incofoam" prodotta tramite carbonile di nichel.....	72

Figura 3. 19 Esempio di assorbimento di energia meccanica per provini in AlSi10 [Ber07]	74
Figura 3. 20 confronto tra energia assorbita da materiale denso e da schiuma metallica [Yu98].....	74
Figura 3. 21 Influenza della densità relativa sull'energia assorbita [Yu98]	75
Figura 3. 22 Andamento del grado di assorbimento delle schiume in funzione della densità [Yu98]	76
Figura 3. 23 Modulo di Young in funzione della densità [Ash00]	77
Figura 3. 24 Sforzo di compressione in funzione della densità [Ash00]	78
Figura 3. 25 Settori principali per l'applicazioni delle schiume metalliche [Bas07]	78
Figura 3. 26 Applicazioni di pannelli in schiuma metallica in funzione della porosità [Ban01]	79
Figura 3. 27 Pannelli sandwich in schiuma metallica prima e dopo deformazione, a)[Yu98], b) [Ber07]	80
Figura 3. 28 Esempi applicativi delle schiume metalliche [Bas07]	81
Figura 3. 29 Principali applicazioni strutturali per schiume metalliche [Ban01]	82
Figura 3. 30 Applicazioni di pannelli sandwich in schiuma metallica d'alluminio sul veicolo [Yu98].....	83
Figura 3. 31 Esempi applicativi delle schiume metalliche nel settore aerospaziale [Bas07]	85
Figura 3. 32 Rappresentazione di una struttura sacrificale per carrozze ferroviarie [Bas07]	86
Figura 3. 33 Esempi applicativi nel settore delle macchine utensili (a) pannelli sandwich impiegati per strutture portanti di macchine utensili; (b) traversa di una macchina utensile rinforzata in schiuma metallica per la riduzione delle frequenze proprie (riduzione del 60%)[Bas07].....	88
Figura 3. 34 Esempi applicativi delle schiume metalliche nel settore del design [Bas07]	88
Figura 3. 35 Esempio di giunzione adesiva su pannelli sandwich [See02]	89
Figura 3. 36 Diverse modalità di saldatura per pannelli sandwich in schiuma a)saldatura laser, b) saldatura TIG [See02].....	90
Figura 3. 37 Diverse modalità di saldatura per pannelli sandwich in schiuma c) bulloni e perni di saldatura [See02]	91
Figura 3. 38 Metodi di giunzione meccanica: punzone di rivettatura [See02]	91
Figura 3. 39 Esempi di giunzione meccanica: a) dadi e viti di rivettatura, b) perforazione.....	92
Figura 3. 40 Taglio di pannelli sandwich in schiuma, taglio laser e fresatura....	93
Figura 3. 41 Approccio al taglio delle schiume metalliche.....	94
Figura 4. 1 Effetto del mesh# a) sulla profondità di taglio, b) sulla velocità di avanzamento massima [Has91].....	99

Figura 4. 2 Effetto del mesh# a) sulla rugosità superficiale, b) sulla profondità di taglio [Has91]	99
Figura 4. 3 Disco forato per la regolazione dell'abrasivo	101
Figura 4. 4 Andamento della portata in funzione dell'accoppiamento $Dug+Dfoc$ e del numero di foro.....	102
Figura 4. 5 Andamento della portata in funzione della pressione e del numero di foro.....	102
Figura 4. 6 Valore della portata in funzione del numero di foro	103
Figura 4. 7 Sistema di serraggio tramite morsetti per l'analisi dello spessore tagliabile	107
Figura 4. 8 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 10 mm	108
Figura 4. 9 Esito taglio provino 1, fronte.....	109
Figura 4. 10 Esito taglio provino 1, retro.....	109
Figura 4. 11 Esito taglio provino 2, fronte.....	110
Figura 4. 12 Esito taglio provino 2, retro.....	110
Figura 4. 13 Esito provino 3, fronte.....	111
Figura 4. 14 Esito provino 3, retro.....	111
Figura 4. 15 Profondità di taglio in funzione della portata di abrasivo [Cha91]	112
Figura 4. 16 Provino per tagli senza abrasivo, fronte	114
Figura 4. 17 Provino per tagli senza abrasivo, retro	114
Figura 4. 18 Esiti per tagli senza abrasivo, pannelli 10 mm, velocità 5, 10, 20 mm/min.....	115
Figura 4. 19 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire: pannelli 30 mm	118
Figura 4. 20 Esito provino tagli preliminari, 30 mm, fronte	118
Figura 4. 21 Esito provino tagli preliminari, 30 mm, retro	118
Figura 4. 22 Risultati provino 1, piano fattoriale preliminare, pannelli 30 mm	122
Figura 4. 23 Risultati provino 2, piano fattoriale preliminare, pannelli 30 mm	123
Figura 4. 24 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, piano fattoriale a 4 livelli, pannelli 30 mm.....	125
Figura 4. 25 Risultati per condizioni sperimentali 252 g/min (n. ro 63,58) e 408 g/min (n. ro 38, 32), a 250 MPa, 500 mm/min, $Dug+Dfoc$ 1 mm.....	127
Figura 4. 26 Risultati per condizione sperimentale 252 g/min, 350 MPa, 700 mm/min, $Dug+Dfoc$ 1 mm	128
Figura 4. 27 Risultati per condizione sperimentale 252 g/min (tagli n. ro 44, 30), e 408 g/min (tagli n. ro 43, 1), 350 MPa, 1000 mm/min, $Dug+Dfoc$ 1 mm.....	129
Figura 4. 28 Provino per l'analisi della qualità del solco di taglio.....	135
Figura 4. 29 Sistema di serraggio del pezzo per l'analisi della qualità del taglio	136
Figura 5. 1 Influenza percentuale delle singole voci di costo sul totale [Hoo06]	

Figura 5. 2 a) Effetto della Pressione sulla portata di abrasivo (ghisa grigia); b) Effetto della Pressione sulla velocità di avanzamento (acciaio dolce) [Has89]	140
Figura 5. 3 Volume di materiale rimosso in funzione del diametro del focalizzatore	141
Figura 5. 4 Massimo spessore tagliabile in funzione della lunghezza del focalizzatore	141
Figura 5. 5 Aumento del diametro in uscita dell'ugello focalizzatore in funzione della sua lunghezza [Nan00]	142
Figura 5. 6 Effetto della s.o.d. sullo spessore tagliabile [Blic90-TesiPi].....	143
Figura 5. 7 Andamento della vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura (condizioni sperimentali a esito passante, pannelli da 30 mm).....	146
Figura 5. 8 Vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura, 30 mm,	149
Figura 5. 9 Vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura, 30 mm,	151
Figura 5. 10 Andamento del costo di usura in €/h in funzione della vita utile del focalizzatore, a) 100<velocità di avanzamento<1000 mm/min, b) 250<Pressione<350 MPa	151
Figura 5. 11 a) Vita utile dell'ugello focalizzatore in funzione del tasso di usura; b) costo di usura in funzione della vita utile, condizioni sperimentali per tagli passanti, pannelli da 10 mm	153
Figura 5. 12 Costi di usura, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min	161
Figura 5. 13 Costi di usura, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa.....	162
Figura 5. 14 Incidenza percentuale delle singole voci di costo sul costo totale minimo, pannelli 30 mm	163
Figura 5. 15 Costi di usura, pannelli 10 mm	168
Figura 5. 16 Minimo costo, pannelli 10 mm.....	169
Figura 5. 17 Incidenza percentuale delle singole voci di costo sul costo totale minimo, pannelli 10 mm	170
Figura 5. 18 Incidenza percentuale delle singole voci sul costo totale, taglio con solo getto d'acqua, pannelli 10 mm	171
Figura 5. 19 Confronto dei costi per taglio con e senza abrasivo, pannelli 10 mm	173
Figura 6. 1 Ampiezza del solco di taglio i funzione della velocità di avanzamento e della portata di abrasivo [Ann99].....	180
Figura 6. 2 Modelli di forma del getto per CAM [Hen98].....	181
Figura 6. 3 Significato fisico del parametro conicità [Ann99].....	182
Figura 6. 4 Rapporto di conicità in funzione della velocità di avanzamento [Mom98]	182
Figura 6. 5 a) effetto della pressione, b) del diametro del focalizzatore e c) della s.o.d sull'inclinazione della parete del solco [Ann99]	184
Figura 6. 6 Effetto a) del diametro delle particelle di abrasivo e b) della portata di abrasivo sull'inclinazione delle pareti del solco [Mom98].....	184

Figura 6. 7 Fasi sperimentali e di rielaborazione dei dati per l'analisi della qualità del solco di taglio	185
Figura 6. 8 Esempio pratico per la valutazione della densità locale del provino	187
Figura 6. 9 Calcolo del volume: misurazione di larghezza, lunghezza e spessore del provino, faccia superiore.....	188
Figura 6. 10 Rivestimento del provino per la scansione.....	191
Figura 6. 11 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni fronte del provino	192
Figura 6. 12 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni retro del provino.....	193
Figura 6. 13 Ritaglio dei 40 mm centrali per ciascuna immagine scannerizzata, lato fronte e retro del provino	193
Figura 6. 14 Applicazione del livello di soglia al provino, creazione della maschera del provino, lato fronte e retro del provino.....	193
Figura 6. 15 Sistema di riferimento utilizzato per la definizione delle coordinate di centroide e <i>bounding rectangle</i> [Mon06]	195
Figura 6. 16 Esempio di doppie aree individuate all'interno della striscia	195
Figura 6. 17 Esempio di suddivisione di ciascun solco di taglio in 80 strisce della medesima altezza, lato "retro"	196
Figura 6. 18 corrispondenza tra larghezza della striscia in ingresso e della larghezza della striscia in uscita per il calcolo della conicità locale.....	196
Figura 6. 19 Influenza dei fattori <i>Pressione</i> , <i>Portata di abrasivo</i> (Foro), <i>Velocità di avanzamento</i> , <i>Dug+Dfoc</i> (Ugello) sulla larghezza media del solco in ingresso	197
Figura 6. 20 Influenza dell'interazione dei fattori, larghezza media del solco in ingresso	198
Figura 6. 21 Andamento medio della Larghezza media sul solco in ingresso al variare dei fattori.....	200
Figura 6. 22 Mascheratura delle immagini scannerizzate per ciascun provino, lato "retro"	201
Figura 6. 23 Ponte di collegamento, taglio n. ro 7 provino 4, analisi della qualità di taglio	201
Figura 6. 24 condizioni sperimentali tagli n. ro 6 e 7, provino 4, analisi della qualità del taglio	202
Figura 6. 25 Influenza dei fattori <i>Velocità di avanzamento</i> , <i>Portata di abrasivo</i> (Foro), <i>Pressione</i> , <i>Dug+Dfoc</i> (Ugelli) e delle loro interazioni sulla larghezza media del solco in uscita.....	202
Figura 6. 26 Andamento medio della Larghezza media sul solco in uscita al variare dei fattori.....	205
Figura 6. 27 Andamento delle Deviazioni standard in ingresso e in uscita in funzione di <i>Portata di abrasivo</i> e <i>Dug+Dfoc</i>	206

Figura 6. 28 Andamento delle Deviazioni standard in ingresso e in uscita in funzione di <i>Pressione</i> e <i>Velocità di avanzamento</i>	207
Figura 6. 29 Influenza dei fattori <i>Velocità di avanzamento</i> , <i>Portata di abrasivo</i> (Foro), <i>Pressione</i> , <i>Dug+Dfoc</i> (Ugelli) e delle loro interazioni sulla dev. Stand. larghezza media del solco in uscita.....	207
Figura 6. 30 Profilo del solco in uscita all'aumento della velocità di avanzamento [Mon06]	209
Figura 6. 31 Andamento medio della Conicità media al variare dei fattori.....	210
Figura 6. 32 Influenza dei fattori <i>Velocità di avanzamento</i> , <i>Portata di abrasivo</i> (Foro), <i>Pressione</i> , <i>Dug+Dfoc</i> (Ugelli) e delle loro interazioni sulla conicità media del solco in uscita	210
Figura 6. 33 Andamento della Conicità media e della dev. stand. sulla Conicità al variare della <i>Velocità di avanzamento</i>	213
Figura 6. 34 Effetto medio di <i>Velocità di avanzamento</i> e portata di abrasivo sulla dev. Stand. della conicità, pannelli 10 mm [Mon06].....	213
Figura 6. 35 Influenza dei fattori <i>Velocità di avanzamento</i> , <i>Portata di abrasivo</i> (Foro), <i>Pressione</i> , <i>Dug+Dfoc</i> (Ugelli) e delle loro interazioni sulla dev. stand. della Conicità	214
Figura 6. 36 Andamento della dev. stand. della Conicità al variare dei fattori.	216
Figura 6. 37 Incidenza percentuale dei costi.....	222
Figura 6. 38 Incidenza percentuale dei costi.....	223
Figura 7. 1 Confronto di costi totali per vita media e applicazione del modello di usura, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi.	229
Figura A. 1 Andamento dell'area del foro in funzione del numero che li identifica.....	232
Figura A. 2 Disco forato per la regolazione dell'abrasivo	235
Figura A. 3 a) l'abrasivo lascia riaffiorare la maglia del setaccio: questo istante corrisponde allo stop nel cronometraggio; b) raccolta dell'abrasivo residuo in un contenitore, per procedere alla pesatura successiva.	236
Figura A. 4 Andamento della portata in funzione di foro e <i>Dug+Dfoc</i>	239
Figura A. 5 Andamento della portata in funzione del n. ro del foro	240
Figura A. 6 Effetto medio dei fattori <i>Dug+Dfoc</i> e Numero foro.....	240
Figura A. 7 Effetto medio dell'interazione tra i fattori <i>Dug+Dfoc</i> e Numero del foro	241
Figura A. 8 Modello lineare per la portata di abrasivo (g/min)	242
Figura A. 9 Andamento della portata di abrasivo in funzione della pressione e del numero di foro	247
Figura A. 10 Andamento della portata di abrasivo del numero di foro	247
Figura A. 11 Effetto medio dei fattori <i>Pressione</i> e Numero del foro sulla Portata di abrasivo	248

Figura A. 12 Effetto medio dell'interazione tra i fattori Pressione e Numero del foro sulla Portata di abrasivo	248
Figura A. 13 Normalità dei residui, sperimentazione 350 MPa	254
Figura A. 14 Omogeneità della varianza, sperimentazione a 350 MPa.....	254
Figura A. 15 Indipendenza dei residui, sperimentazione 350 MPa.....	255
Figura A. 16 Normalità dei residui, sperimentazione 250 MPa	258
Figura A. 17 Omogeneità della Varianza, sperimentazione 250 MPa	258
Figura A. 18 Indipendenza dei residui, sperimentazione a 250 MPa	259
Figura B. 1 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 10-30 mm, massima velocità di avanzamento al limite di taglio	261
Figura B. 2 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 30 mm, piani fattoriali a due e quattro livelli per i fattori Portata di abrasivo e Velocità di avanzamento	262
Figura B. 3 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 30 mm, piani fattoriali a due livelli per l'analisi della qualità del taglio	263
Figura E. 1 Ritaglio dell'immagine scannerizzata relativa al "fronte" del provino, definizione della soglia.....	278
Figura E. 2 Ritaglio dell'immagine scannerizzata relativa al "retro" del provino, definizione della soglia	278
Figura E. 3 Applicazione del livello di soglia	279
Figura E. 4 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni fronte del provino	280
Figura E. 5 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni retro del provino	281
Figura F. 1 Termocoppie applicate allo scanner.....	297
Figura F. 2 Solco n. ro 1, provino 3 lato "retro"	298
Figura F. 3 Temperatura dello scanner in funzione della scansione.....	299
Figura F. 4 a) Andamento dell'area misurata in funzione della temperatura dello scanner; b) Distribuzione normale dei valori di area misurata	299
Figura F. 5 Autocorrelation test per la valutazione dell'andamento dell'Area in funzione della temperatura dello scanner	300
Figura F. 6 Verifica delle ipotesi dell'ANOVA: a) normalità dei residui, b) omogeneità della varianza, d) indipendenza dei residui.....	301
Figura F. 7 Dati tecnici dello scanner utilizzato	304
Figura G. 1 Esempio di particelle multiple nella striscia individuata [Mon06]	305
Figura H. 1 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in ingresso..	319

Figura H. 2 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in ingresso
senza interazioni tra fattori.....319

Figura H. 3 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in uscita320

Figura H. 4 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in uscita senza
interazioni tra i fattori.....320

Figura H. 5 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. larghezza media in
uscita321

Figura H. 6 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. larghezza media in
uscita, senza interazioni tra i fattori321

Figura H. 7 Verifica ipotesi validità ANOVA, Conicità media.....322

Figura H. 8 Verifica ipotesi validità ANOVA, Conicità media, senza interazione
tra i fattori.....322

Figura H. 9 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. conicità323

Figura H. 10 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. conicità, senza
interazioni tra i fattori.....323

Indice delle tabelle

Tabella 2. 1 coefficienti sperimentali, massimo spessore tagliabile	22
Tabella 2. 2 Coefficienti sperimentali per rugosità	23
Tabella 2. 3 condizioni sperimentali, Titanio.....	23
Tabella 2. 4 Condizioni sperimentali, Acciaio inossidabile.....	23
Tabella 2. 5 Condizioni sperimentali, Alluminio.....	23
Tabella 2. 6 Coefficienti sperimentali, conicità	24
Tabella 3. 1 Processi di produzione per metalli cellulari e schiume metalliche [Ban01].....	60
Tabella 3. 2 Tecniche di saldatura per pannelli sandwich in schiuma metallica	90
Tabella 4. 1 Parametri costanti nella sperimentazione.....	97
Tabella 4. 2 Combinazione 1: Ugelli primari e focalizzatori utilizzati nella sperimentazione.....	98
Tabella 4. 3 Combinazione 1: Ugelli primari e focalizzatori utilizzati nella sperimentazione.....	98
Tabella 4. 4 Valore della portata di abrasivo per ciascun foro.....	103
Tabella 4. 5 Condizioni sperimentali per le prove di intasamento.....	104
Tabella 4. 6 Prove di intasamento a testa di taglio ferma	104
Tabella 4. 7 Condizioni sperimentali per prove di intasamento a testa di taglio in movimento.....	105
Tabella 4. 8 Prove di intasamento a testa di taglio in movimento	105
Tabella 4. 9 Valore dei fattori, prove preliminari in pannelli da 10 mm	108
Tabella 4. 10 Ripartizione dei livelli di velocità nei provini.....	109
Tabella 4. 11 Esito provino 1	109
Tabella 4. 12 Esito provino 2	110
Tabella 4. 13 Esito provino 3	111
Tabella 4. 14 Valore dei fattori, velocità al limite di taglio in pannelli da 10 mm	113
Tabella 4. 15 Esiti taglio senza abrasivo, pannelli 10 mm, 25<velocità <200 mm/min	113
Tabella 4. 16 Esiti taglio senza abrasivo, pannelli 10 mm, velocità 5, 10, 20 mm/min	114
Tabella 4. 17 Valore dei fattori, prove preliminari in pannelli da 30 mm	117
Tabella 4. 18 Esiti della sperimentazione,	118
Tabella 4. 19 Valori dei livelli nel piano fattoriale preliminare.....	120
Tabella 4. 20 Esiti della sperimentazione, pannelli 30 mm, piano fattoriale a 2 livelli	121
Tabella 4. 21 Valori dei livelli nel piano fattoriale	124
Tabella 4. 22 Esiti dei tagli ottenuti a 500 mm/min, Pressione 250 MPa.....	126

Tabella 4. 23 Esiti dei tagli ottenuti a 500 mm/min, Pressione 350 MPa.....	126
Tabella 4. 24 Esiti dei tagli ottenuti a 700 mm/min, Pressione 250 MPa.....	128
Tabella 4. 25 Esiti dei tagli ottenuti a 700 mm/min, Pressione 350 MPa.....	128
Tabella 4. 26 Esiti dei tagli ottenuti a 1000 mm/min, Pressione 250 MPa	130
Tabella 4. 27 Esiti dei tagli ottenuti a 1000 mm/min, Pressione 350 MPa	130
Tabella 4. 28 Valori dei livelli nel piano fattoriale per l'analisi della qualità..	133
Tabella 5. 1 Variazione del 20% sul diametro iniziale, focalizzatore da 0,76-1mm	146
Tabella 5. 2 Prezzi di listino diffusi commercialmente per ugelli focalizzatore e primario.....	148
Tabella 5. 3 Costo orario dell'ugello primario	148
Tabella 5. 4 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min.....	148
Tabella 5. 5 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min	149
Tabella 5. 6 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa	150
Tabella 5. 7 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa.....	150
Tabella 5. 8 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 10 mm.....	152
Tabella 5. 9 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli	153
Tabella 5. 10 Costi unitari inseriti nel modello di costo.....	154
Tabella 5. 11 Parametri ottimali per pannelli di spessore 30 mm,	158
Tabella 5. 12 Parametri ottimali per pannelli di spessore 30 mm,	159
Tabella 5. 13 Costi minimi, 100<velocità<1000 mm/min, pannelli 30 mm	160
Tabella 5. 14 Costi minimi, 250<Pressione<350 MPa, pannelli 30 mm.....	160
Tabella 5. 15 Costi minimi di usura, 100<velocità<1000 mm/min,.....	160
Tabella 5. 16 Costi minimi di usura, 250<Pressione<350 MPa,	161
Tabella 5. 17 Costo minimo totale, pannelli 30 mm	162
Tabella 5. 18 Parametri ottimali per pannelli di spessore 10 mm	166
Tabella 5. 19 Costo minimo per il consumo di abrasivo, pannelli 10 mm.....	167
Tabella 5. 20 Costo minimo per il consumo di acqua, pannelli 10 mm	167
Tabella 5. 21 Costo minimo per il consumo di energia, pannelli 10 mm.....	167
Tabella 5. 22 Costi minimi di usura, pannelli 10 mm	168
Tabella 5. 23 Vita utile degli ugelli per costo minimo e costo minimo per massima vita utile del focalizzatore, pannelli 10 mm.....	169
Tabella 5. 24 Confronto costi totali, pannelli 10 mm	169
Tabella 5. 25 Costi totali, parametri ottimizzati, pannelli 10 mm	170
Tabella 5. 26 Confronto dei costi di taglio con e senza l'utilizzo di abrasivo, pannelli 10 mm	172

Tabella 5. 27 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di abrasivo	174
Tabella 5. 28 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di acqua	175
Tabella 5. 29 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di energia elettrica	175
Tabella 5. 30 Variazione percentuale del costo di usura.....	176
Tabella 5. 31 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di abrasivo, modello di usura.....	176
Tabella 5. 32 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di acqua, modello di usura.....	177
Tabella 5. 33 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di energia elettrica, modello di usura	177
Tabella 5. 34 Variazione percentuale del costo di usura, modello di usura.....	178
Tabella 6. 1 Dimensioni medie provino 1	188
Tabella 6. 2 Dimensioni medie provino 2	188
Tabella 6. 3 Dimensioni medie provino 3	189
Tabella 6. 4 Dimensioni medie provino 4	189
Tabella 6. 5 Risultato delle pesature dei quattro provini	189
Tabella 6. 6 Densità media dei provini per l'analisi della qualità del taglio.....	190
Tabella 6. 7 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione del livello di soglia per fronte e retro del provino	192
Tabella 6. 8 Esempio di parte di tabella restituita dalla funzione "Analyze Particles" all'interno di un'opportuna macro	194
Tabella 6. 9 Significatività dei fattori	217
Tabella 6. 10 Significatività dei fattori	217
Tabella 6. 11 Fonti di errore per la stima dell'incertezza di misura sulla larghezza media in ingresso	219
Tabella 6. 12 Fonti di errore per la stima dell'incertezza di misura sulla larghezza media in uscita	219
Tabella 6. 13 Valori ottimali da attribuire ai parametri di processo e lavorazione, analisi della qualità del taglio.....	221
Tabella 6. 14 Costo totale per minima deviazione standard larghezza in uscita, vita media dell'ugello.....	221
Tabella 6. 15 Valori ottimali, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm	222
Tabella 6. 16 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm	222
Tabella 6. 17 Valori ottimali, $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm	222
Tabella 6. 18 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm	223
Tabella 6. 19 Costo totale per minima deviazione standard conicità, vita media dell'ugello	223
Tabella 6. 20 Valori ottimali, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm	223
Tabella 6. 21 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm	223
Tabella 6. 22 Valori ottimali, $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm	224

Tabella 6. 23 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm	224
Tabella 7. 1 Costi di taglio per vita media dell'ugello, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi	228
Tabella 7. 2 Costi di taglio, applicazione modello di usura, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi	228
Tabella A. 1 Dimensioni dei fori a seconda del numero che li identifica	231
Tabella A. 2 Risultati della taratura a getto spento.....	234
Tabella A. 3 ripetizione della misura per i fori 4 e 5	234
Tabella A. 4 Fattori variabili e costanti per le prove di taratura.....	237
Tabella A. 5 Casualizzazione delle prove sperimentali, 350 MPa	238
Tabella A. 6 Risultati della sperimentazione a 350 MPa.....	238
Tabella A. 7 Valore di portata di abrasivo (g/min) a seconda del numero del foro	243
Tabella A. 8 Casualizzazione delle condizioni sperimentali a 250 MPa.....	244
Tabella A. 9 Incertezza di misura sul valore di portata per ciascun livello del fattore numero foro, pressione 250 MPa e $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm	244
Tabella A. 10 Incertezza di misura sul valore di portata di abrasivo per ciascuna condizione sperimentale a 350 MPa.....	245
Tabella A. 11 Incertezza di misura per ciascun livello del fattore Numero Foro, Pressione 350 MPa	246
Tabella A. 12 Incertezza di misura calcolate per ciascun livello del fattore Pressione e Numero del foro.....	246
Tabella A. 13 Combinazione 1 per l'accoppiamento tra ugello primario e ugello focalizzatore.....	251
Tabella A. 14 Combinazione 2 per l'accoppiamento tra ugello primario e ugello focalizzatore.....	251
Tabella A. 15 Calcolo della portata (g/min) sperimentazione a pressione di 350 MPa.....	252
Tabella A. 16 Valore dei fattori e della risposta per l'analisi dell'influenza dei fattori $Dug+Dfoc$ e numero del foro	253
Tabella A. 17 Calcolo della portata (g/min) sperimentazione a pressione di 350 MPa.....	256
Tabella A. 18 Valore dei fattori e della risposta per l'analisi dell'influenza dei fattori $Dug+Dfoc$ e numero del foro	257
Tabella C. 1 Valori dei livelli nel piano fattoriale	265
Tabella C. 2 Piano fattoriale a quattro livelli per velocità di avanzamento e portata di abrasivo per pannelli a 30 mm.....	266
Tabella C. 3 Piano fattoriale per l'analisi della qualità del taglio	270
Tabella C. 4 piano fattoriale a due livelli per l'analisi della qualità del taglio	271

Tabella D. 1 Composizione chimica dell'abrasivo GMA Garnet	275
Tabella D. 2 Composizione mineraria dell'abrasivo GMA Garnet	275
Tabella D. 3 Caratteristiche fisiche dell'abrasivo GMA Garnet.....	276
Tabella D. 4 Altre caratteristiche dell'abrasivo GMA Garnet	276
Tabella E. 1 Esempio dei primi tre risultati restituiti dalla funzione “Analyze Particles”, “fronte” del provino.....	279
Tabella E. 2 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione del livello di soglia per fronte e retro del provino	280
Tabella E. 3 Misure locali dei solchi tramite calibro, lato “fronte”	281
Tabella E. 4 Misure locali dei solchi tramite calibro, lato “retro”	282
Tabella E. 5 Livello di soglia: Default - 134.....	283
Tabella E. 6 Livello di soglia: Default - 140.....	284
Tabella E. 7 Livello di soglia: Default - 145.....	285
Tabella E. 8 Livello di soglia: Default - 130.....	286
Tabella E. 9 Livello di soglia: Default - 125.....	287
Tabella E. 10 Livello di soglia: Default - 150.....	288
Tabella E. 11 Livello di soglia: Default - 155.....	289
Tabella E. 12 Livello di soglia: Default - 131	290
Tabella E. 13 Livello di soglia: Default – 140	291
Tabella E. 14 Livello di soglia: Default – 145	292
Tabella E. 15 Livello di soglia: Default - 120.....	293
Tabella E. 16 Livello di soglia: Default - 110.....	294
Tabella E. 17 Livello di soglia: Default - 150.....	295
Tabella E. 18 Livello di soglia: Default - 155.....	296
Tabella F. 1 Area misurata a diverse temperature dello scanner	302
Tabella F. 2 Risultati del piano fattoriale per la valutazione dell'effetto della scansione sull'area misurata.....	302
Tabella H. 1 Risultati ottenuti per l'analisi della qualità del solco di taglio.....	315

Sommario

Negli ultimi anni si è affermata una nuova classe di materiali a grande potenzialità applicativa. Le schiume metalliche di alluminio si prestano a molteplici applicazioni in diversi settori industriali per le caratteristiche di leggerezza, buona capacità di assorbimento degli urti, proprietà acustiche e smorzamento delle vibrazioni. La tecnologia AWJ può essere utilizzata per il taglio di lamiere in schiuma metallica. L'ottimizzazione del processo di taglio di pannelli in schiuma metallica di alluminio AlSi10 di spessori 10 e 30 mm, viene condotta in base alle possibili applicazioni cui il pannello è indirizzato: il taglio dovrà garantire la semplice separazione meccanica dei due lembi di lamiera o una particolare finitura macrogeometrica del solco di taglio, con particolare interesse alla conicità del solco. La selezione dei valori ottimi da attribuire ai parametri è effettuata sulla base dei risultati sperimentali: nel primo caso per minimizzare il costo di taglio e massimizzare la produttività, e nel secondo caso per garantire la qualità del solco di taglio. I costi minimi si ottengono minimizzando il valore di portata di abrasivo che consenta di ottenere un taglio passante alla velocità di avanzamento massima possibile per lo spessore tagliato. Nel taglio di schiume metalliche con tecnologia AWJ il "parametro conicità media", utilizzato per la caratterizzazione della qualità macrogeometrica, deve essere affiancato dal "parametro deviazione standard della conicità" per descrivere la variabilità della larghezza del solco in uscita, poiché la morfologia intrinseca del materiale incide notevolmente sul risultato del taglio.

Parole chiave: ottimizzazione, schiume metalliche di alluminio AlSi10, taglio con tecnologia WJ/AWJ, qualità del taglio, conicità del solco

Abstract

In the past few years has emerged a new class of materials with great potential applications. Aluminum metal foams are suitable for many applications in various industries for its lightness, good ability to absorb shock, vibration damping and acoustic properties. AWJ technology can be used for cutting sheet metal foam. The optimization of the process of cutting metal aluminum foam AlSi10 panels of 10 mm and 30 mm, is conducted according to the possible applications which the panel is addressed: the cutting will ensure the simple mechanical separation of the two strips of metal or particular finish of the cutting groove, with particular interest in the taper of the kerf. The selection of optimal values to be attributed to the parameters is made on the basis of

experimental results: in the first case to minimize the cost cutting and maximizing productivity, and in the second case to ensure the quality of the groove cutting. The minimum cost is obtained by minimizing the value of flow of abrasive which promises to cut through the thickness of the panel at the maximum possible speed. When cutting metal foam with AWJ technology the “average taper parameter” is used to characterize the quality of the kerf and it must be accompanied by “the standard deviation of taper parameter” to describe the variability of the width of the output kerf, since the intrinsic morphology of the material has a significant effect on the result of the cut.

Key words: Optimization process, aluminium metal foams AlSi10, WJ/AWJ cutting technology, quality of the kerf, taper.

Introduzione

Nell'ambito delle lavorazioni meccaniche la tecnologia water jet è tutt'ora soggetta a studi e indagini a livello internazionale aventi lo scopo di apportare sviluppi e miglioramenti, sia per la comprensione della fisicità del fenomeno sia per l'incremento delle prestazioni del taglio.

L'applicabilità della tecnologia WJ/AWJ ricopre un'ampissima varietà di materiali e, per i numerosi vantaggi che essa offre, può interessare materiali innovativi tra cui i pannelli in schiuma metallica. Dato il recente sviluppo di questi materiali, non è possibile rintracciare informazioni e documentazione da studi precedenti, ma la tecnologia AWJ è citata a fianco di altre tecniche non convenzionali (Laser) come potenziale tecnologia di taglio per tali materiali. Il presente studio ha quindi lo scopo di mettere al servizio di una nuova classe di materiali, l'importante e ampio bagaglio di esperienze e studi che la tecnologia AWJ ha accumulato negli ultimi anni.

Le schiume metalliche hanno proprietà meccaniche nettamente superiori rispetto alle schiume polimeriche, infatti sono più rigide di almeno un ordine di grandezza, sono stabili ad elevate temperature, possiedono una grande resistenza al fuoco e non producono fumi tossici se a contatto con fiamme. In ultimo, ma non per importanza, sono dei materiali a basso impatto ambientale e completamente riciclabili. Grazie ai pori le schiume metalliche racchiudono un set di proprietà, tra cui la capacità di assorbimento di energia meccanica, smorzamento delle vibrazioni proprietà acustiche che, combinate con l'elevata leggerezza fanno delle schiume metalliche un materiale innovativo, capace di affermarsi in numerosi campi applicativi.

Per aumentare la competitività del prodotto, non solo è necessario ottimizzare i costi di produzione delle schiume, ma anche il processo di lavorazione dei pannelli. L'interesse industriale per l'analisi dei costi di lavorazione è la base del presente studio. L'obiettivo consiste infatti nella selezione dei parametri ottimali nel processo di taglio di pannelli in schiuma metallica. Per la selezione dei parametri, i modelli di costo sono combinati con i risultati di prove sperimentali condotte per lamiere di sola schiuma metallica AlSi10, di diversa spessore tra quelle maggiormente diffuse in commercio, che sono di 10-30 mm.

A seconda delle applicazioni a cui il pannello in schiuma è indirizzato, i requisiti del pannello stesso saranno differenti. Se non sono richieste particolari finiture macrogeometriche del solco di taglio, l'unica richiesta che il processo deve soddisfare consiste nell'ottenere un taglio passante, garantendo cioè la separazione meccanica della lamiera. In questo primo caso l'interesse industriale è rivolto principalmente alla minimizzazione del costo e alla massimizzazione della produttività: i parametri saranno selezionati in modo che sia garantita questa condizione.

In un secondo caso, è necessario valutare la qualità del taglio se le applicazioni dovessero richiederlo. Lo studio della qualità del taglio di schiume metalliche si riduce alla sola considerazione delle larghezze del solco in ingresso e in uscita e della conicità del solco.

Lo studio della qualità microgeometrica (rugosità) risulta difficoltoso se non impossibile: il solco di uscita si mostra frastagliato e la misurazione della rugosità a diverse profondità di taglio è impossibile da determinare, a causa della morfologia della schiuma. Questa fase della sperimentazione sarà indirizzata a valutare la significatività della “conicità” nella descrizione della qualità del taglio e all’individuazione di ulteriori parametri adatti allo scopo.

Il valore da assegnare ai parametri di taglio sarà in questo caso selezionato per ottenere un miglioramento della qualità del taglio sulla base dei dati sperimentali ottenuti e i costi di lavorazione saranno, quindi, calcolati sulla base di tali parametri.

Il lavoro si articola in sette capitoli. I primi tre sono di carattere descrittivo: sono presentati la tecnologia WJ/AWJ (caratteristiche dell’impianto utilizzato per la sperimentazione, vantaggi e svantaggi nell’utilizzo di questa tecnologia, elementi dell’impianto etc.), l’approccio alla risoluzione di un problema generale di ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ (parametri di interesse, modelli di costo, modelli di usura per la stima della vita utile dell’ugello focalizzatore) e le caratteristiche e le possibili applicazioni delle schiume metalliche in ambito industriale (principali tecniche di produzione, proprietà dei pannelli in schiuma, lavorabilità delle schiume metalliche, approccio al taglio delle stesse con tecnologia AWJ). Il quarto capitolo presenta nel dettaglio le finalità e le caratteristiche della sperimentazione (analisi dello spessore tagliabile a seconda del valore associato ai parametri di processo e lavorazione, analisi della qualità macrogeometrica del solco di taglio); nel quinto capitolo il modello di costo utilizzato è combinato con i risultati sperimentali per l’ottenimento di un taglio passante senza vincoli sulla macrogeometria del solco, cui si aggiungono la selezione dei valori ottimi per la minimizzazione del costo di taglio e la stima del costo minimo. Nel sesto capitolo sono illustrati i risultati della sperimentazione condotta per l’analisi della qualità macrogeometrica del solco e la relativa selezione dei parametri ottimali e calcolo dei costi. Chiudono il lavoro le conclusioni e gli spunti per possibili approfondimenti futuri.

Capitolo 1: Introduzione alla tecnologia AWJ

In questo capitolo viene presentata la tecnologia WJ/AWJ che viene applicata, nel presente lavoro, per il taglio di lamiere di schiuma metallica. Nel capitolo vengono illustrati sia il processo di taglio alla base della tecnologia in esame, sia le caratteristiche di un impianto WJ/AWJ con particolare attenzione alle caratteristiche dell'impianto in uso presso il laboratorio MUSP di Piacenza, sede del lavoro di tesi.

1.1 Caratteristiche della Tecnologia Water jet

La tecnologia water jet utilizza come vettore di energia, necessaria alle lavorazioni, il getto d'acqua e rientra nella categoria delle lavorazioni non convenzionali. Gli elementi di base (acqua e abrasivo) hanno una notevole disponibilità in natura e garantiscono assenza di impatto ambientale.

Per i molteplici campi di applicazione e per la molteplicità di materiali che possono essere tagliati, la tecnologia water jet è diventata comune in questi ultimi anni. Esistono applicazioni industriali che prevedono l'utilizzo della tecnologia di taglio con getto di acqua pura: industria tessile, industria alimentare, operazioni di lavaggio, pulizia di scavo e rimozione.

In campo industriale al fianco della tecnologia WJ trova grande applicazione, grazie alla maggiore potenzialità di taglio, la tecnologia AWJ, che prevede la miscelazione di acqua e abrasivo garantendo, in questo modo, una maggiore asportazione di materiale.

Questa tecnologia, in origine utilizzata soprattutto per le estrazioni minerarie ed in ambito di taglio di materiali quali il marmo, si è espansa fino a diventare competitiva per il taglio di materiali metallici, plastici, vetrosi, ceramici e lapidei.

La competitività della tecnologia WJ/AWJ è dovuta principalmente dalla possibilità di eseguire il taglio "a freddo": l'acqua non solo funge da vettore per l'energia del taglio, ma anche da liquido refrigerante che impedisce sia le alterazioni strutturali nei materiali metallici, sia il degrado nei materiali plastici (nella zona di taglio, infatti, si raggiungono al massimo gli 80°C); il taglio non lascia sfridi e bave evidenti e il "tagliente" e il pezzo non vengono a contatto; sebbene gli sforzi agenti sul pezzo siano elevati, sono esigue le forze di taglio sul pezzo in lavorazione e ciò rende lo staffaggio meno importante; si può iniziare la lavorazione in qualsiasi punto del pezzo e la formazione di bave durante la lavorazione è ridotta.

Il sistema AWJ, inoltre, è dotato di un sistema a controllo numerico che garantisce una gestione automatica delle funzioni operative con alta qualità e precisione; è possibile, poi, un interfacciamento con un sistema CAD-CAM che

permette la massima libertà di espressione; si possono, infine, eseguire disegni tecnici con tolleranza ristretta e disegni artistici di qualsiasi complessità.

È da ricordare, però, che nonostante i numerosi aspetti positivi sopraelencati, il processo di taglio risulta rumoroso, l'utilizzo di abrasivo porta a problemi ambientali di smaltimento e, oltre a costi elevati d'investimento, l'impianto necessita di manutenzione assidua.

1.2 Processo di taglio

Il processo su cui si basa la tecnologia AWJ (Abrasive Water Jet) consiste nella conversione dell'energia di pressione contenuta nel fluido acqua, opportunamente intensificato, in energia cinetica che consente di effettuare l'operazione di taglio vera e propria. Nel processo di taglio l'acqua viene prelevata dalla rete idrica e depurata nell'impianto di trattamento, convogliata al sistema di pompaggio e portata a livelli di pressione desiderati.

L'operazione di intensificazione viene effettuata sfruttando cilindri oleoidraulici che possono essere a singolo effetto o a doppio effetto. I livelli di pressione che possono essere raggiunti sono prossimi a 400 MPa e possono raggiungere anche i 620 MPa.

L'acqua viene inviata alla testa di taglio dove avviene il passaggio da energia di pressione a energia cinetica attraverso l'utilizzo di un ugello primario.

Nel caso si utilizzi dell'abrasivo, soluzione industrialmente preferita ma non indispensabile, questo viene miscelato in una camera di miscelazione a valle dell'ugello primario: in questa camera avviene lo scambio di quantità di moto tra le particelle solide e fluide facendo acquisire alle particelle stesse l'energia necessaria per poter effettuare il taglio.

È molto importante che il getto presenti una corretta coerenza per effettuare tagli efficaci: un getto non coerente porta a una diminuzione della capacità di taglio in quanto l'energia viene distribuita su un'area maggiore e, quindi, con un'energia specifica minore. Per ovviare a questo inconveniente si utilizza un ugello focalizzatore. Grazie alle caratteristiche geometriche e alle dimensioni ridotte dell'ugello stesso, è possibile focalizzare la potenza del getto su una sezione ridotta. Il fluido risultante all'uscita dell'ugello sarà quindi caratterizzato da una buona coerenza ed una elevatissima energia cinetica. Dopo l'asportazione di materiale, l'energia residua del getto viene dispersa nella vasca di raccolta.

1.3 Elementi dell'impianto

L'impianto, di cui si riporta in figura 1.1 un'immagine esemplificativa, è costituito da elementi fondamentali, elencati in seguito:

- Impianto di trattamento e depurazione dell'acqua
- Intensificatore
- Sistema di adduzione dell'abrasivo
- Testa di taglio
- Sistema di movimentazione e vasca di raccolta

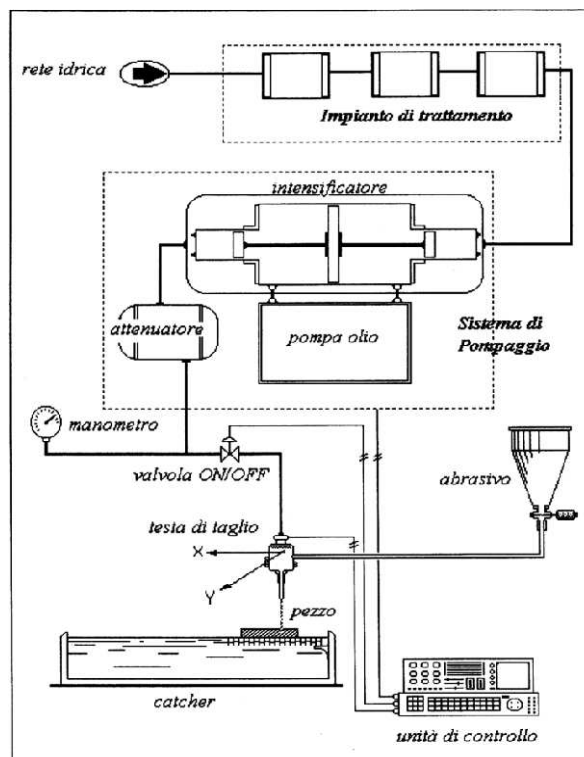


Figura 1. 1 Elementi principali dell'impianto [Ann99]

Si riporta in seguito la descrizione di ciascun componente della macchina di fabbricazione Tecnocut, a disposizione presso il laboratorio MUSP di Piacenza, sede del presente lavoro di tesi.

1.3.1 Intensificatore



Figura 1. 2 Intensificatore di pressione in uso presso il laboratorio MUSP

L'intensificatore a disposizione è il modello 120 Hp della Tecnocut e presenta due bancate ciascuna da tre cilindri oleoidraulici, un sistema di pompaggio dell'olio, un sistema di raffreddamento dell'olio stesso e una tubazione per acqua ad altissima pressione.

Il processo di taglio richiede il raggiungimento di pressioni elevate. L'intensificatore è il componente in cui avviene l'innalzamento della pressione dell'acqua fino alle pressioni di esercizio richieste, che nell'impianto considerato possono raggiungere i 400 MPa.

Tale operazione è gestita sfruttando cilindri a singolo effetto che, opportunamente fasati, consentono di ottenere la pressione desiderata nel getto d'acqua. Il principio di funzionamento generale si basa sull'equilibrio delle forze agenti su pistoni di diametro diverso.

L'intensificatore di pressione rappresenta quindi il cuore della tecnologia water jet in quanto esso si occupa dell'innalzamento della pressione dell'acqua ai livelli di utilizzo.

Esistono due categorie di intensificatori presenti attualmente sul mercato più un'ulteriore categoria in fase sperimentale:

- *Intensificatori oleodinamici*
- *Intensificatori a pompa diretta*
- *Intensificatore a Pompa elettrica*

Intensificatori oleodinamici

Gli *intensificatori oleodinamici* sfruttano come fluido vettore l'olio.

Uno stantuffo (a singolo effetto o doppio effetto) viene spinto dentro una camera chiusa mettendo in pressione ed espellendo il fluido acqua attraverso una valvola di scarico; quando la direzione dello stantuffo è inversa, il fluido a bassa pressione entra nella camera attraverso una valvola d'aspirazione.



Figura 1.3 Schema di pistone a singolo effetto

Per accrescere la pressione dell'acqua si sfrutta il rapporto di intensificazione tra le aree del pistone su cui agiscono i due fluidi, acqua e olio.

$$P_{acqua} \cdot S_{acqua} = P_{olio} \cdot S_{olio} \quad (1.1)$$

Da cui:

$$P_{acqua} = P_{olio} \cdot \frac{S_{olio}}{S_{acqua}} \quad (1.2)$$

Nella maggioranza delle macchine tale rapporto è pari a 20: ciò significa che la pressione dell'acqua nel circuito di alta pressione sarà 20 volte superiore alla pressione dell'olio nel circuito di bassa pressione; per calcolare quindi il valore della pressione raggiunto, è necessario moltiplicare il valore letto sul manometro per 20 o per un valore differente del rapporto d'intensificazione della macchina utilizzata.

Gli intensificatori di pressione possono essere a singolo o doppio effetto.

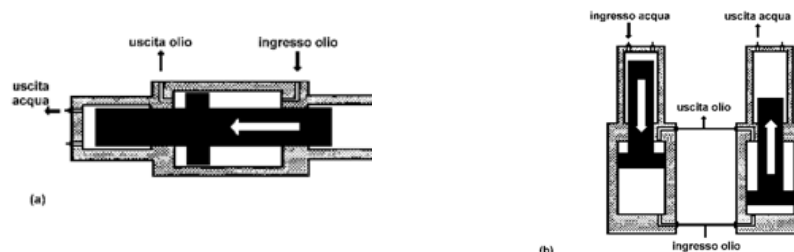


Figura 1.4 Intensificatore a doppio effetto (a) e a singolo effetto (b) [Ann99]

La differenza risiede nel fatto che i pistoni a singolo effetto sono in grado di fornire portata all'ugello solo nella corsa di mandata, mentre la corsa di ritorno è utilizzata per riempire nuovamente il cilindro dell'acqua; nei pistoni a doppio effetto, invece, è possibile incrementare la pressione dell'acqua in entrambi i sensi di marcia. L'aspetto positivo nell'utilizzo di cilindri a singolo effetto risiede nell'eliminazione dell'accumulatore idraulico, presente invece nel caso di cilindri a doppio effetto per contenere le fluttuazioni di pressione che si originano al momento dell'inversione di moto nel pistone.

L'intensificatore presente nella macchina a disposizione presenta cilindri a singolo effetto in due bancate di tre cilindri.



Figura 1. 5 Cilindri oleoidraulici che costituiscono l'intensificatore utilizzato

Il funzionamento di un pistone a singolo effetto si compone di tre fasi [Ann03]:

- Compressione dell'acqua: si innalza la pressione dell'acqua; le valvole di mandata e aspirazione dell'acqua e di scarico dell'olio sono chiuse; è aperta la valvola di ingresso dell'olio che determina l'avanzamento del pistone.
- Mandata dell'acqua in pressione: al raggiungimento del valore di taratura della valvola di mandata, essa si apre e l'acqua ad alta pressione fluisce verso l'ugello primario.
- Ritorno del pistone: completato l'avanzamento, il pistone torna nella sua posizione iniziale, aspirando acqua nella camera di compressione; le valvole di mandata dell'acqua e di ingresso dell'olio si chiudono, mentre si aprono quelle di aspirazione dell'acqua e di scarico dell'olio.

La sequenza descritta si ripete per ogni pistone, ma in modo sfasato tra un pistone e l'altro: al termine della mandata di un pistone, un altro è pronto a

iniziare la propria. La fasatura dei cilindri è gestita elettronicamente attraverso un PLC che equipaggia la pompa. Data la necessità di fasatura, la realizzazione di un sistema con cilindri a singolo effetto è più complicato. Analizzando invece il funzionamento di un cilindro a doppio effetto, esso può essere così schematizzato:

- Compressione dell'acqua in una camera, aspirazione dell'acqua nella camera opposta: l'olio in ingresso comprime l'acqua aumentandone la pressione fino al valore di apertura della valvola di mandata; contemporaneamente nella camera dell'acqua opposta si crea una depressione che aspira fluido da comprimere nella corsa successiva; l'olio accumulato nella corsa precedente viene scaricato.
- Mandata dell'acqua in pressione: all'apertura della valvola di mandata l'acqua in pressione fluisce verso la testa di taglio.

Alla fine della corsa il pistone aziona uno spillo che comanda idraulicamente una valvola pilota che inverte i flussi dell'olio nel pistone dando inizio a una corsa di ritorno.

Intensificatori a Pompa diretta

Gli intensificatori a *pompa diretta* sfruttano la stessa tipologia di cilindri e lo stesso principio di intensificazione degli intensificatori oleodinamici. La differenza fra le due tecnologie è il mezzo con il quale lo stantuffo si muove: la pompa diretta utilizza un albero a gomito simile a quello del motore delle autovetture (da qui il nome inglese Crank Drive Pumps).

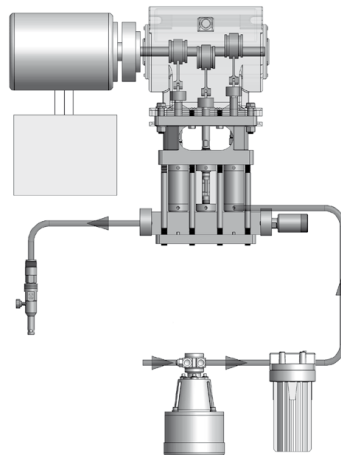


Figura 1. 6 Schema funzionamento pompa diretta Omax

Intensificatori Elettrici

Gli intensificatori elettrici sono un nuovo progetto di moltiplicatori di pressione, non ancora sul mercato. Questa nuova tipologia di intensificatori sfrutta un azionamento elettrico composto da un motore brushless e una vite a ricircolo di sfere in grado di movimentare un pistone a doppio effetto e ottenere i livelli di pressione dell'acqua richiesti.

Una soluzione costruttiva di questo tipo permette di aumentare la produttività, prevede un monitoraggio continuo sulla macchina e riduce i costi di esercizio.

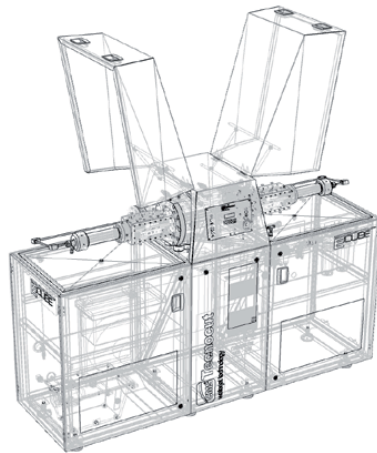


Figura 1. 7 Spaccato di pompa elettrica Tecnocut

1.3.2 Sistema di adduzione dell'abrasivo

Il sistema di adduzione dell'abrasivo è l'elemento che consente l'invio di abrasivo verso la testa di taglio per rendere più performante il taglio stesso. La macchina AWJ in dotazione prevede un sistema formato da un serbatoio esterno in pressione (circa 4-5 bar) di capacità 25 Kg circa e una tramoggia a bordo della testa di taglio di capacità 0,5 Kg circa. L'abrasivo viene inviato verso la tramoggia attraverso un sistema di tubazioni flessibili in gomma. La differenza di pressione tra la tramoggia e il serbatoio genera il flusso d'aria necessario per consentire l'invio di abrasivo dal serbatoio fino alla tramoggia. Il serbatoio serve solamente per reintegrare l'abrasivo nella tramoggia quando si verifica una diminuzione del suo livello. L'abrasivo è condotto dalla tramoggia alla camera di miscelazione tramite un tubicino flessibile in gomma della lunghezza di circa 20 cm. La luce di passaggio dalla tramoggia è regolata tramite un disco forato in cui i fori calibrati rappresentano uno specifico valore di portata di abrasivo. Per tale motivo viene effettuato un preciso processo di taratura, al fine di stimare l'effettivo valore di portata corrispondente a ciascun foro (cfr. Capitolo 4).



Figura 1. 8 Serbatoio per il contenimento dell'abrasivo

L'abrasivo viene inviato dalla tramoggia alla camera di miscelazione sfruttando contemporaneamente due fenomeni fisici : caduta per gravità ed effetto Venturi.



Figura 1. 9 Particolare della testa di taglio: tramoggia

La caduta per gravità è dovuta alla differenza di quota tra la tramoggia e la camera di miscelazione (posta più in basso). Il percorso praticamente verticale dell'abrasivo dalla tramoggia alla camera stessa rende l'azione dell'effetto Venturi ancora più efficace e si rende possibile una maggiore capacità di smaltimento. L'effetto Venturi consiste nel risucchio di abrasivo grazie alla depressione che si genera nella camera grazie al getto d'acqua particolarmente veloce.

Un altro sistema, utilizzato in condizioni critiche in cui si rischia l'intasamento del tubo e tralasciato nel caso considerato, consiste nel facilitare l'azione di risucchio di abrasivo iniettando aria compressa nel tubo di adduzione in modo da aumentare la forza di trascinamento, come ausilio all'effetto Venturi. [Has91]

Nel sistema di adduzione considerato è solo l'azione dell'effetto Venturi a aspirare aria.

L'aria risulta quindi essenziale per il trasporto di abrasivo e penetra nel getto fino a costituirne il 95% in volume. L'aria rallenta il processo di scambio di quantità di moto tra l'acqua e le particelle solide riducendone la velocità d'impatto sul pezzo; inoltre la turbolenza in camera di miscelazione ha effetti sulla coerenza del getto [Ann99].

1.3.3 Impianto di trattamento e depurazione dell'acqua

L'acqua per il funzionamento del sistema AWJ viene prelevata direttamente dalla rete idrica e necessita pertanto di un processo di depurazione e trattamento. L'acqua di rete contiene particelle sospese che provocherebbero un'accelerata usura delle parti meccaniche del sistema, in particolare sali di calcio e magnesio, che causano incrostazioni calcaree, e cloruri e solfati responsabili della corrosione delle parti metalliche. La configurazione tipica di un impianto di depurazione dell'acqua opera negli stadi di prefiltrazione e osmosi inversa [Ann99]. La prefiltrazione comprende uno stadio di addolcimento e deionizzazione a opera di resine cationiche che eliminano o limitano la presenza di ioni di calcio e magnesio, e uno stadio di filtraggio che consente di eliminare eventuali particelle e residui solidi. L'osmosi inversa permette di estrarre il fluido da una soluzione ricca di impurità. Per ottenere un flusso contrario a quello dell'osmosi naturale, dalla soluzione meno concentrata alla soluzione più concentrata, si applica una pressione superiore alla pressione osmotica. La soluzione diluita viene raccolta in un serbatoio, mentre il flusso più concentrato viene scaricato.

L'impianto in uso è formato da:

- Filtro anti-sabbia
- Addolcitore
- Dosatore polifosfati
- Serbatoio raccolta acqua
- Autoclave

Il filtro anti sabbia consente l'eliminazione delle particelle sospese nell'acqua attraverso un primo filtraggio. Nel percorso fra la fonte (pozzo, sorgente, etc.) e l'utenza, l'acqua si arricchisce di particelle estranee, quali ossidi di ferro, sabbia, terriccio, etc. Queste impurità creano seri inconvenienti depositandosi nelle tubazioni e provocano corrosioni puntiformi ed incrostazioni che diminuiscono il rendimento e limitano il corretto funzionamento della macchina.



Figura 1. 10 Addolcitore

L'addolcitore è dotato di alimentatore (produttore di cloro), ma non contiene bypass integrato. L'acqua entra nel decalcificatore e incontra uno strato di resine che trattengono il calcio e, con un opportuno trattamento, anche il ferro. Dopo un certo numero di litri le resine sono scaricate e devono essere rigenerate con acqua salata. L'intero processo avviene automaticamente come impostato da programmatore.



Figura 1. 11 Dosatore polifosfati

I dosatori sono impiegati per proteggere dalle incrostazioni calcaree e dalla corrosione gli impianti idraulici, dosando in modo proporzionale una miscela anticalcareo ed anticorrosiva, cedendo così all'acqua una parte della loro particolare composizione che forma sulle superfici metalliche una pellicola microscopica ed antivegetativa. L'acqua crea pertanto un limitato contatto con le superfici metalliche; si instaura inoltre un processo di sospensione colloidale che non permetterà la precipitazione dei sali di calcio e magnesio.



Figura 1. 12 Serbatoio raccolta acqua

Il serbatoio dell'acqua ha il compito di raccogliere l'acqua proveniente dal dolcificatore: è collegato a un pompa che immette l'acqua raccolta al suo interno, nell'autoclave. Nel serbatoio è presente un galleggiante che controlla il livello dell'acqua contenuta al suo interno. Quando il livello dell'acqua diminuisce fino a un valore stabilito, attraverso l'apertura di una valvola è possibile richiamare acqua dal dolcificatore, in modo da consentire la presenza costante di acqua nel serbatoio.



Figura 1. 13 Autoclave

L'acqua presente nel serbatoio di raccolta, proveniente dall'addolcitore, viene spinta nel polmone con una pressione maggiore di quella di rete per azione della pompa. Nell'autoclave è presente una camera d'aria che per effetto della pressione si comprime, agendo come una molla, in modo che, allo spegnimento della pompa, l'acqua venga mantenuta in pressione. La pompa previene inoltre lo svuotamento dell'autoclave e il galleggiante di raccolta dell'acqua si abbassa, mettendo in funzione la pompa quando è necessario il reintegro. Un pressostato

avvia la pompa quando la pressione è inferiore a un limite minimo e la spegne al raggiungimento del valore massimo prefissato. Da qui l'acqua viene inviata all'accumulatore.

1.3.4 Testa di taglio

La testa di taglio presenta l'ultima fase del ciclo dell'acqua. È infatti all'interno della testa di taglio che avviene la trasformazione dell'energia di pressione in energia cinetica. La testa di taglio si compone essenzialmente di tre parti: camera di miscelazione, ugello primario e ugello focalizzatore.

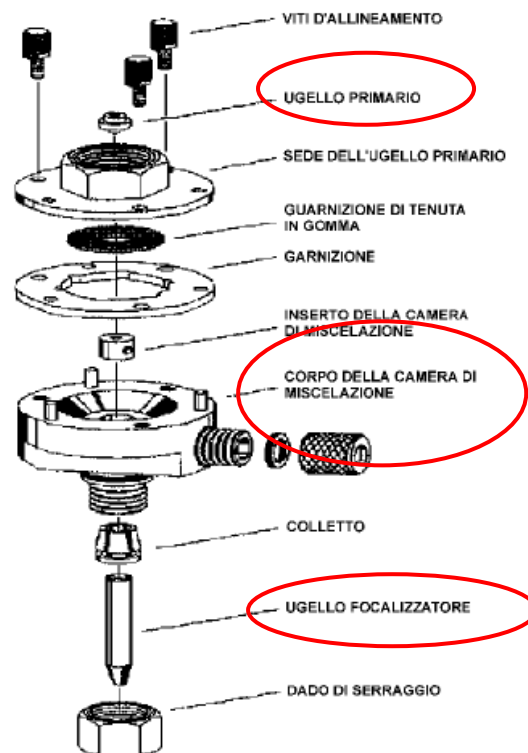


Figura 1. 14 Esploso della testa di taglio [Ann99]

1.3.4.1 Ugello primario

L'ugello primario è il componente all'interno del quale avviene il passaggio da energia di pressione a energia cinetica sfruttando il principio di conservazione dell'energia. Per garantire resistenza all'usura, alla corrosione, alle alte pressioni l'ugello primario è realizzato in zaffiro sintetico e presenta diametro interno che varia tra gli 0,05 e 0,4 mm; nel caso in esame sono disponibili ugelli con diametro interno pari a 0,25 e 0,3 mm.

Considerando l'acqua un fluido perfetto incomprimibile, esente da sforzi tangenziali, soggetto solo alla forza di massa derivante dal campo gravitazionale, la trasformazione energetica che avviene all'ingresso e all'uscita dell'ugello primario viene descritta dall'equazione di Bernoulli:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta h + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V^2}{g} = 0 \quad (1.3)$$

Dove: ΔP rappresenta la variazione di pressione tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello primario, Δh la variazione di quota tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello e ΔV^2 la variazione di velocità tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello. Inoltre γ rappresenta il peso specifico del fluido e g l'accelerazione di gravità. Considerando nulla la velocità d'ingresso all'ugello, trascurabile la variazione di quota e le pressioni relative alla pressione ambiente, l'espressione della velocità di uscita all'ugello diventa:

$$V_1 = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot P_0}{\rho}} \quad (1.4)$$

Dove: V_1 rappresenta la velocità dell'acqua nella sezione di uscita, P_0 la pressione dell'acqua sulla sezione di ingresso e ρ la densità dell'acqua a pressione atmosferica.

Alle pressioni di utilizzo in un sistema WJ/AWJ, l'acqua manifesta comprimibilità annullando pertanto l'ipotesi alla base del teorema di Bernoulli. Per correggere il valore della velocità dell'acqua in uscita all'ugello si deve considerare il valore effettivo della densità dell'acqua, valore legato alle pressioni di esercizio, per cui [Has89]:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{P}{L}\right)^C \quad (1.5)$$

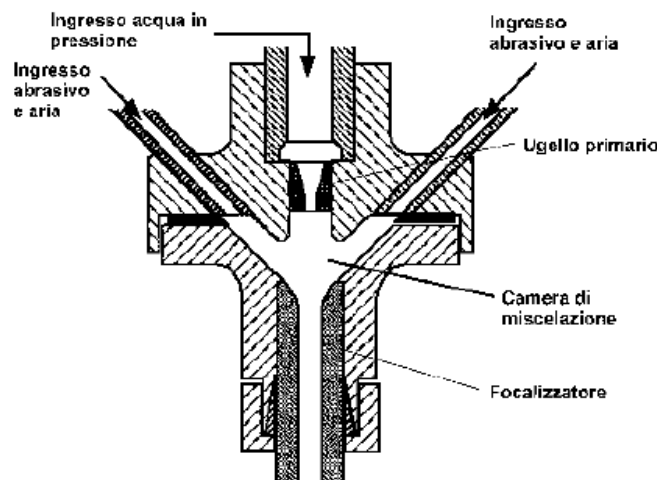
$$V = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot L}{\rho_0 \cdot (1 + C)} \cdot \left[\left(\frac{P}{L} + 1\right)^{1-C} - 1\right]} \quad (1.6)$$

Dove L e C sono due costanti del valore di 0,1368 e 300 MPa.

1.3.4.2 Camera di miscelazione

La camera di miscelazione, posizionata a valle dell'ugello primario, consente di ottenere la miscelazione dell'abrasivo; la geometria della camera deve essere in grado di facilitare l'ingresso dell'abrasivo e garantire una miscelazione omogenea tra le due fasi (acqua-abrasivo).

La miscelazione avviene sfruttando l'effetto Venturi per cui l'acqua in arrivo nella camera crea una depressione che impone all'abrasivo di entrare; la camera di miscelazione accoglie infatti i canali di adduzione dell'abrasivo.



1.7 Camera di miscelazione a due porte d'ingresso per l'abrasivo [Ann99]

1.3.4.3 Ugello focalizzatore

A valle della camera di miscelazione si incontra l'ugello focalizzatore, l'ultimo componente dell'impianto prima di giungere sul pezzo da lavorare. Questo componente della testa di taglio consente di migliorare la coerenza del getto sul pezzo da lavorare aumentando l'omogeneità delle due fasi (acqua-abrasivo) e, tramite un diametro adeguato, consente di ottenere maggiore energia specifica.

Per quanto riguarda le dimensioni dell'ugello sono disponibili lunghezze tra i 50 e i 100 mm e diametri tra gli 0,8 e 1,2 mm. Gli ugelli a disposizione presentano lunghezza pari a 76 mm e diametri di 0,76 e 1 mm.

L'ugello focalizzatore è caratterizzato da fenomeni di usura dovuta all'elevata energia posseduta dalle particelle abrasive che vengono a contatto con le sue pareti. Il processo di usura avviene in due modalità differenti: nella parte superiore, direttamente a contatto con la camera di miscelazione, le particelle colpiscono le pareti con angoli d'impatto elevati, quindi asportano per erosione; verso la parte terminale dell'ugello, dove la velocità delle fasi del getto è più

uniforme sulla sezione, le particelle strisciano sulle pareti (angoli d'impatto bassi) ed asportano per abrasione. Per far fronte a questi fenomeni il focalizzatore è costituito da carburo di tungsteno sinterizzato per avere caratteristiche di elevata densità e durezza. Considerando il fenomeno di usura, la vita utile dell'ugello è in media pari a 100 h. Diversi autori hanno fornito modelli per il calcolo effettivo della durata dell'ugello in funzione dei parametri di taglio in gioco. Nei capitoli successivi, per lo studio dell'ottimizzazione dei parametri che consentono il minimo costo di taglio a seconda dello spessore tagliabile vengono analizzati tali modelli di usura (cfr. Capitolo 2) per avere una stima migliore sulla vita dell'ugello stesso, in modo da calcolare il costo associato alla vita utile dell'ugello.

1.3.5 Il sistema di movimentazione e vasca di raccolta

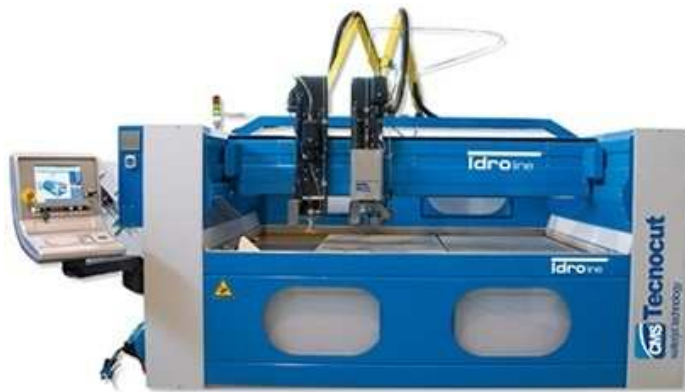


Figura 1. 15 Sistema di movimentazione assi con vasca di raccolta

Il sistema di movimentazione consente il movimento della testa di taglio lungo due direzioni X e Y in modo automatico grazie al controllo numerico, mentre lo spostamento lungo l'asse Z avviene in modo manuale tramite il movimento di una manovella. Nei moderni sistemi di movimentazione è possibile avere a disposizione anche più di tre assi realizzando teste tiltanti per lavorazioni più diversificate.

Il controllo numerico gestisce i parametri di lavorazione (avanzamento) e la movimentazione degli assi. La sua programmazione è realizzata in codice ISO o grazie all'unità video-grafica, ma è anche possibile integrare il tutto con un sistema CAD-CAM.

Si ricorda infine che è necessaria la presenza di una vasca di raccolta sopra cui viene posizionato il pezzo (fissato tramite pesi) che consente al getto d'acqua di esaurire l'energia posseduta dopo l'operazione di taglio.

Capitolo 2: Ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ

In questo capitolo viene illustrata la procedura per la selezione dei parametri ottimali nel processo di taglio con tecnologia AWJ. L'approccio generale per l'ottimizzazione del processo è affrontato indipendentemente dal materiale considerato. In seguito verrà esteso al caso in esame ovvero il taglio di pannelli in schiuma metallica. Le schiume metalliche sono comparse sullo scenario commerciale in tempi recenti e sono tutt'ora oggetto di studio per le numerose applicazioni possibili (cfr. capitolo 3).

Nonostante in letteratura la tecnologia AWJ sia citata come tecnologia applicabile per il taglio di schiume metalliche [See02], non sono tuttavia presenti modelli descrittivi del processo di taglio e della qualità micro e macrogeometrica del solco (massimo spessore tagliabile, conicità, profilo del taglio...). L'approccio che verrà, pertanto, applicato nella selezione dei parametri ottimali per il taglio delle schiume metalliche sarà empirico e basato sui risultati sperimentali ottenuti con il presente studio.

In questo capitolo viene illustrata l'impostazione generale del problema di selezione dei parametri ottimali per tecnologia AWJ, attraverso l'analisi dei modelli di costo presenti in letteratura.

2.1 Procedura generale per l'impostazione e risoluzione del problema di ottimizzazione.

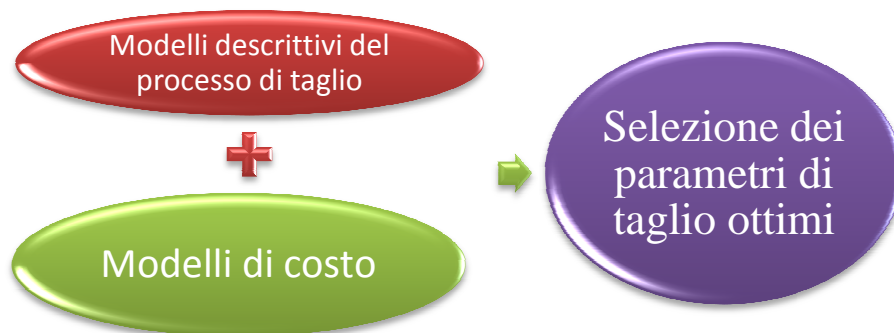


Figura 2. 1 Approccio generale per la selezione dei parametri di taglio ottimo

La selezione dei parametri ottimali nel processo di taglio AWJ è basata sulla combinazione dei modelli in grado di descrivere il processo di taglio e dei modelli di costo.

È anche possibile selezionare i parametri ottimali per il processo di taglio prescindendo da vincoli economici; non necessariamente, infatti, la funzione obiettivo che si vuole ottimizzare è legata a vincoli di costo, e l'obiettivo del problema può essere rivolto alla ricerca di particolari finiture macro e micro geometriche del solco di taglio. A questo proposito in letteratura è possibile rintracciare modelli descrittivi sia della qualità micro e macrogeometrica del solco, sia dello spessore tagliabile. Il problema di ottimizzazione si articola principalmente in tre fasi:

1. selezione dei parametri di input tecnici ed economici;
2. individuazione dei modelli descrittivi della funzione o funzioni obiettivo da massimizzare o minimizzare;
3. risoluzione del problema di massimizzazione o minimizzazione, con individuazione del valore ottimale dei parametri variabili per l'obiettivo prefissato.

Al termine della procedura di ottimizzazione è bene valutare la sensibilità dei modelli applicati: aumentando o diminuendo percentualmente il valore dei parametri che concorrono alla definizione della funzione obiettivo, è possibile apprezzare la variabilità della funzione ottimizzata rispetto al risultato precedente.

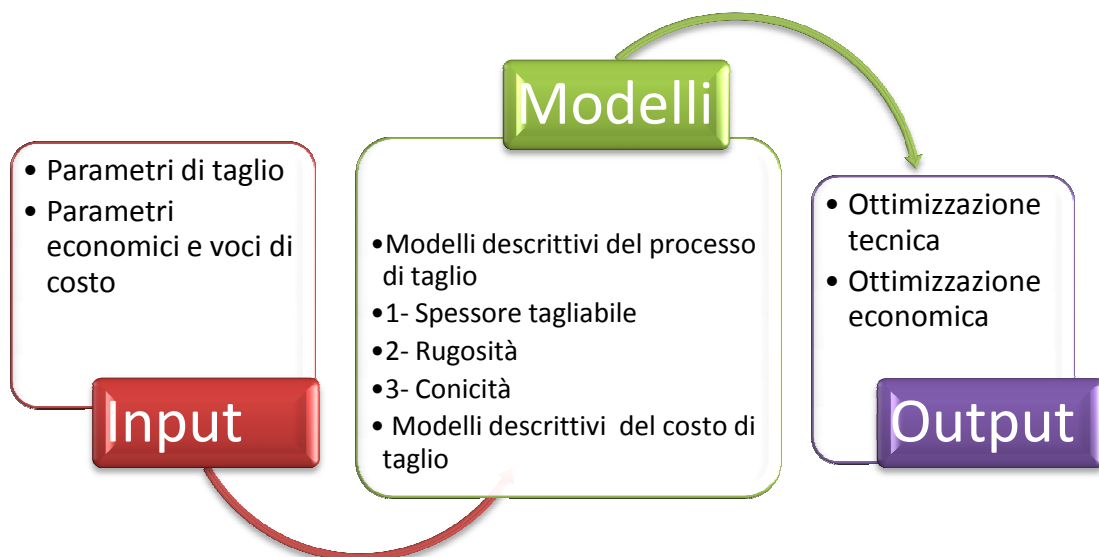


Figura 2. 2 Fasi principali del problema di ottimizzazione

2.1.1 Selezione dei parametri di input tecnici ed economici

In questa prima fase vengono selezionati i parametri di input del problema di ottimizzazione: vengono definiti i parametri fissi, quelli variabili e il valore o l'intervallo di variabilità di ciascuno di essi. I parametri possono essere sia tecnici che economici. I parametri tecnici includono:

1. *Parametri di processo:*

- Ugello focalizzatore: diametro, lunghezza, materiale;
- Ugello primario: diametro, materiale;
- Abrasivo: tipo, mesh #, portata;
- Pressione;
- Additivi: tipo, concentrazione.

2. *Parametri del grezzo:*

- Materiale: omogeneità, densità, durezza, tipo, E;
- Geometria;
- Stato di finitura.

3. *Parametri di lavorazione:*

- Velocità di avanzamento;
- Stand off distance;
- Inclinazione della testa;
- Numero di passate.

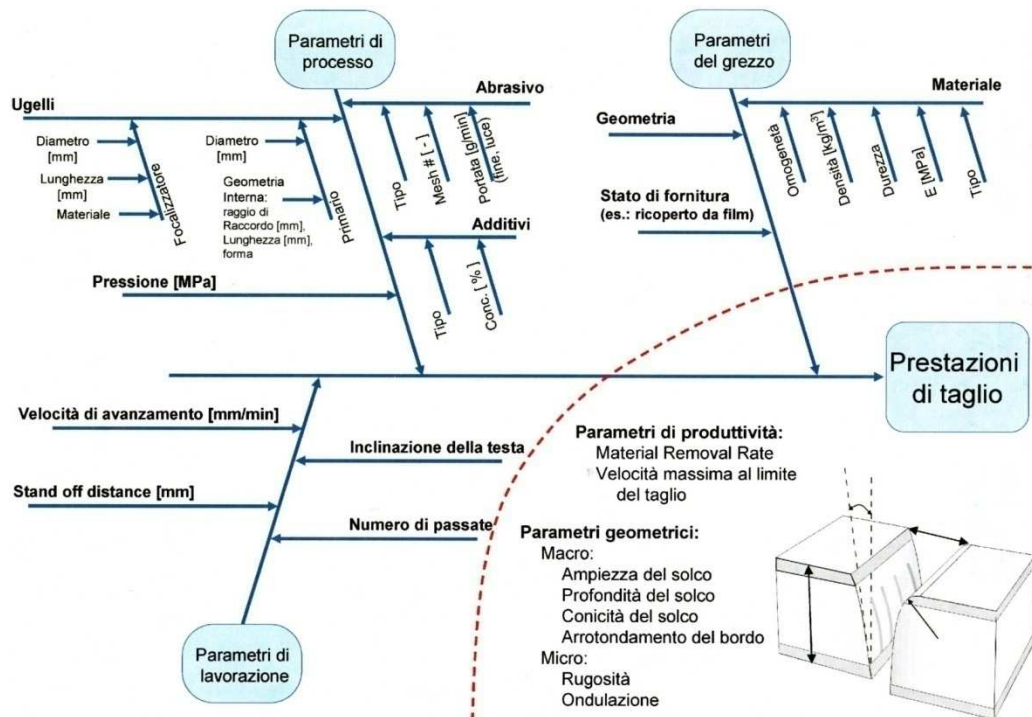


Figura 2. 3 Parametri di taglio

Nelle applicazioni industriali tipiche, la sola velocità di avanzamento della testa di taglio è considerata il parametro variabile sul quale l'operatore può agire; gli altri parametri tecnologici sono fissati al loro massimo valore nel senso di massima capacità di taglio. Questo tipo di approccio può essere migliorato andando a variare i parametri che consentono di ottenere una migliore qualità di taglio o, più in generale, per rispettare i vincoli imposti sulla funzione obiettivo. In seguito, nel caso specifico del taglio delle schiume metalliche, verranno illustrate le scelte sull'intervallo di variabilità dei parametri di taglio. Si vedrà come la scelta di operare alla massima velocità di avanzamento consenta di ottenere il minimo costo dell'operazione di taglio e aumentare la produttività. La selezione dei parametri economici dipende dal modello di costo utilizzato. Le voci di costo si suddividono in costi fissi e costi variabili: i primi sono legati ai costi di investimento e di manodopera e alla manutenzione della macchina; i costi variabili dipendono direttamente dal valore assunto dai parametri di taglio utilizzati. Queste voci verranno analizzate in dettaglio durante l'analisi dei modelli di costo presenti in letteratura per la stima dei costi con tecnologia AWJ (cfr. paragrafo 2.2).

2.1.2 Selezione dei modelli

In questa seconda fase si individua la/e funzione/i obiettivo che ci si propone di massimizzare o minimizzare. In letteratura sono rintracciabili modelli di costo e modelli descrittivi del processo di taglio sia per i materiali omogenei che per i materiali compositi. Questi modelli riguardano principalmente:

- *Spessore tagliabile*, come indice della potenza del getto;
- *Conicità del solco*, come indice della qualità macrogeometrica del taglio;
- *Rugosità*, come indice della qualità microgeometrica del taglio.

Nel caso di pannelli in schiuma metallica, non sono attualmente presenti modelli descrittivi del processo di taglio. Bisogna sottolineare, inoltre, che lo studio della finitura microgeometrica di un pannello in schiuma metallica risulterebbe complicato (se non impossibile) sia per la sensibilità del rugosimetro rispetto alla finitura del taglio, sia per l'impossibilità di misurare la rugosità per diverso spessore. Lo studio della finitura microgeometrica potrebbe essere significativo per i pannelli sandwich di schiuma metallica, con pelli dello spessore necessario alla misurazione della rugosità a diverse profondità.

Per qualsiasi materiale la selezione del modello dipende dal tipo di ottimizzazione che si ricerca per ottenere determinate finiture geometriche o per la minimizzazione dei costi.

2.1.3 Risoluzione del problema

Una volta selezionati i modelli di interesse, si passa alla risoluzione del problema di ottimizzazione, per ottenere i parametri ottimali per l'obiettivo prefissato.

In questa fase è necessario applicare i vincoli sui parametri variabili. L'intervallo di variabilità deriva da considerazioni pratiche e può essere scritto come [Mon07]:

$$\begin{aligned} v_{min} < v < v_{max} \\ P_{min} < P < P_{max} \\ \dot{m}_{abr,min} < \dot{m}_{abr} < \dot{m}_{abr,max} \end{aligned}$$

$v_{max}, v_{min}, P_{max}, P_{min}, \dot{m}_{abr,max}, \dot{m}_{abr,min}$ rappresentano i possibili valori massimi e minimi dei parametri di lavorazione e processo. Gli intervalli sono definiti in base alla variabilità dei parametri nel piano sperimentale, in base alle condizioni di lavoro o, anche, in riferimento a un ricercato livello di produttività. Il problema di ottimizzazione può, inoltre, considerare come vincolo sulla funzione obiettivo sia la qualità del solco di taglio, in termini di finitura

superficiale), [Cap96] sia la qualità del solco di taglio, in termini di macrogeometria del solco.

Per un qualsiasi materiale lavorato le richieste frequenti nella selezione dei parametri ottimali per la lavorazione si possono riassumere principalmente in:

- *Combinazione di modelli di costo e qualità di taglio:*

1. Qualità microgeometrica del taglio e minimo costo [Mon07]

$$\left\{ \begin{array}{l} Ra^{vincolo} = f(v, \dot{m}_a, p, mesh) \\ \min \left[C = ca' \cdot \frac{\dot{m}_a}{v} + cw' \cdot \frac{\sqrt{P}}{v} + ce' \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{v} + cu \cdot \frac{1}{v} \right] \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Ra^{vincolo} = \alpha \cdot \frac{\left[\beta \cdot \left(\frac{v}{\dot{m}_a} \right)^\delta \right]^{Kr^{vincolo}}}{mesh^\gamma} \\ K_r = \frac{K_{misur}^{vincolo}}{A \cdot \frac{p^B \cdot \dot{m}_p^C}{v^D}} \\ \min \left[C = ca' \cdot \frac{\dot{m}_a}{v} + cw' \cdot \frac{\sqrt{P}}{v} + ce' \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{v} + cu \cdot \frac{1}{v} \right] \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Con vincoli sui parametri di taglio:

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v \leq v_{max} \\ \dot{m}_{a,min} &\leq \dot{m}_a \leq \dot{m}_{a,max} \\ P_{min} &\leq P \leq P_{max} \\ mesh\# &= 80; mesh\# = 120 \end{aligned}$$

I parametri A, B, C, D, α , β , γ , δ che rientrano nelle equazioni sono definiti in funzione del materiale tagliato. I valori sono riportati in tabella [Mon07]:

Tabella 2. 1 coefficienti sperimentali, massimo spessore tagliabile

Massimo spessore tagliabile (mm)	200<P<350 (MPa) 50<v<200 (mm/min) Barton Garnet #80, #120				
	A	B	C	D	R-sq
Titanio	0,272	0,885	0,555	0,774	95,9
Acciaio inoss.	0,802	0,705	0,55	0,856	95
Alluminio	18,91	0,626	0,017	0,63	95,5

Tabella 2. 2 Coefficienti sperimentali per rugosità

Rugosità (μm)					
Materiale	α	β	δ	γ	R-sq
Titanio	15,99	8,85	0,31	0,05	86,6
Acciaio Inoss.	74,44	11,02	0,72	0,72	92,4
Alluminio	96,54	16,78	0,78	0,84	85,9

Le condizioni sperimentali sono riportate per materiale nelle tabelle seguenti [Mon07]:

Titanio (k_{misur} : 1, 4, 6, 11 (mm))

Tabella 2. 3 condizioni sperimentali, Titanio

Pressione (MPa)	Velocità (mm/min)	Portata di abrasivo (g/min)	Mesh #
250	50	200	B.G. #80
285	100	270	B.G.#120
320	150	340	
350	200	400	

Acciaio inossidabile, spessore 12 mm, (k_{misur} 1, 4, 7, 11 (mm))

Tabella 2. 4 Condizioni sperimentali, Acciaio inossidabile

Pressione (MPa)	Velocità (mm/min)	Portata di abrasivo (g/min)	Mesh #
250	50	200	B.G. #80
285	70	270	B.G.#120
320	100	340	
350	200	400	

Alluminio, spessore 30 mm (k_{misur} 1, 8, 15, 22, 29 (mm))

Tabella 2. 5 Condizioni sperimentali, Alluminio

Pressione (MPa)	Velocità (mm/min)	Portata di abrasivo (g/min)	Mesh #
250	50	200	B.G. #80
350	150	400	B.G.#120

2. Qualità macrogeometrica del taglio e minimo costo [Mon07]

$$\left\{ \begin{array}{l} T = f(h, mesh, \dot{m}_a, p, v) \\ \min \left[C = ca' \cdot \frac{\dot{m}_a}{v} + cw' \cdot \frac{\sqrt{P}}{v} + ce' \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{v} + cu \cdot \frac{1}{v} \right] \end{array} \right. \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T = h \cdot \left[1,094 \cdot \frac{mesh^{0,0452} \cdot v^{0,0849}}{\dot{m}_a^{0,0321} \cdot p^{0,0765}} \right] \\ \min \left[C = ca' \cdot \frac{\dot{m}_a}{v} + cw' \cdot \frac{\sqrt{P}}{v} + ce' \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{v} + cu \cdot \frac{1}{v} \right] \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Con vincoli sui parametri di taglio:

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v \leq v_{max} \\ \dot{m}_{a,min} &\leq \dot{m}_a \leq \dot{m}_{a,max} \\ P_{min} &\leq P \leq P_{max} \\ mesh \# &= 80; mesh \# = 120 \end{aligned}$$

Le condizioni di validità sperimentale sono riportate in tabella [Mon07]:

Tabella 2. 6 Coefficienti sperimentali, conicità

Conicità (mm) ±9	Conicità (gradi) ±0,4	Velocità (mm/min) 20-60	Pressione (MPa) 250-350	Portata abr (g/min) 180-290	Mesh # 80-120
S.o.d.	d _f /d ₀	Abrasivo	Materiale		N. ro tagli
2 mm	≈ 3,3	B.Garnet	Lega di alluminio, 2017A-T451, UNI 9002/2: P-AlCu4MgMnSi		360

3. Qualità micro e macrogeometrica del solco di taglio e minimo costo [Mon07]

$$\left\{ \begin{array}{l} T = f(h, mesh, \dot{m}_a, p, v) \\ Ra^{vincolo} = f(v, \dot{m}_a, p, mesh) \\ \min \left[C = ca' \cdot \frac{\dot{m}_a}{v} + cw' \cdot \frac{\sqrt{P}}{v} + ce' \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{v} + cu \cdot \frac{1}{v} \right] \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Con vincoli sui parametri di taglio:

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v \leq v_{max} \\ \dot{m}_{a,min} &\leq \dot{m}_a \leq \dot{m}_{a,max} \\ P_{min} &\leq P \leq P_{max} \\ mesh \# &= 80; mesh \# = 120 \end{aligned}$$

- *Combinazione di modelli di qualità di taglio:*

1. Qualità micro e macrogeometrica del solco di taglio [Mon07]

$$\begin{cases} T = f(h, mesh, \dot{m}_a, p, v) \\ Ra^{vincolo} = f(v, \dot{m}_a, p, mesh) \end{cases} \quad (2.6)$$

Con vincoli sui parametri di taglio:

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v \leq v_{max} \\ \dot{m}_{a,min} &\leq \dot{m}_a \leq \dot{m}_{a,max} \\ P_{min} &\leq P \leq P_{max} \\ mesh \# &= 80 ; mesh \# = 120 \end{aligned}$$

2.2 Stato dell'arte per modelli di costo per tecnologia AWJ

Il tentativo di stimare e di ridurre il costo di taglio nell'utilizzo della tecnologia AWJ è stato fino ad ora oggetto di numerosi studi. Le voci di costo che vengono considerate nella stima del totale sono suddivisibili in due categorie:

- Costi fissi
- Costi variabili

I primi valutano il costo dell'investimento, i costi di manutenzione e di manodopera. I costi variabili invece, racchiudono le spese economiche derivanti dalla scelta dei parametri tecnologici [Jen93] [Sum01] [Paw93].

In base alle richieste della funzione obiettivo (massimo spessore tagliabile, ricerca di particolare finitura micro e macrogeometrica del taglio), è possibile tralasciare le voci di costo relative ai costi fissi non correlati direttamente alla scelta dei parametri di processo [Cap96].

Un'altra peculiarità dei modelli di costo sta nella valutazione della vita dell'ugello focalizzatore: è possibile considerare sia la vita media dell'ugello

sulla base dell'esperienza e tramite le informazioni fornite dalle case costruttrici, sia stimare la vita dell'ugello applicandone un modello di usura, in base ai valori assunti dai parametri di taglio [Hoo06].

- Costo dell'ugello focalizzatore dalla vita media dell'ugello;
- Costo dell'ugello focalizzatore con applicazione del modello di usura per la stima della vita dell'ugello in funzione dei parametri di taglio.

L'impianto AWJ può essere fornito di una o più teste di taglio [Hoo06] e può ricorrere all'utilizzo di sistemi per il recupero di abrasivo [Pi07]: la tipologia di impianto utilizzata comporta la variazione del costo di taglio.

- Impianti che prevedono l'utilizzo di una testa di taglio
- Impianti che prevedono l'utilizzo di più teste di taglio
- Impianti che prevedono il recupero di abrasivo
- Impianti che non prevedono il recupero di abrasivo

2.2.1 J Jeng e T. Kim

Gli autori [Jen93] presentano un modello per determinare il costo orario (\$/h) delle operazioni di taglio con tecnologia AWJ. Tale modello considera sia voci di costo fisse legate all'investimento, alla manutenzione della macchina e al costo della manodopera, che voci di costo variabili, direttamente legate alla scelta dei parametri di taglio.

Il costo orario (\$/h) include:

- Costo orario della macchina, C_{mh} (\$/h):

il costo d'investimento annuo della macchina C_{my} (\$/anno) è rapportato al numero di ore di lavoro annue h_y . Ne deriva che il costo orario della macchina è pari a:

$$C_{mh} = \frac{C_{my}}{h_y} \quad (2.7)$$

- Costo orario della manodopera, C_{lh} (\$/h):

il costo della manodopera per le operazioni di taglio considera il salario annuale dell'operatore specializzato O_y (\$/anno), i benefici supplementari per l'operatore (straordinari e altre spese) F_y (\$/anno) e il costo di supervisione S_y (\$/anno). Rapportando il totale al numero di ore di lavoro annue si ottiene:

$$C_{th} = \frac{O_y + F_{y+} + S_y}{h_y} \quad (2.8)$$

- Costo orario dei materiali, C_{th} (\$/h):

vengono sommati tutti i costi variabili legati alla scelta dei parametri di taglio come il costo dell'abrasivo, il costo dell'acqua, il costo degli ugelli. Per la stima della vita utile in ore dell'ugello si fa riferimento alla vita media dello stesso sulla base dell'esperienza. La vita media dell'ugello focalizzatore viene stimata pari a 50 h, mentre per l'ugello primario in zaffiro pari a 100 h.

Per eventi esterni (guasti, riparazioni, manutenzione...) si devono considerare intervalli di non funzionamento della macchina: indicando con T_d (%) il tasso di fermo della macchina, il costo del materiale all'ora è calcolato come:

$$C_{th} = \left(3,6 \cdot \dot{m} \cdot C_a + 60 \cdot \dot{m}_w \cdot C_w + \frac{C_n}{L_n} + \frac{C_0}{L_0} \right) \cdot (1 - T_d) \quad (2.9)$$

Dove:

\dot{m} (g/s): massa di abrasivo;

C_a (\$/kg): costo unitario dell'abrasivo;

\dot{m}_w (l/min): massa d'acqua;

C_w (\$/litro): costo unitario dell'acqua;

C_n (\$/pezzo): costo unitario del focalizzatore;

L_n (h): vita media dell'ugello focalizzatore;

C_0 (\$/pezzo): costo unitario dell'ugello primario;

L_0 (h): vita media dell'ugello primario.

- Costo orario dell'energia, C_{ph} (\$/h):

definito il costo dell'energia elettrica C_p (\$/kwh) e la potenza dell'impianto P (kw), e considerando il tasso di fermo macchina, il costo diventa:

$$C_{ph} = P \cdot C_p \cdot (1 - T_d) \quad (2.10)$$

- Costi di manutenzione e controllo, C_{dh} (\$/h):

considerati i costi di manutenzione e controllo e rapportati gli stessi al numero di ore per tali operazioni, la voce di costo risulta:

$$C_{dh} = \frac{C_{mt}}{h_{mt}} + \frac{C_{dp}}{h_{dp}} \quad (2.11)$$

Il costo orario totale stimato per l'operazione di taglio risulta:

$$C_h = C_{mh} + C_{lh} + C_{th} + C_{ph} + C_{dh} \text{ (\$ per ora)} \quad (2.12)$$

Il costo per unità di lunghezza è ottenuto dividendo il costo orario per la velocità di avanzamento della testa di taglio u (mm/min).

2.2.2 V. N. Pi

Anche in questo caso [Pi05] vengono suddivise le voci di costo in costi fissi e costi variabili e il costo totale dell'operazione è calcolato come costo orario (€/h). Questo modello entra nel dettaglio per la stima dei costi, analizzando ogni singola voce che concorre alla definizione dei costi fissi e costi variabili. Rispetto al caso precedente il modello prende in considerazione la possibilità di avere nell'impianto più teste di taglio. La vita utile dell'ugello focalizzatore viene stimata tramite l'applicazione di un modello di usura elaborato dall'autore. La valutazione del costo dell'ugello sarà correlata alla scelta dei parametri di taglio che rientrano nel modello d'usura.

Il costo totale viene scritto come:

$$C_h = C_{fix,h} + C_{var,h} \quad (2.13)$$

I costi fissi racchiudono il costo orario della macchina, $C_{mt,h}$ (€/h) e i costi orari di gestione dell'impianto inclusi i salari, $C_{wa,h}$ (€/h).

$$C_{fix,h} = C_{mt,h} + C_{wa,h} \quad (2.14)$$

I costi variabili considerano le spese legate alla scelta dei parametri di taglio e includono: il costo dell'ugello primario $C_{ori,h}$ (€/h) il costo dell'ugello focalizzatore $C_{f,h}$ (€/h), il costo dell'abrasivo $C_{a,h}$ (€/h) e il costo dell'acqua $C_{w,h}$ (€/h). I costi di manutenzione legati alle presenti voci di costo (sostituzione degli ugelli etc.) sono inclusi nei costi fissi di manutenzione.

$$C_{var,h} = C_{ori,h} + C_{f,h} + C_{w,h} + C_{a,h} \quad (2.15)$$

2.2.2.1 Costo orario della macchina, $C_{mt,h}$ (€/h)

Il costo orario della macchina è dato dalla somma di diversi contributi tra cui il costo annuale di ammortamento $C_{de,y}$ (€/anno), il costo annuale di interessi $C_{in,y}$ (€/anno), il costo di affitto $C_{ro,y}$ (€/anno) per lo spazio occupato

dall'impianto AWJ, il costo di manutenzione annuo $C_{ma,y}$ (€/anno) e il costo dell'energia $C_{en,y}$ (€/anno).

I costi annui sono riferiti al numero di ore di funzionamento dell'impianto in un anno lavorativo, T_{use} (h/anno).

$$C_{mt,h} = \frac{C_{de,y} + C_{in,y} + C_{ro,y} + C_{ma,y} + C_{en,y}}{T_{use}} \quad (2.16)$$

$$C_{de,y} = C_{rpl}/T_{tot} \text{ (€/anno)} \quad (2.17)$$

$$C_{in,y} = C_{rpl} \cdot x_{int}/2 \text{ (€/anno)} \quad (2.18)$$

L'ammortamento annuo è calcolato come rapporto tra il valore dell'investimento C_{rpl} in € e il numero di anni T_{tot} , x_{int} rappresenta il tasso di interesse annuo.

$$C_{ro,y} = C_{sqm} \cdot A_{mt} \text{ (€/anno)} \quad (2.19)$$

$$C_{ma,y} = x_{ma,y} \cdot C_{rpl} \text{ (€/anno)} \quad (2.20)$$

$$C_{en,y} = T_{use} \cdot C_e \cdot P_{tot} \cdot d_{op} \text{ (€/anno)} \quad (2.21)$$

Nella stima del costo di affitto $C_{ro,y}$ si considera il costo annuo al metro quadro della superficie occupata C_{sqm} , (€/m² · anno) e l'area occupata dall'impianto A_{mt} .

Il costo di manutenzione $C_{ma,y}$ è calcolato moltiplicando il costo dell'investimento in € per il tasso di manutenzione annuo, in genere $x_{ma,y}$: 38%.

Il costo dell'energia $C_{en,y}$ è ottenuto moltiplicando il tempo di utilizzo annuo della macchina T_{use} (h/anno) per il costo unitario dell'energia C_e (€/kwh), per la potenza totale installata sulla macchina P_{tot} (kwh) e infine per il tasso di durata dell'operazione, d_{op} (h).

Nel calcolo del numero di ore annue in cui la macchina è effettivamente utilizzata T_{use} (h/anno), si considerano: il numero di turni lavorativi al giorno x_{sh} , la durata giornaliera di un turno lavorativo t_{sh} , il numero di giorni lavorativi in un anno d_{wor} e il tasso di utilizzo della macchina x_{ut} .

$$T_{use} = x_{sh} \cdot t_{sh} \cdot d_{wor} \cdot x_{ut} \quad (2.22)$$

Il tasso di utilizzo considera i tempi di fermo macchina dovuti a manutenzione e operazioni accessorie che necessitano lo spegnimento della macchina e la conseguente interruzione dell'operazione di taglio (rottura e sostituzione

dell'ugello focalizzatore etc.). Questo valore è in genere compreso tra 0,7 ...0,8, ma considerando un impianto a testa di taglio multipla n_f , il tasso di utilizzo diminuisce all'aumentare del tempo di sostituzione del focalizzatore, t_{cn} . L_f rappresenta la vita in ore dell'ugello focalizzatore.

$$x_{ut} = (0,7 \dots 0,8) - t_{cn} \cdot n_f / L_f \quad (2.23)$$

2.2.2.2 Costo orario di gestione e salari, $C_{wa,h}$ (€/h)

L'utilizzo della tecnologia AWJ non necessita in ogni momento della supervisione e controllo manuale: impostati i parametri di taglio e avviata la lavorazione, il taglio può essere effettuato in sicurezza senza la presenza costante dell'operatore. In questo modo è possibile ridurre i costi di gestione e dei salari. Per stimare il costo effettivo dei salari, si introduce un coefficiente k_{msh} come rapporto tra i turni con supervisione dell'operatore x_{msh} e il numero di turni totali x_{sh} :

$$k_{msh} = \frac{x_{msh}}{x_{sh}} \quad (2.24)$$

Il costo orario di gestione $C_{ov,h}$ e salari $C_{la,h}$ risulta pertanto, pari a:

$$C_{wa,h} = \frac{k_{msh} \cdot (C_{la,h} + C_{ov,h})}{x_{ut}} \quad (2.25)$$

2.2.2.3 Costo orario dell'ugello primario $C_{ori,h}$ (€/h)

Il modello di costo prevede un impianto a testa di taglio multipla con l'utilizzo di n_f ugelli focalizzatori. Il costo dell'ugello al pezzo è rappresentato da $C_{ori,p}$ (€/pezzo), mentre L_{ori} rappresenta la vita media dell'ugello primario (h).

$$C_{ori,h} = n_f \cdot C_{ori,p} / L_{ori} \quad (2.26)$$

2.2.2.4 Costo orario dell'ugello focalizzatore $C_{f,h}$ (€/h)

Anche per la stima del costo dell'ugello focalizzatore valgono le considerazioni fatte per il costo dell'ugello primario. Il modello di costo prevede un impianto a testa di taglio multipla con l'utilizzo di n_f ugelli focalizzatori. Il costo dell'ugello al pezzo è rappresentato da $C_{f,p}$ (€/pezzo), mentre L_f non rappresenta la vita media dell'ugello focalizzatore, ma la vita effettiva dell'ugello (h) in base ai parametri di taglio selezionati. La trattazione del fenomeno di usura del focalizzatore con conseguente stima della vita utile verrà esposta in seguito (cfr. paragrafo 2.3.1).

$$C_{f,h} = n_f \cdot C_{f,p} / L_f \quad (2.27)$$

2.2.2.5 Costo orario per il consumo d'acqua $C_{w,h}$ (€/h)

Il costo orario per il consumo dell'acqua è valutato tramite la seguente equazione:

$$C_{w,h} = 3600 \cdot n_f \cdot \dot{m}_w \cdot C_{w,m} \quad (2.28)$$

$C_{w,m}$ rappresenta il costo unitario dell'acqua (€/kg), mentre \dot{m}_w rappresenta la portata d'acqua utilizzata durante l'operazione ($\frac{kg}{s \cdot num\ foc}$).

2.2.2.6 Valutazione della portata d'acqua \dot{m}_w (kg/s)

Per stimare il costo orario dovuto al consumo d'acqua è necessario valutare la quantità d'acqua utilizzata durante le operazioni di taglio.

Il valore della portata dell'acqua che fluisce nell'impianto è calcolato come:

$$\dot{m}_w = c_d \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_{or}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_w}{\rho_w}} \quad (2.29)$$

d_{or} rappresenta il diametro dell'ugello primario, p_w la pressione dell'acqua, ρ_w la densità dell'acqua e c_d il coefficiente di efflusso.

Per comprendere il significato della formula che consente il calcolo della portata del fluido e il significato dei termini che rientrano nell'equazione, è necessario ripercorrere e analizzare il percorso del fluido all'interno della testa di taglio.

Per ottenere un getto ad alta pressione, l'acqua viene costretta a passare nell'ugello primario. A valle dell'ugello primario il diametro del getto d'acqua è inferiore a quello dell'orifizio, come visibile in Figura 2.4 [Pi05].

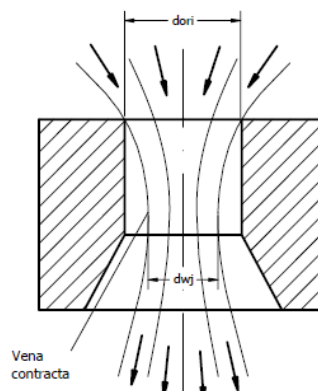


Figura 2. 4 Schema illustrativo del coefficiente di efflusso nell'ugello primario [Pi05]

La sezione descritta dal getto d'acqua decresce fino al punto di contrazione di vena, dove raggiunge il valore minimo A_{wj} . La diminuzione della velocità del fluido oltre il punto di vena contratta è causata dall'aumento delle forze di attrito tra la parete dell'ugello primario, l'aria e il getto d'acqua.

A causa della diminuzione della velocità dovuta ai cambi improvvisi delle condizioni fluido-meccaniche sulla parete dell'ugello, a valle dell'ugello stesso la portata volumetrica effettiva dell'acqua $\dot{q}_{w,eff}$ è inferiore rispetto alla portata volumetrica teorica dell'acqua $\dot{q}_{w,th}$. [Mom98].

La portata volumetrica effettiva del getto può essere scritta come [Pi05]:

$$\dot{q}_{w,eff} = A_{wj} \cdot v_{wj} \quad (2.30)$$

E anche:

$$\dot{q}_{w,eff} = \frac{A_{wj}}{A_0} \cdot \frac{v_{wj}}{v_{wj,inc}} \cdot A_0 \cdot v_{wj,inc} = c_c \cdot c_{vc} \cdot c_{vf} \cdot \dot{q}_{wj,th} = c_d \cdot \dot{q}_{w,th} \quad (2.31)$$

Nell'equazione sopra riportata il termine A_{wj} rappresenta il valore della sezione del getto in corrispondenza della contrazione di vena, mentre A_0 rappresenta la sezione nominale del getto senza considerare la contrazione del fluido. A sua volta il termine v_{wj} corrisponde alla velocità del getto alla pressione di esercizio, mentre $v_{wj,inc}$ la velocità del fluido considerando il getto incomprimibile.

Considerando l'acqua un fluido perfetto incomprimibile, esente da sforzi tangenziali, soggetto solo alla forza di massa derivante dal campo gravitazionale, la trasformazione energetica che avviene all'ingresso e all'uscita dell'ugello primario viene descritta dall'equazione di Bernoulli (cfr. capitolo 1),

$$\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta h + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V^2}{g} = 0 \quad (2.32)$$

dove ΔP rappresenta la variazione di pressione tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello primario, Δh la variazione di quota tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello e ΔV^2 la variazione di velocità tra l'ingresso e l'uscita dell'ugello; γ , inoltre, rappresenta il peso specifico del fluido e g accelerazione di gravità. Considerando nulla la velocità d'ingresso all'ugello e trascurabile la variazione di quota, e considerando le pressioni relative alla pressione ambiente, l'espressione della velocità di uscita all'ugello diventa:

$$v_{wj,inc} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_w}{\rho_0}} \quad (2.33)$$

La portata volumetrica teorica di acqua $\dot{q}_{w,th}$ può essere quindi calcolata come:

$$\dot{q}_{w,th} = A_0 \cdot v_{wj,inc} = \frac{\pi \cdot d_{ori}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_w}{\rho_0}} \quad (2.34)$$

Per passare dalla portata volumetrica teorica a quella effettiva è necessario moltiplicare il valore della portata teorica per il coefficiente di efflusso c_d , dato dal rapporto tra la portata volumetrica effettiva e la portata volumetrica teorica:

$$c_d = c_c \cdot c_{vc} \cdot c_{vf} = \frac{\dot{q}_{w,eff}}{\dot{q}_{w,th}} \quad (2.35)$$

Il valore del coefficiente di efflusso è scomponibile nel prodotto del coefficiente c_c , coefficiente di contrazione, c_{vc} coefficiente di comprimibilità e del coefficiente di velocità c_{vf} .

- Il coefficiente di contrazione c_c è dato dal rapporto tra la sezione del getto nell'area di vena contratta e l'area nominale del getto senza considerare la contrazione di vena del fluido nell'ugello primario [Sus06]

$$c_c = A_{wj}/A_0 \quad (2.36)$$

- Il coefficiente di comprimibilità c_{vc} è dato del rapporto tra la velocità del getto alla pressione di esercizio e la velocità del getto considerando l'acqua un fluido incomprimibile [Has02] [Sus06]

$$c_{vc} = v_{wj}/v_{wj,inc} \quad (2.37)$$

- Il coefficiente c_{vf} considera le ulteriori perdite per irreversibilità e attriti che si verificano nell'ugello primario.

$$c_{vf} = v_{wj}/v_{wj,isoentropica} \quad (2.38)$$

Alle pressioni di utilizzo in un sistema WJ/AWJ, l'acqua manifesta comprimibilità annullando pertanto l'ipotesi alla base del teorema di Bernoulli. Per correggere il valore della velocità dell'acqua in uscita all'ugello si deve considerare il valore effettivo della densità dell'acqua, valore legato alle pressioni di esercizio.

Hashish [Has89] mostra il legame tra la pressione di esercizio P e la densità dell'acqua ρ tramite la relazione:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{P}{L}\right)^C \quad (2.39)$$

dove L e C sono due costanti del valore di 0,1368 e 300 MPa, ρ_0 rappresenta la pressione dell'acqua in condizioni ambiente (1000 kg/m³).

È possibile quindi ricalcolare il valore della velocità del flusso partendo dall'equazione di Bernoulli [Has89]:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot L}{\rho_0 \cdot (1 + C)} \cdot \left[\left(\frac{P}{L} + 1 \right)^{1-C} - 1 \right]} \quad (2.40)$$

Altri autori [Sus06] hanno presentato il legame tra la pressione p_w e la densità dell'acqua ρ :

$$\rho(p_w) = \left(1 + \frac{n \cdot p_w}{E_{w0}}\right)^{1/n} \cdot \rho_0 \quad (2.41)$$

dove ρ_0 rappresenta la densità dell'acqua a condizioni ambiente (1000 kg/m³), mentre E_{w0} e n sono coefficienti sperimentali che valgono rispettivamente 2135 MPa e 1,75. Sostituendo nell'equazione di Bernoulli si ottiene:

$$v_{wj,com} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{w0}}{\rho_0 \cdot (n - 1)} \cdot \left[\left(1 + \frac{n \cdot p_w}{E_{w0}}\right)^{1-1/n} - 1 \right]} \quad (2.42)$$

In sintesi il coefficiente di efflusso risulta:

$$c_d = c_c \cdot c_{vc} \cdot c_{vf} \quad (2.43)$$

Tipicamente il valore del coefficiente di efflusso è compreso tra 0,6 e 0,8 per ugelli primari in zaffiro [Mom98]. Anche Hashish ha presentato numerosi studi in merito, presentando la relazione che intercorre tra il coefficiente di efflusso e il valore della pressione di esercizio per ugelli primari a diverso diametro.

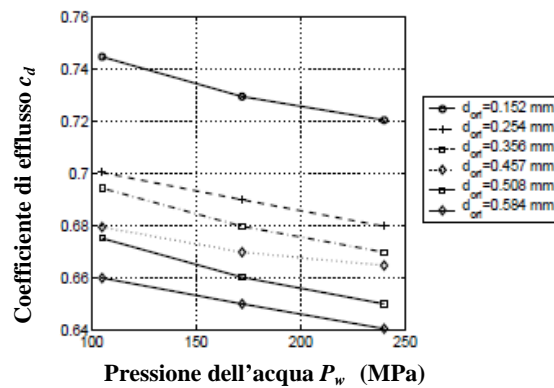


Figura 2. 5 Effetto della pressione P_w sul coefficiente c_d [Hash 89]

Per pressioni comprese tra 105 e 240 MPa e diametri dell'ugello compresi tra 0,152 e 0,584 mm il coefficiente di efflusso diminuisce con l'aumento della pressione dell'acqua. A parità di pressione il valore diminuisce all'aumento del diametro dell'ugello. Un'equazione lineare conferma il legame tra la pressione p_w , il diametro dell'ugello d_{ori} e il coefficiente di efflusso [Has02].

$$c_d = 0,785 - 0,00014 \cdot p_w - 0,197 \cdot d_{ori} \quad (2.44)$$

Anche altri autori, Cluade e al. [Cla98], confermano la relazione tra il coefficiente di efflusso e la pressione. Il coefficiente si riduce da 0,74 a 0,64 per un incremento di pressione da 50 a 350 MPa.

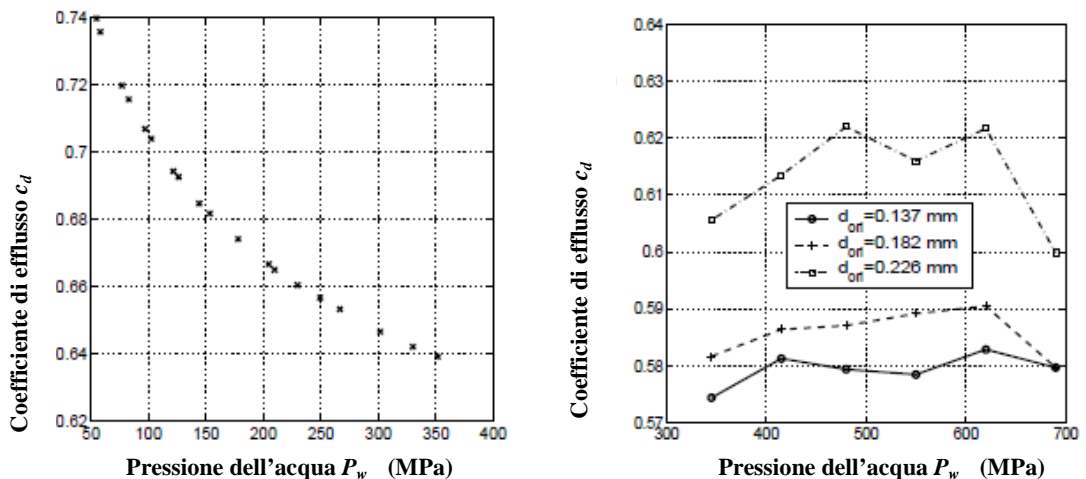


Figura 2. 6 Effetto della pressione [Cla98] e dell'alta pressione [Has97] sul coefficiente di efflusso

Il coefficiente di efflusso ricopre un ruolo importante nella valutazione della potenza e della portata del getto d'acqua. All'aumentare del valore di pressione [Has97] il valore del coefficiente si attesta e si stabilizza attorno a 0,6.

Nei calcoli successivi per il calcolo della portata d'acqua e il conseguente calcolo dei costi di ottimizzazione nel taglio delle schiume metalliche, il valore del coefficiente c_d sarà stimato pari a 0,65 [Ann08].

2.2.2.7 Costo orario dell'abrasivo, $C_{a,h}$ (€/h)

Il costo orario dell'abrasivo è calcolato come

$$C_{a,h} = 3600 \cdot n_f \cdot \dot{m}_a \cdot C_{a,m} \quad (2.45)$$

dove n_f rappresenta il numero di ugelli focalizzatori, \dot{m}_a il valore della portata di abrasivo in kg/s, $C_{a,m}$ il costo unitario di abrasivo in €/kg.

2.2.2.8 Costi totali per taglio AWJ in €/m

Il costo di taglio al metro C_l (€/m) viene calcolato dividendo i costi orari per la velocità di avanzamento della testa di taglio. Questa scelta consente di associare il costo di taglio alla produttività, intesa come metri tagliati nell'unità di tempo. È deducibile quindi che a parità di fattori, un ruolo determinante è giocato dalla velocità di avanzamento della testa di taglio: maggiore è la velocità di avanzamento consentita per il materiale, minori sono i costi a parità di parametri di taglio. Si ha quindi:

$$C_l = \frac{C_h}{3600 \cdot n_f \cdot v_{f,a}} \quad (2.46)$$

dove $v_{f,a}$ è la velocità di avanzamento della testa di taglio (m/s)

2.2.3 Calcolo dei costi per impianti a recupero di abrasivo

Il taglio con tecnologia AWJ può essere effettuato sia con impianti tradizionali in cui si rinnova costantemente l'abrasivo utilizzato per il taglio, sia impianti che prevedono il recupero dell'abrasivo utilizzato in precedenza tramite sistemi di asciugatura dello stesso. Alcuni autori [Pi07] [Sum01] hanno presentato modelli e tecniche per la valutazione di convenienza nella scelta dell'impianto che consente il recupero dell'abrasivo. In particolare è possibile il confronto dei costi per due tipologie di impianto [Pi07] sulla base delle caratteristiche di ciascuna delle due macchine.

La base di partenza per questo tipo di valutazione sta nella calcolo del costo per il recupero dell'abrasivo C_{ra} (€/kg), che può essere calcolato come [Pi07]:

$$C_{ra} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7)}{(k_w \cdot G_{dc})} \quad (2.47)$$

con k_w come coefficiente di lavoro del sistema ($k_w \leq 1$) e G_{dc} come capacità di recupero di abrasivo intesa come quantità di abrasivo asciugata nell'unità di tempo (kg/h).

- C_1 rappresenta il costo orario (€/h) della macchina e viene calcolato come rapporto tra il costo C_m in € del sistema per il recupero dell'abrasivo e:

$$C_1 = \frac{C_m}{(n_y \cdot n_w \cdot n_d \cdot n_h)} \quad (2.48)$$

n_y : numero di anni di servizio del sistema;

n_w : numero di settimane lavorative all'anno;

n_d : numero di giorni lavorativi alla settimana;

n_h : numero di ore lavorative al giorno.

Il costo di due impianti WARDJet utilizzati per il confronto è pari a $C_m = 50271$ (€) per il sistema WARDJet2005a- WARD 1 e $C_m = 37387$ (€) per il sistema WARDJet2005b- WARD 2 [Pi07].

Proseguendo con le voci di costo:

- C_2 : costo orario (€/h) della manodopera;
- C_3 : costo orario (€/h) di amministrazione;
- C_4 : costo orario (€/h) di gestione (costo orario per il mantenimento dei locali, luce, riscaldamento, gestione...);
- C_5 : costo orario (€/h) per la manutenzione della macchina (rimozione-sostituzione di ugelli...)

$$C_5 = \frac{(0,03 \dots 0,08) \cdot C_m}{(n_w \cdot n_d \cdot n_h)} \quad (2.49)$$

- C_6 : costo orario dovuto al consumo di energia (€/h)

$$C_6 = C_p \cdot P_{elec} \quad (2.50)$$

C_p rappresenta il costo unitario dell'energia elettrica (€/W), mentre P_{elec} (W/h) corrisponde al consumo elettrico orario dell'impianto. Considerando due

tipologie di impianto differenti, ovviamente varia anche il consumo di energia a seconda della macchina considerata. Per un impianto WARDJet2005a-WARD 1 $P_{elec} = 33000$ W/h mentre per l'impianto WARDJet2005b- WARD 2 $P_{elec} = 13,200$ W/h. [Pi07]

- C_7 : costo orario dovuto al consumo di acqua (€/h).

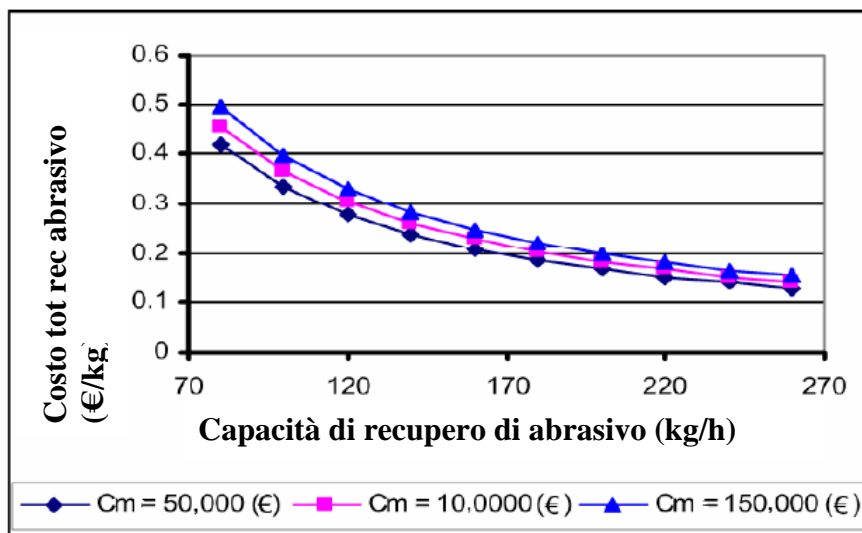
$$C_7 = 3600 \cdot C_w \cdot \dot{m}_w \quad (2.51)$$

C_w rappresenta il costo unitario dell'acqua (€/kg); \dot{m}_w corrisponde alla portata di acqua (kg/s). Per il sistema WARDJet2005a-WARD 1, $\dot{m}_w = 0,0505$, mentre per il sistema WARDJet2005a-WARD 2, $\dot{m}_w = 0,03154$.

Applicando il modello di costo sopra descritto è possibile valutare l'effetto delle singole voci di costo sul totale C_{ra} (€/kg) e individuare di conseguenza l'impianto migliore.

Si deve sottolineare che la capacità di recupero di abrasivo, intesa come capacità del sistema di asciugare l'abrasivo già utilizzato in precedenti operazioni di taglio in kg/h, è un parametro fondamentale nella scelta dell'impianto.

Il costo totale per il recupero dell'abrasivo diminuisce all'aumentare del parametro G_{dc} [Pi07]



$n_y=5$; $n_w=50$; $n_d=5$; $n_h=16$; $C_2=18$ (€/kg); $C_3=3$ (€/kg); $C_4=3$ (€/kg);
 $C_p=0,12$ (€/KWh) $C_w=0,004$ (€/kg)

Figura 2.7 Capacità di recupero dell'abrasivo G_{dc} e costo totale per il recupero dell'abrasivo [Pi07]

Dalla figura 2.8 e seguenti [Pi07] si deduce come le singole componenti di costo che concorrono alla stima del costo totale, siano in genere inferiori per il sistema WARD 1 rispetto al sistema WARD 2. La spiegazione si ritrova facilmente nel fatto che il costo totale per il recupero di abrasivo dipende fortemente dal parametro G_{dc} , ossia dalla quantità di abrasivo recuperabile tramite asciugatura nell'unità di tempo (kg/h). A seconda dell'impianto utilizzato tale parametro presenta valore differente. La capacità di recupero di abrasivo è pari a 81,65 kg/h per il sistema WARD 1, mentre risulta molto inferiore per il sistema WARD 2 pari a 32,69 kg/h.

Poiché la capacità di recupero di abrasivo è maggiore per il sistema WARD 1, il costo totale risulta inferiore rispetto al costo totale ottenibile dal sistema WARD 2. Pertanto tra le due opzioni di impianto, la scelta del sistema WARD 1 risulta vincente.

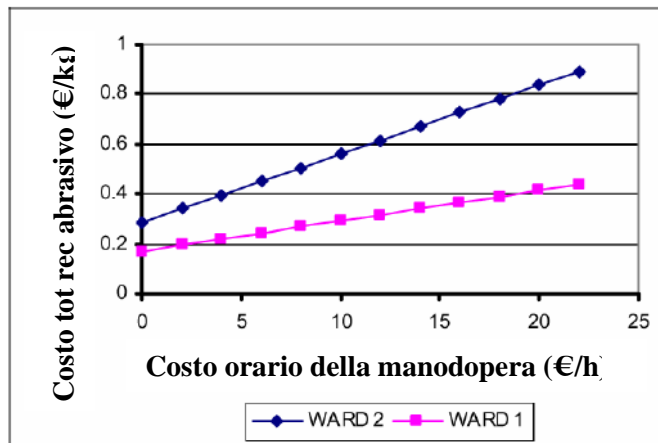


Figura 2. 8 Componenti di costo: costo orario della manodopera rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07]

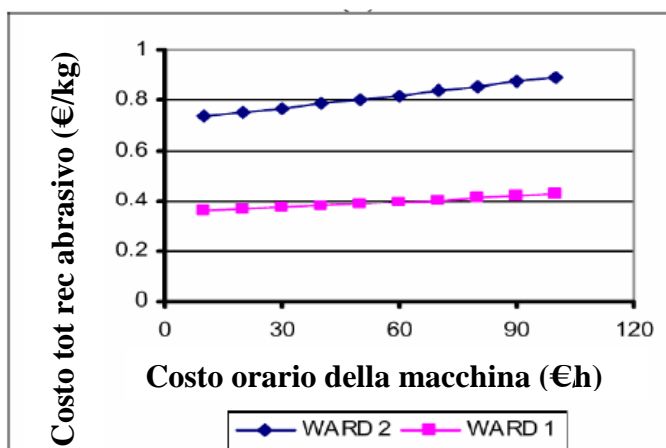


Figura 2. 9 Componenti di costo: costo orario della macchina rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07]

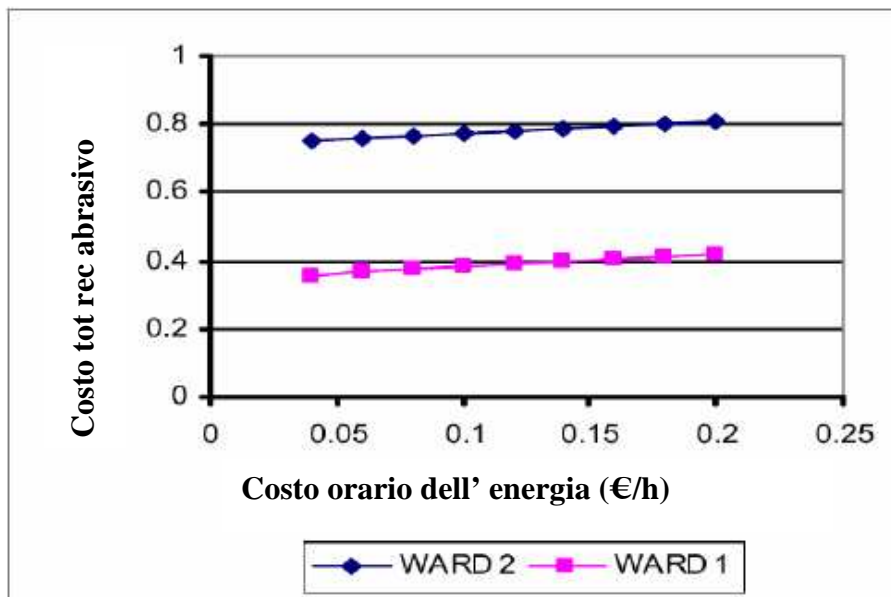


Figura 2. 10 Componenti di costo: costo orario dell'energia rispetto al costo totale per recupero dell'abrasivo [Pi07]

Sintetizzando: un valido impianto per il recupero dell'abrasivo deve tener conto di quanto segue [Pi07].

- Per ridurre il costo totale per il recupero di abrasivo, la capacità di asciugatura del sistema in kg nell'unità di tempo (kg/h) deve essere la più alta possibile. Dalla Figura 2.7 si può notare che impianti che consentono l'asciugatura di 200 kg/h di abrasivo permettono una riduzione del costo totale C_{ra} fino a 0,2 €/kg.
- Per facilitarne l'asciugatura sarebbe meglio raccogliere l'abrasivo e mantenerlo in condizioni ambiente per circa 20-30 giorni, prima di procedere all'asciugatura artificiale. In questo modo non solo sarebbe consentito un maggiore risparmio di energia e riduzione dei costi di asciugatura, ma si renderebbe disponibile una maggiore quantità di abrasivo da riciclare utilizzando impianti con elevata capacità di recupero all'ora.

2.3 Scelta del modello di costo

Il problema di ottimizzazione che verrà affrontato in seguito per la selezione dei parametri ottimali nel taglio di schiume metalliche ha lo scopo di minimizzare i costi per l'operazione di taglio.

I modelli precedenti analizzano il costo totale tenendo conto di voci di spesa inerenti all'investimento, alla manutenzione, al costo della manodopera etc.

Nei casi analizzati [Pi07] [Hoo06], per la scelta della macchina più conveniente dal punto di vista economico, l'obiettivo si riconduce al confronto dei costi tra impianti a recupero di abrasivo e testa multipla di taglio.

Se, nel taglio di un qualsiasi materiale, l'obiettivo dell'ottimizzazione si riferisce all'individuazione dei parametri di taglio che minimizzano il costo per ottenere una particolare richiesta tecnologica (taglio passante, finitura macro-microgeometrica), è possibile allora trascurare i costi fissi legati alle politiche economiche dell'azienda. Le ipotesi alla base del modello di costo da considerare sono le seguenti:

- La funzione obiettivo da minimizzare considera soltanto le voci di costo variabili direttamente legate alla scelta dei parametri di lavorazione.
- Si fa riferimento ad una situazione di impianto già esistente.
- L'impianto è costituito da una macchina con una sola testa di taglio e senza necessità di recupero dell'abrasivo.
- Non si considerano i costi di manodopera, che vengono considerati come costi diretti fissi. Si ipotizza infatti che l'impianto sia sorvegliato e utilizzato costantemente da un operatore.
- Non si considerano i costi variabili indiretti quali il sistema di fissaggio del pezzo, l'usura della camera di miscelazione e la vasca di raccolta, poiché sono difficili da correlare a parametri tecnologici.
- I costi relativi all'usura dell'ugello primario e del focalizzatore sono quelli indicati sulla base della vita media utile del pezzo e indicato dalle case costruttrici. Per completezza, a lato di questa ipotesi semplificativa, la vita dell'ugello focalizzatore sarà stimata in base al valore dei parametri di taglio scelti. Tale stima sarà consentita dall'applicazione di un modello descrittivo dell'usura del focalizzatore.
La vita utile t_f (h) del focalizzatore è stimata come vita media sulla base dell'esperienza e dall'applicazione di un modello di usura.

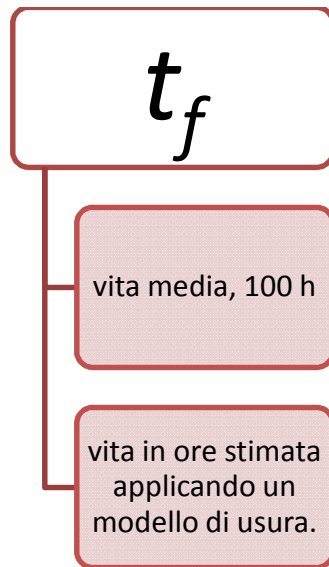


Figura 2. 11 Calcolo della vita utile dell'ugello

In base a queste ipotesi le voci di costo si riducono a:

$C_{abrasivo}$, C_{acqua} , $C_{energia}$, C_{usura} .

- $C_{abrasivo}$: costo relativo al consumo di abrasivo
- C_{acqua} : costo relativo al consumo dell'acqua
- $C_{energia}$: costo relativo al consumo di energia elettrica
- C_{usura} : costo relativo all'usura dell'ugello primario e del focalizzatore

La funzione dei costi totali assume quindi la seguente espressione:

$$C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura} \quad (2. 52)$$

Per poter esprimere la funzione obiettivo in funzione dei parametri di processo, ciascuna voce deve essere analizzata in modo da evidenziarne la dipendenza dai parametri di processo stessi.

Il costo dell'abrasivo è dipendente dalla portata di abrasivo effettivamente smaltita. Definiti la portata di abrasivo $Q_{abrasivo}$ (g/min), la velocità di avanzamento della testa di taglio u (mm/min) e il costo dell'abrasivo c'_a in €/kg, la voce di costo $C_{abrasivo}$ risulta quindi:

$$C_{abrasivo} = \frac{c_a}{1000} \cdot \frac{Q_{abrasivo}}{u} = c'_a \cdot \frac{Q_{abrasivo}}{u} \text{ in } (\text{€}/\text{mm}) \quad (2. 53)$$

Il costo relativo al consumo di acqua è dipendente dalla portata smaltita. Definiti il diametro dell'ugello primario d_n (mm), la pressione dell'acqua P (MPa), la densità dell'acqua ρ_0 (kg/m³), tramite l'equazione di Bernoulli (paragrafo 2.2.2.6) l'equazione della portata d'acqua smaltita Q_w (m³/s) risulta:

$$Q_w = 0,65 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_n^2}{4} \cdot 10^{-6} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot 10^6}{\rho_0}} = q_w \cdot \sqrt{P} \quad (2.54)$$

La densità dell'acqua viene considerata pari a 1000 kg/m³, tralasciando gli effetti della pressione.

Definito il costo unitario dell'acqua c_w (€/m³). Il costo relativo (€/mm) risulta quindi:

$$C_w = \frac{60 \cdot c_w \cdot Q_w}{u} = 60 \cdot c_w \cdot q_w \cdot \frac{\sqrt{P}}{u} = c'_w \cdot \frac{\sqrt{P}}{u} \quad (2.55)$$

Dove $c'_w = 60 \cdot c_w \cdot q_w$

Il costo dell'energia elettrica (€/mm) viene espresso come:

$$C_E = c_e \cdot \frac{1000 \cdot Q_w \cdot P}{60 \cdot u \cdot \eta} = c_e \cdot \frac{1000 \cdot q_w \cdot \sqrt{P} \cdot P}{60 \cdot u \cdot \eta} = c'_e \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{u} \quad (2.56)$$

Dove:

$$c'_e = \frac{1000 \cdot q_w}{60 \cdot \eta} \quad (2.57)$$

η rappresenta il rendimento complessivo dell'intensificatore, pari a 0,8.

Infine definiti il costo unitario del focalizzatore c_f (€/pezzo), la vita utile del focalizzatore t_f (h), il costo unitario dell'ugello primario c_u (€/pezzo) e t_u (h), il costo dell'ugello primario e focalizzatore risulta (€/mm)

$$C_u = \frac{1}{60 \cdot u} \cdot \left(\frac{c_f}{t_f} + \frac{c_u}{t_u} \right) = \frac{c'_u}{u} \quad (2.58)$$

Dove:

$$c'_u = \frac{1}{60} \cdot \left(\frac{c_f}{t_f} + \frac{c_u}{t_u} \right) \quad (2.59)$$

2.4 Scelta del modello di usura per la stima della vita utile dell'ugello focalizzatore

In questo paragrafo è illustrato il fenomeno di usura a cui è soggetto l'ugello focalizzatore. L'obiettivo è quello di individuare un modello che, tenendo conto del processo di usura del focalizzatore stesso, sia in grado di stimarne la vita effettiva in ore a seconda dei parametri scelti per il processo di taglio.

2.4.1 Analisi del fenomeno di usura dell'ugello focalizzatore

Per ottenere un taglio passante, nella tecnologia AWJ, nella camera di miscelazione le particelle di abrasivo sono unite al getto d'acqua ad alta velocità. La velocità raggiunta nell'ugello focalizzatore dipende da diversi fattori: pressione dell'acqua, portata di abrasivo, diametro dell'ugello primario e diametro del focalizzatore, e tale valore può raggiungere anche i 500 m/s e oltre [Him91].

Le particelle che impattano sulle pareti dell'ugello ad alta velocità sono responsabili di una rapida usura dell'ugello stesso tramite asportazione di materiale dalle pareti. L'usura si manifesta quindi con la perdita di peso dell'ugello e con un aumento del diametro del focalizzatore.

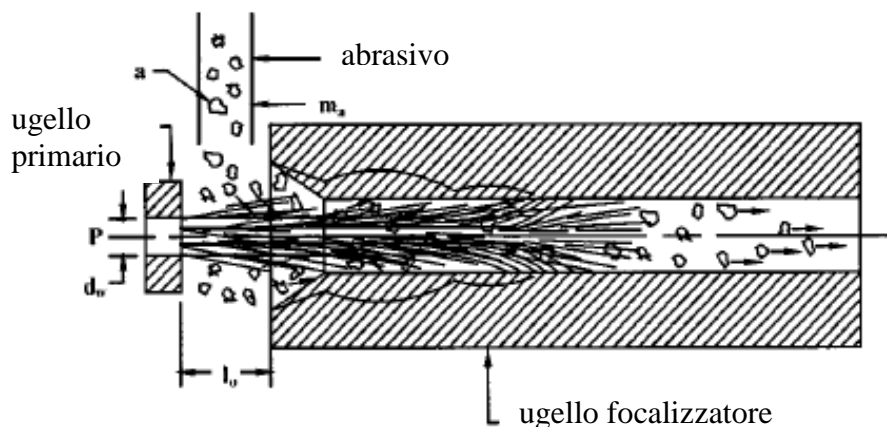


Figura 2. 12 Fenomeno di usura dell'ugello primario [Nan00]

Il meccanismo di asportazione di materiale dall'ugello focalizzatore presenta due modalità differenti. Nella parte superiore, direttamente a contatto con la camera di miscelazione, le particelle colpiscono le pareti con angoli d'impatto elevati: asportano, quindi, per erosione. Verso la parte terminale dell'ugello, invece, dove la velocità delle fasi del getto è più uniforme sulla sezione, le particelle strisciano sulle pareti (angoli di impatto bassi) e asportano per abrasione.

Bisognerebbe allora costruire il focalizzatore con due materiali diversi oppure con un materiale in grado di avere caratteristiche di durezza, tenacità e duttilità variabili sulla sua lunghezza. I materiali duri, infatti, hanno una migliore resistenza all'abrasione (parte bassa) mentre i materiali più tenaci e duttili si comportano meglio contro l'erosione (parte alta) [Has94]. In realtà non si è ancora giunti a tali complesse soluzioni, ma si sceglie un materiale dalle caratteristiche soddisfacenti in entrambe le situazioni, come il carburo di tungsteno (elevata densità e durezza).

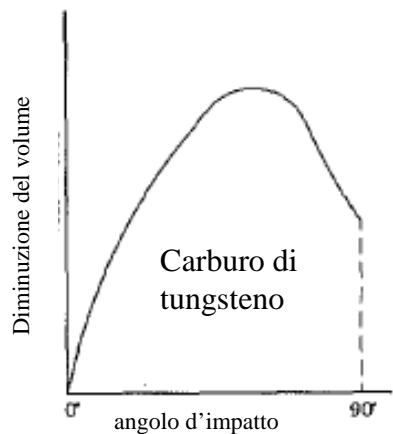


Figura 2. 13 Effetto dell'angolo d'impatto [Has94]

La simulazione delle condizioni che sono responsabili dell'usura all'interno dell'ugello risulta molto spesso notevolmente difficoltosa, così come il monitoraggio del fenomeno. Le proprietà del materiale, infatti, (la durezza, la densità, la resistenza alla frattura) rendono difficoltose le misurazioni e l'analisi del profilo interno dell'ugello.

Il processo di usura dell'ugello è, quindi, molto spesso monitorato tramite la misura della variazione del diametro di uscita e ulteriori procedure prevedono la valutazione della perdita di peso e l'analisi dell'andamento del profilo interno del focalizzatore a intervalli periodici, sezionando l'ugello longitudinalmente.

La figura 2.14 mostra la sezione longitudinale del focalizzatore dopo 3 ore di utilizzo alla pressione di 310 MPa, con portata di abrasivo Garnet pari a 3,8 g/s e un calco dell'ugello in silicone effettuato prima di sezionamento [Nan02].

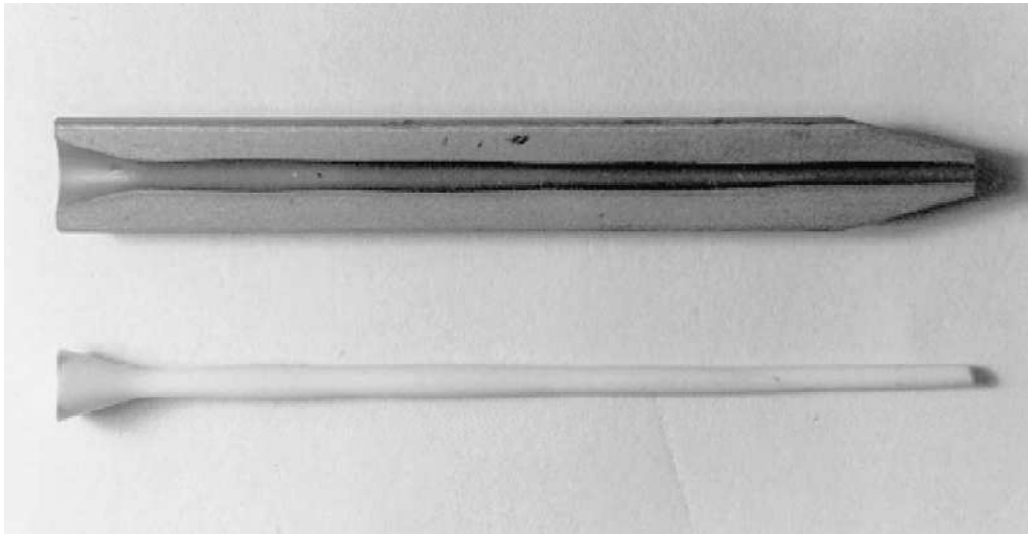


Figura 2. 14 Sezione longitudinale e calco di focilizzatore dopo 3 h di utilizzo [Nan02]

In figura 2.15 è possibile visualizzare l'andamento dei diametri del focilizzatore a diverse ore di funzionamento. Confrontando il raggio iniziale dell'ugello (quota Y centrale nulla) con i raggi misurati rispettivamente dopo 1, 2, 3 ore di funzionamento, si nota per tutta la lunghezza del focilizzatore un progressivo aumento del raggio fino al bordo di uscita, a dimostrazione di una crescita non lineare del raggio del focilizzatore sul bordo di uscita stesso. [Nan00].

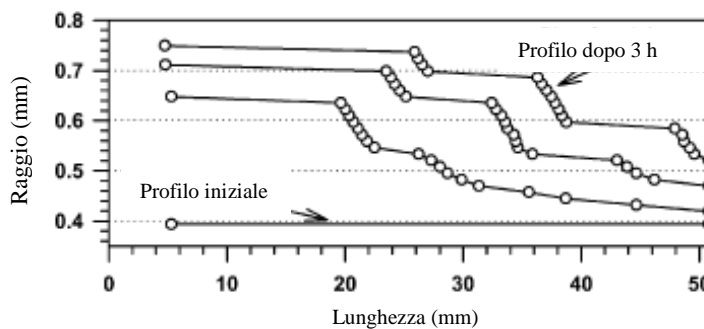


Figura 2. 15 Profilo longitudinale dell'ugello focilizzatore dopo 3 h di utilizzo [Nan00]

Per ugelli focilizzatori ROCTEC 100, molto diffusi in commercio, in condizioni standard di utilizzo della tecnologia AWJ la vita media si attesta attorno alle 50-100 h [Nan00]. Utilizzando tre ugelli ROCTEC 100 (R230_1, R230_2, R230_3) di lunghezza 50,8 mm, con ugello primario 0,25 mm, pressione 310 MPa, e portata di abrasivo di ossido di alluminio 7,6 g/s, l'aumento del diametro del focilizzatore arriva a 0,25 mm in sei ore di utilizzo. Nel medesimo intervallo temporale la perdita di peso si attesta a 1,2 g. [Nan00]:

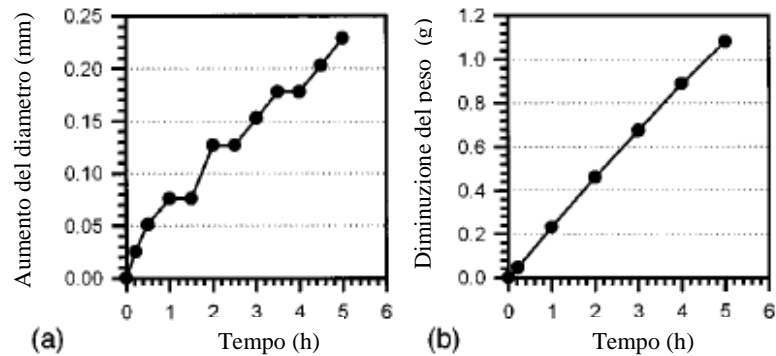


Figura 2. 16 Aumento del diametro di uscita (a) e diminuzione del peso dell'ugello (b) [Nan00]

2.4.2 Parametri di influenza sull'usura dell'ugello

Sia i parametri del processo di taglio che la geometria dell'ugello sono legati al processo di usura dell'ugello stesso.

In seguito sono sintetizzati gli effetti che pressione, portata di abrasivo, diametro dell'ugello primario, diametro iniziale e lunghezza del focalizzatore determinano sul fenomeno di usura.

2.4.2.1 Lunghezza dell'ugello

L'aumento della lunghezza dell'ugello determina una diminuzione dell'usura. La lunghezza dell'ugello ha influenza diretta sull'aumento del diametro di uscita dell'ugello. La variazione del profilo si registra per tutta la lunghezza del bordo (cfr. figura 2.17): all'aumentare della lunghezza diminuisce il valore dell'aumento sul bordo di uscita [Nan02].

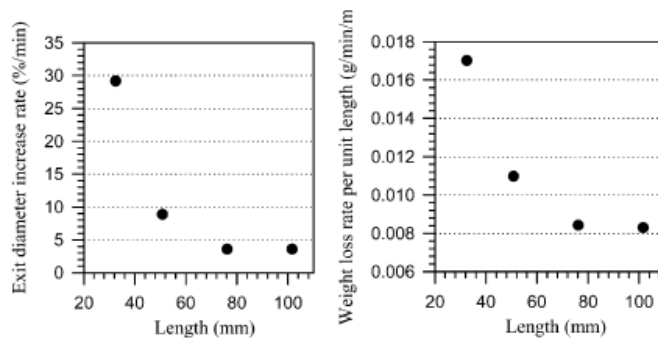


Figura 2. 17 Effetto della lunghezza del focalizzatore sull'usura

2.4.2.2 Angolo d'imbocco

Prove a breve durata (15 min) dimostrano che, all'aumentare dell'angolo, aumenta l'usura dell'ugello. Aumentando la durata delle prove per diversi angoli d'imbocco, si può notare che la vita utile degli ugelli rimane la medesima. [Nan02]. L'andamento della variazione del diametro sulla lunghezza dell'ugello risulta differente a seconda dell'angolo d'imbocco: per angoli maggiori si generano profili interni dell'ugello più ondulati, contribuendo a una crescita non lineare del diametro di uscita; angoli minori, invece, comportano una maggior crescita lineare del diametro d'uscita stesso [Nan02].

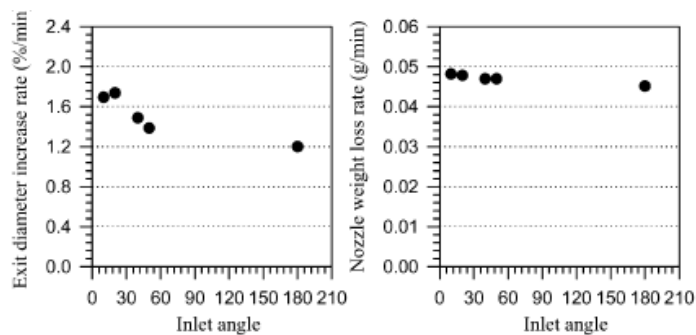


Figura 2. 18 Effetto dell'angolo d'imbocco sull'usura [Nan02]

2.4.2.3 Diametro iniziale del focalizzatore

Il risultato dell'effetto del diametro iniziale sull'usura è sintetizzato in figura 2.19 [Nan02]. La variazione del diametro di uscita è compresa tra 6 (%/min) e 10 (%/min) per diametri iniziali tra 0,6 e 0,8 mm. Successivamente la variazione percentuale del diametro di uscita ritorna ad assestarsi a 6 (%/min) per diametri maggiori a 1,2 mm. La perdita di peso dell'ugello diminuisce progressivamente da 0,7 g/min a 0,4 g/min per diametri iniziali compresi tra 0,6 e 1,8 mm.

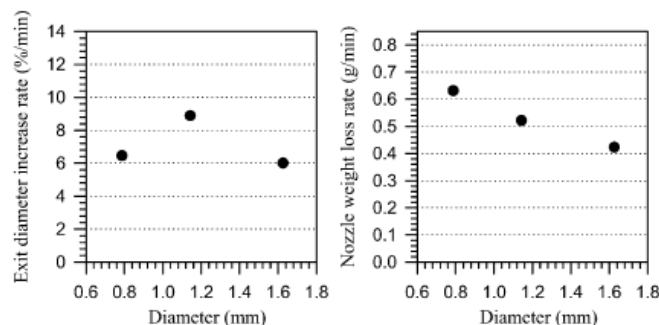


Figura 2. 19 Effetto del diametro iniziale del focalizzatore sull'usura [Nan02]

2.4.2.4 Diametro dell'ugello primario

Il risultato dell'effetto del diametro dell'ugello primario sull'usura del focalizzatore è sintetizzato in figura 2.20 [Nan02]. La curva di variazione del diametro di uscita non suggerisce particolari andamenti dell'usura rispetto al diametro dell'ugello primario. Si assiste ad un aumento della perdita di peso del focalizzatore all'aumentare del diametro dell'ugello primario. [Nan02]

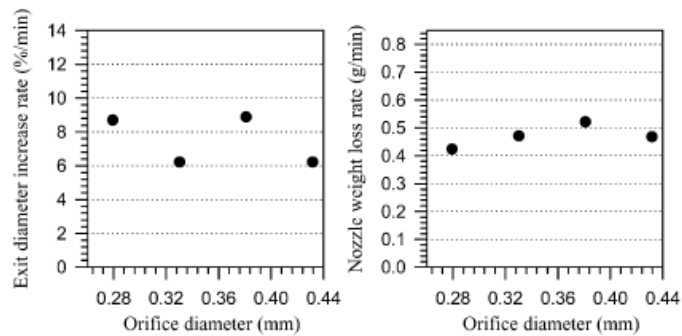


Figura 2. 20 Effetto del diametro dell'ugello primario sull'usura [Nan02]

2.4.2.5 Portata di abrasivo

Sia il diametro di uscita del focalizzatore (%/min) che la perdita di peso (g/min) mostrano un andamento crescente all'aumentare della massa di abrasivo [Nan02]. È da sottolineare che aumentando la portata di abrasivo, aumenta la concentrazione delle particelle nel getto, poiché la portata d'acqua rimane invariata. In questo modo la velocità delle particelle abrasive unite all'acqua diminuisce. Pertanto per un preciso valore di portata di abrasivo il valore dell'usura deve rimanere invariato, questo fenomeno non è stato evidenziato con i valori di portata utilizzati [Nan02].

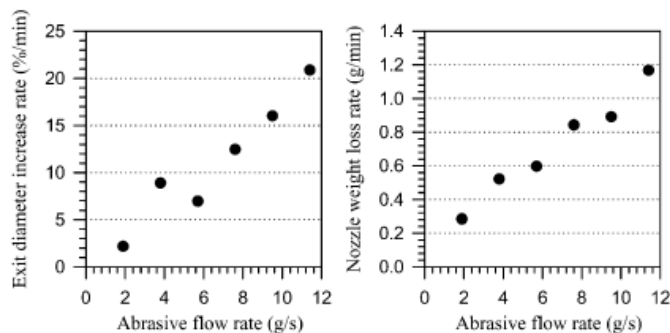


Figura 2. 21 Effetto della portata di abrasivo sull'usura [Nan02]

2.4.2.6 Pressione dell'acqua

L'aumento della pressione dell'acqua comporta un aumento del fenomeno di usura. Come dimostrato dall'andamento del diametro di uscita del focalizzatore (%/min) e dall'andamento della perdita di peso (g/min), si assiste ad un andamento crescente all'aumentare della pressione (figura 2.22) [Nan02]. È da sottolineare che un eccessivo aumento della pressione dell'acqua potrebbe causare una frammentazione delle particelle nel getto idro-abrasivo, riducendo gli effetti di usura: il profilo di usura a 359 MPa risulta attenuato rispetto al profilo a 310 MPa [Nan02].

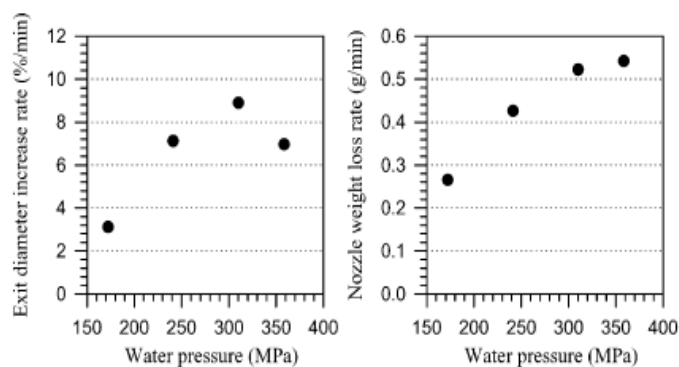


Figura 2. 22 Effetto della pressione sull'usura [Nan02]

2.4.3 Modelli di usura per la stima della vita utile dell'ugello

La stima effettiva a seconda dei parametri scelti nel processo di taglio ha ripercussioni significative sul calcolo dei costi di taglio.

Il costo dell'ugello focalizzatore nei modelli analizzati (cfr. paragrafo 2.2) è inversamente proporzionale alla sua vita utile. La valutazione delle ore effettive che l'ugello può sopportare con i parametri di taglio selezionati, senza raggiungere livelli eccessivi di usura, consente un'analisi accurata dei costi.

In seguito vengono illustrati due modelli per l'analisi dell'usura: il primo, elaborato da M. Nanduri e al., si basa sulla stima dell'usura tramite la perdita in peso dell'ugello; il secondo, elaborato da V.N. Pi e A.M. Hoogstrate, si basa sull'incremento del diametro di uscita del focalizzatore.

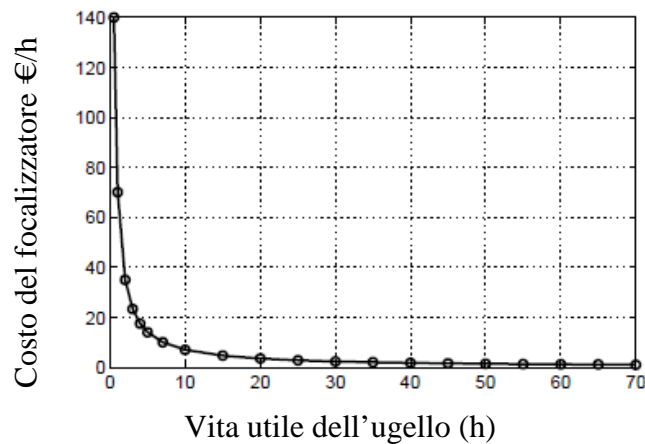


Figura 2. 23 Costi di usura del focalizzatore e vita utile dell'ugello, Cf=70 €/pezzo [Pi05]

2.4.3.1 M. Nanduri, D.G. Taggart, T.J. Kim

L'approccio seguito dagli autori consiste nella valutazione dell'usura dell'ugello tramite la perdita di peso dell'ugello stesso, a causa dei fenomeni di rimozione del materiale dovuti all'elevata velocità delle particelle di abrasivo che impattano sulle pareti.

La perdita di peso dell'ugello dipende da parametri di processo e parametri geometrici (cfr. paragrafo 2.4.2), per cui: definiti

- p_w : pressione del getto,
- d_{ori} : diametro dell'ugello primario
- m_a : portata di abrasivo,
- $d_{f,0}$: diametro iniziale dell'ugello focalizzatore,
- L_f : lunghezza dell'ugello focalizzatore

e indicata con \dot{W}_N la perdita di peso in (g/min/mm), l'equazione (ugelli WC/Co) risulta [Nan02]:

$$\dot{W}_N = 8,07 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{p_w^{0,9} \cdot d_{ori}^{0,38} \cdot \dot{m}_a^{0,7}}{d_{f,0}^{0,5} \cdot L_f^{0,8}} \quad (2. 60)$$

2.4.3.2 V.N. Pi, A.M. Hoogstrate

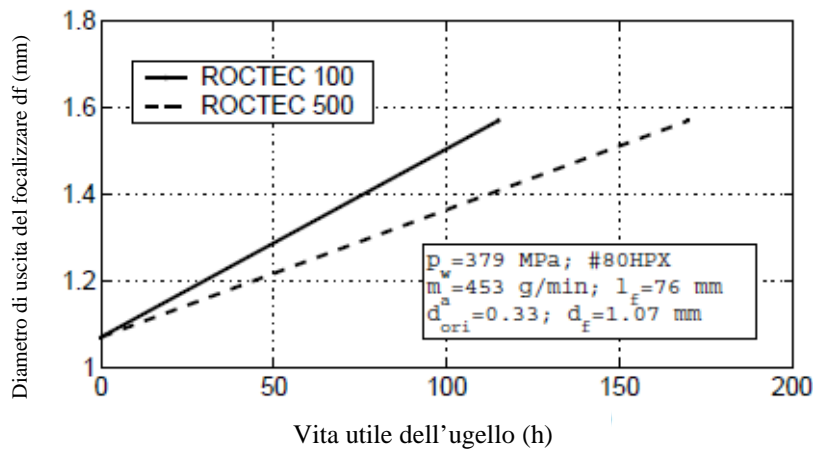


Figura 2. 24 Vita utile dell'ugello e andamento del diametro di uscita [Pi05]

L'usura del focalizzatore viene quantificata dagli autori attraverso l'aumento del diametro di uscita. La relazione lineare che lega la vita utile dell'ugello alla variazione del diametro di uscita viene calcolata come:

$$L_f = (d_f - d_{f,0}) / \dot{\delta}_{df} \quad (2. 61)$$

Dove:

- L_f rappresenta la vita in ore dell'ugello
- d_f , diametro del focalizzatore all'istante "t"
- $d_{f,0}$, diametro del focalizzatore all'istante iniziale

Il diametro d_f è calcolato con un aumento del 20% rispetto alla condizione iniziale. L'istante "t" corrisponde al momento in cui il diametro iniziale ha subito un incremento del 20%.

- $\dot{\delta}_{df}$ rappresenta il tasso di usura (m/h) a cui è soggetto il focalizzatore in funzione dei parametri di taglio impostati.

Utilizzando ugelli ROCTEC 100 con abrasivo garnet 80# e impostati

- p_w : pressione del getto,
- d_{ori} : diametro dell'ugello primario

- \dot{m}_a : portata di abrasivo
- $d_{f,0}$: diametro iniziale dell'ugello focalizzatore,
- l_f : lunghezza dell'ugello focalizzatore

il tasso di usura in m/h è calcolato come ($R^2=0,97$):

$$\dot{\delta}_{df} = \frac{0,0015 \cdot p_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \quad (2.62)$$

Capitolo 3: Schiume metalliche, caratteristiche e applicazioni

Negli ultimi anni è stata sviluppata una serie di materiali di grande interesse per il settore della ricerca, conosciuti come “smart materials”. Le applicazioni di questi materiali, cellulari e non, sono rivolte al campo dell’ingegneria per alleggerimento di strutture, per l’assorbimento di energia meccanica, onde sonore e vibrazioni, per la schermatura da onde elettromagnetiche e per l’isolamento termico; fra questi materiali vi sono le schiume metalliche e quelle polimeriche. Dal punto di vista ingegneristico diverse proprietà delle schiume metalliche sono migliori rispetto a quelle delle schiume polimeriche; infatti le prime sono più rigide di un ordine di grandezza, hanno un punto di fusione superiore, possiedono, quindi, una maggiore resistenza al fuoco e nel caso di scoppio di un incendio nell’ambiente in cui sono applicate non emettono sostanze nocive [Bas07]. Un ulteriore vantaggio, non trascurabile, delle schiume metalliche è la loro riciclabilità: oltre al campo ingegneristico, infatti, anche l’opinione pubblica preme sempre di più verso lo studio, la realizzazione e l’impiego di nuove classi di materiali che abbiano un basso impatto ambientale [Ber07].

Il presente capitolo ha lo scopo di illustrare e presentare le tecniche di produzione e le principali applicazioni delle schiume metalliche. Le proprietà delle schiume e dei materiali cellulari dipendono, infatti, non solo dalle caratteristiche del metallo di base, dalla densità relativa e dalla distribuzione del metallo all’interno della struttura (a celle aperte o chiuse, a celle grandi o piccole), ma anche dalla tecnica applicata per produrle.

Lo studio del taglio delle schiume metalliche presuppone, quindi, l’analisi e la conoscenza del materiale stesso, partendo sia dalle caratteristiche chimiche e fisiche che dalle tecniche di produzione.

Per definire le funzioni obiettivo nell’ottimizzazione delle condizioni di taglio con tecnologia water jet, il punto di partenza è l’analisi delle applicazioni per cui i pannelli sono indirizzati. Tale analisi ha lo scopo di individuare quale prestazione di taglio ricercare, sia in riferimento a parametri di produttività (velocità massima al limite di taglio) e ottimizzazione dei costi, sia a parametri macrogeometrici (ampiezza del solco, profondità del solco, conicità e arrotondamento del bordo) e microgeometrici (rugosità e ondulazione).

Nel caso del taglio delle schiume metalliche le valutazioni microgeometriche sono difficoltose se non impossibili e per questo l’indagine non si concentrerà sulla qualità microgeometrica del taglio, preferendo altresì gli aspetti economici produttivi e riguardanti la qualità macrogeometrica del solco.

3.1 Definizione di schiuma metallica

È necessario precisare il significato del termine schiuma metallica, che molto spesso è utilizzato in modo generico per descrivere materiali che non sono schiume in senso stretto [Ban00]:

- Metalli cellulari: è il termine più generico che indica una struttura metallica nella quale sono dispersi vuoti gassosi di vario tipo. La fase metallica è suddivisa in celle, che contengono fase gassosa.
- Metalli porosi: sono un particolare caso di metalli cellulari; i pori gassosi sono generalmente circolari e isolati gli uni dagli altri.
- Schiume metalliche (solide): sono una classe particolare di metalli cellulari. Le celle sono chiuse, rotonde o poliedriche e separate le une dalle altre da una parete sottile.
- Spugne metalliche: la morfologia è quella dei materiali cellulari, in genere con vuoti interconnessi. Diversamente dalle schiume, le spugne metalliche non presentano la cella chiusa, ma cella aperta.

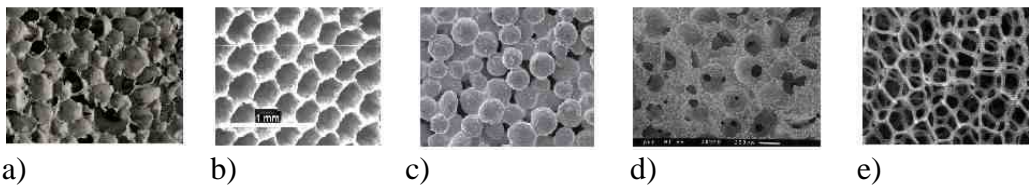


Figura 3.1 a) schiuma di alluminio, b) metallo cellulare a base di ferro, c) spugna metallica da bronzo sinterizzato, d) spugna di alluminio, e) spugna di nichel

Le schiume a celle chiuse sono caratterizzate da bolle separate e trovano applicazione come materiali strutturali al fine di aumentare la rigidezza, diminuire il peso, smorzare le vibrazioni di una struttura o assorbire urti. In commercio sono reperibili schiume realizzate in alluminio, zinco e piombo, ma in laboratorio sono state ottenute anche schiume in magnesio, stagno e ottone, sebbene per il momento alcune siano da considerarsi disponibili solo per applicazioni di ricerca. La percentuale di porosità ottenibile all'interno di una schiuma metallica è compresa tra 60% e 97% circa, a seconda del particolare processo di produzione utilizzato [Ber07].

Le spugne, materiali porosi a celle aperte, sono caratterizzate da cavità collegate fra loro e trovano impiego come materiali per filtri, catalizzatori, assorbitori di rumore e scambiatori di calore; la porosità delle schiume è compresa tra il 20% e 97% [Ber07].

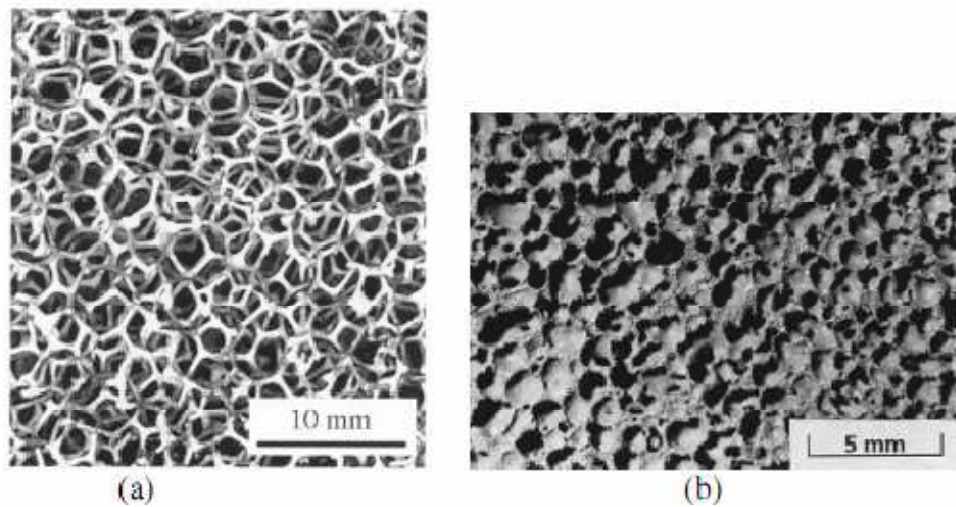


Figura 3. 2 (a) Struttura a celle aperte: spugne metalliche [Ash00]; (b) Struttura a celle chiuse :schiume metalliche [Ash00]

3.2 Generalità sulle schiume metalliche

La caratterizzazione delle schiume metalliche è ben riassunta dalla descrizione di due proprietà fondamentali: la densità relativa e il tipo della struttura, cioè se la schiuma è a celle aperte (spugna metallica) o chiuse.

Le proprietà delle schiume sono influenzate dalla morfologia della loro struttura, in particolare dall'anisotropia e da possibili difetti, forma e dimensione delle bolle. Come è già noto, le schiume metalliche sono materiali ultraleggeri fortemente porosi e raggiungono densità di circa cinque volte inferiori rispetto a quella del metallo base.

La porosità viene calcolata mediante la seguente espressione generale [Ash00]:

$$p = \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right] \cdot 100 \quad (3.1)$$

dove il rapporto $\left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)$ rappresenta la densità relativa, ρ densità della schiuma e ρ_s densità della lega di base.

Alcune delle proprietà meccaniche della schiuma possono essere espresse in funzione della densità relativa, come ad esempio la conduttività termica ed elettrica, il modulo di elasticità e lo sforzo di snervamento. L'espressione generale della dipendenza dalla densità relativa è [Ash00]:

$$\frac{K}{K_s} = z \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^t \quad (3.2)$$

K indica la proprietà della schiuma considerata, K_s la proprietà della lega di base, z e t sono delle costanti empiriche che dipendono dalla struttura del materiale e dalla specifica proprietà presa in considerazione. Nel caso si voglia determinare il modulo di Young ed il modulo a taglio l'espressione sarà riscritta come

$$\frac{E}{E_s} \approx \alpha \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \quad (3.3)$$

$$\frac{G}{G_s} \approx \frac{3}{8} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \quad (3.4)$$

Se si considera il caso di compressione con carico monotono, i valori da assegnare alle costanti empiriche sono presenti in letteratura ed ottenuti a seguito di campagne sperimentali [Ash00]: il valore di n è compreso tra $1.8 \div 2.2$, mentre α tra $0.1 \div 4$.

3.3 Tecniche di preparazione

Le tecniche di preparazione delle schiume metalliche e di altri materiali con strutture cellulari sono suddivise a seconda dello stato di partenza della matrice. Le tecniche di produzione possono essere sintetizzate secondo quattro tipologie [Ban01]:

- metallo liquido
- metallo solido in forma di polvere
- vapori di metallo o composti metallici gassosi
- soluzioni di ioni metallici

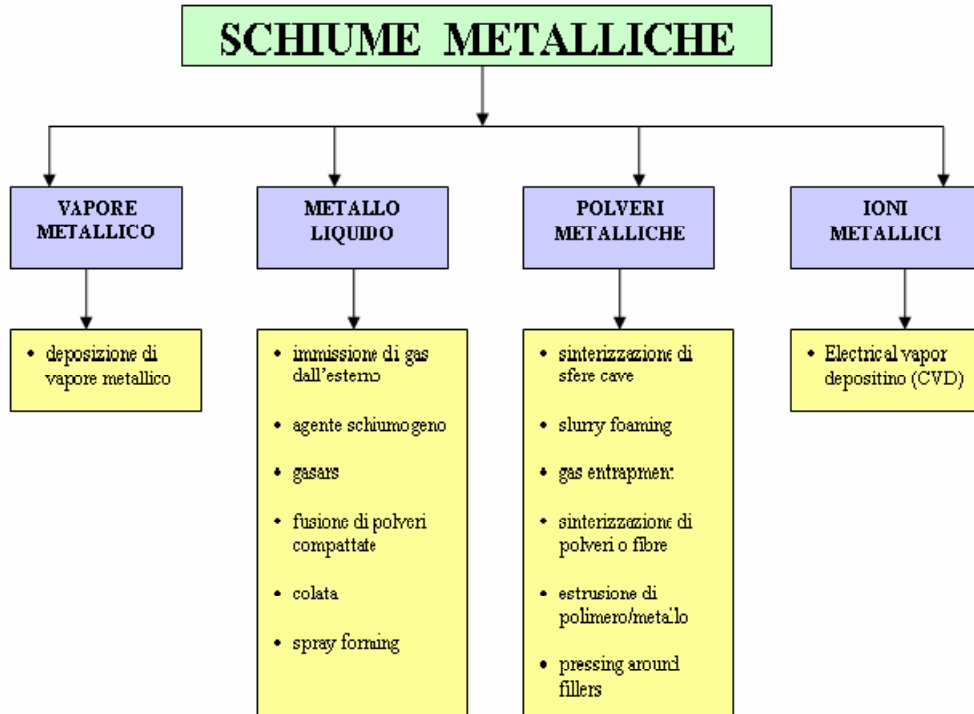


Figura 3. 3 Schema dei principali metodi di produzione delle schiume metalliche [Ber07]

La tecnica di preparazione viene selezionata in base alla matrice di partenza e da tale scelta dipende il grado di porosità del materiale finale [Ban01].

I processi produttivi delle schiume, oltre a influenzarne le proprietà, ne impongono il campo di applicazione. Le schiume prodotte da precursore solido sono adatte ad applicazioni di carattere strutturale, irrigidimento interno, smorzamento delle vibrazioni; le schiume prodotte a partire da matrice liquida sono impiegate, invece, per la produzione di pannelli di grandi dimensioni con funzioni di assorbimento di energia.

Allo stato attuale sono stati studiati, ed in parte sviluppati, vari processi diversi tra loro. Nella produzione commerciale, però, solamente alcuni sono effettivamente utilizzati [Ban01]. Ogni metodo può impiegare un gruppo limitato di metalli o leghe al fine di ottenere un materiale poroso con densità relativa e dimensione di cella che cadano in un intervallo specifico.

Tabella 3. 1 Processi di produzione per metalli cellulari e schiume metalliche [Ban01]

Processo	Porosità (%)	Metallo	In commercio?
Metallo liquido			
<i>Immissione di gas dall'esterno</i>	80-97,5	<i>Al, Zn</i>	<i>Sì</i>
<i>Tramite agente schiumogeno a rilascio di gas nel fuso</i>	91-93	<i>Al, Zn</i>	<i>Sì</i>
<i>Gasars</i>	5-75	<i>Ni, Cu, Al, Mg</i>	<i>No</i>
<i>Formazione del precursore a partire da bagno liquido</i>	60-90	<i>Al, Zn, Pb</i>	<i>Sì</i>
<i>Colata in stampo su schiume polimeriche</i>	80-97	<i>Al, Zn</i>	<i>Sì</i>
<i>“Lattice Block Materials”(LBM)</i>	-	<i>Al</i>	<i>No</i>
<i>Colata su sfere cave</i>	≤ 65	<i>Al, Zn, Pb, Cu</i>	<i>Sì</i>
<i>“Osprey process”</i>	≤ 60	<i>Acciaio, Cu</i>	<i>No</i>
Polveri metalliche			
<i>Sinterizzazione</i>	20-80	<i>Bronzo, Acciaio</i>	<i>Sì</i>
<i>Intrappolamento di gas</i>	≤ 45	<i>Ti</i>	<i>No</i>
<i>Slurries foaming</i>	≤ 93	<i>Al</i>	<i>No</i>
<i>Pressatura delle polveri attorno a spazi vuoti</i>	≤ 70	<i>Ti</i>	<i>No</i>
<i>Strutture a sfere cave</i>	≤ 80	<i>Acciaio</i>	<i>No</i>
<i>Reaction sintering</i>	≤ 50	<i>Fe, Cu</i>	<i>No</i>
Ioni metallici			
<i>Elettrodeposizione</i>	92-95	<i>Ni, Cu</i>	<i>Sì</i>
Vapore metallico			
<i>Vapori di metallo</i>	93-97,5	<i>Ni, Ni-Cr, Cu</i>	<i>Sì</i>

3.3.1 Formazione di metalli cellulari da stato liquido

3.3.1.1 Schiumatura tramite iniezione di gas

Questa tecnica di schiumatura dei metalli interessa principalmente l'alluminio e le sue leghe ed è utilizzato da *Hydro Aluminium* in Norvegia e da *Cymat Aluminium* in Canada, che sfruttano metodi e brevetti sviluppati da *Alcan International* (Canada) [Ban01].

In questo processo la fase iniziale consiste nella preparazione della colata di alluminio: per aumentare la viscosità del bagno fuso e quindi impedire lo scorrimento del liquido sulla membrana delle bolle, è necessario aggiungere carburi di silicio, ossido di alluminio o ossido di magnesio [Ban01]. In seguito si iniettano i gas inerti (aria, argo, azoto, anidride carbonica) tramite ventole o ugelli vibranti, per ottenere bolle uniformemente distribuite. Le bolle formate galleggiano fino a raggiungere la superficie fusa, defluiscono e quindi incominciano a solidificare. Dal processo si possono ottenere lastre di un metro e di spessore fino a 20 cm [Ber07]. La densità relativa ottenibile dal processo è compresa fra 0,05 e 0,1 e il processo descritto è utilizzato esclusivamente per schiume in alluminio [Ash00].

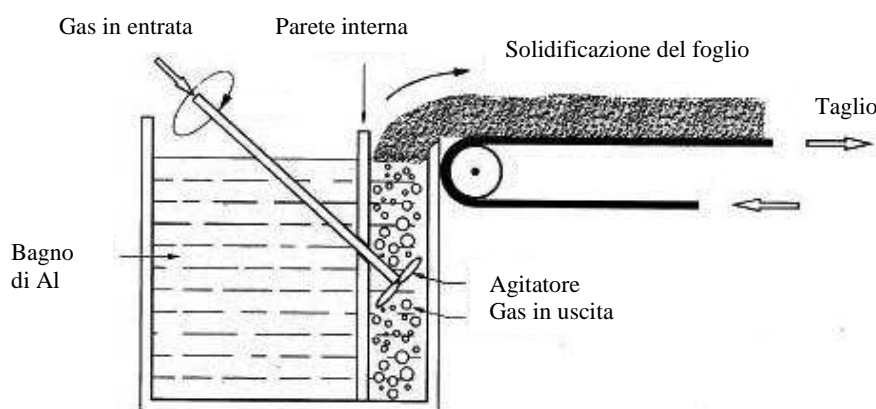


Figura 3. 4 Schiumatura mediante iniezione di gas

3.3.1.2 Schiumatura tramite agente schiumogeno a rilascio di gas nel fuso

In questo processo si aggiunge direttamente un agente schiumogeno al metallo fuso. L'agente, sotto effetto del calore, si decompone e libera il gas che aziona il processo di schiumatura. Dopo aver portato l'alluminio fuso alla temperatura di 680° , si aggiunge calcio. La viscosità della colata aumenta anche di cinque volte per la formazione di ossidi di calcio (CaO), ossidi di calcio e alluminio (CaAl_2O_4) o magari Al_4Ca ; successivamente si aggiunge l'agente schiumogeno [Ban01]. L'idruro di titanio, utilizzato come agente schiumogeno, si decompone

in titanio e idrogeno gassoso quando viene scaldato intorno ai 465°C: in questo modo si producono grandi quantità di idrogeno gassoso che concorrono alla formazione di bolle nel fuso [Ber07]. La schiumatura avviene a pressione costante. Le schiume formate in questo modo prendono il nome di “Alporas” e sono tra le schiume a celle chiuse che presentano una struttura più omogenea [Ban01]. Questo processo viene utilizzato per fabbricare solo schiume con leghe di alluminio, perché l'idrogeno tende a instaurare fenomeni corrosivi se viene a contatto con determinati metalli e perché la decomposizione avviene troppo velocemente in leghe che hanno il punto di fusione troppo alto [Ber07].

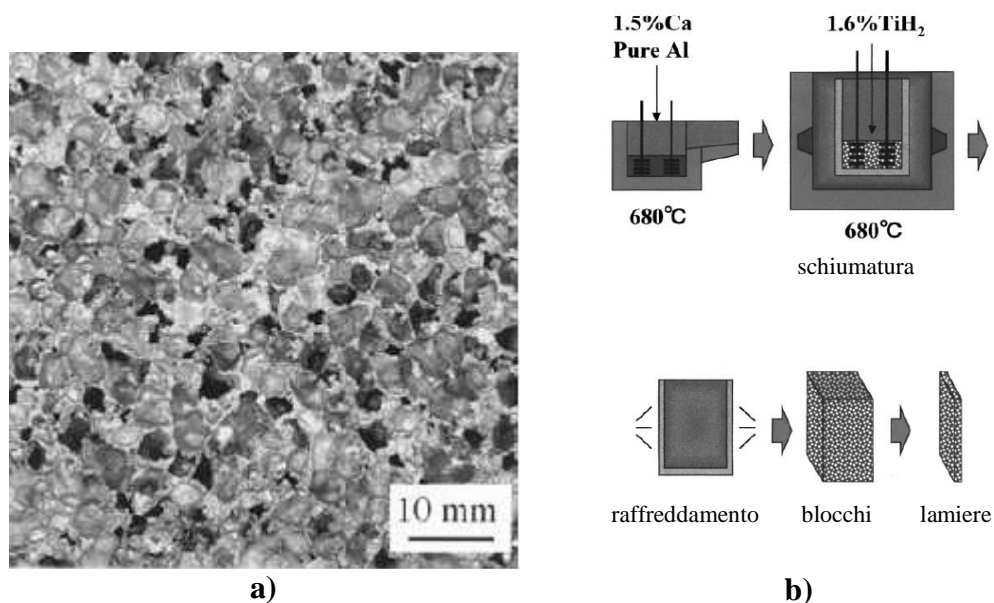


Figura 3. 5 a) Schiuma Alporas [Ash00]; b) Schiumatura con aggiunta di agente schiumogeno “Alporas”-process [Ban01]

3.3.1.3 Solidificazione eutettica solido-gas “GASAR”

Molti diagrammi bifasici idrogeno-lega metallica mostrano una composizione eutettica. Le leghe in analisi possono essere a base di alluminio, berillio, cromo, rame, ferro, magnesio, manganese e nichel; tali leghe possono essere rese fuse, essere rese saturate con idrogeno e poi solidificate direzionalmente: i materiali così ottenuti sono chiamati *GASARs* o *GASERITE* [Ber07]. Portando a fusione uno di questi metalli in un'atmosfera di idrogeno a 50 atm, si ottiene una colata omogenea con idrogeno. Dal raffreddamento il metallo in stato liquido passa a composto eterogeneo a due fasi “solido + liquido”; pressione e temperatura devono essere scelte in modo da garantire il mantenimento delle bolle nella zona di solidificazione, evitando la loro dissoluzione nella fase liquida [Ban01].

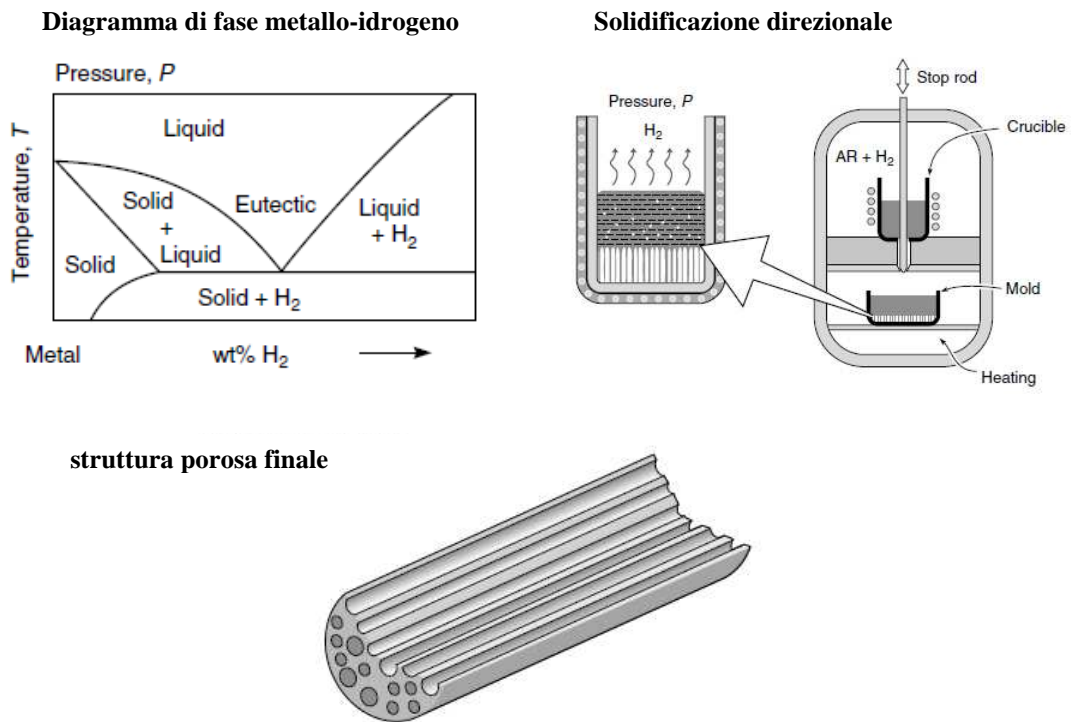


Figura 3. 6 schema di produzione per la solidificazione dell'eutettico gas-metallo [Ash00]

3.3.1.4 Processo con formazione del precursore a partire dal bagno liquido (FORMGRIP)

Il processo FORMGRIP è un processo ibrido, infatti permette di ottenere schiuma metallica a partire da un materiale solido, detto precursore, che è stato a sua volta ottenuto a partire da un bagno liquido di metallo (Al puro o leghe). Particelle di idruro di titanio vengono inserite all'interno del bagno liquido che viene poi rapidamente raffreddato al di sotto della temperatura di fusione del metallo prescelto. Al fine di evitare il prematuro sviluppo di idrogeno si rende necessario [Ber07]:

- 1) passivare il TiH_2 al fine di creare una barriera protettiva che ne inibisca la rapida reazione a contatto col bagno liquido. Ciò si ottiene attraverso un processo di ossidazione della superficie esterna delle particelle con formazione di uno strato di TiO ;
- 2) prevedere una rapida solidificazione del bagno dopo il mescolamento con l'agente schiumogeno, al fine di intrappolare le bolle nella matrice metallica prima della loro decomposizione.

L'omogenea distribuzione dell'idruro di titanio all'interno del materiale fuso viene garantita attraverso un continuo mescolamento del bagno. La stabilità del processo viene incrementata aggiungendo particelle ceramiche (SiC) in quantità pari al 10÷15% del volume del bagno liquido [Ber07]. Il precursore viene quindi colato all'interno di una forma e solidificato. A questo punto la schiumatura avviene seguendo lo stesso procedimento adottato per la tecnica in 3.3.2.1.

3.3.1.5 Metodi di colata

I materiali metallici cellulari possono essere prodotti da metallo liquido senza che il processo di schiumatura coinvolga direttamente il metallo fuso [Ban01]. Alcuni processi prevedono infatti l'utilizzo iniziale di matrici polimeriche o a sfere a bassa densità [Ban01]. Queste tecniche di produzione di spugne metalliche partono dall'acquisizione di spugne polimeriche a celle aperte che vengono sfruttate per realizzare un calco in materiale da fonderia, che a sua volta rappresenta il negativo del prodotto finito.

Attorno ai reticoli polimerici si aggiunge materiale refrattario. Una volta rimossa la matrice polimerica, si aggiunge la colata nei vuoti così ottenuti. Rimosso il materiale refrattario si ottiene una struttura metallica reticolare che riproduce esattamente l'iniziale reticolo polimerico [Ban01].

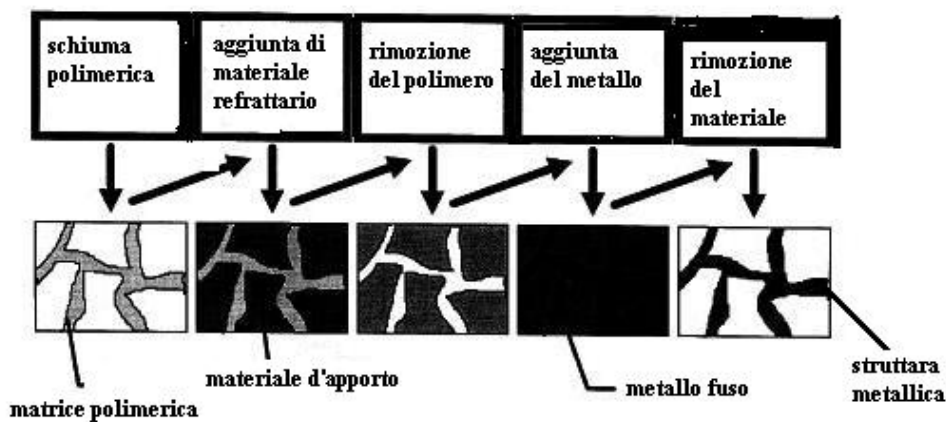


Figura 3. 7 Produzione di materiali metallici cellulari tramite solidificazione in stampo [Ban01]

Il metodo appena descritto viene utilizzato da ERG in Oakland (USA) per produrre spugne *Duocel* [Ban01]. Il metodo permette di ottenere spugne (cella aperta) con dimensioni del poro tra 1-5 mm e densità relativa di 0,05 [Ash00].

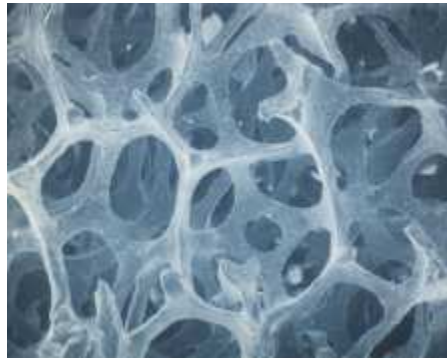


Figura 3. 8 Rappresentazione della struttura della spugna di alluminio Duocel

La matrice polimerica può essere sostituita da strutture di lattice e sarà utilizzata per creare metalli a elevata porosità dal nome “*Lattice Block materials*” (LBMs) le cui dimensioni dei pori sono comprese tra 1,5 e 3,8 mm [Ban01] [Ash00]. Si possono utilizzare, inoltre, sfere o strutture granulari che saranno la base per i successivi spazi vuoti. La distribuzione e la dimensione dei vuoti nella spugna finale, sarà quindi direttamente controllata dalla struttura granulare o sferica di partenza. Come matrice granulare si possono utilizzare sali solubili [Ash00], granuli di sabbia e sfere in ossido di alluminio; come materiali di colata sono utilizzabili, invece, alluminio, magnesio, zinco, rame [Ban01].

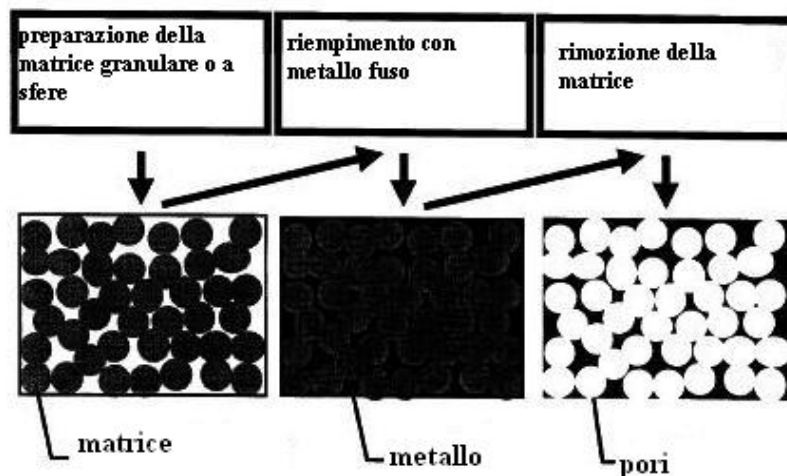


Figura 3. 9 Produzione di materiali metallici cellulari tramite matrici granulari

Accanto a queste due tecniche un altro metodo (“*Osprey process*”) consiste nel nebulizzare metallo allo stato liquido, creando gocce allo scopo di farle crescere su una matrice esterna (fogli, tubi, billette): in questo modo si ottengono grani di piccole dimensioni) [Ban01].

3.3.2 Formazione di metalli cellulari da stato solido: compattazione di polveri metalliche

I processi di schiumatura da metalli allo stato solido seguono la medesima logica dei processi che partono da stato liquido con la differenza che la colata di metallo è sostituita dall'utilizzo di polveri di metallo. Per tutto il processo che conduce alla formazione di schiume metalliche, le polveri rimangono solide e passano attraverso un processo di sinterizzazione o in altri trattamenti allo stato solido [Ban01].

3.3.2.1 Decomposizione di particelle che rilasciano gas in semi-solidi

L'idruro di titanio inizia a decomporsi rapidamente a circa $465^{\circ}C$, temperatura ben al di sotto del punto di fusione dell'alluminio ($660^{\circ}C$) e delle sue leghe. Grazie a questa proprietà, risulta interessante produrre schiume metalliche a celle chiuse a partire da un materiale solido, detto precursore, ottenuto usando tecniche proprie della metallurgia delle polveri [Ash00]. Tale materiale, se riscaldato nell'intervallo compreso tra la linea del liquidus e quella del solidus della lega prescelta, raggiunge uno stato semi-solido, fortemente viscoso, che oppone bassa resistenza alla dispersione, al suo interno, di particelle di idrogeno gassoso; ciò porta alla formazione di una struttura porosa. Alcuni gruppi di ricerca hanno lavorato su questo approccio, e MEPURA ha realizzato una schiuma denominata ALULIGHT [Ber07].

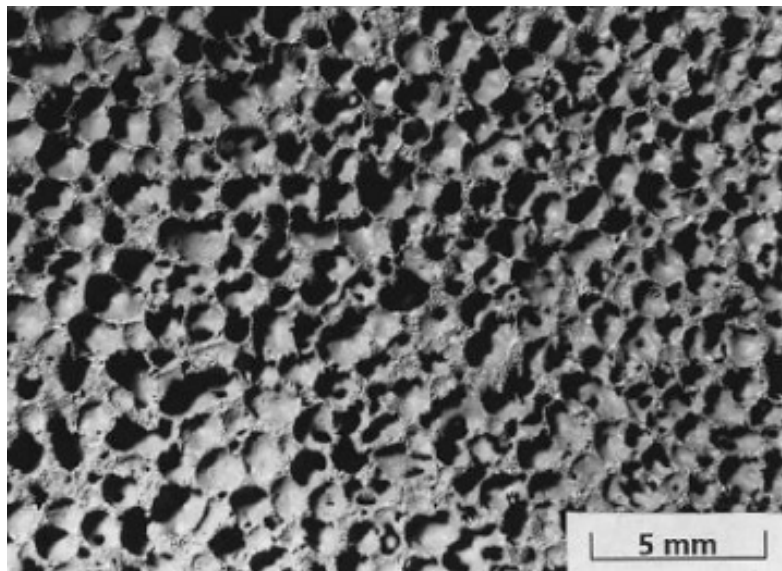


Figura 3. 10 Micrografia di schiuma *Alulight* [Ban01]

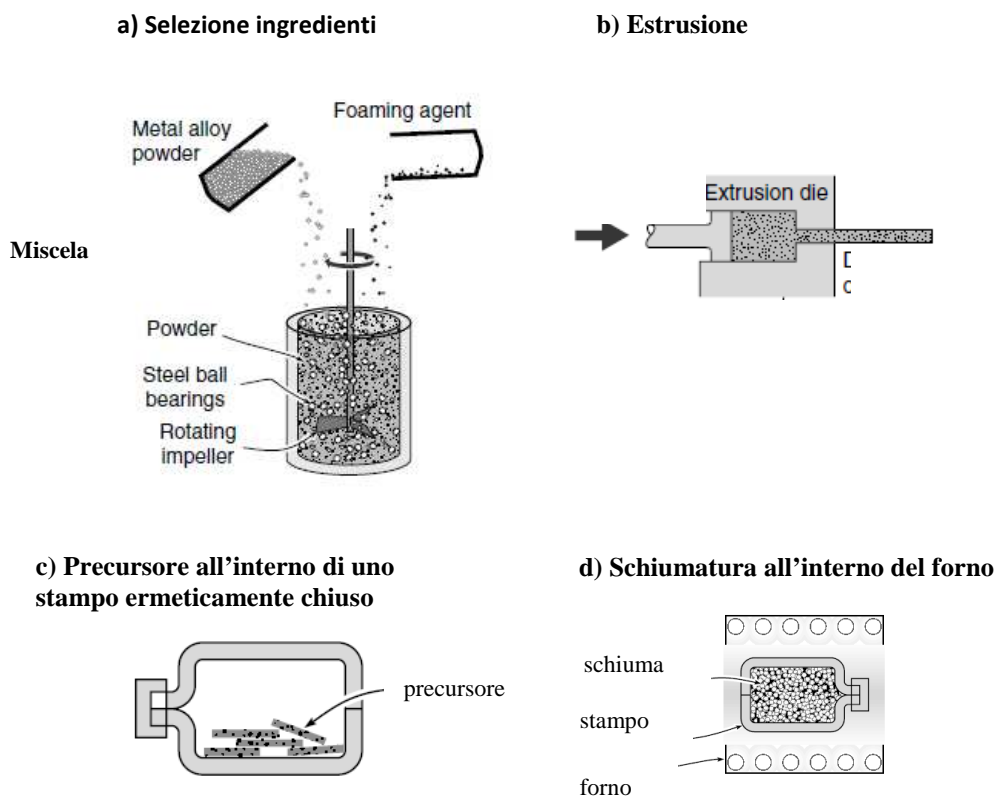


Figura 3. 11 schema di decomposizione di particelle che rilasciano gas in semi solidi, schiume *Alulight* [Ash00]

Come si vede in fig.3.11, l'idruro di titanio si decompone creando bolle che si espandono sfruttando lo stato semi-solido della matrice: la pastiglia originaria si gonfia e la schiuma così originata riempie lo stampo.

Le leghe che vengono maggiormente impiegate in questo processo sono, oltre all'alluminio, le leghe serie 2xxx e 6xxx. AlSi7Mg e AlSi12. Queste leghe presentano un basso punto di fusione e buone proprietà per la schiuma. Se si presta attenzione alla regolazione dei parametri di processo, tutte le leghe di alluminio possono essere utilizzate per la produzione di schiume metalliche.

Le curve di espansione per la tecnica in analisi sono visibili in fig. 3.12, in cui si può analizzare l'andamento del volume della schiuma in funzione del tempo di schiumatura. Come si vede, il volume della schiuma presenta un rapido aumento fino ad un livello massimo: successivamente seguono la fase di collasso e drenaggio. Dall'immagine si può osservare una crescita costante e omogenea del diametro delle bolle, fino al punto di massima espansione; successivamente è

evidente il collasso nella zona superiore e il drenaggio nella zona inferiore [Ban01]. Nel caso di esposizione della schiuma per lungo tempo alle alte temperature, il processo di schiumatura può essere caratterizzato da processi degenerativi, sintetizzati in:

- drenaggio
- coalescenza
- collasso

Il drenaggio rappresenta il flusso di liquido che attraversa le pareti della schiuma e ne fuoriesce per effetto gravitazionale. Esso determina una variazione della distribuzione della densità del materiale lungo l'asse verticale.

La coalescenza rappresenta la crescita di alcune bolle a scapito di altre. La ragione principale di questo fenomeno è dovuta alla diffusione di gas da una cella all'altra [Ban99]. I pori presentano al loro interno una pressione del gas che è inversamente proporzionale alle loro dimensioni. Lunghe permanenze ad elevate temperature determinano la scomparsa delle bolle più piccole, che presentano le pressioni interne maggiori, con conseguente cessione del loro gas a quelle più grandi.

Il collasso rappresenta il fenomeno di cedimento delle celle che rilasciano il loro gas nell'atmosfera esterna, con conseguente contrazione ed ossidazione delle pareti delle stesse [Ban99].

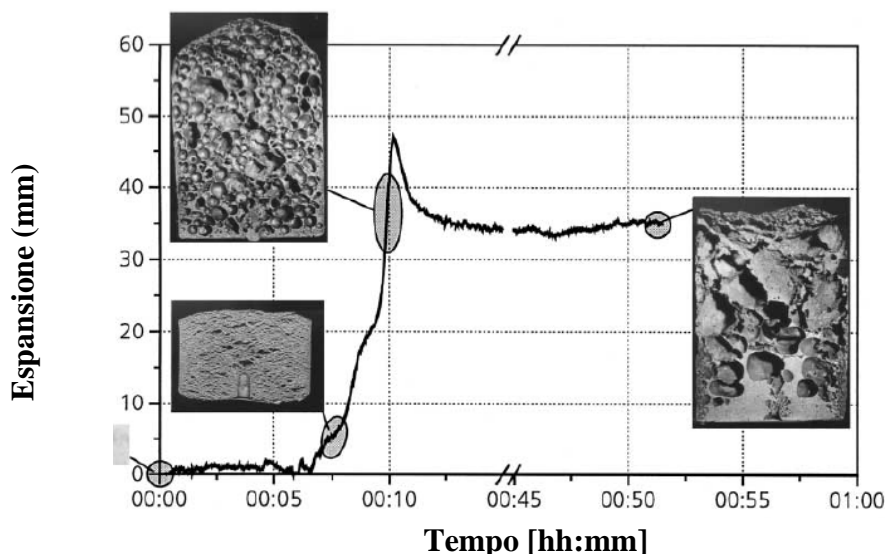


Figura 3. 12 Rappresentazione dell'espansione del precursore all'aumentare del tempo di permanenza all'interno del forno mantenuto alla temperatura di 750°C [Ban01]

Con una variante al processo descritto si possono realizzare pannelli sandwich inserendo le barrette di precursore tra le due lamine di lega di alluminio. L'insieme subisce una laminazione a caldo in modo da formare una struttura con pareti sottili di lega di alluminio e un'anima di precursore solido. La struttura sandwich viene pressata fino a farle raggiungere la forma voluta e successivamente messa in forno dove avviene la schiumatura [Ban01].

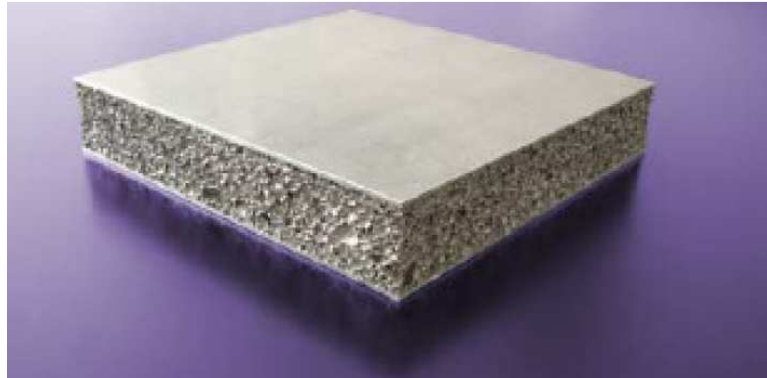


Figura 3. 13 Esempio di struttura sandwich [Ber07]

3.3.2.2 Sinterizzazione di polveri metalliche

I materiali utilizzati per la sinterizzazione delle polveri includono il titanio e le sue leghe, ma anche il bronzo e gli acciai inossidabili per le numerose applicazioni sul mercato. In generale questa tecnica di produzione prevede la preparazione e la successiva compattazione delle polveri e infine la sinterizzazione. La preparazione di metalli porosi partendo da leghe di alluminio è più difficoltosa rispetto all'utilizzo dei materiali sopraccitati, in quanto l'alluminio è in genere ricoperto da un denso strato di ossido che ostacola il processo di sinterizzazione dei granuli [Ban01].

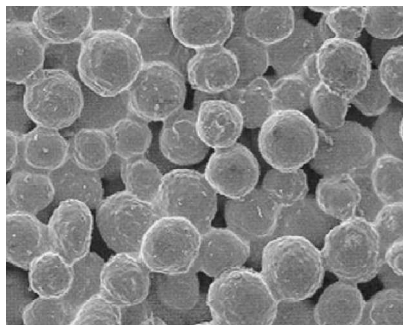


Figura 3. 14 Bronzo poroso sinterizzato da granuli di diametro di circa 100 μm [Ban01]

3.3.2.3 Espansione di gas intrappolato

La solubilità di gas inerti (quali argon e neon), solitamente, è molto bassa nei metalli. Usando metodi che vengono dalla metallurgia delle polveri, sono state sviluppate nuove tecnologie per fabbricare materiali con una dispersione interna di piccoli pori che contengono gas inerte ad alta pressione. Questo processo di fabbricazione è stato usato dalla Boeing per creare pannelli sandwich con anima a bassa densità (LowDensityCore) TiAl6V4 con frazione di pori che raggiungano il 50% del volume complessivo [Ash00].

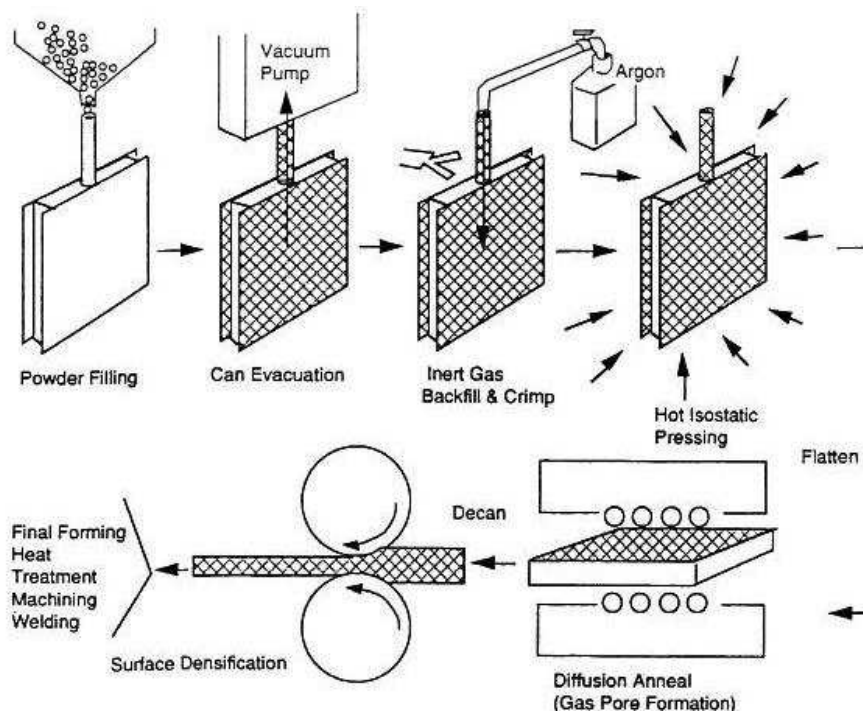


Figura 3. 15 Tecnica a “intrappolamento di gas” [Ban01]

Come si vede in fig. 3.15 il processo comincia intrappolando il gas inerte in una lega di titanio: a questo scopo si può sigillare polvere di Ti-6Al-4V in una scatola fatta della stessa lega. La scatola viene poi messa sotto vuoto per eliminare qualsiasi sorgente di ossigeno che possa ossidare il titanio e poi riempita con 3÷5 atm di argon; il contenitore viene quindi sigillato e compresso in una massa compatta ad un’alta densità relativa (0.85÷0.95) attraverso l’applicazione di una pressione idrostatica a caldo. Successivamente il campione si sottopone ad un processo di laminazione per rompere la struttura dei pori e creare così una distribuzione più omogenea di pori più piccoli. Nelle leghe di titanio la laminazione a 900÷940° C provoca un appiattimento e un allungamento delle bolle nella direzione di laminazione. Appiattendosi, le cavità formano facce di contatto e queste si legano rapidamente per diffusione creando

strisce di piccoli pori riempiti da gas. Il passaggio finale del processo è l'espansione: essa può essere ottenuta mettendo il componente in forno a 900°C per 20÷30 ore [Ash00]. Il risultato è dato da pannelli sandwich con cuore in schiume a porosità inferiore al 50% [Ban01] e dimensione dei pori compresa fra i 10 e i 300 μm [Ash00].

3.3.2.4 Strutture a sfere cave

Sfere cave di nichel, rame, o titanio possono essere usate per creare materiali a elevata porosità dall'unione delle singole sfere tramite un processo di sinterizzazione [Ban01]. Si possono ottenere strutture cave di polvere di lega metallica con densità relative fino a 0.1 e dimensioni delle sfere tra 0,3 e 1 mm [Ash00]. Un esempio tipico di materiale cellulare che si è riusciti a ottenere tramite questa tecnica è costituito dalla lega Ti6Al4V, con il 36% di porosità interstiziale, 44% di porosità dalle sfere cave e densità di 9 g/cm^3 .

È possibile ottenere strutture a celle chiuse riempiendo gli interstizi tra le sfere con polveri metalliche o metallo liquido [Ban01].

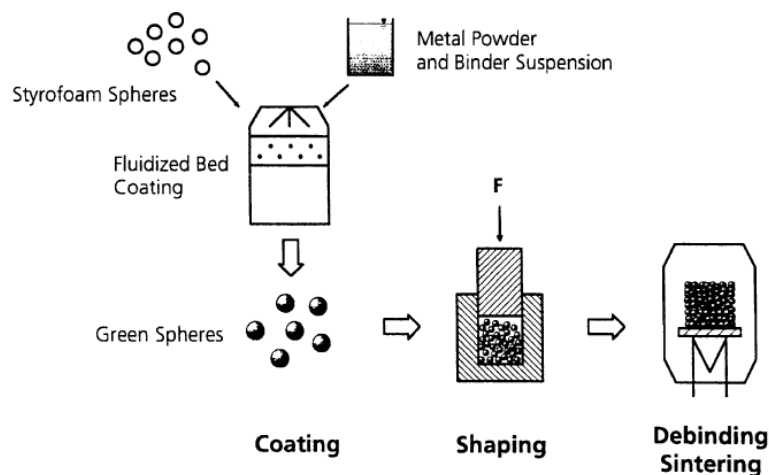


Figura 3. 16 Processo di sinterizzazione per strutture a sfere cave [Ban01]

3.3.3 Tecniche di deposito

Le tecniche di deposito sono di due tipi: deposito elettrico e deposito di vapori. La prima parte da una soluzione metallica ionizzata in un elettrolita: in questa tecnica il metallo si deposita elettricamente su di una matrice polimerica a cella aperta che sarà successivamente rimossa. Affinché sia garantito il deposito del metallo sul polimero per via elettrica è necessario che la base polimerica sia resa conduttiva, per questo si applica un rivestimento con materiale elettricamente conduttivo [Ban01].

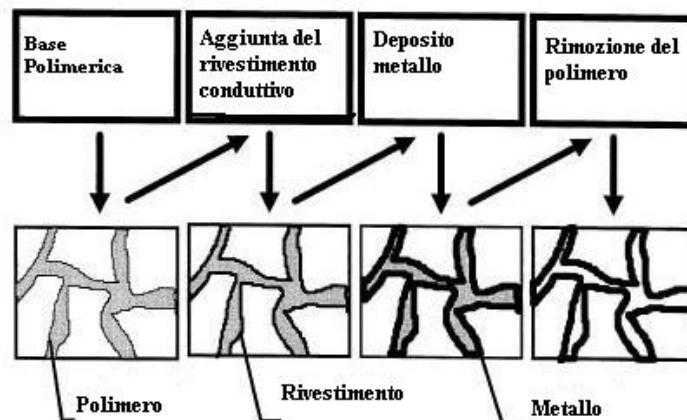


Figura 3. 17 Tecnica del deposito elettrico per la produzione di schiume metalliche

La seconda tecnica prevede la formazione delle schiume a partire da metallo o composti metallici allo stato gassoso. Per definire la geometria del materiale finale è richiesta una spugna polimerica a celle aperte sulla quale depositare il nichel proveniente dalla decomposizione chimica di un gas, in genere $\text{Ni}(\text{CO})_4$ [Ban01]. In una camera a vuoto a 120°C vengono creati i vapori di nichel e monossido di carbonio: il nichel è portato a condensare sulla matrice reticolare. Sulla matrice polimerica si crea un rivestimento metallico dello spessore di alcuni micron; in seguito si procede al riscaldamento tramite infrarossi. Successivamente, tramite trattamenti termici e chimici si procede alla rimozione del polimero. Le spugne di nichel prodotte in questo modo sono disponibili in commercio con il nome di “*Incofoam*” in fogli di 3 mm di spessore; la densità è compresa tra 0,2 e $0,6 \text{ g/cm}^3$ [Ban01].

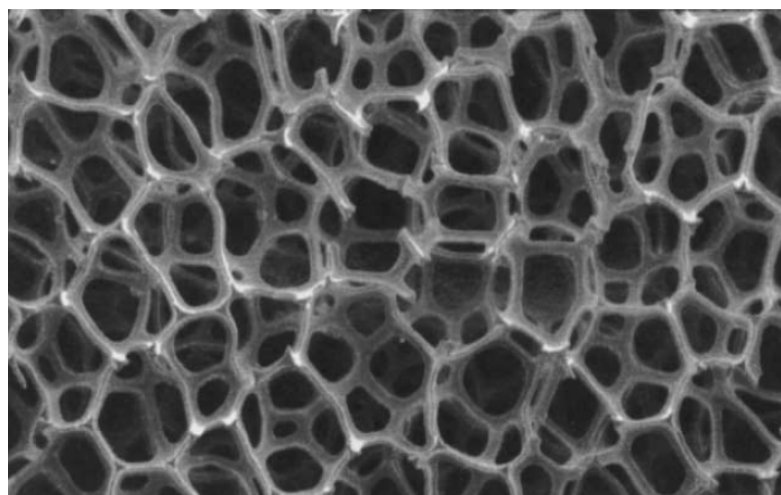


Figura 3. 18 “*Incofoam*” prodotta tramite carbonile di nichel

3.4 Proprietà delle schiume metalliche

Le proprietà delle schiume metalliche sono fortemente influenzate dalla distribuzione interna della porosità. Proprio per questo, facendo variare la densità e la dimensione media delle porosità, si riesce a ottenere una vasta gamma di materiali impiegabili nei più disparati campi: settore automobilistico e aeronautico, settore per l'edilizia civile e industriale, settore delle macchine utensili e settore del design, fino agli ambiti medico e biomedico.

3.4.1 Capacità di assorbimento di energia meccanica

La capacità di assorbimento di energia meccanica delle schiume metalliche è cinque o dieci volte superiore rispetto alla lega di base. Ne deriva che tale proprietà rende appetibile l'applicazione di questa nuova classe di materiali in tutti quei settori dove è richiesta un'elevata capacità di assorbimento degli urti ed una massa ridotta.

La quantità di energia assorbita dalla schiuma metallica può essere facilmente determinata mediante una prova di compressione (Fig.3.19) [Ber07]. L'energia assorbita è definita come l'integrale, calcolato con il metodo dei trapezi, dello sforzo di compressione in funzione della deformazione. L'energia assorbita non è altro che l'area sottesa alla curva sforzi-deformazioni fino al 50% di deformazione. Inoltre l'efficienza di assorbimento (η) è definita come il rapporto tra la quantità di energia effettivamente assorbita dalla schiuma metallica (area verde fig. 3.19) e l'energia assorbita da un materiale ideale perfettamente plastico a pari livello di deformazione (area nera tratteggiata in fig. 3.19).

$$E = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon \quad (3.5)$$

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon}{E_{\max}(\varepsilon) \cdot \varepsilon} \quad (3.6)$$

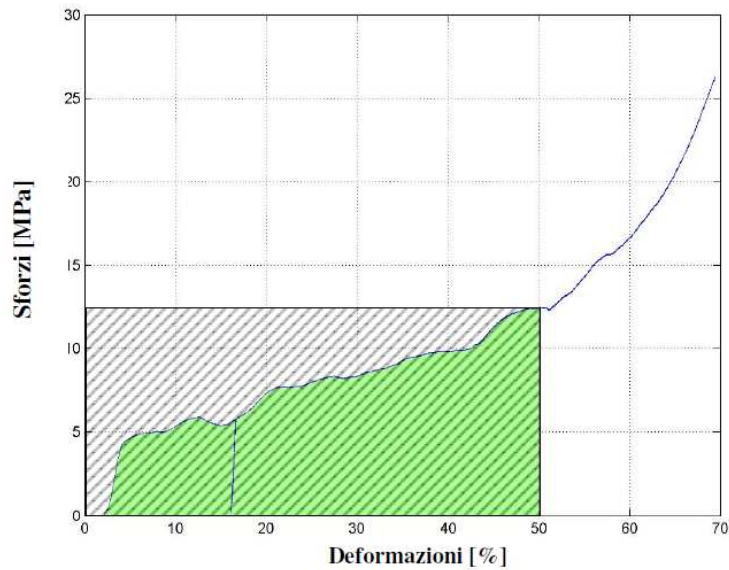


Figura 3. 19 Esempio di assorbimento di energia meccanica per provini in AlSi10 [Ber07]

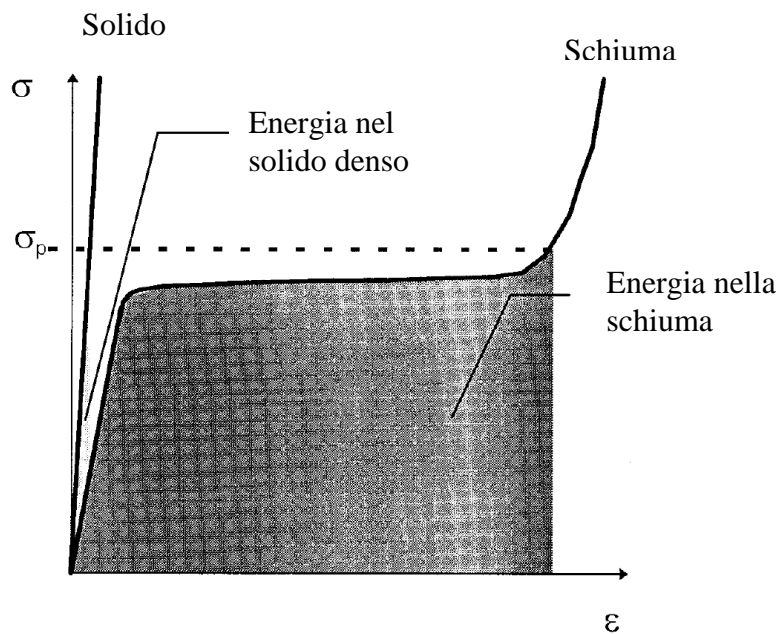


Figura 3. 20 confronto tra energia assorbita da materiale denso e da schiuma metallica [Yu98]

In fig. 3.20 è rappresentato schematicamente il confronto tra il livello di energia assorbito da un materiale denso elastico e da una schiuma metallica. La schiuma, per un dato livello di carico, riesce ad assorbire più energia di un materiale denso [Yu98].

Queste proprietà dipendono dalla densità della schiuma, come visibile in figura 3.21 [Yu98], dove vengono rappresentati i valori sperimentali condotti su

schiuma di alluminio a tre diversi livelli di densità: $0,31 \text{ g/cm}^3$, $0,45 \text{ g/cm}^3$, $0,70 \text{ g/cm}^3$; l'area evidenziata rappresenta il quantitativo di energia assorbita. Dal confronto si vede che la schiuma a densità media assorbe il dato quantitativo di energia a un livello di sforzo inferiore [Yu98].

A parità di energia assorbita, in funzione delle diverse densità, varieranno i valori di deformazione del materiale. Questo è un parametro che, assieme al valore massimo dello sforzo nel materiale e alla quantità totale di energia assorbita, deve essere considerato nella progettazione degli organi destinati all'assorbimento di urti.

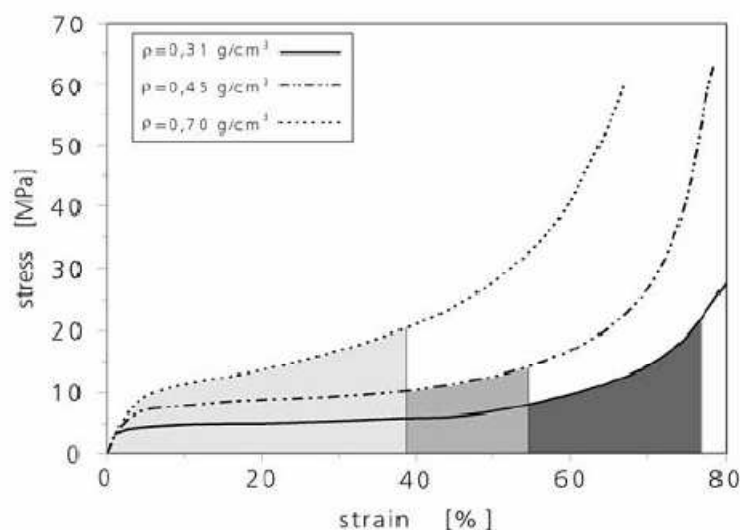


Figura 3. 21 Influenza della densità relativa sull'energia assorbita [Yu98]

3.4.2 Smorzamento delle vibrazioni

Lo smorzamento è la capacità che ha un materiale di dissipare l'energia dovuta all'instaurarsi di vibrazioni. Le schiume metalliche, in particolar modo le schiume di alluminio, presentano valori del fattore di smorzamento (η) che sono almeno di un ordine di grandezza superiori rispetto a quello della lega di base [Ber07]. La dissipazione dell'energia nelle schiume deriva fondamentalmente dall'attrito tra le superfici adiacenti delle cricche presenti all'interno della matrice metallica e dalla vibrazione delle pareti delle bolle [Amj01]. La proprietà di smorzamento può essere ulteriormente migliorata attraverso l'aggiunta di particelle non solubili (grafite o carburo di silicio): in questo modo vengono introdotte all'interno della struttura elementi di interfaccia aggiuntivi che migliorano la dissipazione dell'energia. Le schiume metalliche stanno acquistando un crescente interesse nel riempimento di organi cavi, in quanto, oltre ad aumentarne la rigidità, ne migliorano le caratteristiche di smorzamento. Appare dunque evidente come la tipologia del legame tra la

schiuma e le pareti dell'organo cavo abbia una forte influenza sul comportamento finale. La creazione del legame metallurgico sull'interfaccia schiuma-acciaio non favorisce lo smorzamento delle vibrazioni [Ber07]. L'applicazione, invece, della schiuma senza interposizione di legami o addirittura con insufficiente riempimento della cavità, determina un forte incremento della capacità smorzante della struttura [Ber07]. Ciò è dovuto all'incremento dell'attrito all'interfaccia tra schiuma e pareti in metallo con conseguente crescita dell'energia dissipata. L'applicazione di collanti nel fissaggio della schiuma può avere risultati differenti a seconda della composizione dell'adesivo utilizzato.

3.4.3 Proprietà acustiche

Un grosso vantaggio delle schiume è la loro capacità di assorbire onde acustiche e vibrazioni. In questi materiali le onde sonore vengono riflesse dalla struttura porosa irregolare; l'energia vibrazionale comporta piccole deformazioni delle pareti delle bolle convertendosi in energia termica: l'intensità del suono riflesso, pertanto, diminuisce. Dai risultati di numerosi studi di ricerca è emerso che il grado di assorbimento potrebbe essere incrementato imponendo una distribuzione delle bolle della struttura interna il più possibile omogenea [Ber07]; inoltre il grado di assorbimento è inversamente proporzionale alla densità della schiuma (Fig. 3.22) [Yu98] e per una lega AlSi12 di materiale completamente denso è inferiore del 20% rispetto a quello di una schiuma dello stesso materiale (densità $0,5 \text{ g/cm}^3$) [Yu98]. Numerose indagini hanno dimostrato che il coefficiente di assorbimento del suono nella schiuma *Alporas* è praticamente uguale a quello della lana di vetro [Ber07].

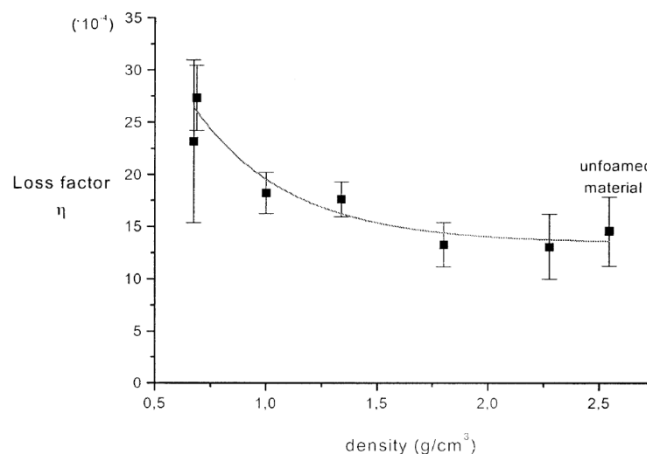


Figura 3. 22 Andamento del grado di assorbimento delle schiume in funzione della densità [Yu98]

3.4.4 Mappe caratteristiche

La scelta del materiale idoneo all'applicazione prevista può essere facilitata tramite la consultazione delle "mappe di Ashby"[Ash00], particolari grafici che riassumono le principali caratteristiche delle schiume metalliche.

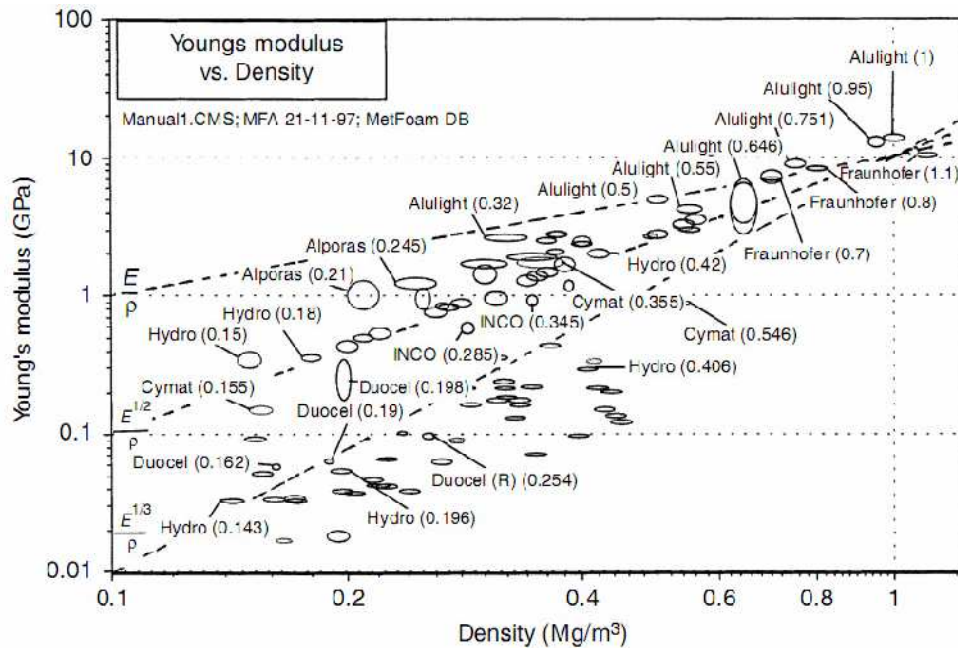


Figura 3. 23 Modulo di Young in funzione della densità [Ash00]

In fig. 3.23 i numeri tra parentesi sono i valori della densità della schiuma in Mg/m³ e le linee tratteggiate indicano rispettivamente gli indici E/ρ , $E^{1/2}/\rho$ e $E^{1/3}/\rho$.

In fig. 3.24. si può vedere lo sforzo di compressione rappresentato in funzione della densità relativa e , anche in questo caso, i numeri tra parentesi indicano la densità della schiuma in Mg/m³. Le linee tratteggiate sono relative agli indici σ_c/ρ , $\sigma_c^{1/2}/\rho$, $\sigma_c^{1/3}/\rho$ [Ash00].

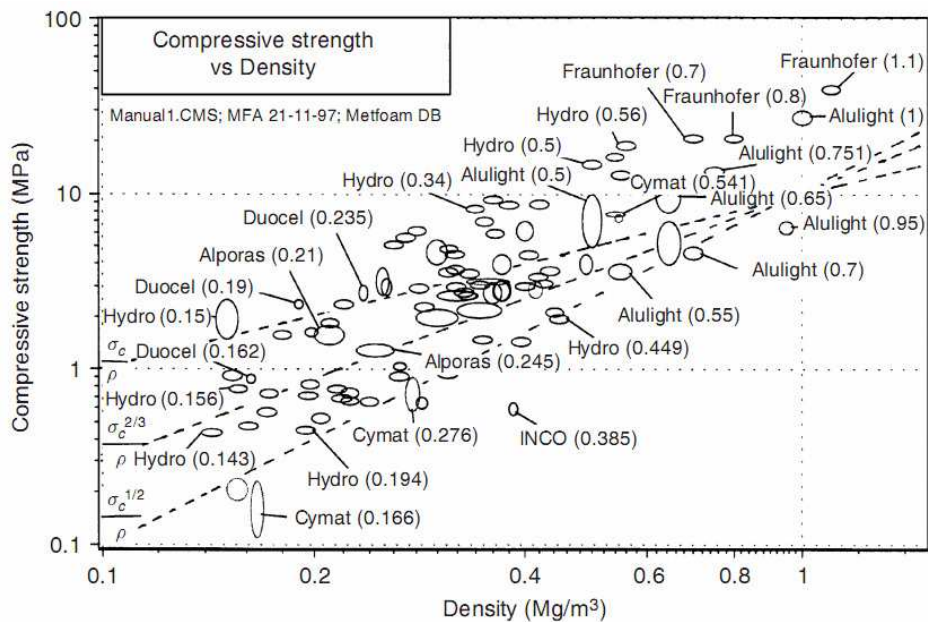


Figura 3. 24 Sforzo di compressione in funzione della densità [Ash00]

3.5 Applicazione delle schiume metalliche

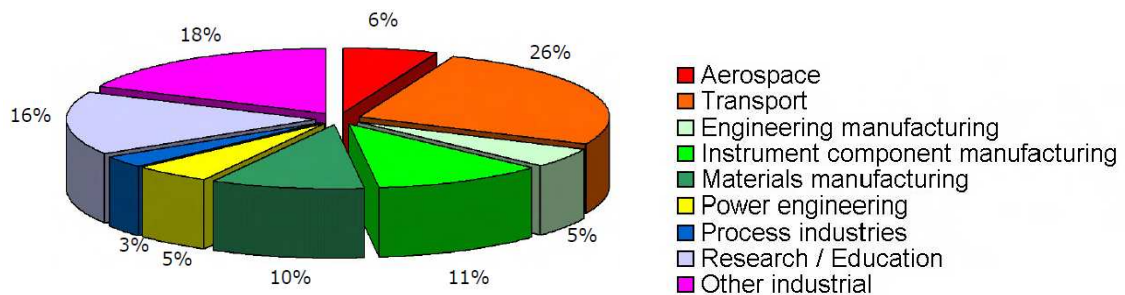


Figura 3. 25 Settori principali per l'applicazioni delle schiume metalliche [Bas07]

Come si vede in fig. 3.25, le applicazioni ingegneristiche che vedono le schiume metalliche come possibili protagonisti sono le più svariate, e comprendono principalmente: alleggerimenti strutturali, isolamento termico e acustico e altre applicazioni relative all'assorbimento di energia. I campi di applicazione spaziano quindi dal settore automobilistico a quelli aerospaziale, navale, delle macchine utensili, edilizio e civile, ferroviario e del design.

L'applicabilità della schiuma metallica dipende da diverse condizioni [Ban01]:

- Morfologia – tipo di porosità (cella aperta/chiusa)
- Metallurgia – metallo o leghe
- Processo
- Costo

La porosità è un elemento cruciale nella determinazione del campo di applicazione, che può spaziare da ambiti *strutturali* ad ambiti *funzionali*. A seconda della tipologia di cella (più o meno chiusa), varia la tipologia di applicazione. Per schiume a porosità aperta le applicazioni sono principalmente funzionali; verso la porosità chiusa le applicazioni risultano principalmente strutturali [Ban01].

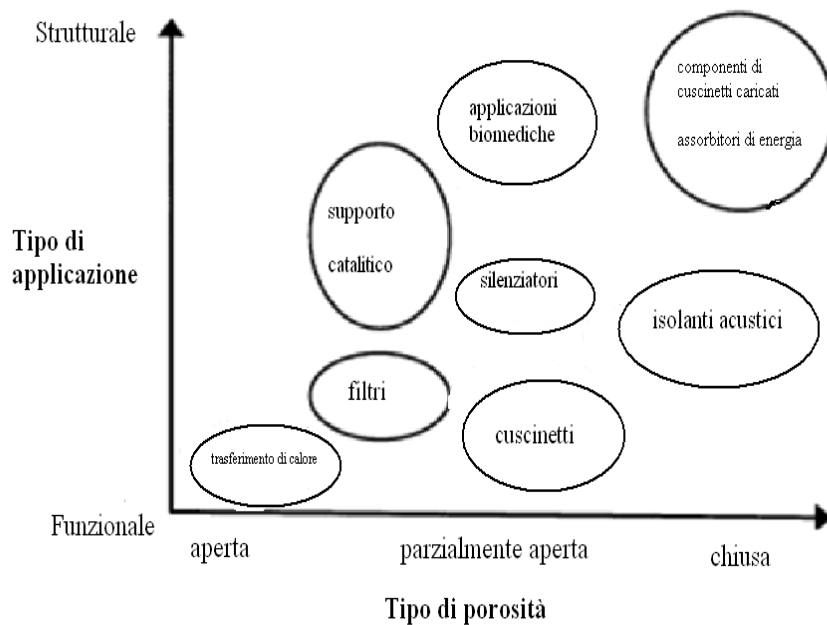
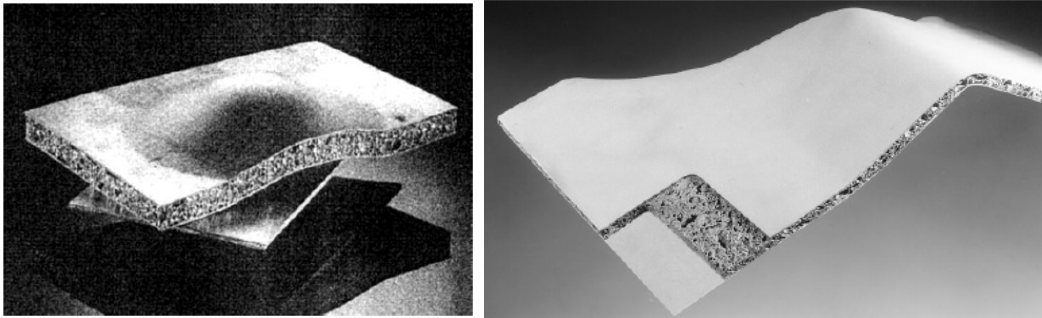


Figura 3. 26 Applicazioni di pannelli in schiuma metallica in funzione della porosità [Ban01]

Lo studio condotto si concentra sul taglio delle schiume metalliche d'alluminio (cella chiusa) e, in seguito, vengono analizzate le possibili applicazioni per tali pannelli.

Accanto ai semplici pannelli in schiuma trovano interessanti applicazioni pannelli sandwich in schiuma metallica: non solo l'industria automobilistica può offrire un ampio spazio al loro utilizzo, ma anche il settore dei trasporti, dell'industria navale e civile.

I pannelli sandwich sono in grado di combinare le proprietà della lamiera esterna con le proprietà del cuore in schiuma. Tali pannelli sono costituiti da due lamiere, fra le quali viene posizionato del precursore che, sottoposto ad un adeguato ciclo termico in forno, si trasforma in schiuma metallica.



a) b)
**Figura 3. 27 Pannelli sandwich in schiuma metallica prima e dopo deformazione, a)[Yu98],
b) [Ber07]**

I pannelli sandwich, rispetto ad una lamiera paragonabile per dimensione e materiale, sono più leggeri del 50%, fino a 10 volte più rigidi e con un coefficiente d'isolamento termico fortemente incrementato [Ber07]. Inoltre, i pannelli possono assumere la forma desiderata se sottoposti ad un'operazione di curvatura. La schiuma, di cui sono realizzati, solitamente presenta una struttura a celle chiuse; la parete esterna è affiancata a lamiere mediante collanti sintetici o mediante trattamenti termici, in fase di schiumatura, che permettono l'instaurarsi di un legame metallurgico tra i componenti.

3.5.1 Applicazioni strutturali delle schiume metalliche

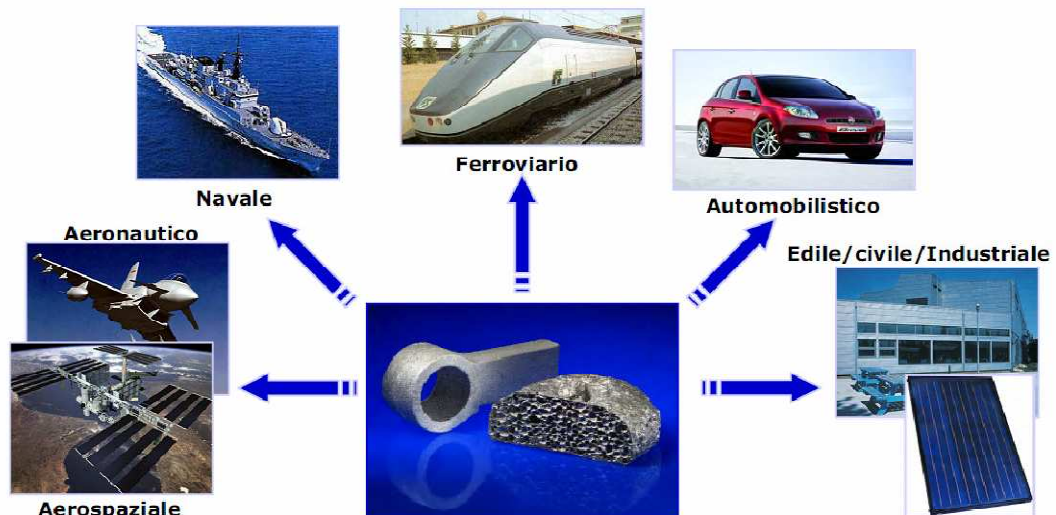


Figura 3. 28 Esempi applicativi delle schiume metalliche [Bas07]

L'applicazione strutturale delle schiume metalliche coinvolge diversi settori industriali:

- Industria automobilistica
- Industria aerospaziale
- Industria navale
- Industria ferroviaria
- Industria delle costruzioni
- Industria delle macchine utensili

Le schiume metalliche a cella chiusa sono adatte ad applicazioni strutturali. La tecnica di schiumatura da polveri metalliche e agente precursore, in particolare, consente di ottenere materiali porosi a cella chiusa che presentano un'elevata frazione di porosità. Questa caratteristica microstrutturale è particolarmente interessante per le applicazioni che richiedono un'elevata rigidità specifica e un'elevata capacità di assorbimento di energia [Yu98]; entrambe le caratteristiche possono riguardare diversi campi industriali del settore automobilistico e di quello aerospaziale.

In seguito vengono illustrati i campi di applicazione delle schiume metalliche [Ban01]. È interessante ricordare che spugne di titanio (cella aperta) [Ban01] e di magnesio [Ban01] possono essere applicate in ambito biomedico.

3.5.1.1 Industria automobilistica

I pannelli di schiuma metallica e i pannelli sandwich trovano ampia possibilità di applicazione nell'industria automobilistica.

Sia per motivi ingegneristici, sia per motivi ambientali, una delle richieste dominanti nel settore automobilistico riguarda l'alleggerimento delle strutture: la riduzione del peso del veicolo comporta una diminuzione della quantità di carburante necessaria al movimento e una conseguente riduzione delle emissioni.

In sintesi le applicazioni per il settore automobilistico possono essere:

- assorbitori d'urto per la sicurezza passiva;
- elementi di rinforzo dei telai;
- isolamento acustico;
- alleggerimento di pannelli e strutture 3D;

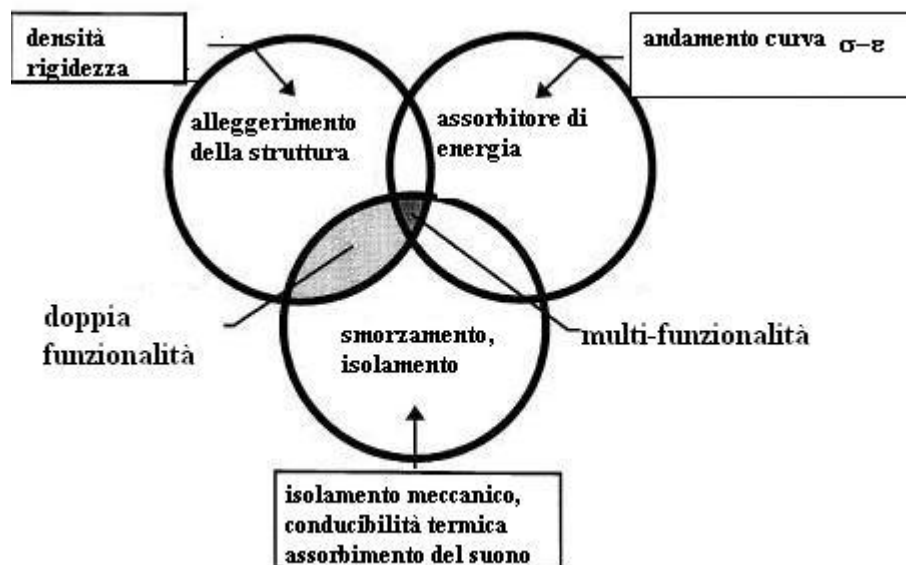


Figura 3. 29 Principali applicazioni strutturali per schiume metalliche [Ban01]

Nel settore automobilistico particolare attenzione è rivolta anche alla sicurezza del veicolo passiva, che risulta influenzata, principalmente, dalla scelta dei materiali. Il principale scopo degli assorbitori d'urto è quello relativo alla dissipazione dell'energia cinetica del veicolo in seguito ad urti frontali e/o laterali, salvaguardando così la sicurezza dei passeggeri. Attualmente, nella struttura delle autovetture e dei mezzi di trasporto, sono già previsti degli elementi simili. Questi elementi che sono posizionati in modo tale da deformarsi quando sottoposti ad elevati carichi di compressione, possono essere realizzati in

schiuma di alluminio. Tale accorgimento migliorerebbe sicuramente le loro proprietà di assorbimento riducendone anche il peso.

Ulteriore applicazione delle schiume metalliche, in questo settore, riguarda l'isolamento acustico. La schiuma può essere utilizzata, infatti, per "ingabbiare" il vano motore ed impedire la trasmissione di rumore alle persone presenti sia nell'abitacolo che nell'ambiente circostante.

Il buon rapporto tra peso e rigidità che le schiume riescono ad offrire giustifica una loro possibile applicazione nella realizzazione di componenti strutturali delle autovetture, come ad esempio telai scorrevoli, braccetti dello sterzo, vano motore e altri possibili impieghi.

La rigidità di un pannello è proporzionale a Eh^3 , dove E rappresenta il modulo di Young e h lo spessore. È noto che E è proporzionale al quadrato della densità ρ , mentre h dipende da ρ^{-1} . Da qui si deduce che la rigidità di un pannello dipende in conclusione da ρ^{-1} . Ciò significa che densità minore comporta rigidità maggiore, considerando un pannello in schiuma con densità cinque volte inferiore rispetto ad un pannello tradizionale dello stesso peso [Ban01]. Si assume il legame di dipendenza quadratica tra E e ρ sulla base di osservazioni empiriche che considerano le imperfezioni nella schiume. Per una schiuma perfetta ci si aspetta un legame lineare tra E e ρ , per cui la rigidità del pannello sarà maggiore [Ban01]. Se consideriamo pannelli sandwich, il vantaggio è ancora maggiore e un disegno di ottimizzazione è accompagnato dalla determinazione dello spessore ottimale delle pelli.

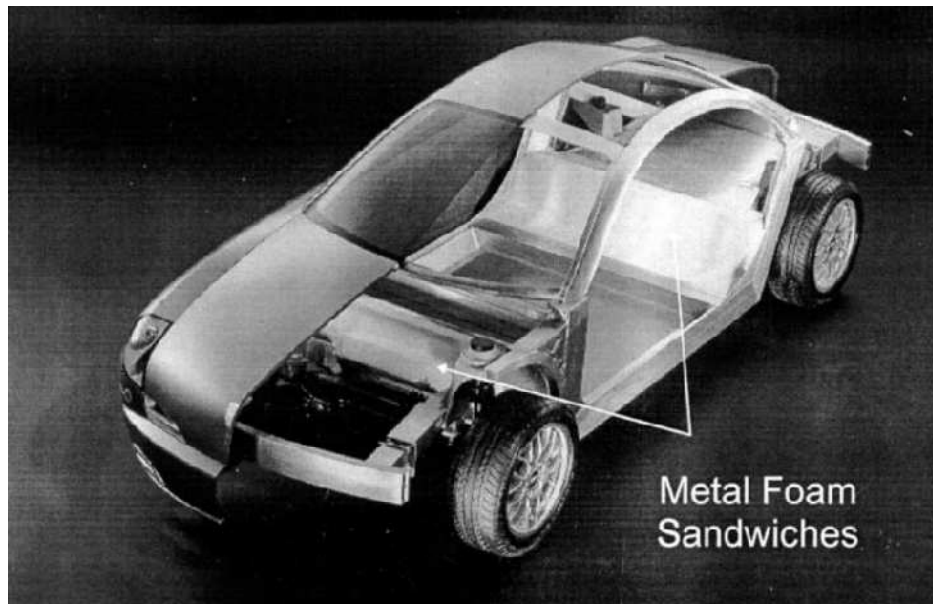


Figura 3. 30 Applicazioni di pannelli sandwich in schiuma metallica d'alluminio sul veicolo [Yu98]

3.5.1.2 Industria aerospaziale

Una delle priorità del settore aeronautico e aerospaziale è quella di ottenere l'alleggerimento delle strutture.

Anche il settore aerospaziale, come il settore automobilistico, può sfruttare le proprietà dei pannelli in schiuma o pannelli sandwich per rispondere alle esigenze di alleggerimento strutturale.

In questi settori l'utilizzo di materiali compositi (pannelli honeycomb con struttura a celle e a nido d'ape) è da tempo una pratica frequente.

La principale proprietà delle schiume metalliche, ovvero la leggerezza, può risultare molto importante per l'applicazione nel settore aerospaziale e potrebbe sostituire le strutture composite a nido d'ape già ampiamente utilizzate nel settore stesso [Ban01]. I pannelli in schiuma metallica possono essere sostituiti ai pannelli honeycomb per diversi motivi [Ban01]:

- I pannelli in schiuma sono facilmente lavorabili in geometrie complesse, mentre i pannelli honeycomb comportano maggiori costi nella lavorazione 3D, molto spesso difficoltosa.
- I pannelli in schiuma sono più robusti.
- Le schiume metalliche presentano altre utili proprietà (controllo acustico per esempio).

La sostituzione con pannelli in schiuma comporterebbe numerosi vantaggi tra cui l'abbattimento dei costi, l'ottenimento di parti con proprietà omogenee e la realizzazione di parti senza l'utilizzo di nessun tipo di collante. Quest'ultima caratteristica potrebbe contribuire a mantenere l'integrità della struttura in caso di incendio.

La casa costruttrice Boeing (USA) ha valutato la possibilità di utilizzare pannelli sandwich in titanio e pannelli in schiuma di alluminio per le code degli elicotteri [Ban01]. Per il settore aerospaziale le schiume di alluminio possono essere utilizzate come assorbitori di onde d'urto e rinforzo delle strutture nei satelliti sostituendo i materiali che causano problemi per le condizioni ambientali dello spazio (temperature, vuoto, etc.) [Ban01].

In sintesi le principali applicazioni in questo campo sono sintetizzabili in [Bas07]:

- pannelleria;
- strutture 3D alleggerite;
- rinforzi strutturali localizzati;
- cabina di pilotaggio rinforzata (pannelli per evitare intrusione di oggetti);
- elementi assorbitori di onde d'urto;
- protezioni per equipaggiamenti elettronici sensibili.



Figura 3. 31 Esempi applicativi delle schiume metalliche nel settore aerospaziale [Bas07]

3.5.1.3 Industria navale

Le schiume metalliche, in questo campo, si rendono necessarie laddove sono richiesti marcati alleggerimenti strutturali.

Le moderne navi passeggeri sono costruite a partire da lamiere in alluminio e da pannelli compositi in alluminio con strutture a nido d'ape: pannelli sandwich in schiuma di alluminio possono prendere parte alla struttura delle navi. Le pelli sono tenute unite al cuore in schiuma tramite adesivi in poliuretano: questo metodo di unione è più resistente agli ambienti umidi [Ban01].

L'industria navale ricerca quindi sistemi idonei di fissaggio e saldatura tra lamiere [Ban01] e la realizzazione di opportune indagini per quantificare la corrosione delle schiume di alluminio in acqua salata.

I primi esperimenti effettuati sulle schiume a celle aperte avrebbero dimostrato che solamente nella parte più esterna si potrebbe avere una piccola infiltrazione della soluzione di cloruro di sodio, senza però causare danneggiamenti strutturali [Bas07].

In sintesi le principali applicazioni delle schiume metalliche nel campo navale sono [Bas07] [Ban01]:

- pannelleria
- ponti, paratie, scafi, porte tagliafuoco
- rinforzi strutturali
- piattaforme di elevazione

3.5.1.4 Industria ferroviaria

Le schiume metalliche nel settore ferroviario possono essere impiegate, come nel settore automobilistico, per alleggerimento strutturale, assorbimento di energia e isolamento acustico. Applicazioni nel settore si ritrovano nelle

carrozze ferroviarie giapponesi, in cui le schiume *Alporas* sono utilizzate per migliorare l'assorbimento di energia agli urti [Ban01].

L'applicazione maggiore è collegata alla realizzazione di pannelli sandwich o assorbitori d'urto per le carrozze [Bas07]. In particolare si possono distinguere due diversi tipi di assorbitori:

- strutture frontali ad alto assorbimento per urti a media o bassa velocità;
- strutture frontali sacrificali con funzioni anticlimber.

Gli anticlimber servono per evitare che, in caso di urto, una carrozza ferroviaria trasli verso l'alto, andando ad impattare contro la struttura sovrastante, che risulta essere meno resistente. In generale gli anticlimber sono costituiti da scatole con nervature sulla parte frontale interamente costituite da honeycomb. In caso di urti impediscono, nei primi istanti, che una tra le due carrozze che si scontrano si sollevi. Gli anticlimber costituiti da una serie di strati in schiuma metallica potrebbero garantire quantitativi di energia assorbita ben superiori rispetto a quelli già esistenti e un collasso più omogeneo [Bas07].

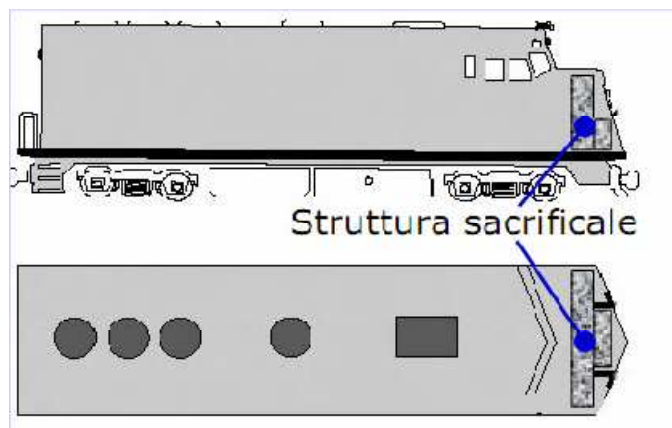


Figura 3. 32 Rappresentazione di una struttura sacrificale per carrozze ferroviarie [Bas07]

3.5.1.5 Settore dell'edilizia civile e industriale

Nel settore dell'edilizia civile ed industriale l'applicazione delle schiume metalliche appare interessante grazie alla loro buona resistenza al fuoco ed alle proprietà di isolamento termico. Parti in schiuma o elementi riempiti di schiuma possono essere utilizzati per eseguire rivestimenti murali interni o esterni agli edifici [Ban01].

I pannelli possono essere utilizzati come materiale fonoassorbente nelle gallerie ferroviarie, (opportunità già applicata in gallerie ferroviarie giapponesi con schiume *Alporas*) [Ban01], all'interno di edifici, oppure sotto i ponti stradali. Grazie alle proprietà di leggerezza, le schiume o i pannelli in schiuma di

alluminio possono essere utilizzati per la costruzione di ponti mobili oppure per ridurre il consumo energetico di ascensori adibiti alla movimentazione di pesi leggeri [Ban01].

Le principali applicazioni in questo settore sono [Bas07]:

- pannelleria;
- strutture leggere rinforzate;
- porte tagliafuoco;
- isolamento elettromagnetico e acustico;
- strutture portanti per pannelli solari;
- pannelli e strutture portanti e macchine utensili per l'incremento di rigidità, carichi utili e precisione di movimentazione.

3.5.1.6 Industria delle macchine utensili

La progettazione e il dimensionamento degli organi di macchine utensili è effettuato sulla base della rigidità: questo criterio porta normalmente a disporre di sezioni molto ampie sovradimensionate dal punto di vista della resistenza.

Anche la scelta dei materiali per la costruzione di macchine di questi tipo si basa più sulla rigidità specifica che sulla resistenza: i materiali più comunemente utilizzati sono l'acciaio e la ghisa, per il buon rapporto rigidità peso.

La ricerca, oggi, si focalizza sulla riduzione del peso delle strutture delle macchine utensili e sull'incremento della rigidità attraverso l'utilizzo di materiali leggeri, ad elevate proprietà strutturali e costi contenuti.

La richiesta di tali caratteristiche può essere soddisfatta utilizzando materiali come le schiume di alluminio sotto forma di pannelli sandwich, in quanto la sola schiuma ha caratteristiche meccaniche (modulo di Young) relativamente basse. Lo sviluppo di strutture e componenti per macchine utensili che impiegano materiali innovativi di questo tipo non è ancora diventata una pratica comune, anche se in passato sono già stati utilizzati materiali quali il calcestruzzo idraulico (lo stesso usato in campo civile) e polimerico (composto particellare di tipo bifasico) [Ber07].

Le schiume di alluminio possono essere efficacemente impiegate per la realizzazione di pannelli sandwich di parti strutturali di macchine utensili: le parti mobili possono conferire maggiore rigidità alle strutture, alla velocità e alla precisione della movimentazione, con risparmi anche in termini di potenza dei motori installati e aumento dei carichi utili [Ban01]. Parti strutturali riempite in schiuma, inoltre, potrebbero ridurre l'inerzia e materiali porosi potrebbero contribuire allo smorzamento delle vibrazioni [Ban01]

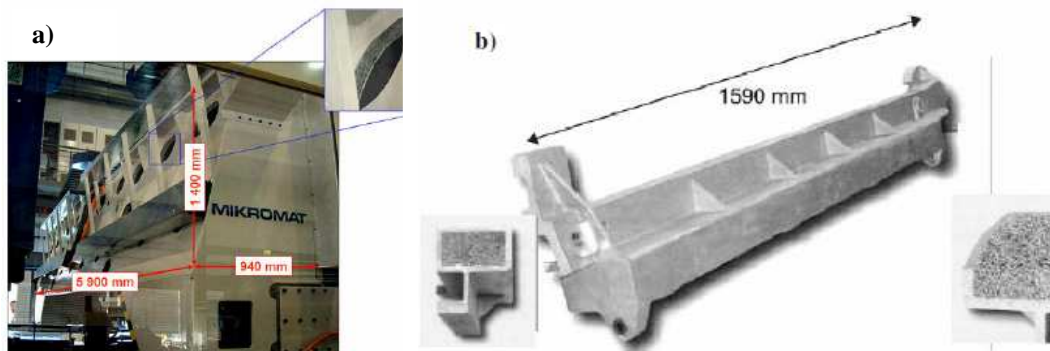


Figura 3. 33 Esempi applicativi nel settore delle macchine utensili (a) pannelli sandwich impiegati per strutture portanti di macchine utensili; (b) traversa di una macchina utensile rinforzata in schiuma metallica per la riduzione delle frequenze proprie (riduzione del 60%)[Bas07]

3.5.1.7 Applicazioni nel settore del design

Le schiume metalliche presentano una superficie particolare che attribuisce loro un grande potenziale anche nel campo del design. Numerosi sono gli esempi di lampade, tavoli o articoli per la casa ed accessori. Le schiume di alluminio trovano applicazione nella costruzione di mobili, tavoli, lampade etc. [Ban01] I mobili realizzati in schiuma, oltre ad un'elevata qualità estetica, offrono anche il vantaggio della leggerezza. Si deve sottolineare che nel campo del design e della moda, il prezzo e il costo contenuto del materiale a pari prestazioni non sono il primo requisito richiesto: anche per questo motivo questi materiali innovativi possono trovare applicazione nel settore [Ban01].



Figura 3. 34 Esempi applicativi delle schiume metalliche nel settore del design [Bas07]

3.6 Lavorazione delle schiume metalliche

Di seguito si riportano le caratteristiche proprie dei materiali cellulari che implicano approcci specifici per la loro lavorazione [Ber07]:

- operazione di piegatura: difficile e complessa da realizzare a causa dell'alta sensibilità ai carichi di trazione;
- rivestimenti superficiali: difficili da applicare a causa della presenza di difetti lungo la parete delle bolle e lungo la pelle esterna;
- operazione di brasatura e saldatura: la difficoltà nell'effettuare tale lavorazione è da imputare alla presenza della pelle esterna ricoperta da ossido formatosi in fase di schiumatura;
- lavorazioni in generale: difficoltose da realizzare per la presenza nella struttura di particelle stabilizzanti.

3.6.1 Tecniche di saldatura per schiume metalliche

La tecnologia di giunzione deve essere adattata alle caratteristiche delle parti da unire. Le temperature elevate, nel caso delle schiume metalliche, portano al collasso delle pareti delle celle: questo limita fortemente l'impiego dei sistemi di saldatura e piegatura. I sistemi di giunzione a freddo (adesivi, giunzioni meccaniche) o sistemi a basso impatto energetico, sembrerebbero la soluzione più interessante, anche se con controindicazioni quali massa e costi aggiuntivi [Ber07]. Tali sistemi di giunzione possono essere utilizzati tanto per pannelli sandwich in schiuma che per le tradizionali lamiere in alluminio; questo comporta il rispetto dei medesimi parametri: definizione delle superfici da collegare, costruzione adatta alla giunzione e scelta dell'adeguato sistema di saldatura [See02].

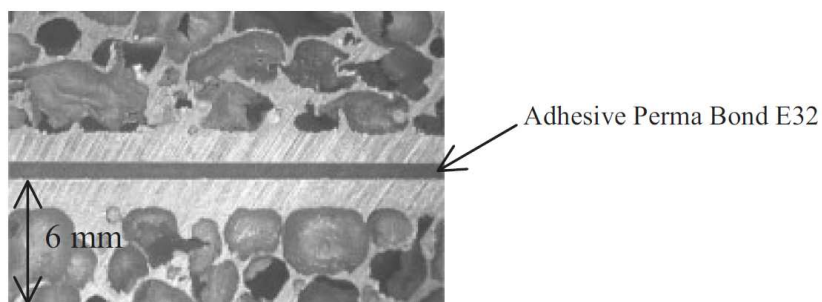


Figura 3. 35 Esempio di giunzione adesiva su pannelli sandwich [See02]

Le principali tecniche di saldatura possono essere sintetizzate in tabella e comprendono la saldatura laser, le tradizionali tecniche di giunzione meccanica, saldatura TIG/MIG [See02].

Tabella 3. 2 Tecniche di saldatura per pannelli sandwich in schiuma metallica

PROCESSO	DETTAGLI
<i>Saldatura Laser</i>	<i>Laser a CO₂</i>
<i>Saldatura TIG/MIG</i>	<i>Manuale e in parte meccanizzata</i>
<i>Bulloni e perni di saldatura</i>	<i>Manuale e meccanizzata</i>
<i>Punzoni e perni di rivettatura</i>	<i>Pannelli in schiuma di alluminio e pannelli sandwich in acciaio</i>
<i>Dadi e viti di rivettatura</i>	<i>M4-M8</i>
<i>Perforazione</i>	<i>M4-M8</i>
<i>Rivettatura</i>	<i>Rivettatura cieca e aperta</i>
<i>Giunzione tramite adesivi</i>	<i>Sistemi 1-K e 2-K</i>

Come visibile in fig.3.36 la struttura cellulare interna non viene danneggiata dalla saldatura laser: in particolare, le velocità di avanzamento non devono essere maggiori di 10 m/min [See02].

Studi condotti per spugne metalliche in nichel hanno dimostrato che la densità del materiale poroso deve essere superiore a 2,6 g/cm³ per garantire la saldabilità, mentre, per garantire un flusso di raffreddamento omogeneo della schiuma, lo spessore minimo deve essere di 10 mm.

Per schiume di questo spessore, non è possibile la piena saldatura su tutta la profondità: l'energia e la potenza termica necessarie al raggio laser comporterebbero la distruzione della schiuma.

Se la saldatura deve essere effettuata su tutta la profondità, per spugne di nichel, lo spessore massimo è stimato a 8 mm, per una densità di 2,6 g/cm³ [Res10].

In generale, per l'applicazione della tecnologia laser, la morfologia e la struttura della schiuma devono essere adeguate ai requisiti del processo per ottenere buone caratteristiche meccanico-tecnologiche della saldatura e nella zona termicamente alterata [Res10].

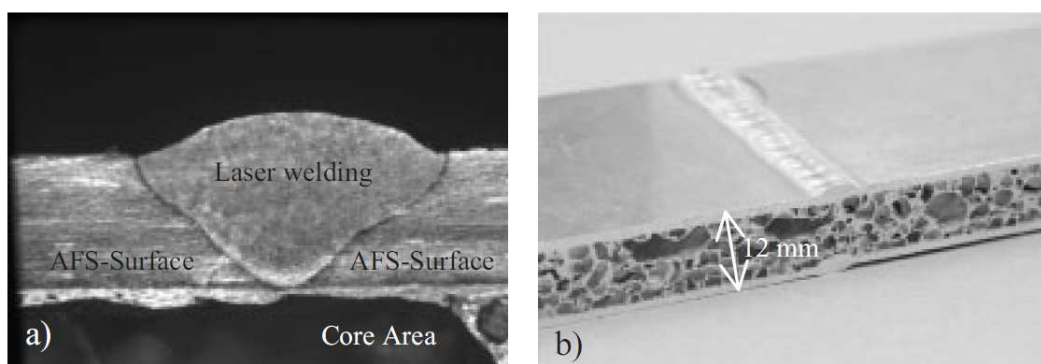


Figura 3. 36 Diverse modalità di saldatura per pannelli sandwich in schiuma a) saldatura laser, b) saldatura TIG [See02]

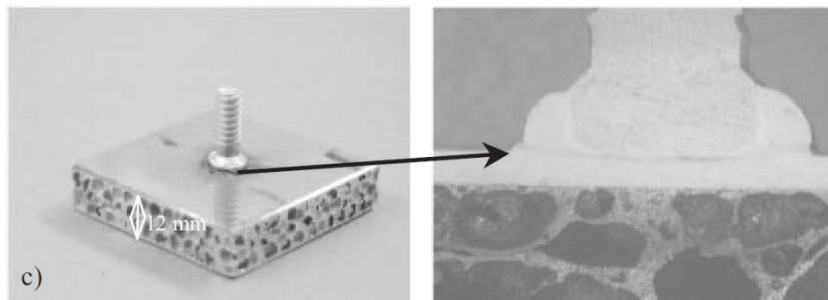


Figura 3. 37 Diverse modalità di saldatura per pannelli sandwich in schiuma c) bulloni e perni di saldatura [See02]

Nel caso di saldatura TIG e MIG manuale la velocità di saldatura corrisponde rispettivamente a 0,3 m/min e 0,8 m/min; mentre per saldatura meccanizzata le velocità arrivano a 1,3 m/min [See02].

I vantaggi nell'utilizzo di queste tecnologie di saldatura si ritrovano nella flessibilità per le molteplici applicazioni, nel vasto bagaglio di esperienze pregresse e nei bassi costi di investimento. Per la bassa conduttività termica, la distorsione dovuta al calore rimane contenuta; i pannelli, inoltre, essendo dotati di elevata rigidità, minimizzano la necessità di controllo nel fissaggio del pezzo [See02].

Sono possibili anche metodi tradizionali di giunzione meccanica: bulloni e perni di saldatura, punzoni di rivettatura, dadi e viti.

I perni e i bulloni non trasferiscono forze elevate nel pezzo, inoltre questa tecnologia è in grado di tener conto delle variazioni di spessore nel materiale e, anche in questo caso, il cuore del pannello rimane inalterato [See02].

Le dimensioni dei dadi e delle viti possono variare tra M4 e M10 a seconda dello spessore del pannello in schiuma.

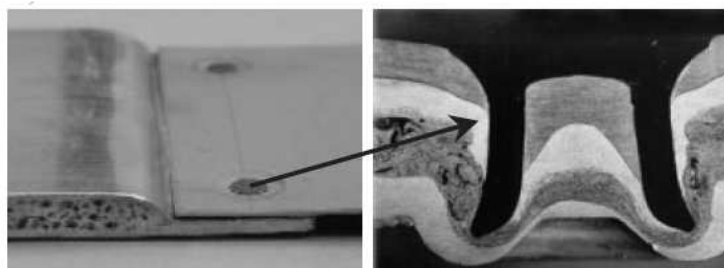


Figura 3. 38 Metodi di giunzione meccanica: punzone di rivettatura [See02]

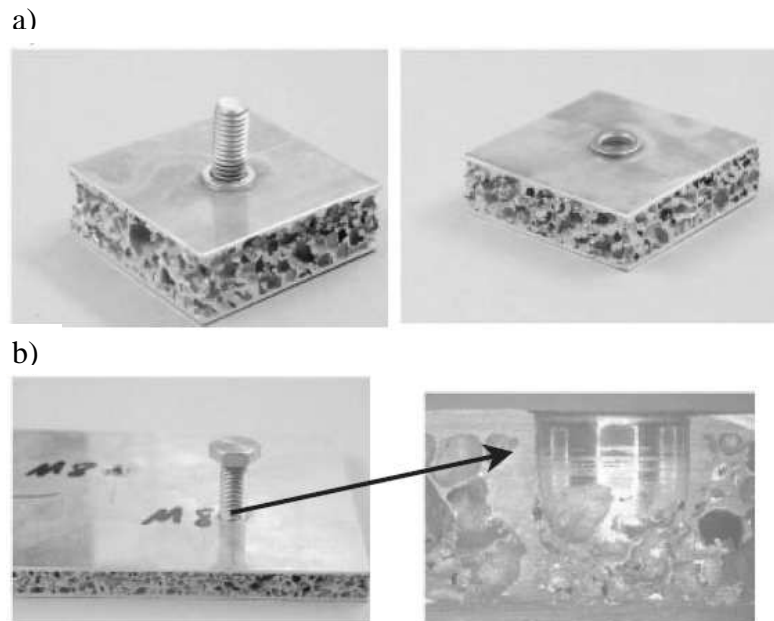


Figura 3. 39 Esempi di giunzione meccanica: a) dadi e viti di rivettatura, b) perforazione

3.6.2 Tecnologie di taglio

L'operazione di taglio per pannelli in schiuma metallica può essere eseguita con una delle comuni tecniche convenzionali. In tal caso è necessario considerare l'usura degli utensili mediante i quali si effettuano le lavorazioni: l'utilizzo di particelle stabilizzanti, come il carburo di silicio, in fase di produzione potrebbe accelerarne il processo.

La morfologia della schiuma rende notevolmente difficoltoso il raggiungimento di finiture superficiali: per trovare vie alternative al taglio delle schiume con tecnologie tradizionali, i processi non convenzionali potrebbero essere una valida soluzione.

Benché in letteratura siano rintracciabili informazioni in notevole quantità per la produzione e le applicazioni delle schiume metalliche, non sono rintracciabili studi riguardanti i trattamenti e le lavorazioni secondarie che è possibile effettuare. Come tecnologie non convenzionali, potenzialmente applicabili alle schiume metalliche, vengono citate la tecnologia laser e la tecnologia water jet [See02].

Nell'utilizzo della tecnologia laser la possibile fusione parziale del cuore in schiuma, dovuta alla temperatura del fascio, sarebbe responsabile del peggioramento della qualità del solco in uscita [See02].

Per un taglio in pannelli sandwich di 12 mm di spessore è richiesto un laser di 5 KW di capacità e la velocità di taglio è data da 0,8 m/min [See02].

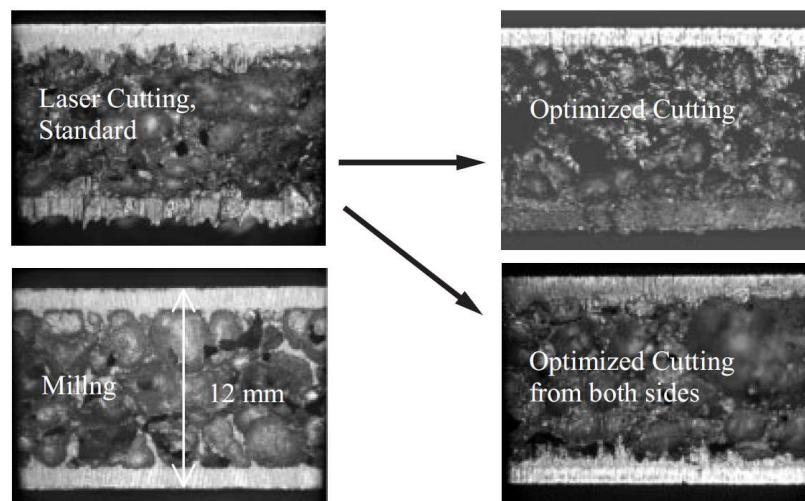


Figura 3. 40 Taglio di pannelli sandwich in schiuma, taglio laser e fresatura

3.7 Taglio di pannelli in schiuma di alluminio

Il taglio delle schiume metalliche di alluminio con tecnologia Water Jet, è oggetto del presente studio. Dall'analisi delle applicazioni per cui le schiume rappresentano una valida possibilità, si deduce quali siano i requisiti che il pannello dovrà presentare in seguito alla lavorazione.

Le applicazioni per cui il pannello tagliato potrà essere utilizzato sono essenzialmente suddivisibili in:

- applicazioni per cui non è richiesta una particolare finitura superficiale (porte tagliafuoco, rivestimenti, in generale strutture interne che non necessitano di saldatura)
- applicazioni per cui è richiesta una particolare finitura superficiale (lamiere e parti soggette a saldatura)

Nel primo caso si deduce che l'unica richiesta che il processo deve soddisfare è che il taglio sia passante, cioè che le parti della lamiera siano separabili meccanicamente. Questa situazione non comporta lo studio della finitura macro/microgeometrica del solco. A tal proposito risulta importante la scelta di parametri tecnologici che consentano la minimizzazione del costo di taglio in base allo spessore tagliato.

Nel secondo caso invece la necessità di saldatura tra le lamiere implica lo studio della qualità macrogeometrica del taglio, intesa come conicità del solco. I costi di lavorazione saranno quindi fissati in base alla selezione dei parametri di taglio che consentano l'ottenimento della qualità del taglio prefissata.

La fase di ottimizzazione, nel taglio delle schiume metalliche, coincide con la selezione dei parametri ottimali per la richiesta prefissata.

Questa fase è strettamente legata alle applicazioni per le quali la lamiera è stata concepita: a seconda delle caratteristiche che il pannello deve presentare, i parametri di taglio saranno impostati in modo tale che il taglio stesso riesca a garantire sulla lamiera le caratteristiche adatte all'applicazione. Per questo motivo, una volta individuate le principali applicazioni, le funzioni obiettivo nell'ottimizzazione del taglio saranno scelte in modo che la lamiera dopo il taglio sia conforme alla richiesta applicativa. L'approccio allo studio di ottimizzazione è sintetizzato in fig.3.41.

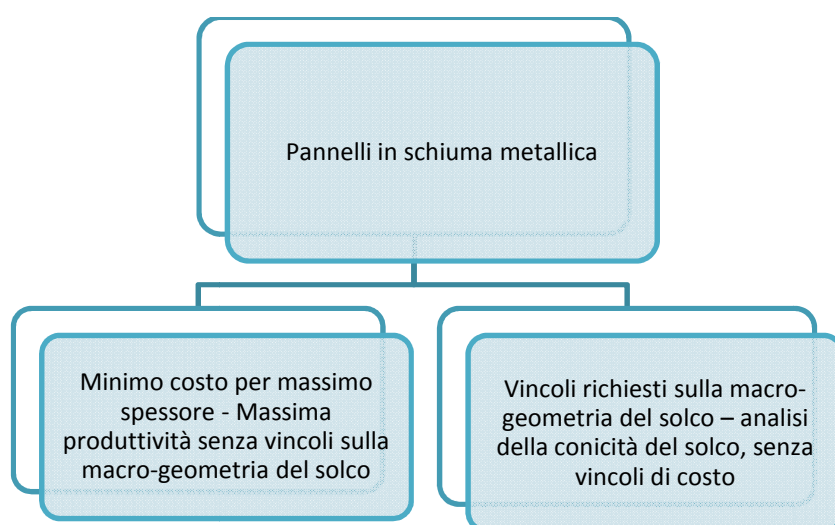


Figura 3. 41 Approccio al taglio delle schiume metalliche

Capitolo 4: Finalità e caratteristiche della sperimentazione

4.1 Obiettivo della sperimentazione

Nell'ambito delle lavorazioni meccaniche la tecnologia water jet è tutt'ora soggetta a studi e indagini a livello internazionale aventi lo scopo di apportare sviluppi e miglioramenti, sia per la comprensione della fisicità del fenomeno sia per l'incremento delle prestazioni del taglio.

L'applicabilità della tecnologia WJ/AWJ ricopre un'amplissima varietà di materiali e, per i numerosi vantaggi che essa offre, può interessare materiali innovativi tra cui i pannelli in schiuma metallica. Dato il recente sviluppo di questi materiali, non è possibile rintracciare informazioni e documentazione da studi precedenti, ma la tecnologia AWJ è citata a fianco di altre tecniche non convenzionali (Laser) [See02] come potenziale tecnologia di taglio per tali materiali. Le schiume metalliche rappresentano una classe di materiali a grande potenzialità con particolare riguardo all'assorbimento di energia e all'alleggerimento delle strutture [Bas07]. I campi di applicazione, inoltre, sono notevoli e tra i principali prodotti possiamo trovare le strutture di rinforzo per telai e pannelli a elevate prestazioni superiori (meccaniche, isolamento termico, acustico e magnetico) [Bas07]. Lo sviluppo di processi di produzione più efficienti con costi contenuti dovrebbe garantire una spinta notevole al massiccio impiego di questi materiali in svariati settori; le medesime considerazioni valgono per la lavorazione successiva che consente l'applicazione per cui il pannello è indirizzato.

L'interesse industriale per l'analisi dei costi di lavorazione è la base del presente studio. L'obiettivo di questo studio consiste infatti, nella selezione dei parametri ottimali nel processo di taglio di pannelli in schiuma metallica. Per la selezione dei parametri, i modelli di costo sono combinati con i risultati di prove sperimentali condotte per lamiere di diverso spessore tra quelle maggiormente diffuse in commercio, che sono di 10-30 mm.

A seconda delle applicazioni a cui il pannello in schiuma è indirizzato, i requisiti del pannello saranno differenti. Come già affermato (cfr. paragrafo 3.7), se non sono richieste particolari finiture macrogeometriche del solco di taglio, l'unica richiesta che il processo deve soddisfare consiste nell'ottenere un taglio passante, garantendo cioè la separazione meccanica della lamiera. In questo primo caso l'interesse industriale è rivolto principalmente alla minimizzazione del costo e alla massimizzazione della produttività: i parametri saranno

selezionati in modo che sia garantita questa condizione.

In un secondo caso, è necessario valutare la qualità del taglio se le applicazioni dovessero richiederlo. Lo studio della qualità del taglio di schiume metalliche si riduce alla sola considerazione delle larghezze del solco in ingresso e in uscita, e della conicità del solco.

Lo studio della qualità microgeometrica (rugosità) risulta difficoltoso se non impossibile: il solco di uscita si mostra frastagliato e la misurazione della rugosità a diverse profondità di taglio è impossibile da determinare, a causa della morfologia della schiuma. Questa fase della sperimentazione sarà indirizzata a valutare la significatività della “conicità” nella descrizione della qualità del taglio e all’individuazione di ulteriori parametri adatti allo scopo.

Il valore da assegnare ai parametri di taglio sarà in questo caso selezionato per ottenere un miglioramento della qualità del taglio sulla base dei dati sperimentali ottenuti e i costi di lavorazione saranno, quindi, calcolati sulla base di tali parametri.

Alla luce delle considerazioni precedenti, la sperimentazione si prefigge i seguenti obiettivi:

- Selezione dei parametri per la minimizzazione del costo di taglio in modo da garantire la separazione meccanica della lamiera senza vincoli sulla qualità macrogeometrica del solco ottenuto.
Le lamiere in esame presentano 10-30 mm di spessore. Il calcolo dei costi minimi è effettuato sulla base dei valori assegnati ai parametri del processo.
- Studio della qualità del solco di taglio:
 1. Valutazione dei fattori significativi sulla larghezza dei solchi in ingresso e in uscita, e sulla la conicità del solco.
 2. Studio della significatività del parametro “conicità” per la caratterizzazione del solco di taglio nei pannelli in sola schiuma metallica e individuazione di ulteriori parametri descrittivi della qualità macrogeometrica.
 3. Selezione dei parametri monitorando la qualità del taglio. Il calcolo dei costi sarà effettuato sulla base dei valori assegnati ai parametri del processo.

Lo studio della qualità del taglio è effettuato in pannelli da 30 mm di spessore in modo da completare studi precedentemente effettuati in pannelli in sola schiuma di spessore 10 mm, nell’ambito del progetto “Tilas” [Mon06].

4.2 Parametri di interesse

Per la finalità del presente studio vengono elencati i parametri di lavorazione e di processo ritenuti significativi e che verranno fatti variare per selezionarne i valori ottimali, sia per la minimizzazione dei costi a taglio passante sia per lo studio della qualità del solco di taglio.

- P : pressione di esercizio (MPa);
- $Mesh \#$: numero di mesh dell'abrasivo;
- Q_{abr} : portata di abrasivo mm/min (g/min);
- $D_{foc}+D_{ug}$: combinazione delle due grandezze diametro interno dell'ugello primario e diametro interno dell'ugello focalizzatore (mm);
- u : velocità di avanzamento della testa durante il taglio (mm/min);
- $s.o.d.$: distanza tra l'ugello focalizzatore e il pezzo (mm)
- $tipo\ di\ abrasivo$: GMA Garnet (cfr. Appendice D)
- $numero\ di\ passate$

Durante la sperimentazione alcuni parametri vengono mantenuti costanti e i restanti sono fatti variare nel piano fattoriale a seconda delle finalità che il piano si prefigge. Tra i parametri che vengono mantenuti costanti si elencano:

Tabella 4. 1 Parametri costanti nella sperimentazione

PARAMETRI COSTANTI	
s.o.d.	2 mm
Dug/Dfoc	≈ 3
Tipo abrasivo	GMA Garnet
Mesh #	80
Numero passate	1
Inclinazione testa di taglio	90°
Direzione testa di taglio	Asse Y

S.o.d.

La distanza tra la punta del focalizzatore e il pezzo in lavorazione comporta una riduzione della coerenza del getto indipendentemente dal valore fissato per gli altri fattori. La scelta è quella di non considerare la distanza di stand off come parametro variabile, ma di considerarla fissa al valore più comunemente utilizzato e pari a 2 mm. Questa scelta è supportata anche dalla necessità di evitare al focalizzatore di entrare in contatto con la superficie della lamiera in assenza di uniformità (avvallamenti o sporgenze).

Rapporto tra gli ugelli, D_{foc}/D_{ug}

È pratica diffusa in ambito industriale utilizzare un determinato rapporto D_{foc}/D_{ug} (sotto consiglio delle stesse aziende produttrici degli impianti) e in letteratura si ha avuto conferma di come esista un rapporto ottimale tra queste due grandezze rispetto a diverse prestazioni (profondità di taglio e rugosità) [Cha91]. Anche per gli scopi di questo studio è utile tenere costante il rapporto D_{foc}/D_{ug} .

Durante la sperimentazione il valore del rapporto viene fissato in prossimità di quello ritenuto ottimale $(D_{foc}/D_{ug})_{opt}=3$, compatibilmente alla disponibilità dei materiali. Per tenere costante D_{foc}/D_{ug} , è necessario variare contemporaneamente i diametri dell'ugello primario e del focalizzatore; questa scelta impedisce di separarne gli effetti (per questo il nome del fattore è $D_{foc}+D_{ug}$). In ambito industriale il focalizzatore e l'ugello primario sono considerati sempre come un unico parametro, per cui appare ragionevole ed utile stimarne l'effetto congiunto a parità di rapporto tra i loro diametri interni.

I livelli del fattore $D_{foc}+D_{ug}$ vengono indicati, per semplicità, dalla sola misura del diametro del focalizzatore.

Gli ugelli focalizzatori a disposizione presso il laboratorio MUSP sono ugelli ROCTEC a lunghezza standard 76,2 mm e di diametro 0,76 mm e 1 mm a cui è possibile accoppiare ugelli primari da 0,25 mm e 0,30 mm.

Le combinazioni possibili rispondono perfettamente alle esigenze ricercate in quanto mantengono il rapporto D_{foc}/D_{ug} ad un valore prossimo a quello ritenuto ottimale.

Tabella 4. 2 Combinazione 1: Ugelli primari e focalizzatori utilizzati nella sperimentazione

Combinazione 1			
Diametro ugello primario	0,01	pollici	0,25 mm
Diametro focalizzatore	0,03	pollici	0,76 mm
Rapporto D_{foc}/D_{ug}	3		

Tabella 4. 3 Combinazione 1: Ugelli primari e focalizzatori utilizzati nella sperimentazione

Combinazione 2:			
Diametro ugello primario	0,012	pollici	0,30 mm
Diametro focalizzatore	0,04	pollici	1 mm
Rapporto D_{foc}/D_{ug}	3,33		

Mesh #

L'abrasivo a disposizione presenta un numero di Mesh# pari a 80. Gli abrasivi maggiormente diffusi industrialmente presentano valori tra 80# e 120#.

L'impiego di abrasivi più grossolani ha effetti negativi sulla qualità microgeometrica del solco, aumentando la rugosità del pezzo [Has91]. Il presente studio non ha lo scopo di indagare gli effetti dei parametri sulla finitura superficiale: per questo motivo l'utilizzo di abrasivo con grani a dimensione intermedia è adatto e non sono necessari abrasivi a Mesh# differenti.

Per materiali tradizionali omogenei, è possibile notare che abrasivi con dimensione intermedia dei grani permettono di raggiungere profondità di taglio maggiori (Fig 4.1 a) [Hash91]; la profondità raggiungibile in una sola passata (Fig 4.2 b) [Hash91] è maggiore per abrasivi a grani intermedi. Infine la rugosità aumenta con il diametro delle particelle abrasive, ma i tagli possono essere effettuati a velocità maggiori perché maggiore è il potere erosivo (Fig. 4.1 b, Fig.4.2 a)[Has91].

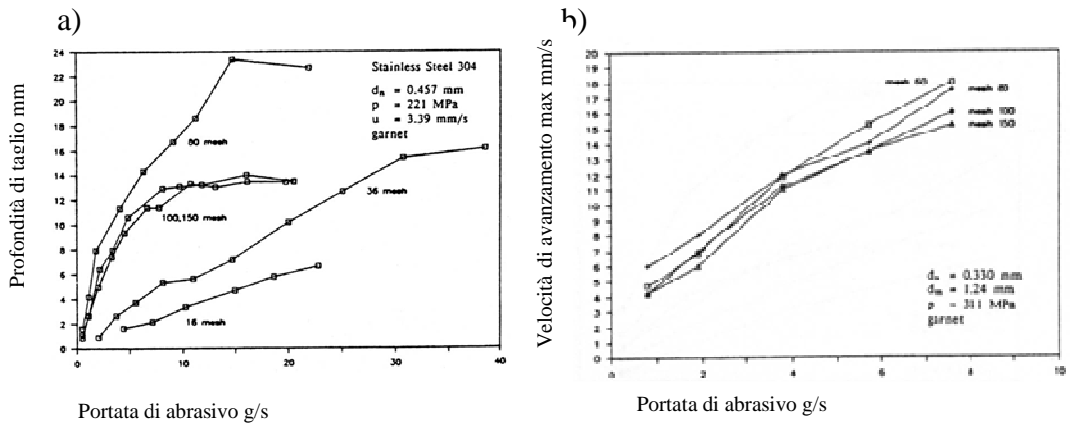


Figura 4. 1 Effetto del mesh# a) sulla profondità di taglio, b) sulla velocità di avanzamento massima [Has91]

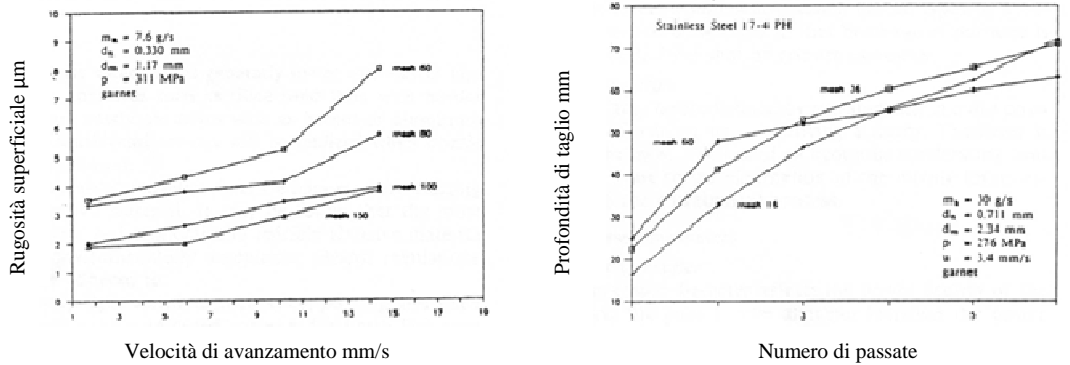


Figura 4. 2 Effetto del mesh# a) sulla rugosità superficiale, b) sulla profondità di taglio [Has91]

Pressione, portata di abrasivo e velocità di avanzamento

I livelli di questi fattori vengono fatti variare a seconda delle finalità delle sperimentazioni. Sia per pannelli da 10 mm che per pannelli da 30 mm, vengono eseguiti tagli preliminari per individuare la velocità massima al limite di taglio in modo da ottenere tagli passanti. Le indagini preliminari vengono effettuate nella combinazione sperimentale peggiore per l'ottenimento di un taglio passante ($P = 250$ MPa; $Q_{abr} = 95$ g/min; Mesh #80; $D_{foc} = 0,76$ mm) [Ann99].

Durante le prove preliminari per entrambi i pannelli la velocità di avanzamento viene fatta variare su molti livelli per individuare la velocità limite. A seguire per pannelli di spessore 30 mm i valori di pressione e portata di abrasivo vengono fatti variare in 2 e 4 livelli per selezionare i parametri di taglio migliori. Si sono determinati i livelli della pressione secondo i più diffusi valori a livello industriale e in modo da sfruttare l'intensificatore al massimo della sua potenzialità, garantendo però una certa escursione tra valore basso e valore alto (livello basso: 250 MPa; livello alto: 350 MPa).

4.3 Prove preliminari

Prima di eseguire le prove di taglio sui pannelli è necessario eseguire una serie di prove preliminari sull'impianto water jet a disposizione:

- Taratura del sistema per individuare i livelli di portata di abrasivo smaltiti dall'impianto;
- Prove di intasamento per verificare che l'accoppiamento *massima portata di abrasivo-minimo diametro del focalizzatore* non causi intasamenti all'interno della camera di miscelazione.

4.3.1 Taratura del sistema

Il sistema per la taratura dell'abrasivo utilizza un disco di regolazione caratterizzato da otto fori di diverse dimensioni. Ruotando il disco si porta il foro desiderato sotto la tramoggia e si determina la portata di abrasivo.

Già studi precedenti hanno evidenziato metodologie per la taratura del sistema di adduzione dell'abrasivo [Ann99]. Nel presente studio, per una prima approssimazione, il processo di taratura viene effettuato mantenendo chiuso il getto d'acqua, e aprendo e chiudendo esclusivamente il getto di abrasivo. In questo modo la taratura stessa viene effettuata per gravità, attraverso la semplice caduta del getto abrasivo tramite la luce del foro a valle delle tramoggia.

Si deve precisare che in questo modo non è possibile valutare la reale portata di abrasivo del sistema che non prescinde dall'azione del getto d'acqua.

Il processo che consente all'abrasivo di arrivare dalla tramoggia alla testa di taglio è regolato sia da semplice caduta per gravità sia dalla spinta dell'aria sulle particelle di abrasivo stesso. Nella camera di miscelazione il getto d'acqua particolarmente veloce crea una depressione: in questo modo l'aria aspirata risucchia le particelle di abrasivo per effetto Venturi (cfr.1.2.2). A fianco di una prima stima di taratura per sola gravità, si deve aggiungere la taratura a getto aperto per valutare l'influenza del risucchio dell'aria sulle particelle di abrasivo, al fine di stimare in modo preciso il reale quantitativo di abrasivo in grado di fluire nel processo di taglio.



Figura 4. 3 Disco forato per la regolazione dell'abrasivo

La procedura sperimentale che ha consentito di arrivare alla stima del quantitativo di abrasivo in grado di fluire nel processo di taglio, viene ampiamente descritto in Appendice A. In seguito si riportano semplicemente i risultati ottenuti dalla sperimentazione.

La sperimentazione eseguita ha permesso di giungere a un modello lineare per la stima della portata di abrasivo in funzione di ciascun foro. Nel calcolo dei costi di taglio compare la voce relativa al consumo di abrasivo: il costo relativo è proporzionale alla portata che fluisce durante il processo di taglio; i valori stimati dal modello di regressione sono i medesimi che saranno utilizzati per il calcolo dei costi stessi.

4.3.1.1 Modello per il calcolo della portata di abrasivo

La procedura sperimentale (cfr. Appendice A) ha permesso di giungere a un modello per il calcolo della portata di abrasivo.

È possibile sintetizzare graficamente i dati attraverso l'andamento della portata misurata rispetto al valore di foro e ugello focalizzatore e l'andamento della portata misurata rispetto al valore di pressione e di numero di foro.

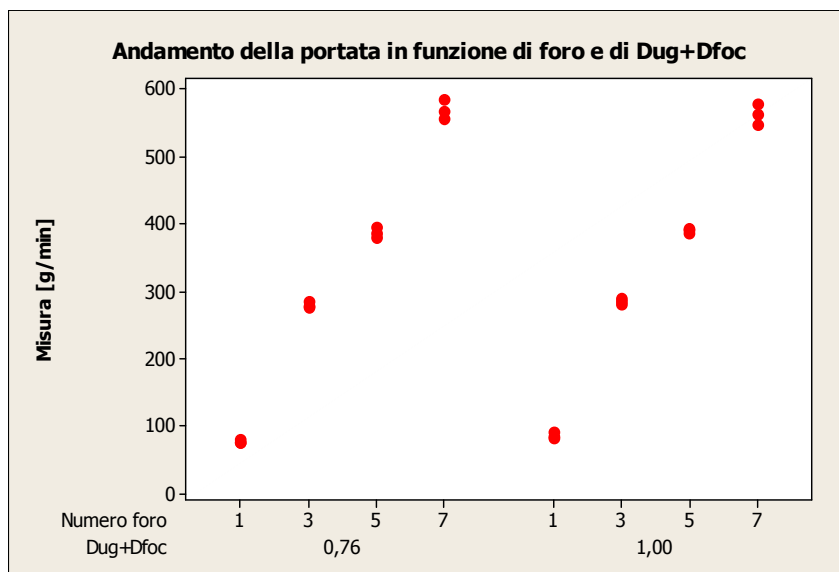


Figura 4. 4 Andamento della portata in funzione dell'accoppiamento Dug+Dfoc e del numero di foro

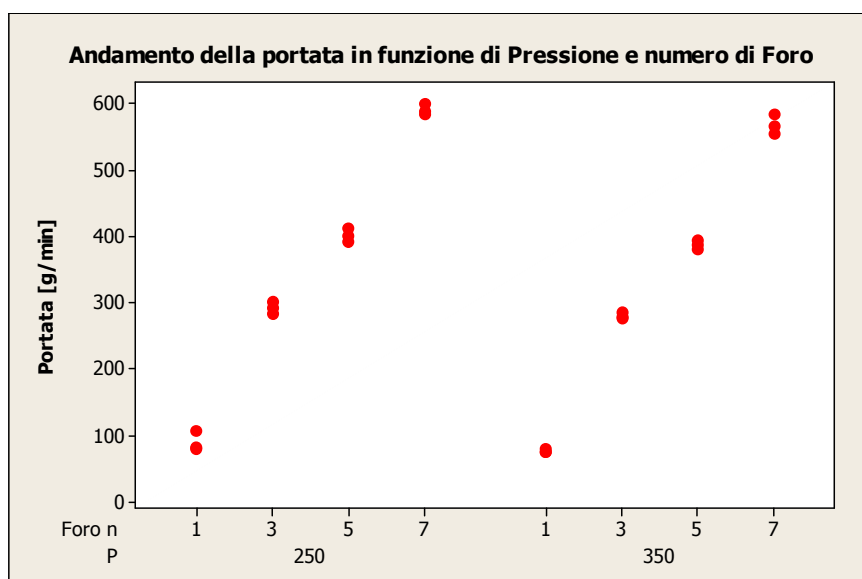


Figura 4. 5 Andamento della portata in funzione della pressione e del numero di foro

Dall'analisi dei dati sperimentali ottenuti è possibile ricavare un modello generale che consente di ottenere il valore della portata per ciascuno degli otto fori del disco regolabile.

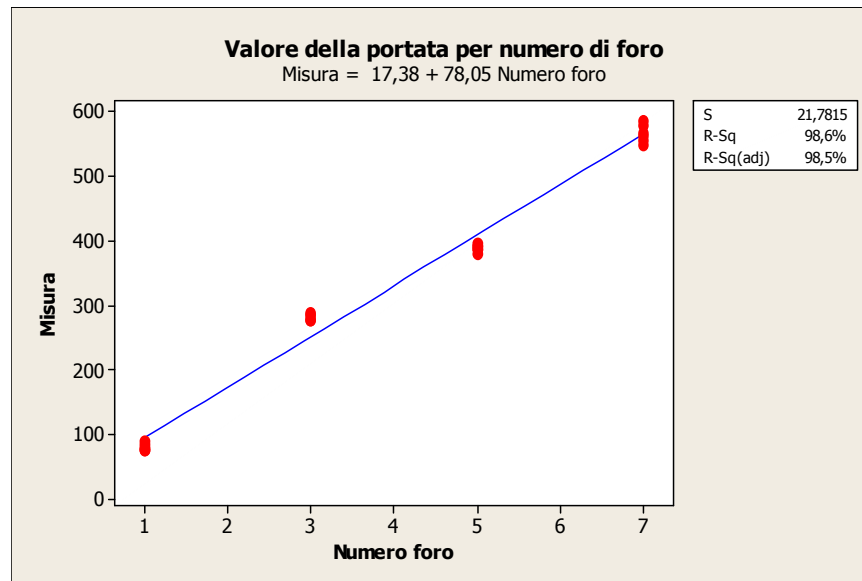


Figura 4. 6 Valore della portata in funzione del numero di foro

Applicando il modello ottenuto dalla regressione lineare, si trovano i valori di portata associati a ciascun foro riassunti nella tabella sottostante.

Tabella 4. 4 Valore della portata di abrasivo per ciascun foro

FORO	PORTATA g/min
1	95
2	173
3	252
4	330
5	408
6	486
7	564
8	642

4.3.2 Prove di intasamento

Dopo aver determinato l'effettivo valore della portata di abrasivo che fluisce durante il processo di taglio è necessario verificare che l'accoppiamento *massima portata – minimo diametro dell'ugello focalizzatore* non crei intasamenti all'interno della camera di miscelazione. Vengono effettuate prove di intasamento della durata di un minuto a testa ferma e a testa in movimento a diverse velocità di avanzamento, per verificare che il flusso di abrasivo sia continuo, senza di interruzioni, in entrambi i casi. Le prove di intasamento

vengono effettuate sul livello “alto” di portata di abrasivo, corrispondente al foro 7 (564 g/min).

È bene verificare sempre durante i tagli che la pressione del serbatoio di adduzione dell’abrasivo sia settata su un valore che consenta sempre all’abrasivo di giungere alla tramoggia a monte della testa di taglio; in caso contrario non giungerebbe abrasivo sufficiente al suo riempimento, in particolare per tagli a portata massima e di lunga durata.

Tabella 4. 5 Condizioni sperimentali per le prove di intasamento

Portata abrasivo	Foro 7 – 564 g/min
Ugello primario	0,76 mm
Ugello focalizzatore	0,25 mm

4.3.2.1 Prova di intasamento a testa di taglio ferma

Tabella 4. 6 Prove di intasamento a testa di taglio ferma

Testa di taglio	Ferma	Ferma
Pressione	250 MPa	350 MPa
Durata misurazione	1 min	1 min
Flusso continuo?	Sì	Sì

La prova ha avuto esito positivo: il flusso è stato continuo per la durata della misurazione.

4.3.2.2 Prova di intasamento a testa di taglio in movimento

Tabella 4. 7 Condizioni sperimentali per prove di intasamento a testa di taglio in movimento

Testa di taglio	In movimento
Durata misurazione	1 min

Tabella 4. 8 Prove di intasamento a testa di taglio in movimento

Velocità di Avanzamento mm/min	Pressione MPa	
	250	350
	Flusso continuo?	
100	Sì	Sì
200	Sì	Sì
300	Sì	Sì
400	Sì	Sì
500	Sì	Sì

La prova ha avuto esito positivo: il flusso è stato continuo per la durata della misurazione.

4.4 Analisi dello spessore tagliabile

Questa fase della sperimentazione viene condotta per pannelli di alluminio in sola schiuma metallica con spessori di 10 mm e 30 mm; queste tipologie di spessori sono quelli più comunemente reperibili in commercio. Si sono scelti pannelli con queste caratteristiche in modo da analizzare il taglio sia per piccoli spessori tra quelli reperibili (10 mm) e allo stesso tempo per lo spessore massimo a disposizione (30 mm). L'obiettivo di questa fase sperimentale consiste nell'individuazione dei valori da associare ai parametri che consentono di ottenere un taglio passante per entrambi gli spessori: il taglio deve quindi consentire la separazione dei lembi della lamiera, senza particolari finiture e vincoli sulla macrogeometria del solco tagliato.

In questa fase vengono fatti variare tutti i parametri di processo e lavorazione sui quali l'operatore è in grado di agire: *Pressione*, *Portata*, *Velocità di avanzamento*, *Dug+Dfoc*. Inizialmente si individua per ciascun pannello la velocità massima al limite di taglio partendo dalla condizione più sfavorevole. I risultati della prima indagine saranno la base per la determinazione del livello "alto" e del livello "basso" per la variazione del fattore *Velocità di avanzamento* in piani fattoriali, da effettuare, se necessario, in seguito alla prima sperimentazione.

I risultati finali al termine di tutta la sperimentazione per l'analisi dello spessore tagliabile saranno la base per la creazione dei vincoli da imporre ai modelli di costo considerati nella fase di ottimizzazione per la minimizzazione del costo di taglio. Inoltre i risultati della sperimentazione saranno utilizzati per impostare il piano fattoriale per pannelli di spessore 30 mm per l'analisi della qualità del taglio.

4.4.1 Sistema di serraggio

Il sistema di fissaggio deve mantenere saldamente vincolata la lamiera da tagliare alle griglie della vasca. Su ciascuna lamiera vengono effettuati tagli a pettine, in successione: una volta terminato il processo di taglio, il provino viene ritagliato. La lamiera viene vincolata alla griglia della vasca tramite morsetti che sono posti ai lati della lamiera stessa, in modo da ottenere un serraggio dalla struttura il più possibile rigida. Dato che in questa fase sperimentale l'interesse non è indirizzato alla qualità del solco di taglio, ma dal semplice taglio della lamiera per ottenere un taglio passante, non si valuta l'influenza delle vibrazioni del pezzo durante la lavorazione. Questo fenomeno potrebbe influenzare negativamente i risultati della rugosità superficiale, ma l'analisi della qualità microgeometrica del taglio delle schiume non è oggetto del presente studio. È da sottolineare, inoltre, che in questa fase sperimentale non vi è l'esigenza di tagliare preventivamente i provini e successivamente eseguire i tagli a pettine (cfr. 4.5.3): la lamiera viene mantenuta integra e i tagli sono effettuati uno in

seguito all'altro. Le dimensioni e il peso della lamiera contribuiscono al suo mantenersi saldamente vincolata alle griglie, rendendo il sistema di fissaggio meno importante.

Il pannello da lavorare viene fissato quindi tramite morsetti alle griglie della vasca in modo che il getto d'acqua sia perpendicolare alla superficie.



Figura 4. 7 Sistema di serraggio tramite morsetti per l'analisi dello spessore tagliabile

4.4.2 Pannelli 10 mm

La fase preliminare della sperimentazione in pannelli da 10 mm consiste nell'individuazione della velocità massima al limite di taglio, partendo dalla condizione di taglio più sfavorevole: dai risultati ottenuti dalla fase preliminare si vaglierà la necessità di effettuare ulteriori sperimentazioni sui pannelli di questo spessore.

4.4.2.1 Velocità massima al limite di taglio

L'obiettivo di questa sperimentazione consiste nell'individuazione della velocità massima al limite di taglio partendo dalla condizione di taglio più sfavorevole. I risultati saranno la base per la determinazione del livello "alto" e del livello "basso" per la variazione del fattore *Velocità di avanzamento* in piani fattoriali, da effettuare, se necessario, in seguito a questa prima sperimentazione.

In questa fase il livello dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, *Dug+Dfoc* è fisso, mentre la velocità di avanzamento viene fatta variare su più livelli per individuare la condizione limite. In tabella sono riassunte le condizioni sperimentali:

Tabella 4. 9 Valore dei fattori, prove preliminari in pannelli da 10 mm

<i>Pressione</i>	250 MPa
<i>Portata</i>	Foro 1 – 95 g/min
<i>Dug+Dfoc</i>	0,76 mm

I parametri di taglio costanti sono stati elencati in tabella 4.1 e rimangono i medesimi per tutte le sperimentazioni eseguite.

La velocità di avanzamento è fatta variare con incrementi di 100 mm/min da 100 mm/min a 1000 mm/min e con incrementi di 200 mm/min da 1000 a 5000 mm/min con due ripetizioni per ciascun taglio. I provini presentano 20 tagli ciascuno per un totale di 60 tagli.

In questa fase vengono effettuati tagli a pettine della lunghezza di 30 mm alla distanza di 5 mm ciascuno come riportato in fig. 4.8. Un programma impostato a controllo numerico permette di effettuare i tagli in modo consecutivo inserendo ogni volta la velocità di avanzamento e la distanza tra le passate (Appendice B). Per consentire alla testa di taglio di accelerare prima di incontrare il bordo della lamiera, la partenza di ogni taglio è fissata a 20 mm di distanza.

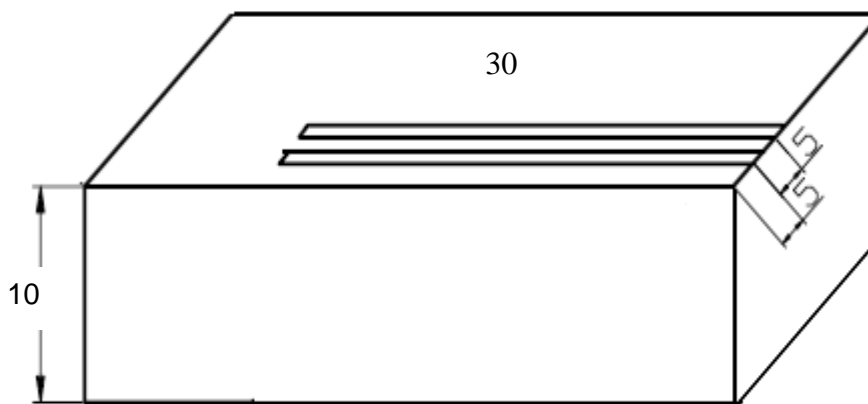


Figura 4. 8 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 10 mm

I tagli sono suddivisi in tre provini e tutti casualizzati secondo numeri casuali generati dal programma Minitab®: in questo modo i tagli alla stessa velocità di avanzamento sono distribuiti in punti differenti della lamiera.

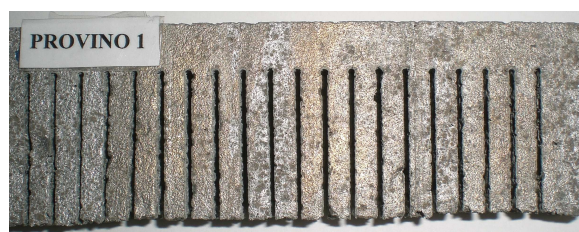
Tabella 4. 10 Ripartizione dei livelli di velocità nei provini

Provino 1	100 -1000 mm/min
Provino 2	1200 – 3000 mm/min
Provino 3	3200 – 5000 mm/min

Nelle tabelle sottostanti sono sintetizzate le condizioni di taglio con l’esito del taglio.

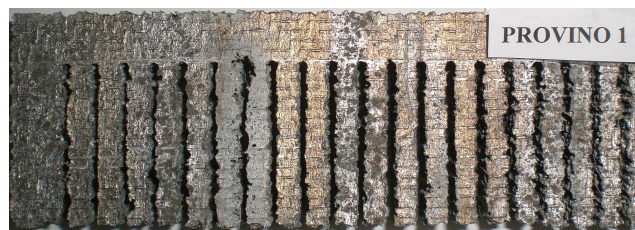
Tabella 4. 11 Esito provino 1

N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
1	500	Sì
2	200	Sì
3	700	Sì
4	1000	Sì
5	800	Sì
6	300	Sì
7	100	Sì
8	600	Sì
9	200	Sì
10	400	Sì
11	800	Sì
12	400	Sì
13	300	Sì
14	1000	Sì
15	900	Sì
16	600	Sì
17	900	Sì
18	500	Sì
19	100	Sì
20	700	Sì



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Figura 4. 9 Esito taglio provino 1, fronte



20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Figura 4. 10 Esito taglio provino 1, retro

Gli esiti dei tagli con velocità di avanzamento comprese tra 100 mm/min e 1000 mm/min sono risultati tutti passanti. Si continua nella sperimentazione considerando velocità comprese tra 1200 mm/min e 3000 mm/min.

Tabella 4. 12 Esito provino 2

Provino 2		
N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
21	2600	Sì
22	3000	Sì
23	1200	Sì
24	2800	Sì
25	2400	Sì
26	2800	Sì
27	2400	Sì
28	1800	Sì
29	1600	Sì
30	2000	Sì
31	1200	Sì
32	1400	Sì
33	1600	Sì
34	2200	Sì
35	2000	Sì
36	3000	Sì
37	2600	Sì
38	1800	Sì
39	2200	Sì
40	1400	Sì

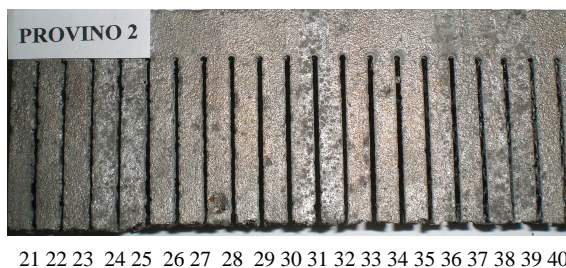


Figura 4. 11 Esito taglio provino 2, fronte



Figura 4. 12 Esito taglio provino 2, retro

Anche gli esiti con velocità di avanzamento comprese tra 1200 mm/min e 3000 mm/min hanno dato esiti tutti passanti. Si procede aumentando la velocità di avanzamento tra 3200 e 5000 mm/min.

Tabella 4. 13 Esito provino 3

Provino 3		
N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
41	4600	Si
42	3600	Si
43	5000	Si
44	4400	Si
45	3200	Si
46	4800	Si
47	5000	Si
48	4000	Si
49	4000	Si
50	4200	Si
51	4600	Si
52	4200	Si
53	4800	Si
54	3600	Si
55	3400	Si
56	3200	Si
57	3800	Si
58	4400	Si
59	3800	Si
60	3400	Si

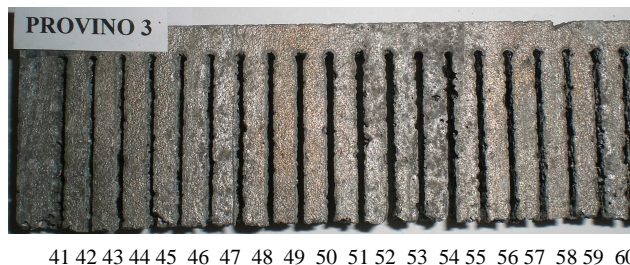


Figura 4. 13 Esito provino 3, fronte

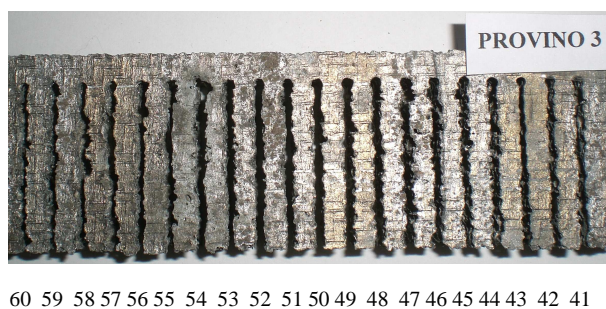


Figura 4. 14 Esito provino 3, retro

Gli esiti della sperimentazione per il provino 3 hanno presentato ancora una volta tagli passanti.

Per pannelli in sola schiuma di spessore 10 mm, gli esiti dei tagli risultano sempre passanti per le condizioni sperimentali fino a qui analizzate. Si decide di non proseguire nella variazione del livello del fattore *Velocità di avanzamento*: a livello industriale infatti, la velocità di avanzamento al limite di taglio trovata in questa sperimentazione, pari a 5000 mm/min, risulta essere più che soddisfacente.

Nella combinazione sperimentale peggiore per l'ottenimento di un taglio passante ($P = 250$ MPa; $Foro I - Q_{abr} = 95$ g/min; $D_{ug} + D_{foc} = 0,76$ mm), la massima velocità di avanzamento impostabile è quindi compresa tra 100 e 5000 mm/min. Non si prosegue nell'indagine impostando altri piani sperimentali: successive indagini risulterebbero inutili poiché dalle combinazioni a bassa energia gli esiti sono sempre stati positivi, garantendo sempre un taglio passante.

4.4.2.2 Velocità massima al limite di taglio senza abrasivo

È noto da letteratura che aumentando la portata di abrasivo, aumenta la profondità di taglio, fino ad un massimo che si ha per $Q_{abr}/Q_w=0,5$ [Has91]; oltre questo limite possono insorgere fenomeni di intasamento della camera. È stato provato sperimentalmente come esista, a parità di focalizzatore, un rapporto ottimo Q_{abr}/Q_w ai fini della profondità di taglio [Cha91] (cfr. fig. 4.15). L'ottimo si mantiene a tale valore anche a diverse pressioni; ovviamente, siccome Q_w cresce per P maggiori, anche Q_{abr} dovrà crescere e l'ottimo si sposterà a destra per le curve a pressione più elevata. Q_{abr}/Q_w vale da 0,19 a 0,3 variando il focalizzatore (0,19 per $D_{foc}=1,65$ mm, $Dug=0,53$ mm e $L_{foc}=79$ mm; 0,3 per $D_{foc}=0,76$ mm, $Dug=0,25$ mm e $L_{foc}=51$ mm). È possibile risparmiare fino al 47% di Q_{abr} se ci si accontenta di restare all'85% della massima profondità di taglio raggiungibile [Cha91]

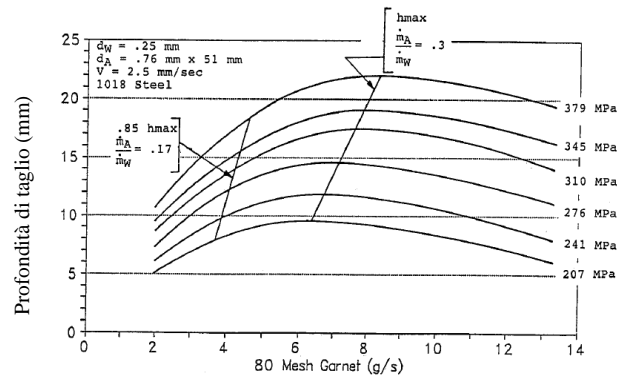


Figura 4. 15 Profondità di taglio in funzione della portata di abrasivo [Cha91]

A questo punto della sperimentazione è interessante impostare un altro tipo di analisi: poiché si ottengono tagli passanti fino a 5000 mm/min in condizioni di minima energia, è interessante valutare fino a che velocità di avanzamento è possibile ottenere un taglio passante nelle medesime condizioni sperimentali, analizzate con i tagli preliminari presentati nel precedente paragrafo, senza utilizzare abrasivo. Dall'analisi dei modelli di costo (cfr. Capitolo 2), la spesa per il taglio in €/m è direttamente proporzionale alla portata di abrasivo e inversamente proporzionale alla velocità di avanzamento (alla massima velocità di avanzamento corrisponde anche la massima produttività). Entrambi i fattori *Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento* svolgono quindi, un ruolo determinante nella definizione dei costi finali di taglio. Eliminando l'utilizzo di abrasivo è evidente che i costi di taglio risulterebbero ridotti, ma è necessario considerare che il mancato utilizzo di abrasivo comporta una riduzione della velocità di avanzamento utilizzabile e quindi della produttività ottenibile. È necessario valutare, quindi, quanto questa decisione risulti economicamente vantaggiosa: l'analisi e la stima del costo totale di taglio, in base ai parametri

risultanti da questa indagine sperimentale, vengono presentati in seguito (cfr. Capitolo 5).

Le prove vengono condotte nelle medesime condizioni sperimentali del caso precedente (cfr. 4.4.2.1) e si vuole analizzare fino a quale velocità di avanzamento è possibile ottenere un taglio passante senza abrasivo.

Tabella 4. 14 Valore dei fattori, velocità al limite di taglio in pannelli da 10 mm

<i>Pressione</i>	250 MPa
<i>Portata di abrasivo</i>	Foro 1 – 95 g/min
<i>Dug+Dfoc</i>	0,76 mm

Inizialmente la velocità di avanzamento è fatta variare tra 25 a 200 mm/min con incrementi di 25 mm/min, con due tagli per ciascuna condizione, per un totale di 16 tagli. Poiché gli esiti del taglio hanno portato ad avere tagli non passanti per tutte le condizioni si è abbassato ulteriormente il livello di velocità variando a 5, 10, 20 mm/min, con due ripetizioni per condizione, per un totale di 6 tagli. I risultati sono sintetizzati nella tabella seguente.

Tabella 4. 15 Esiti taglio senza abrasivo, pannelli 10 mm, 25<velocità <200 mm/min

N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
1	175	NO
2	25	NO
3	200	NO
4	75	NO
5	125	NO
6	75	NO
7	100	NO
8	50	NO
9	175	NO
10	100	NO
11	200	NO
12	125	NO
13	25	NO
14	150	NO
15	50	NO
16	150	NO

Tabella 4. 16 Esiti taglio senza abrasivo, pannelli 10 mm, velocità 5, 10, 20 mm/min

N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
17	10	Sì
18	20	Sì
19	10	Sì
20	20	Sì
21	5	Sì
22	5	Sì

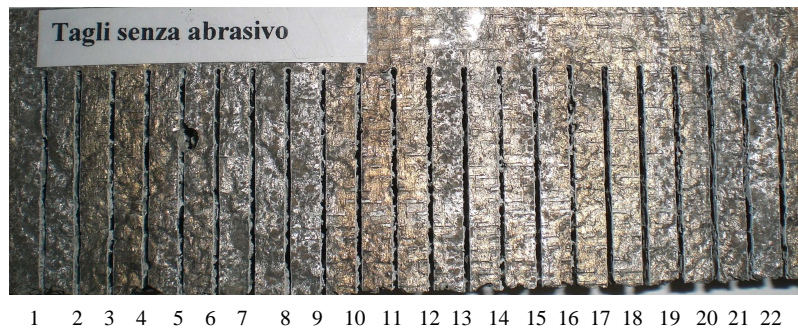


Figura 4. 16 Provino per tagli senza abrasivo, fronte

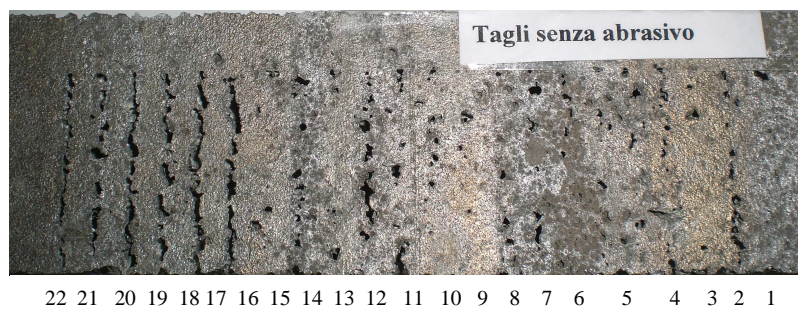


Figura 4. 17 Provino per tagli senza abrasivo, retro

Dall’osservazione dei tagli si nota che per velocità da 5 mm/min a 20 mm/min l’esito è passante. I lembi della lamiera in alcune condizioni presentano sottili ponti di collegamento corrispondenti alla pelle dell’ultima bolla sovrastante. Risulta molto facile distruggere meccanicamente questi collegamenti tra le due superfici, per cui possiamo considerare il taglio passante poiché in questa sperimentazione non si ricerca particolare qualità del taglio.

Come si vedrà anche in seguito per i tagli a maggior spessore e in particolare nello studio della qualità del solco, la morfologia interna della schiuma metallica ha influenza sul processo di taglio. I bordi di uscita risultano frastagliati (in particolare, senza l'utilizzo di abrasivo, il fenomeno risulta particolarmente accentuato). Questo fenomeno è dovuto al fatto che il getto d'acqua incontra periodicamente le pareti delle bolle per poi attraversare lo spazio vuoto all'interno di esse: nell'attraversamento di continui spazi vuoti per poi impattare su di un sottile strato di materiale che costituisce lo spessore della bolla, il getto perde coerenza e la sua energia specifica diminuisce, causando notevole variabilità sul bordo di uscita. Il profilo di uscita dipende, quindi, dalla distribuzione delle bolle che il getto attraversa durante il taglio.

Inoltre, gli esiti dei tagli non sono sempre caratterizzati da ripetibilità: i tagli nelle medesime condizioni di velocità, infatti, hanno comportato separazione completa dei lembi della lamiera in una ripetizione, mentre nel taglio successivo sono rimasti i sottili ponti di collegamento.

Si considerano i due tagli a 20 mm/min (n. ro 18 e n. ro 20): si nota che il taglio n. ro 20 è completamente passante, nonostante la cattiva finitura del solco, mentre il taglio n. ro 18, nelle medesime condizioni, presenta piccole unioni sulla lamiera. Il fatto che per una delle due ripetizioni il taglio risulti completamente passante, permette di affermare che la morfologia della schiuma influenza il processo e che la combinazione dei parametri porta comunque ad un taglio passante (la lamiera può essere facilmente separata meccanicamente anche con presenza di ponti di collegamento).

Anche i tagli a velocità inferiori 5 mm/min (n. ro 22 e n. ro 21) presentano profili differenti a conferma che la morfologia della schiuma influenza il processo di taglio.



22 21 20 19 18 17

Figura 4. 18 Esiti per tagli senza abrasivo, pannelli 10 mm, velocità 5, 10, 20 mm/min

La velocità massima al limite di taglio per pannelli in sola schiuma, effettuando i tagli senza abrasivo, risulta 20 mm/min. Rispetto ai tagli con getto idroabrasivo

la velocità di avanzamento si riduce da 5000 mm/min a 20 mm/min. Dato che la riduzione della velocità di avanzamento è pari a due ordini di grandezza non si procede nell'impostazione di ulteriori piani sperimentali variando i fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, *Dug+D_{foc}* su più livelli. L'utilizzo del getto idroabrasivo consente di impostare velocità di avanzamento notevolmente superiori. Il confronto dei costi nelle due condizioni di taglio verrà affrontato in seguito (cfr. Capitolo 5), considerando il valore dei parametri utilizzato nella sperimentazione.

4.4.2.3 Conclusioni: pannelli in schiuma a 10 mm di spessore

- Nella combinazione sperimentale peggiore per l'ottenimento di un taglio passante ($P = 250 \text{ MPa}$; $Q_{abr} = 95 \text{ g/min}$ – Foro 1; $Dug+D_{foc} = 0,76 \text{ mm}$), la massima velocità di avanzamento impostabile vale 5000 mm/min. Avendo ottenuto tagli sempre passanti nelle condizioni peggiori fino a velocità di 5000 mm/min, si rendono inutili ulteriori verifiche in condizioni diverse. I vincoli per l'ottimizzazione e calcolo del costo minimo di lavorazione sono quindi:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 5000 \text{ (mm/min)} \\ 250 < Pressione < 350 \text{ (MPa)} \\ 95 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 0,76 - 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

- Nella combinazione sperimentale $Pressione = 250 \text{ MPa}$; $Dug+D_{foc} = 0,76 \text{ mm}$, la velocità massima al limite di taglio senza abrasivo risulta pari a 20 mm/min.

Il confronto dei costi di taglio senza utilizzo di abrasivo, e con getto idro-abrasivo a parità di fattori, verrà trattato in seguito.

4.4.3 Pannelli 30 mm

La sperimentazione per pannelli da 30 mm mantiene lo stesso approccio utilizzato per pannelli da 10 mm. La fase preliminare consiste nella ricerca della velocità massima al limite di taglio. Come si vedrà in seguito, diversamente dai risultati ottenuti per pannelli a 10 mm non sarà sufficiente limitare l'indagine facendo variare solamente il parametro velocità di avanzamento, ma sarà necessario variare su più livelli i fattori del piano, in modo tale da selezionare in dettaglio i valori dei parametri che consentono di ottenere un taglio passante.

4.4.3.1 Velocità massima al limite di taglio

Così come per i pannelli da 10 mm, l'obiettivo di questa sperimentazione consiste nell'individuazione della velocità massima al limite di taglio partendo dalla condizione di taglio più sfavorevole. I risultati saranno la base per la determinazione del livello "alto" e del livello "basso" per la variazione fattore velocità di avanzamento in piani fattoriali da effettuare in seguito a questa prima sperimentazione.

I livelli dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, *Dug+Dfoc* sono fissi, mentre la velocità di avanzamento viene fatta variare su più livelli per individuare la condizione limite. In tabella sono riassunte le condizioni sperimentali:

Tabella 4. 17 Valore dei fattori, prove preliminari in pannelli da 30 mm

<i>Pressione</i>	250 MPa
<i>Portata di abrasivo</i>	Foro 1 – 95 g/min
<i>Dug+Dfoc</i>	0,76 mm

I parametri di taglio costanti sono stati elencati in tabella 4.9 e rimangono i medesimi per tutte le sperimentazioni eseguite.

La velocità di avanzamento è fatta variare tra 50 mm/min a 1000 mm/min con incrementi variabili: da 50 a 100 mm/min, da 100 a 700 mm/min con incrementi di 100 mm/min, e infine da 700 a 1000 mm/min. Ciascun taglio è ripetuto due volte per condizione, per un totale di 18 tagli.

Anche in questa prima fase, come per pannelli a 10 mm di spessore, vengono effettuati tagli a pettine, della lunghezza di 30 mm e alla distanza di 5 mm ciascuno, come riportato in fig. 4.19. Un programma impostato a controllo numerico permette di effettuare i tagli in modo consecutivo inserendo ogni volta la velocità di avanzamento e la distanza tra le passate (Appendice B).

Per consentire alla testa di taglio di accelerare prima di incontrare il bordo della lamiera, la partenza di ogni taglio è fissata a 20 mm di distanza.

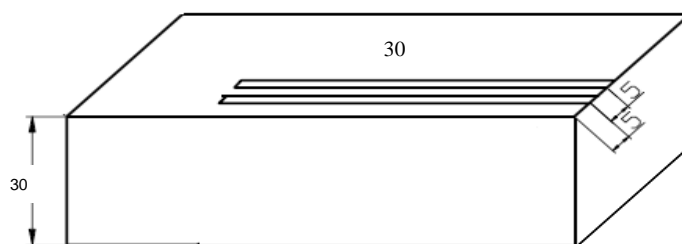


Figura 4. 19 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire: pannelli 30 mm

I tagli sono casualizzati in modo che, alla stessa velocità di avanzamento, siano distribuiti in punti differenti della lamiera.

I risultati della sperimentazione sono sintetizzati nella tabella sottostante.

Tabella 4. 18 Esiti della sperimentazione, pannelli 30 mm, velocità al limite di taglio

N. ro taglio	Velocità (mm/min)	Passante?
1	600	No
2	50	Sì
3	1000	No
4	200	Sì
5	400	No
6	300	No
7	300	No
8	400	No
9	1000	No
10	100	Sì
11	500	No
12	100	Sì
13	200	Sì
14	700	No
15	50	Sì
16	700	No
17	600	No
18	500	No



Figura 4. 20 Esito provino tagli preliminari, 30 mm, fronte

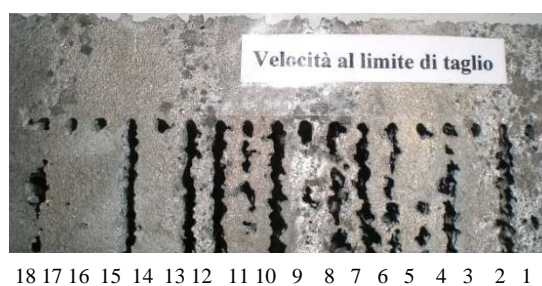


Figura 4. 21 Esito provino tagli preliminari, 30 mm, retro

L'esito delle prove conferma che, per velocità di avanzamento pari a 50mm/min e 100 mm/min, i tagli sono completamente passanti per entrambe le ripetizioni. A velocità di avanzamento pari a 200 mm/min un taglio è risultato completamente passante (taglio n. ro 13), mentre l'altra ripetizione presenta sottili ponti di collegamento tra la lamiera (taglio n. ro 4). Come già evidenziato dagli esiti per tagli a 10 mm senza abrasivo, il processo di taglio dipende dalla morfologia interna della schiuma metallica e non è sempre garantita la ripetibilità dell'esito del taglio (cfr. paragrafo 4.4.2.2). I sottili ponti di collegamento sono facilmente separabili dato che corrispondono alla pelle delle bolle sovrastanti. Poiché un taglio ha dato esito passante e il successivo presenta sottili ponti si può considerare la condizione a 200 mm/min a esito passante.

I tagli n. ro 6 e 7 (300 mm/min) e n. ro 8 (400 mm/min) presentano ponti di collegamento tra i due lembi di lamiera. I due lati del pannello sarebbero facilmente separabili meccanicamente, ma poiché entrambi i tagli presentano questo fenomeno (300 mm/min) e poiché la seconda ripetizione dà un esito non passante (n. ro 5 - 400 mm/min), non è possibile concludere che per velocità di avanzamento a 300 mm/min e 400 mm/min sia possibile ottenere tagli passanti.

A questo punto della sperimentazione non si è in grado di identificare l'effettivo valore da associare ai parametri di taglio per ottenere un taglio passante. È necessario valutare l'esito della sperimentazione a diversi valori di portata e di pressione, e con ugelli a dimensioni differenti. La sperimentazione prosegue individuando piani fattoriali che consentano di valutare l'interazione fra i fattori a diversi livelli, e che consentano di selezionare il valore corretto da associare ai parametri di taglio nel calcolo nella minimizzazione dei costi.

4.4.3.2 Piano fattoriale 2 livelli per portata di abrasivo e velocità di avanzamento

Per selezionare i parametri che consentono di ottenere un taglio passante in pannelli di spessore 30 mm, le prove sperimentali sono organizzate secondo un piano fattoriale comprendente tutti e quattro i fattori: *Portata di abrasivo*, *Pressione*, *Velocità di avanzamento*, *Dug+Dfoc*. I fattori sono fatti variare in due livelli "alto" e "basso".

L'indagine preliminare ha dimostrato che per velocità pari a 1000 mm/min con *Portata di abrasivo* pari a 95 g/min, *Pressione* pari a 250 MPa, *Dug+Foc* pari a 0,76 mm il taglio risulta non passante. Il livello "alto" per il fattore *Velocità di avanzamento* viene mantenuto ancora a 1000 mm/min per valutare quale combinazione nei livelli dei fattori dia come esito un taglio passante.

Nella tabella 4.19 sono indicati i valori dei livelli dei fattori inseriti nel piano fattoriale.

Tabella 4. 19 Valori dei livelli nel piano fattoriale preliminare

FATTORE	LIVELLO BASSO	LIVELLO ALTO
Pressione (MPa)	250	350
Portata di abrasivo – n. ro foro	1	7
Dug+Dfoc (mm)	0,76	1
Velocità di avanzamento (mm/min)	100	1000

Il piano fattoriale è del tipo $n \cdot 2^k$, con k numero dei fattori e n numero delle ripetizioni per condizione. Le risposte del piano fattoriale non saranno oggetto di indagine statistica, ma verranno utilizzate per individuare quale valore dei fattori consente di ottenere un taglio passante: pertanto il valore della risposta sarà semplicemente “Sì” nel caso di taglio passante, “No” in caso contrario.

Si considerano 3 ripetizioni per condizione per un totale di 48 tagli.

Tutte le condizioni sono state casualizzate sfruttando una serie di numeri casuali generati dal programma Minitab® e suddivise in due blocchi corrispondenti al livello del fattore *Dug+Dfoc*.

L’operazione di montaggio e smontaggio dell’ugello primario e del focalizzatore può risultare complessa e può causare la rottura degli stessi: per questi motivi il continuo cambiamento degli ugelli può non assicurare l’uniformità di condizioni per tutte le prove. Per questo motivo i 48 tagli (16 condizioni sperimentali * 3 ripetizioni) sono suddivisi in due blocchi, corrispondenti ai livelli del fattore *Dug+Dfoc* [Mon01].

I tagli vengono eseguiti secondo la successione casualizzata sulla medesima lamiera e in base al blocco corrispondente (*Dug+Dfoc*=0,76 mm; *Dug+Dfoc*= 1 mm) sono suddivisi in due provini ricavati una volta esauriti i tagli per ciascun blocco.

Anche in questa fase sperimentale, come per pannelli a 10 mm di spessore e come per i tagli preliminari per pannelli a 30 mm di spessore, vengono effettuati tagli alla distanza di 5 mm ciascuno. Diversamente da quanto riportato in fig. 4.19, la lunghezza dei tagli non sarà di 30 mm, ma di 60.

Un programma impostato a controllo numerico permette di effettuare i tagli in modo consecutivo inserendo ogni volta la velocità di avanzamento e la distanza tra le passate (Appendice B).

Per consentire alla testa di taglio di accelerare prima di incontrare il bordo della lamiera, la partenza di ogni taglio è fissata a 20 mm di distanza dal bordo stesso. Gli esperimenti vengono eseguiti seguendo l’ordine indicato dal numero della prova come riportato in tabella 4.20, in cui vengono riportati gli esiti dei tagli.

Tabella 4. 20 Esiti della sperimentazione, pannelli 30 mm, piano fattoriale a 2 livelli

		N. ro taglio	Portata, n. ro Foro	Pressione (MPa)	Velocità (mm/min)	Dug+Dfoc (mm)	Passante?
Blocco 1	Provino 1	1	1	350	100	0,76	Sì
		2	7	250	1000	0,76	No
		3	1	350	100	0,76	Sì
		4	7	350	1000	0,76	No
		5	7	350	1000	0,76	No
		6	1	250	100	0,76	Sì
		7	7	250	100	0,76	Sì
		8	1	250	1000	0,76	No
		9	1	350	1000	0,76	No
		10	1	350	1000	0,76	No
		11	1	250	1000	0,76	No
		12	1	350	1000	0,76	No
		13	7	350	1000	0,76	No
		14	1	350	100	0,76	Sì
		15	7	350	100	0,76	Sì
		16	1	250	100	0,76	Sì
		17	7	250	1000	0,76	No
		18	1	250	100	0,76	Sì
		19	7	350	100	0,76	Sì
		20	7	250	1000	0,76	No
		21	1	250	1000	0,76	No
		22	7	350	100	0,76	Sì
		23	7	250	100	0,76	Sì
		24	7	250	100	0,76	Sì
Blocco 2	Provino 2	25	1	250	1000	1	No
		26	1	250	1000	1	No
		27	1	350	1000	1	No
		28	7	350	100	1	Sì
		29	1	250	1000	1	No
		30	7	350	1000	1	Sì
		31	7	350	100	1	Sì
		32	1	350	1000	1	No
		33	7	350	1000	1	Sì

segue

Blocco 2	Provino 2	34	7	250	1000	1	No
		35	1	250	100	1	Sì
		36	7	250	1000	1	No
		37	1	350	100	1	Sì
		38	1	350	100	1	Sì
		39	1	250	100	1	Sì
		40	7	350	1000	1	Sì
		41	7	350	100	1	Sì
		42	1	350	1000	1	No
		43	1	350	100	1	Sì
		44	7	250	100	1	Sì
		45	1	250	100	1	Sì
		46	7	250	1000	1	No
		47	7	250	100	1	Sì
		48	7	250	100	1	Sì

In seguito si riportano le immagini corrispondenti ai tagli eseguiti:

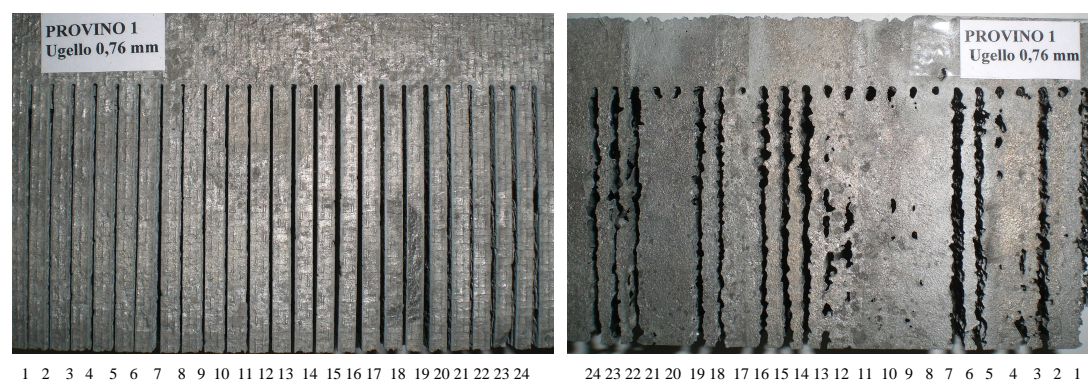


Figura 4. 22 Risultati provino 1, piano fattoriale preliminare, pannelli 30 mm

Gli esiti della sperimentazione per il provino numero 1, corrispondente al fattore $Dug+Dfoc = 0,76$, dimostrano che i tagli sono passanti nelle condizioni a velocità di avanzamento pari a 100 mm/min per qualsiasi valore di pressione e portata di abrasivo, mentre per velocità di avanzamento pari a 1000 mm/min nessuna delle condizioni ha mostrato tagli passanti.

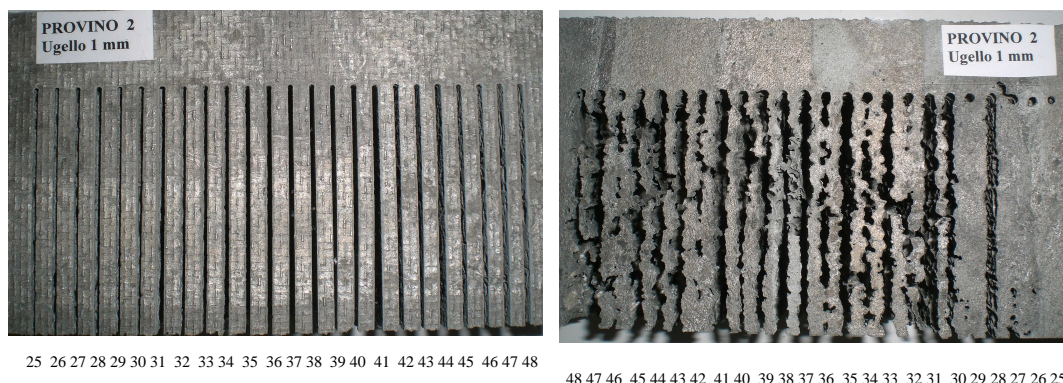


Figura 4. 23 Risultati provino 2, piano fattoriale preliminare, pannelli 30 mm

Anche per il provino numero 2, corrispondente al fattore $D_{ug}+D_{foc} = 1$ mm, gli esiti dei tagli a velocità di avanzamento pari a 100 mm/min risultano passanti per qualsiasi condizione di pressione e portata di abrasivo. Diversamente dai risultati ottenuti dal provino 1, per velocità di avanzamento pari a 1000 mm/min, portata di abrasivo pari a 564 g/min (Foro 7) e pressione pari a 350 MPa, i tagli sono risultati passanti.

In sintesi la sperimentazione permette di osservare che fissando il fattore *Velocità di avanzamento* al livello “basso” nel piano fattoriale qualsiasi combinazione dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, $D_{ug}+D_{foc}$ assicura un taglio passante. La sperimentazione preliminare precedente (cfr. 4.4.3.1), condotta fissando i fattori nella condizione energetica più sfavorevole per l’ottenimento di un taglio passante ($P = 250$ MPa; *Foro 1* - $Q_{abr} = 95$ g/min; $D_{ug}+D_{foc} = 0,76$ mm), già lasciava intuire questo risultato poiché i tagli a 100 mm/min risultavano anche in quel caso completamente passanti.

Fissando il fattore *Velocità di avanzamento* al livello “alto” la condizione favorevole al conseguimento di un taglio passante è possibile solo con *Pressione* pari a 350 MPa, *Portata di abrasivo* fissata al Foro 7 (564 g/min) e utilizzando un ugello focalizzatore di 1mm accoppiato ad un ugello primario da 0,3 mm di diametro; nella condizione sperimentale così descritta tutte le tre ripetizioni hanno dato come esito tagli passanti.

La sperimentazione successiva ha l’obiettivo di valutare gli esiti dei tagli variando i fattori *portata di abrasivo* e *velocità di avanzamento* in più livelli. Si vuole ricercare il livello minimo di portata che garantisca un taglio passante con i fattori *Pressione* e $D_{ug}+D_{foc}$ fissati a livello “alto” ($P=350$ MPa; $D_{ug}+D_{foc}=0,76$ mm) e allo stesso tempo individuare il livello di velocità che consenta tagli passanti per valori inferiori nei restanti fattori.

È da notare che utilizzando ugelli focalizzatori del diametro di 1 mm, accoppiati a ugelli primari del diametro di 0,3 mm, la larghezza del solco in uscita risulta eccessiva rispetto alla distanza tra due tagli consecutivi: la morfologia della schiuma, a causa dei numerosi vuoti interni corrispondenti alle bolle, è facilmente soggetta a rotture in profili di piccolo spessore. Nella sperimentazione seguente la distanza tra le passate verrà fissata a 10 mm, assicurando un margine maggiore tra un taglio e l'altro ed evitando rotture del provino lungo il profilo tagliato.

4.4.3.3 Piano fattoriale a 4 livelli per portata di abrasivo e velocità di avanzamento

In questa fase sperimentale i fattori *Velocità di avanzamento* e *Portata di abrasivo* sono fatti variare in quattro livelli, mentre la variazione dei fattori *Pressione* e *Dug+Dfoc* viene mantenuta su due livelli "alto" e "basso".

I risultati ottenuti dal piano fattoriale preliminare hanno mostrato che a velocità pari a 1000 mm/min, portate pari a 564 g/min (foro n. ro 7), pressione massima pari a 350 MPa e ugelli di 1 mm, consentono di ottenere tagli passanti.

Il taglio della lamiera alla velocità massima possibile aumenta la produttività e comporta una diminuzione dei costi totali a parità di valore assegnato ai restanti parametri di taglio.

A questo punto della sperimentazione è interessante verificare se con portate inferiori di abrasivo sia possibile ottenere tagli passanti alla velocità massima 1000 mm/min: ciò comporterebbe una diminuzione dei costi legati al consumo di abrasivo e quindi ai costi totali (cfr. capitolo 2).

Tabella 4. 21 Valori dei livelli nel piano fattoriale

FATTORI	LIVELLI			
Pressione (MPa)	250		350	
Dug+Dfoc (mm)	0,76		1	
Portata di abrasivo – n. ro foro	1	3	5	7
Velocità di avanzamento (mm/min)	100	500	700	1000

Per ciascuna condizione vengono effettuate due ripetizioni per un totale di 128 tagli (64 condizioni * 2 ripetizioni).

L'analisi dell'esito dei tagli non comporta in questa fase della sperimentazione indagini statistiche, ma è semplicemente finalizzata alla determinazione dei valori che, associati ai parametri di processo, consentano di ottenere un taglio che assicuri la separazione meccanica dei due lembi di lamiera.

La scelta di effettuare due sole ripetizioni consente di contenere il numero di tagli totali e di analizzare più combinazioni di taglio.

I risultati del piano fattoriale preliminare hanno mostrato che utilizzando un ugello focalizzatore di diametro pari a 1 mm, accoppiato a un ugello primario di 0,3 mm di diametro, la larghezza del solco in uscita risulta eccessiva rispetto alla distanza di 5 mm fra due passate di taglio consecutive, tanto da causare la rottura di alcune parti del provino (cfr. 4.4.3.2).

In questa sperimentazione, per evitare l'insorgere del fenomeno, la distanza fra due tagli consecutivi viene fissata a 10 mm.

Un programma impostato a controllo numerico permette di effettuare i tagli in modo consecutivo inserendo ogni volta la velocità di avanzamento e la distanza tra le passate (Appendice B).

Questa fase sperimentale non prevede la preventiva preparazione di provini. Per ottimizzare tutto il materiale a disposizione, i tagli a pettine della lunghezza di 60 mm vengono effettuati uno di seguito all'altro sulla lamiera secondo la casualizzazione generata dal programma Minitab®. Per evitare la continua sostituzione dell'ugello primario e dell'ugello focalizzatore anche in questo caso, come per la sperimentazione corrispondente al piano fattoriale preliminare (cfr. 4.4.3.2), i tagli sono suddivisi in due blocchi, in corrispondenza del fattore $Dug+Dfoc$.

Terminata la sperimentazione, per rendere più facile la catalogazione e la numerazione dei tagli, i due blocchi della lamiera soggetta al taglio sono stati suddivisi in 5 provini, in cui il numero dei tagli per provino non necessariamente è costante.

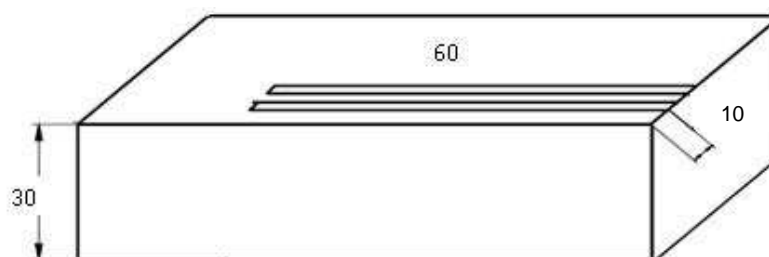


Figura 4. 24 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, piano fattoriale a 4 livelli, pannelli 30 mm

Gli esperimenti vengono eseguiti secondo l'ordine casuale dato dal programma Minitab® (Appendice C); in seguito si riportano i risultati della sperimentazione suddivisi per velocità di avanzamento.

4.4.3.4 Analisi dei risultati per velocità di avanzamento

Velocità di avanzamento 100 mm/min

Il risultato dei tagli conferma quelli del piano preliminare: per qualsiasi livello dei fattori per velocità di avanzamento pari a 100 mm/min, il taglio è passante.

Velocità di avanzamento 500 mm/min

Tabella 4. 22 Esiti dei tagli ottenuti a 500 mm/min, Pressione 250 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione MPa	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	250	500	1	No
1	250	500	1	No
1	250	500	0,76	No
1	250	500	0,76	No

Tabella 4. 23 Esiti dei tagli ottenuti a 500 mm/min, Pressione 350 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione MPa	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	350	500	1	No
1	350	500	1	No
1	350	500	0,76	No
1	350	500	0,76	No

3	250	500	1	Sì
3	250	500	1	Sì
3	250	500	0,76	No
3	250	500	0,76	No

3	350	500	1	Sì
3	350	500	1	Sì
3	350	500	0,76	No
3	350	500	0,76	No

5	250	500	1	Sì
5	250	500	1	Sì
5	250	500	0,76	No
5	250	500	0,76	No

5	350	500	1	Sì
5	350	500	1	Sì
5	350	500	0,76	Sì
5	350	500	0,76	Sì

7	250	500	1	Sì
7	250	500	1	Sì
7	250	500	0,76	Sì
7	250	500	0,76	No

7	350	500	1	Sì
7	350	500	1	Sì
7	350	500	0,76	Sì
7	350	500	0,76	Sì

Se si incrementa il valore della velocità di avanzamento a 500 mm/min, utilizzando un ugello focalizzatore sia da 1 che da 0,76 mm di diametro, il valore di portata di abrasivo pari a 95 g/min (foro n. ro 1) non è sufficiente per garantire la separazione meccanica dei due lembi di lamiera, né con valori di pressione pari 250 MPa, né con valori di pressione pari a 350 MPa.

Considerando un ugello focalizzatore da 1 mm di diametro si ottengono tagli passanti già con pressione pari a 250 MPa e portata pari a 252 g/min (foro n. ro 3). Come già illustrato in precedenza, è possibile che alcuni tagli presentino sottili ponti di collegamento fra i due lembi di lamiera: a 250 MPa con ugello da 1 mm, i tagli corrispondenti alle condizioni di portata 252 g/min (foro n. ro 3), 408 g/min (foro n. ro 5) hanno mostrato ponti di collegamento in una delle due

ripetizioni (tagli n. ro 63, 38), mentre le rispettive ripetizioni (tagli n. ro 58 e 32) consentono di ottenere un taglio passante.

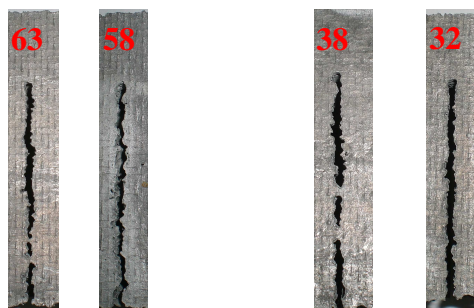


Figura 4. 25 Risultati per condizioni sperimentali 252 g/min (n. ro 63,58) e 408 g/min (n. ro 38, 32), a 250 MPa, 500 mm/min, Dug+Dfoc 1 mm

Poiché i due lembi della lamiera risultano facilmente separabili e dato che in questa fase sperimentale non si ricerca una particolare finitura geometrica del solco, la selezione dei parametri di taglio con i valori sopracitati di pressione e portata di abrasivo consente di ottenere un taglio conforme alle caratteristiche ricercate; ovvero: i due lembi della lamiera sono separabili meccanicamente, pur non consentendo una buona finitura superficiale.

I risultati dei tagli con ugello focalizzatore da 0,76 mm mostrano esiti passanti solo per portate maggiori o uguali a 408 g/min (foro n. ro 5) a pressioni di 350 MPa. A pressione pari a 250 MPa solo un taglio (taglio n. ro 107) è risultato passante alla condizione di portata 564 g/min (foro n. ro 7), mentre la successiva ripetizione non ne ha confermato l'esito (taglio n. ro 128).

Velocità di avanzamento 700 mm/min

Aumentando la velocità di avanzamento a 700 mm/min diminuisce il numero dei tagli a esito passante. Tutte le condizioni di taglio che prevedono pressione pari a 250 MPa, sia con ugello focalizzatore da 1 sia da 0,76 mm di diametro non consentono di ottenere tagli passanti a qualsiasi livello di portata.

A pressioni di 350 MPa nessuna condizione di taglio con ugello focalizzatore da 0,76 mm può essere ritenuta passante, mentre i tagli effettuati con ugello focalizzatore da 1 mm e portate di abrasivo pari a 408 g/min (foro n. ro 5) e 564 g/min (foro n. ro 7) hanno dato esiti sempre passanti.

Abbassando la portata a 252 g/min (foro n. ro 3), con i medesimi livelli nei fattori di *Pressione* e *Dug+Dfoc*, una ripetizione dei due tagli ha mostrato sottili ponti di collegamento tra i lembi della lamiera (taglio n. ro 41), poiché, anche in questo caso, il secondo taglio dimostrato un esito passante (taglio n. ro 33), anche la selezione dei parametri Portata di abrasivo=252 g/min (foro n. ro 3), Pressione=350 MPa, Dug+Dfoc=1 mm, può essere ritenuta significativa ai fini

di ottenere un taglio che consenta la separazione meccanica dei due lembi di lamiera, sebbene non sia garantita qualità nella geometria del solco.

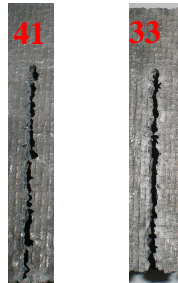


Figura 4. 26 Risultati per condizione sperimentale 252 g/min, 350 MPa, 700 mm/min, Dug+Dfoc 1 mm

Nelle tabelle sottostanti vengono riassunti gli esiti ottenuti per velocità di avanzamento pari a 700 mm/min.

Tabella 4. 24 Esiti dei tagli ottenuti a 700 mm/min, Pressione 250 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione MPa	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	250	700	1	No
1	250	700	1	No
1	250	700	0,76	No
1	250	700	0,76	No

3	250	700	1	No
3	250	700	1	No
3	250	700	0,76	No
3	250	700	0,76	No

5	250	700	1	No
5	250	700	1	No
5	250	700	0,76	No
5	250	700	0,76	No

7	250	700	1	No
7	250	700	1	No
7	250	700	0,76	No
7	250	700	0,76	No

Tabella 4. 25 Esiti dei tagli ottenuti a 700 mm/min, Pressione 350 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione MPa	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	350	700	1	No
1	350	700	1	No
1	350	700	0,76	No
1	350	700	0,76	No

3	350	700	1	Sì
3	350	700	1	Sì
3	350	700	0,76	No
3	350	700	0,76	No

5	350	700	1	Sì
5	350	700	1	Sì
5	350	700	0,76	No
5	350	700	0,76	No

7	350	700	1	Sì
7	350	700	1	Sì
7	350	700	0,76	No
7	350	700	0,76	No

Velocità avanzamento 1000 mm/min

La sperimentazione conferma quanto mostrato dai risultati del piano fattoriale preliminare: per ugello focalizzatore da 0,76 mm di diametro, tutte le condizioni di taglio non consentono di ottenere tagli passanti.

I tagli eseguiti assegnando ai parametri di taglio i valori di Pressione pari 350 MPa, portata massima di abrasivo 564 g/min (foro n. ro 7) e $D_{ug}+D_{foc}$ pari a 1 mm hanno consentito la separazione dei due lembi di lamiera, così come già anticipato dal piano fattoriale preliminare.

Questa parte della sperimentazione si proponeva l'obiettivo di individuare se alla velocità di 1000 mm/min si potessero ottenere tagli passanti per portate di abrasivo più basse rispetto alla portata massima 654 g/min nelle medesime condizioni di pressione (350 MPa) e con l'utilizzo dell'ugello da 1mm, così come confermato dal piano fattoriale preliminare.

La selezione di portate di abrasivo più basse, a parità di valori per gli altri parametri, consente infatti di ottenere costi totali di taglio inferiori. Inoltre è conveniente effettuare l'operazione di taglio alla velocità massima possibile: ne conseguono, infatti, la riduzione dei costi di taglio e l'aumento della produttività.

La sperimentazione mostra che il primo taglio passante per velocità di avanzamento pari a 1000 mm/min è ottenibile selezionando portate di abrasivo pari a 252 g/min (foro n. ro 3), pressione 350 MPa e ugello focalizzatore di 1 mm di diametro (taglio n. ro 30). Il secondo taglio delle due ripetizioni non ha però portato esito passante, rendendo impossibile la separazione meccanica della lamiera (taglio n. ro 44).

A portata pari 408 g/min (foro n. ro 5), un taglio risulta completamente passante (taglio n. ro 1): la sua ripetizione presenta sottili ponti di collegamento, ma per le motivazioni già esposte tale condizione sperimentale può essere ritenuta significativa per l'ottenimento di un taglio passante.

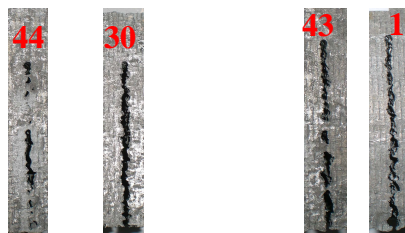


Figura 4. 27 Risultati per condizione sperimentale 252 g/min (tagli n. ro 44, 30), e 408 g/min (tagli n. ro 43, 1), 350 MPa, 1000 mm/min, $D_{ug}+D_{foc}$ 1 mm

La diversità nei risultati della sperimentazione può essere dovuta sia alla morfologia interna della schiuma e alla differente distribuzione delle bolle nella

lamiera (i tagli sono stati casualizzati interessando parti differenti della lamiera stessa), sia a un mancato afflusso di abrasivo alla testa di taglio.

In pannelli di 30 mm di spessore, la velocità di avanzamento pari a 1000 mm/min è da considerarsi come velocità limite di taglio: operando nella condizione limite le diversità locali nella morfologia interna della schiuma e nella distribuzione non omogenea delle bolle in tutte le parti della lamiera, potrebbero avere particolare influenza nel risultato del taglio.

La velocità 1000 mm/min corrisponde alla velocità al limite di taglio. Pur non essendo passanti entrambi i tagli per la condizione a portata di abrasivo 252 g/min (foro n. ro 3), si sfrutta il taglio passante per poter massimizzare la velocità di avanzamento e minimizzare la portata di abrasivo.

Tabella 4. 26 Esiti dei tagli ottenuti a 1000 mm/min, Pressione 250 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione MPa	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	250	1000	1	No
1	250	1000	1	No
1	250	1000	0,76	No
1	250	1000	0,76	No

3	250	1000	1	No
3	250	1000	1	No
3	250	1000	0,76	No
3	250	1000	0,76	No

5	250	1000	1	No
5	250	1000	1	No
5	250	1000	0,76	No
5	250	1000	0,76	No

7	250	1000	1	No
7	250	1000	1	No
7	250	1000	0,76	No
7	250	1000	0,76	No

Tabella 4. 27 Esiti dei tagli ottenuti a 1000 mm/min, Pressione 350 MPa

Portata (n. ro foro)	Pressione (MPa)	Velocità mm/min	Dug+Dfoc mm	Esito
1	350	1000	1	No
1	350	1000	1	No
1	350	1000	0,76	No
1	350	1000	0,76	No

3	350	1000	1	Si
3	350	1000	1	No
3	350	1000	0,76	No
3	350	1000	0,76	No

5	350	1000	1	Si
5	350	1000	1	Si
5	350	1000	0,76	No
5	350	1000	0,76	No

7	350	1000	1	Si
7	350	1000	1	Si
7	350	1000	0,76	No
7	350	1000	0,76	No

4.4.3.5 Conclusioni: pannelli in schiuma a 30 mm di spessore

- I risultati del piano fattoriale preliminare dimostrano che si possono ottenere tagli completamente passanti per velocità di avanzamento pari a 100 mm/min con qualsiasi combinazione tra i valori “alto” e “basso” dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, *Dug+Dfoc*. Tagli passanti a 1000 mm/min si ottengono solo con *Pressione*=350 MPa, *Portata di abrasivo*=564 g/min, *Dug+Dfoc*=1 mm.
- I risultati del piano fattoriale a quattro livelli per i fattori *Velocità di avanzamento* e *Portata di abrasivo* mostrano che il valore dei parametri da selezionare per ottenere tagli passanti, per comprendere la massima velocità di avanzamento, corrisponde a:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 1000 \text{ (mm/min)} \\ \text{Pressione} = 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

- Per ottenere tagli passanti nell’intervallo di pressione compreso tra 250 e 350 MPa, con il minimo livello di portata di abrasivo i valori da attribuire ai parametri di taglio risultano:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 500 \text{ (mm/min)} \\ 250 < \text{Pressione} < 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

A velocità superiori (700 mm/min e 1000 mm/min) solo le condizioni a portata maggiore o uguale a 252 g/min, ugello focalizzatore pari a 1 mm di diametro e pressione di 350 MPa consentono di ottenere esito passante.

4.5 Analisi della qualità del taglio

La qualità del taglio water jet viene tradizionalmente analizzata attraverso l'osservazione della macrogeometria del solco di taglio (ampiezza del solco di taglio e conicità) e della sua microgeometria (rugosità e ondulazione).

Per le schiume metalliche la definizione di un taglio di qualità si limita alla valutazione della larghezza del solco di taglio e della conicità.

La fase sperimentale per l'analisi della qualità si propone di valutare la significatività dei fattori sulla larghezza dei solchi in ingresso e in uscita e sulla conicità del solco.

Si vuole valutare, inoltre, l'effettiva significatività del parametro "conicità" per la caratterizzazione del solco di taglio nei pannelli in sola schiuma metallica ed eventualmente si punta all'individuazione di ulteriori parametri descrittivi della qualità macrogeometrica.

La fase sperimentale viene condotta per pannelli di 30 mm di spessore. Studi precedenti svolti nell'ambito del progetto "Tilas" [Mon06] hanno analizzato la qualità del taglio in pannelli di 10 mm di spessore; per dare continuità allo studio si procede analizzando la qualità in pannelli di spessore superiore.

4.5.1 Piano fattoriale per lo studio della qualità del taglio

L'analisi della qualità del taglio parte dall'osservazione della macrogeometria del solco. Per rendere possibile la misurazione delle dimensioni del solco è necessario che l'esito del taglio sia completamente passante: i risultati ottenuti dall'analisi dello spessore tagliabile sono, a questo proposito, il punto di partenza per la stesura di un piano sperimentale per lo studio della qualità del taglio.

I parametri di interesse considerati in questa fase sperimentale sono quelli illustrati al paragrafo 4.2 e, così come per l'analisi dello spessore tagliabile, si prevede la variazione dei fattori *Portata di abrasivo*, *Pressione*, *Velocità di avanzamento*, *Dug+Dfoc* su due livelli "alto" e "basso", all'interno di un piano fattoriale del tipo $n \cdot 2^k$.

Il piano fattoriale deve quindi:

- Comprendere al suo interno tutti i quattro fattori senza escluderne alcuno a priori: in questo modo è possibile valutare la significatività di ciascun fattore sui parametri che descrivono la qualità macrogeometrica del solco.
- Garantire tagli completamente passanti per assicurare la misurazione della larghezza dei solchi in ingresso e in uscita.

Dalla combinazione di queste richieste, sulla base dei risultati ottenuti nell'analisi dello spessore tagliabile, si deduce che il livelli "alto" e "basso" per la variazione dei fattori risultano:

Tabella 4. 28 Valori dei livelli nel piano fattoriale per l'analisi della qualità

FATTORE	LIVELLO BASSO	LIVELLO ALTO
Pressione (MPa)	250	350
Portata di abrasivo – n. ro foro	1	7
Dug+Dfoc (mm)	0,76	1
Velocità di avanzamento (mm/min)	50	100

Il livello "alto" per il fattore *Velocità di avanzamento* è vincolato ai risultati ottenuti dall'analisi precedente: per impostare velocità di avanzamento pari a 1000 mm/min è necessario che la pressione sia fissata a 350 MPa e che si utilizzi un ugello focalizzatore pari a 1 mm (cfr. paragrafo 4.4.3.3).

Anche la soluzione che prevede di operare a pressioni comprese tra 250 e 350 MPa non può essere ritenuta valida poiché si esclude a priori l'utilizzo di un ugello focalizzatore di 0,76 mm di diametro (cfr. paragrafo 4.4.3.3).

Si potrebbe pensare di aumentare i livelli di portata di abrasivo impostando una variazione tra 408 g/min (foro n. ro 5) e 564 g/min (foro n. ro 7), anche in questo caso sarebbe necessario escludere a priori la variazione di un fattore:

- per velocità di 500 mm/min con entrambi gli ugelli focalizzatori si ottengono tagli passanti con pressione di 350 MPa. Con ugello focalizzatore da 0,76 mm solo un taglio è passante per portata 564 g/min e pressione 250 MPa; con ugello focalizzatore da 1 mm sono passanti per portate maggiori o uguali a 252 g/min per qualsiasi valore di pressione;
- a velocità di avanzamento pari a 700 mm/min e 1000 mm/min i tagli hanno esito passante solo per ugello focalizzatore pari a 1 mm e pressione pari a 350 MPa.

È da ricordare inoltre che l'esito del taglio in questa fase sperimentale non deve garantire la semplice separazione meccanica della lamiera, ma deve completamente suddividere i due lembi del pannello per consentire la misurazione della larghezza del solco di taglio. Non è possibile prevedere e accettare tagli che presentino sottili ponti di collegamento: questi consentono comunque la separazione della lamiera, ma non consentirebbero un'adeguata misura del solco di taglio.

Per i motivi sopra elencati il livello “alto” di velocità di avanzamento è fissato a 100 mm/min, mentre il livello “basso” viene selezionato in base ai comuni livelli di velocità utilizzati a livello industriale.

I dati rilevati dal piano fattoriale saranno poi analizzati tramite il metodo ANOVA (Analysis of Variance) in modo da valutare l’influenza dei fattori sulla larghezza dei solchi in ingresso e in uscita e sulla conicità del taglio.

Per questo motivo si operano 5 ripetizioni per ogni condizione sperimentale: il loro numero è giustificato dalla possibilità di utilizzare il Test di Bartlett per la verifica dell’*omogeneità della varianza* (una delle ipotesi dell’ANOVA, insieme alla *normalità e indipendenza dei residui*).

Il piano prevede quindi l’esecuzione di 80 tagli (16 condizioni *5 ripetizioni). Tutte le condizioni sono state casualizzate sfruttando una serie di numeri casuali generati dal programma Minitab® e suddivise in due blocchi corrispondenti al livello del fattore *Dug+Dfoc* (Appendice C). La continua sostituzione degli ugelli potrebbe risultare difficoltosa e, oltre alla possibile rottura degli stessi, potrebbe non essere garantita l’uniformità nelle condizioni di prova.

Si eseguono tagli a pettine della lunghezza di 60 mm, a una distanza l’uno dall’altro di 10 mm, così come per i tagli del piano fattoriale a quattro livelli per i fattori velocità di avanzamento e portata di abrasivo nell’ambito della sperimentazione per l’analisi dello spessore tagliabile, come mostrato in figura 4.24. Un programma impostato a controllo numerico permette di eseguire automaticamente i tagli inserendo di volta in volta velocità di avanzamento e distanza tra le passate (Appendice B).

4.5.2 Preparazione dei provini

La fase sperimentale propedeutica all’analisi della qualità del taglio necessita la preparazione preventiva dei provini sui quali effettuare i tagli.

L’analisi della qualità si basa sull’analisi dell’immagine: la misura della larghezza del solco di taglio in ingresso e in uscita viene effettuata sull’immagine scannerizzata dei provini (cfr. capitolo 6). Per questo motivo i tagli devono essere suddivisi in provini della dimensione adatta alla scansione. Inoltre, in questa fase sperimentale, per non trascurare l’effetto della morfologia del materiale sulla qualità del taglio, viene misurata la densità media del provino come rapporto *Massa/Volume* (cfr. capitolo 6).

La valutazione a priori della densità necessita, quindi, la preparazione di provini delle stesse dimensioni che saranno pesati prima dell’esecuzione dei tagli.

Per ottimizzare il materiale a disposizione si suddividono gli 80 tagli previsti dal piano in 4 provini delle stesse dimensioni. Il calcolo delle dimensioni del provino viene effettuato tenendo conto che:

- Ciascun provino presenta 20 tagli distanziati di 10 mm per evitare la rottura della striscia tagliata.
- Alla lunghezza minima del provino (190 mm) si aggiungono 30 mm circa in direzione X per consentirne lo staffaggio.
- Alla lunghezza del taglio, 60 mm, si aggiungono 20 mm di margine superiore in direzione Y.

Ciascun provino presenta quindi 250 mm di lunghezza e 80 mm di larghezza. Per il calcolo viene effettuata un'apposita campagna di misure per valutare le effettive dimensioni (cfr. capitolo 6).

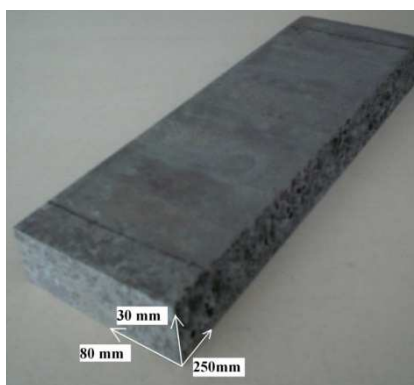


Figura 4. 28 Provino per l'analisi della qualità del solco di taglio

4.5.3 Sistema di serraggio

La funzione del sistema di serraggio, in questa fase sperimentale, è quella di rendere stabile un provino di dimensioni ridotte durante la lavorazione.

L'analisi della qualità del taglio per le schiume metalliche non implica la misura della rugosità del solco tagliato: per tale motivo non sono richiesti il monitoraggio e il contenimento delle vibrazioni del pezzo durante la lavorazione.

Se, per l'analisi del massimo spessore tagliabile, i tagli sono stati eseguiti in successione sulla stessa lamiera senza preparazione preliminare dei provini, esigenze di misurazione successiva rendono necessaria, per l'analisi della qualità del taglio, la suddivisione dei tagli in più campioni. Tale suddivisione rende possibile sia l'analisi dell'immagine che la stima della densità del provino. Per vincolare saldamente il provino di dimensioni ridotte si opta per un fissaggio del provino stesso tramite viti passanti alla griglia della vasca. La vite viene mantenuta a filo sulla superficie del provino in modo che una vite sporgente non ostacoli il movimento della testa di taglio nell'eventualità di utilizzo della cuffia di protezione dell'ugello.

Il reflusso d'acqua causato dalle griglie potrebbe interagire con le pareti sottili delle bolle sulla superficie in uscita della lamiera, provocando l'allargamento del solco. Il provino viene quindi fissato a sbalzo in modo che la parte interessata al taglio sia distante dalle griglie.

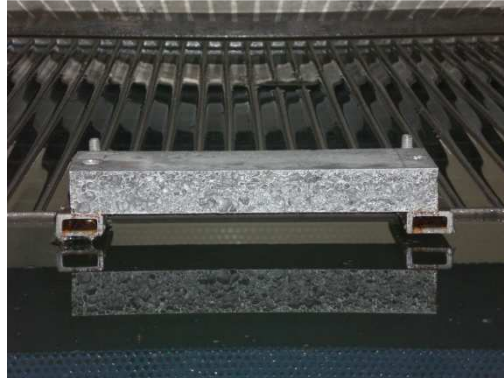


Figura 4. 29 Sistema di serraggio del pezzo per l'analisi della qualità del taglio

Capitolo 5: Analisi dello spessore tagliabile, selezione dei parametri ottimali

Nel presente capitolo è illustrata la procedura di selezione dei parametri ottimali che consentono di ottenere un taglio passante, ovvero un taglio per cui sia semplicemente garantita la separazione meccanica della lamiera, senza interesse alcuno alla qualità macrogeometrica del solco tagliato.

I pannelli in schiuma metallica presi in esame presentano spessore pari a 10 mm e 30 mm.

Ci si propone che l'ottimizzazione coincida con la selezione dei parametri che consentono la minimizzazione della funzione descrittiva del costo di taglio con tecnologia AWJ. La prima richiesta del settore industriale, infatti, è minimizzare i costi di lavorazione, per immettere sul mercato un prodotto competitivo ed economicamente vantaggioso.

La minimizzazione del costo di taglio è vincolata ai risultati sperimentali ottenuti per pannelli da 10 e 30 mm di spessore: il campo di variabilità dei parametri di taglio coinvolti nella funzione di costo deriva dai risultati sperimentali condotti su pannelli di detto spessore (cfr. Capitolo 4).

La funzione di costo che verrà utilizzata è stata illustrata in precedenza nel Capitolo 2 (cfr. paragrafo 2.3).

Un aspetto rilevante nella corretta valutazione dei costi di taglio è riferibile alla stima della vita utile dell'ugello focalizzatore, da cui dipende il costo totale di taglio: si considereranno sia la vita media dell'ugello focalizzatore, dichiarata dalle principali case costruttrici, sia la vita utile dello stesso stimata applicando un modello di usura.

5.1 Stato dell'arte nell'ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ

Come presentato nel Capitolo 2, uno degli aspetti fondamentali della lavorazione AWJ di qualsiasi materiale è rappresentato dalla necessità di analizzare i costi di taglio.

Il costo dell'operazione tradizionale a livello europeo è stimato a 150-200 €/h [Pi05]. Di conseguenza, la ricerca di soluzioni per la diminuzione del costo totale di taglio è uno dei principali obiettivi perseguiti dagli utilizzatori di questa tecnologia di lavorazione.

Tra i costi di taglio, il costo per il consumo di abrasivo rappresenta una delle voci di maggior importanza (Fig.5.1) e può variare dal 20% al 70% a seconda dei parametri di lavorazione selezionati (portata di abrasivo, numero di teste di taglio utilizzate, prezzo unitario dell'abrasivo) e dal costo d'investimento per l'acquisto dell'impianto AWJ. È da notare che il costo dell'abrasivo può essere ridotto grazie impianti che ne consentano il riciclaggio (cfr. Capitolo 2) [Hoo06].

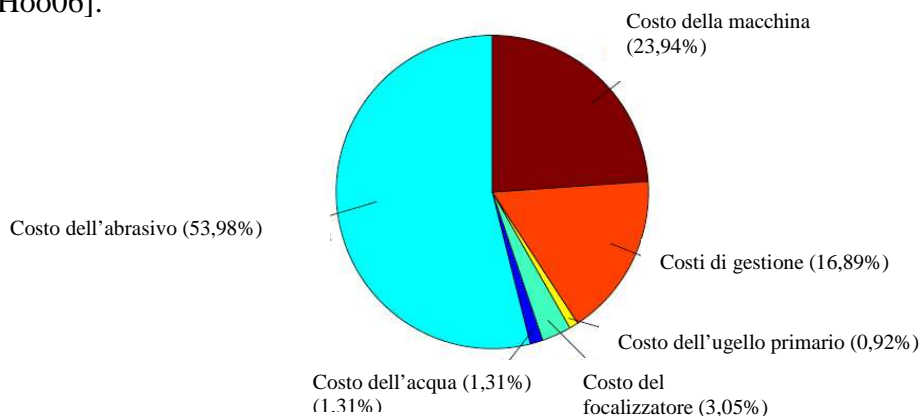


Figura 5. 1 Influenza percentuale delle singole voci di costo sul totale [Hoo06]

I problemi di ottimizzazione con tecnologia AWJ possono essere suddivisi in due categorie: ottimizzazione tecnica e ottimizzazione economica.

L'ottimizzazione tecnica, basata sulle relazioni fisiche che intercorrono tra i parametri di processo, ha l'obiettivo di determinare l'ottimo valore dei parametri stimandone l'effetto sulle prestazioni ricercate (massimo spessore tagliabile, finitura superficiale). L'ottimizzazione economica, basata sulla combinazione di modelli di costo e modelli descrittivi delle relazioni fisiche che intercorrono tra i parametri di processo, ha l'obiettivo di individuare il valore ottimo dei parametri stessi per la minimizzazione del costo di taglio e massimizzazione della produttività in base alle prestazioni di taglio ricercate (cfr. Capitolo 2).

L'analisi dei modelli di costo presenti in letteratura e l'approccio da seguire per l'ottimizzazione del processo di taglio con tecnologia AWJ per un qualsiasi materiale è già stata presentata nel Capitolo 2; nella sezione che segue viene presentato l'effetto dei parametri di processo sullo spessore tagliabile tramite il risultato di studi precedenti presenti in letteratura per materiali tradizionali e omogenei.

Nel resto del presente capitolo viene illustrata la selezione dei parametri di processo per la minimizzazione dei costi come risultato dell'ottimizzazione economica del taglio di schiume metalliche.

5.1.1 Stato dell'arte nell'ottimizzazione tecnica del processo di taglio con tecnologia AWJ

Il processo di rimozione del materiale e le prestazioni di taglio sono influenzate da parametri di lavorazione (s.o.d., velocità di avanzamento), da parametri di processo (pressione dell'acqua, diametro dell'ugello primario e del focalizzatore, portata di abrasivo, Mesh #) e infine dai parametri del grezzo.

In sintesi la profondità di taglio aumenta se:

- la pressione aumenta (esiste un limite minimo per la pressione al di sotto del quale non si ha asportazione [Has89]);
- la portata di abrasivo aumenta fino al limite dell'intasamento della camera o dell'inefficienza nella miscelazione e all'impatto (cfr. 4.4.2.2) [Has91];
- la velocità di avanzamento diminuisce [Has89];
- il rapporto D_{foc}/D_{ug} diminuisce [Cha91]. Ciò è spiegabile osservando l'influenza dei due parametri geometrici sulla profondità di taglio: se si riduce D_{foc} aumenta la potenza specifica del getto (tra l'altro serve una portata di abrasivo inferiore per avere le stesse prestazioni); se si incrementa D_{ug} l'efficienza della miscelazione sembra migliorare. Esiste però un limite per entrambi, a causa dei problemi di intasamento per D_{foc} e di quelli di coerenza del getto per D_{ug} [Ann99];
- il getto è più coerente (maggiore energia specifica [Has91]);
- il diametro dell'ugello primario aumenta ([Has91], [Ann99]); esiste però un limite oltre al quale si ha un peggioramento (a causa dell'aumento della portata di abrasivo);
- la lunghezza del focalizzatore diminuisce [Ann99];

Esiste inoltre una dimensione ottima del grano di abrasivo al fine di migliorare la profondità di taglio (cfr.4.2).

5.1.1.1 Effetto della pressione

L'aumento della pressione provoca l'aumento della profondità di taglio [Has91] [Cha91]. Esiste un valore di soglia minimo di pressione sotto il quale non si incide il pezzo (il valore di soglia è ottenuto prolungando le curve del grafico fino ad intersecare l'asse delle pressioni) [Ann99]. Questo valore di soglia diminuisce all'aumentare della portata di abrasivo fino ad arrivare alla quantità massima di abrasivo smaltibile dalla camera, oltre la quale il valore di soglia di pressione aumenta.

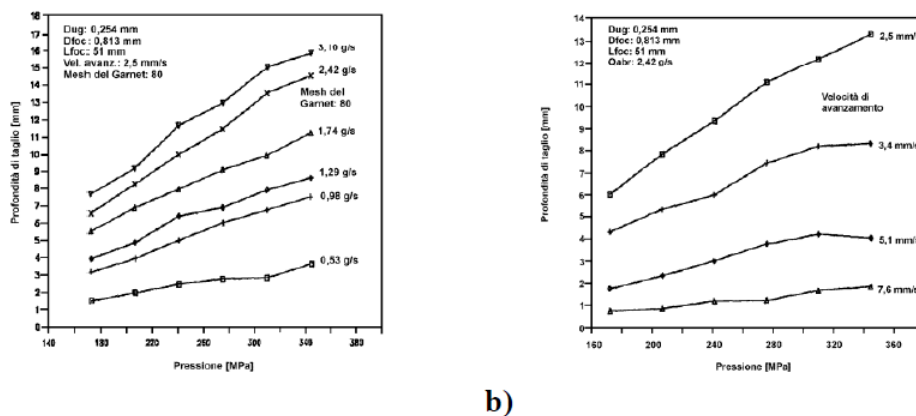


Figura 5. 2 a) Effetto della Pressione sulla portata di abrasivo (ghisa grigia); b) Effetto della Pressione sulla velocità di avanzamento (acciaio dolce) [Has89]

Tazibt [Taz95] verifica sperimentalmente questi valori di soglia ottenendo risultati apparentemente opposti: se la portata di abrasivo aumenta, il valore di soglia di pressione aumenta a causa della ripartizione dell'energia su più particelle: esse godono di velocità inferiori ed hanno bisogno di una pressione più elevata per essere accelerate oltre il valore minimo di velocità necessario per l'asportazione di materiale [Taz95]. La contraddizione potrebbe essere dovuta al fatto che Hashish non arriva a verificare sperimentalmente il valore di soglia, ma lo deduce dall'andamento delle curve a pressioni più elevate [Ann99].

Se si incrementa la velocità di avanzamento, il valore di soglia di pressione cresce [Ann99].

5.1.1.2. Ottima combinazione tra ugello primario e ugello focalizzatore

Studi precedenti [Cha91] [Him91] confermano che esiste una combinazione ottimale tra ugello primario e ugello focalizzatore per ottenere la massima profondità di taglio. Per garantire la massima asportazione di materiale è necessario che il rapporto tra D_{foc}/D_{ug} sia pari a 3.

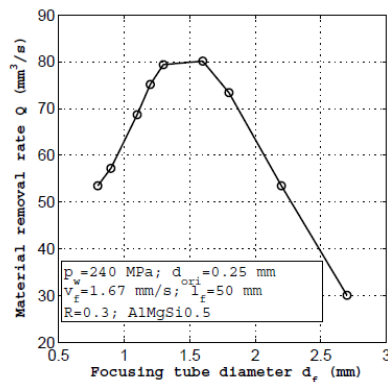


Figura 5.3 Volume di materiale rimosso in funzione del diametro del focalizzatore [Pi05]

5.1.1.3 Lunghezza ottima dell'ugello focalizzatore

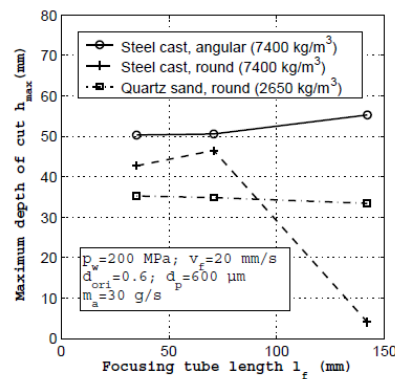


Figura 5.4 Massimo spessore tagliabile in funzione della lunghezza del focalizzatore

La figura 5.4 mostra la relazione che intercorre tra la lunghezza del focalizzatore e il massimo spessore tagliabile. La profondità di taglio, inizialmente, aumenta linearmente con l'aumento della lunghezza del focalizzatore: ciò è dovuto al fatto che le particelle abrasive necessitano di una distanza per accelerare [Mom98]. Superata la distanza critica necessaria all'accelerazione, a causa perdite per attrito, la velocità delle particelle abrasive diminuisce e quindi diminuisce lo spessore tagliabile [Mom98].

Anche M. Hashish ha evidenziato dipendenza tra la profondità di taglio, la larghezza del solco e la lunghezza del focalizzatore [Has91]: se la lunghezza del focalizzatore aumenta fino a 50/70 volte il diametro del focalizzatore, la larghezza del solco e la profondità del taglio decrescono.

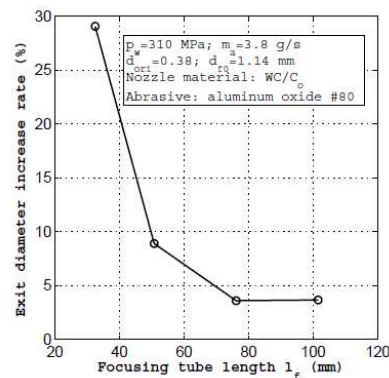


Figura 5. 5 Aumento del diametro in uscita dell’ugello focalizzatore in funzione della sua lunghezza [Nan00]

Come già presentato al Capitolo 2 (cfr. paragrafo 2.4.1), l’usura del focalizzatore dipende dai parametri geometrici dello stesso, tra cui appunto la sua lunghezza.

La figura 5.5 illustra la relazione tra la lunghezza del focalizzatore e l’usura del diametro di uscita dell’ugello: quando la lunghezza dell’ugello focalizzatore è inferiore a un certo valore (in questo caso circa 75 mm), un’ulteriore diminuzione della lunghezza provoca un significativo aumento dell’usura dell’ugello. Superato il valore critico, il diametro di uscita non presenta aumenti significativi all’aumento della lunghezza del focalizzatore [Nan00].

La lunghezza ottimale dell’ugello focalizzatore deve considerare contemporaneamente le prestazioni di taglio raggiunte per una data lunghezza e l’usura dello stesso. Le lunghezze dei focalizzatori sono standardizzate nelle dimensioni comuni di 76 mm (3”), 89 mm (3.5”) e 101.6 mm (4”) [Pi05]. L’ugello focalizzatore più comunemente utilizzato presenta una lunghezza di 76 mm, poiché offre la miglior combinazione costo - usura-vita utile [Pi05].

5.1.1.4 Ottima s.o.d.

Il primo ad occuparsi dell’effetto della s.o.d. sul massimo spessore tagliabile è stato R.E. Barton nel 1982 [Pi05]. È stato dimostrato che lo spessore tagliabile diminuisce linearmente con l’aumento della s.o.d.: la figura 5.6 [Pi05] ne mostra la relazione.

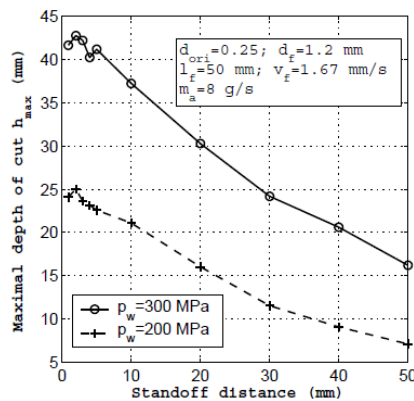


Figura 5. 6 Effetto della s.o.d. sullo spessore tagliabile [Pi05]

R.A Tikhomirov e al. hanno riportato i medesimi risultati; inoltre gli autori hanno notato che per piccoli aumenti della s.o.d., la velocità massima rimane costante e successivamente diminuisce secondo una regressione pressoché lineare. L'effetto della s.o.d. sullo spessore tagliabile è confermato dagli autori Blickwedel [Pi05], Kovacevic e Guo e al.[Pi05]. La s.o.d. ottimale è indicata a circa 2 mm .[Pi05].

5.2 Ottimizzazione economica per il taglio delle schiume metalliche: ricerca del minimo costo

La scelta dei parametri ottimali per la risoluzione del problema di ottimizzazione, viene impostata generalmente combinando modelli di costo di taglio con modelli descrittivi del processo di taglio (massimo spessore tagliabile, conicità e rugosità del solco tagliato).

$$\begin{cases} C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura} \\ h = f(\dot{m}_a, P_w, velocità_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \end{cases} \quad (5.1)$$

Nell'equazione 5.1 viene riportata la combinazione del modello di costo, considerato nel presente studio (cfr. 2.3), con la funzione h descrittiva dello spessore tagliabile che dipende dai parametri *Portata di abrasivo* (\dot{m}_a), *Pressione* (P_w), *Velocità di avanzamento* ($velocità_{av}$), $D_{ug} + D_{foc}$. In mancanza di una funzione matematica in grado di descrivere lo spessore tagliabile in funzione dei parametri di taglio, la minimizzazione del costo viene effettuata imponendo i vincoli sui parametri in modo da ottenere un taglio passante per lo spessore considerato: tali vincoli sono ricavati dai risultati del piano sperimentale.

L'approccio che viene utilizzato nel presente studio si basa, quindi, sui risultati della sperimentazione condotta per l'analisi dello spessore tagliabile (cfr. Capitolo 4.4).

Il valore dei parametri di processo, coinvolti nella funzione di costo, sarà scelto nell'intervallo che la sperimentazione ha mostrato significativo per l'ottenimento di un taglio passante.

I vincoli alla funzione obiettivo "minimo costo" non derivano dalla combinazione della stessa con un modello descrittivo del processo di taglio, ma sono imposti empiricamente sulla base dei risultati sperimentali ottenuti.

La selezione dei parametri ottimali viene quindi effettuata per pannelli in schiuma di spessori di 10 e 30 mm.

In seguito vengono sintetizzati i risultati ottenuti nella fase sperimentale, che dovranno rappresentare i vincoli per il problema di ottimizzazione.

Pannelli di spessore 10 mm

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 5000 \text{ (mm/min)} \\ 250 < Pressione < 350 \text{ (MPa)} \\ 95 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 0,76 - 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Pannelli di spessore 30 mm

I vincoli selezionabili per pannelli di spessore pari a 30 mm possono essere espressi per includere la massima velocità di avanzamento (5.3) o per consentire la variazione della pressione su entrambi i livelli "alto" e "basso" (5.4). Questa seconda scelta comporta una diminuzione della velocità di avanzamento; sarà la stima dei costi minimi a indicare la soluzione migliore: selezione della massima velocità di avanzamento vincolati a operare con livelli "alti" di pressione, o selezione di livelli inferiori di pressione riducendo la velocità di avanzamento.

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 1000 \text{ (mm/min)} \\ Pressione = 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 500 \text{ (mm/min)} \\ 250 < Pressione < 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

5.3 Stima della vita del focalizzatore: applicazione del modello di usura

Come già presentato nel capitolo 2, la vita utile dell'ugello focalizzatore può essere considerata pari alla sua vita media oppure può essere stimata tramite un modello di usura (quello che viene utilizzato nel presente studio è stato presentato nel cap. 2.4.3.2).

In tale modello viene definito il tasso di usura del focalizzatore (m/h) $\dot{\delta}_{df}$ che risulta funzione dei parametri p_w , (pressione), \dot{m}_a (portata di abrasivo), d_{ori} (diametro dell'ugello primario), $d_{f,0}$ (diametro iniziale del focalizzatore) e l_f lunghezza del focalizzatore.

$$\dot{\delta}_{df} = \frac{0,0015 \cdot p_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \quad (5.5)$$

A seconda dei parametri di taglio impostati durante la lavorazione, il fenomeno di usura risulterà più o meno marcato e di conseguenza varierà il numero di ore di vita utile dell'ugello stesso.

La vita utile viene stimata come rapporto tra la differenza del diametro del focalizzatore all'istante iniziale e il diametro del focalizzatore nell'istante in cui si verifica un suo aumento del 20%, il tutto diviso per il tasso di usura.

$$L_f = (d_f - d_{f,0}) / \dot{\delta}_{df} \quad (5.6)$$

Il diametro d_f è calcolato con un aumento del 20% rispetto alla misura del diametro nell'istante iniziale:

$$d_f = 0,2 \cdot d_{f,0} + d_{f,0} \quad (5.7)$$

Nel caso considerato in questo studio, in cui si utilizzano focalizzatori da 1 mm (ugello primario 0,3 mm) e da 0,76 mm (ugello primario da 0,25 mm), la variazione dei diametri è sintetizzata in tabella 5.1.

Tabella 5. 1 Variazione del 20% sul diametro iniziale, focalizzatore da 0,76-1mm

Variazione del 20% sul diametro iniziale $d_{f,0}$	
foc. 0,76 mm, $df-df_0$	0,152 mm
foc. 1 mm, $df-df_0$	0,2 mm

Come mostra la figura 5.7, a pari tasso di usura δ_{df} per il focalizzatore da 1 mm la vita utile è maggiore perché maggiore è la differenza tra il diametro dell'ugello usurato (incremento del diametro pari al 20%) e il diametro iniziale.

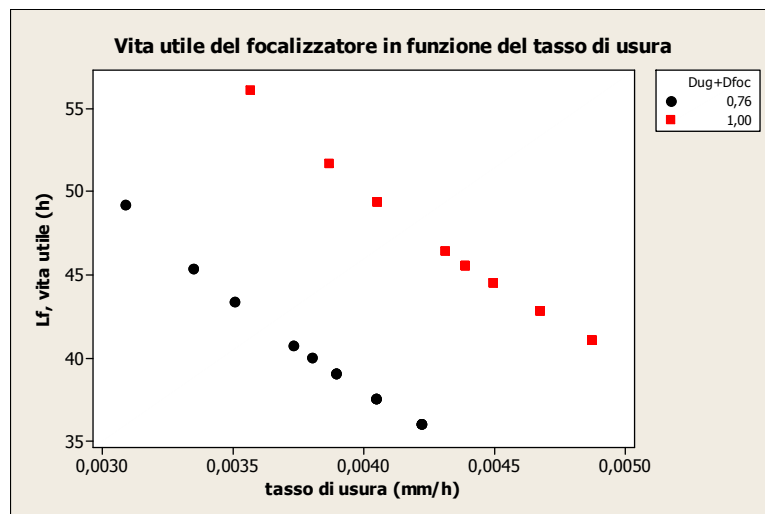


Figura 5. 7 Andamento della vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura (condizioni sperimentali a esito passante, pannelli da 30 mm)

Valutando la vita utile del focalizzatore tramite un modello di usura, che tiene conto del valore assegnato ai parametri, è interessante verificare se il costo minimo dell'operazione di taglio ottenuto massimizzando la vita dell'ugello è inferiore al costo minimo senza aver minimizzato il tasso di usura.

Considerando il modello d'usura si calcola:

- *Minimo costo, massima vita dell'ugello focalizzatore*

Sia per la condizione di massimo spessore tagliato, pannelli da 30 mm, sia per la condizione di spessore minimo, pannelli da 10 mm, si stima la vita utile massima e minima dell'ugello focalizzatore: tali valori saranno utilizzati come vincoli nell'ottimizzazione per la scelta dei parametri di taglio che minimizzano il costo.

Minimo costo, senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore.

- Sia per la condizione di massimo spessore tagliato, pannelli da 30 mm, sia per spessore minimo, pannelli da 10 mm, si effettua l'ottimizzazione per minimizzare i costi senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore. La vita utile sarà calcolata in base ai valori dei parametri derivanti dall'ottimizzazione.

Bisogna ricordare che la vita utile che deriva dall'applicazione del modello di usura corrisponde al numero di ore che il focalizzatore impiegherebbe ad aumentare il suo diametro del 20% a pari valore dei parametri di taglio: non sono presenti in letteratura modelli in grado di fornire una stima in ore della vita utile dell'ugello focalizzatore contemplando una variazione continua nel valore dei parametri.

5.3.1 Calcolo vita dell'ugello: pannelli 30 mm

In base ai risultati sperimentali che hanno permesso di ottenere un taglio passante, viene calcolato il valore di usura massima, e quindi vita minima, e il valore di usura minima, e quindi vita massima, dell'ugello focalizzatore.

Si calcolano:

$$\begin{aligned} \min \delta_f(\dot{m}_a, P_w, d_{foc}, d_{ori}, l_f) \\ \max \delta_f(\dot{m}_a, P_w, d_{foc}, d_{ori}, l_f) \end{aligned} \quad (5.8)$$

dove \dot{m}_a corrisponde alla portata di abrasivo, P_w alla pressione, d_{foc} al diametro del focalizzatore, d_{ori} al diametro dell'ugello primario, l_f alla lunghezza del focalizzatore pari a 76,2 mm.

I valori che definiscono il tasso di usura massima e minima derivano dai risultati sperimentali.

I risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle 5.5 e 5.7: δdf rappresenta il tasso di usura in mm/h; tf rappresenta la vita utile del focalizzatore in h, cf/tf il costo orario dovuto all'usura del solo focalizzatore in €/h, $cf/tf+cug/tug$ il costo dovuto all'usura di focalizzatore e ugello primario in €/h.

Per stimare il costo dovuto all'usura è necessario definire i costi unitari di ugello focalizzatore cf e ugello primario cug , espressi in €/pezzo. Il calcolo dei costi totali viene effettuato considerando come unitari quelli rintracciati in base ai listini di una delle principali case produttrici, sulla base di prezzi da fattura commerciale.

Tabella 5. 2 Prezzi di listino diffusi commercialmente per ugelli focalizzatore e primario

<i>cf</i>	90 €/pezzo
<i>cug</i>	10,33 €/pezzo

Il costo di usura del solo ugello primario viene stimato considerando una vita utile *tug* pari a 100 h sulla base dell'esperienza [Mon07].

Il costo orario dell'ugello primario rimane fisso: non subisce l'influenza di modelli di usura.

Tabella 5. 3 Costo orario dell'ugello primario

<i>cug</i> (€/pezzo)	<i>tug</i> (h)	<i>cug/tug</i> (€/h)
10,33	100	0,1033

Caso 1: Massima velocità di avanzamento (mm/min)

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 1000 \text{ (mm/min)} \\ \text{Pressione} = 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Tabella 5. 4 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min

Massima usura dell'ugello-Vita minima ($D_{foc}=1 \text{ mm}$, $P=350 \text{ MPa}$, $d_f=d_{f,0}+0,2*d_{f,0}$)			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
564	350	0,3	1
Minima usura dell'ugello-Vita massima ($D_{foc}=1 \text{ mm}$, $P=350 \text{ MPa}$, $d_f=d_{f,0}+0,2*d_{f,0}$)			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
252	350	0,3	1

Com'è facile a intuirsi solo la portata di abrasivo è il parametro su cui si può agire per variare l'usura dell'ugello focalizzatore (cfr.5.9).

La stima della vita utile del focalizzatore, corrispondente al valore dei parametri selezionati, risulta sintetizzata in tabella 5.5.

Tabella 5.5 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min

Massima usura dell'ugello-Vita minima ($D_{foc}=1$ mm, $P=350$ MPa, $df = df_0+0,2*df_0$)				
δdf (mm/h)	t_f (h)	cf/t_f (€/h)	$cf/t_f+cug/tug$ (€/h)	$cf/t_f+cug/tug$ arrotondato al centesimo (€/h)
0,00487	41,03	2,1936	2,2969	2,30
Minima usura dell'ugello-Vita massima ($D_{foc}=1$ mm, $P=350$ MPa, $df = df_0+0,2*df_0$)				
δdf (mm/h)	t_f (h)	cf/t_f (€/h)	$cf/t_f+cug/tug$ (€/h)	$cf/t_f+cug/tug$ arrotondato al centesimo (€/h)
0,00439	45,56	1,9755	2,0788	2,08

La vita dell'ugello focalizzatore, considerando la possibilità di variazione della portata di abrasivo sui tre livelli 252 g/min, 408 g/min e 564 g/min, è compresa tra 41,03 h e 45,56 h (cfr. Tabella 5.5 e Fig.5.8).

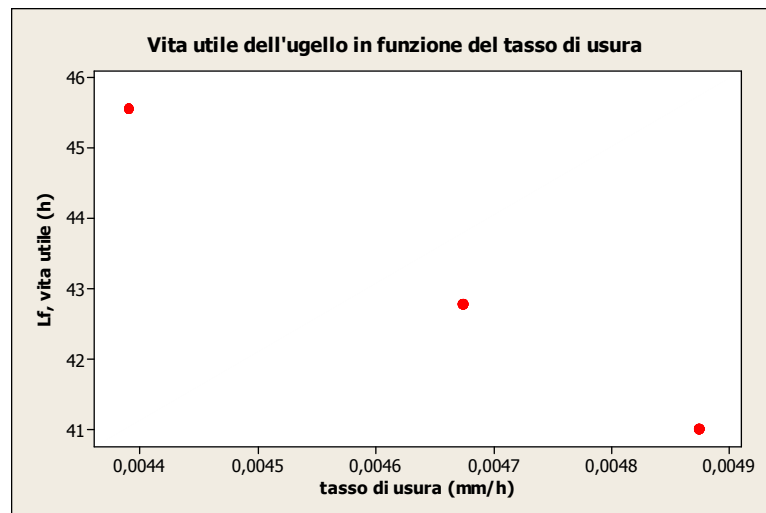


Figura 5.8 Vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura, 30 mm, 100<velocità <1000 mm/min

Caso 2: 250<Pressione<350 MPa

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 500(mm/min) \\ 250 < Pressione < 350 (MPa) \\ 252 < Portata_{abrasivo} < 564 g/min \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 mm \end{array} \right. \quad (5.10)$$

Tabella 5. 6 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa

Massima usura dell'ugello-Vita minima ($D_{foc}=1$ mm, $250 < P < 350$ MPa, $d_f = d_{f,0} + 0,2 * d_{f,0}$)			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
564	350	0,3	1
Minima usura dell'ugello-Vita massima ($D_{foc}=1$ mm, $250 < P < 350$ MPa, $d_f = d_{f,0} + 0,2 * d_{f,0}$)			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
252	250	0,3	1

Tabella 5. 7 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa

Massima usura dell'ugello-Vita minima ($D_{foc}=1$ mm, $250 < P < 350$ MPa, $d_f = d_{f,0} + 0,2 * d_{f,0}$)				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00487	41,03	2,1936	2,2969	2,30
Minima usura dell'ugello-Vita massima ($D_{foc}=1$ mm, $250 < P < 350$ MPa, $d_f = d_{f,0} + 0,2 * d_{f,0}$)				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00405	49,39	1,8223	1,9256	1,93

Rispetto al caso precedente, comprendendo entrambi i valori di pressione a 250 e 350 MPa (cfr.5.10), la vita utile massima aumenta poiché è possibile scegliere il valore minimo della pressione, pari a 250 MPa, oltre al valore minimo della portata di abrasivo pari a 252 g/min. La vita utile massima dell'ugello passa quindi da 45,56 h e 49,39 h (cfr. tabelle 5.5 e 5.7).

Il valore di vita utile minima è, invece, uguale in entrambi i casi: i valori dei parametri che minimizzano la vita utile è il medesimo.

L'andamento della vita utile rispetto al tasso di usura è mostrato nella figura: le combinazioni sperimentali in questo caso sono maggiori, poiché la scelta nei valori interessa i parametri di pressione e portata di abrasivo.

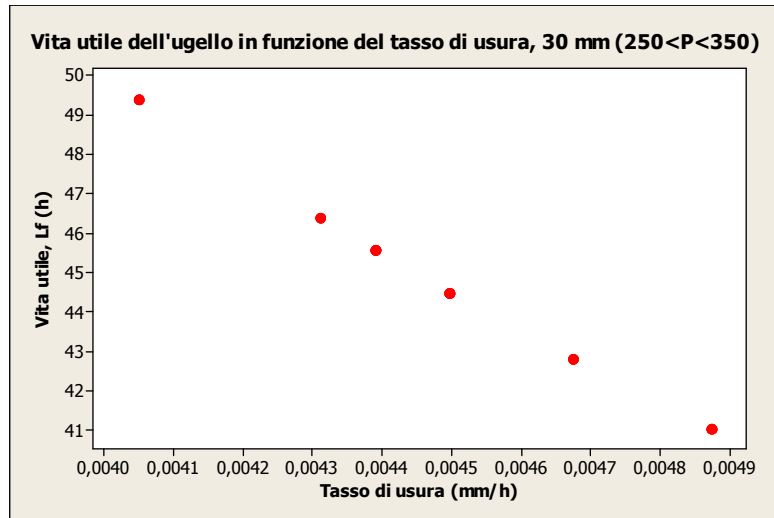


Figura 5. 9 Vita utile del focalizzatore in funzione del tasso di usura, 30 mm, 250<Pressione <350 MPa

La massimizzazione della vita dell'ugello focalizzatore, ottenuta selezionando il valore dei parametri dai vincoli ottenuti dalla sperimentazione, corrisponde quindi al minimo costo per l'usura degli ugelli. Considerando la combinazione sperimentale che prevede la variazione di velocità di avanzamento tra 100 e 1000 mm/min (caso 1), la massimizzazione della vita dell'ugello garantisce una riduzione dei costi totali di usura pari al 9,56% rispetto al caso di massima usura. Considerando, invece, la combinazione sperimentale che prevede la variazione di pressione tra 250 e 350 MPa (caso 2), la massimizzazione della vita dell'ugello garantisce una riduzione dei costi totali di usura pari al 16,09% rispetto al caso di massima usura.

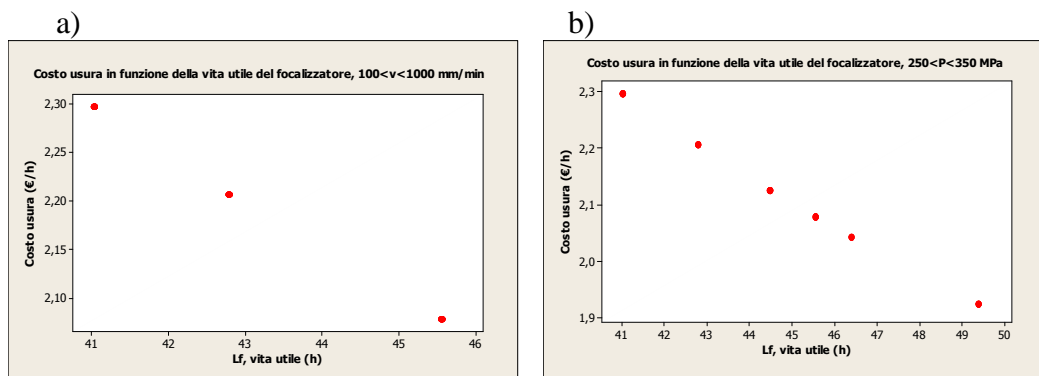


Figura 5. 10 Andamento del costo di usura in €/h in funzione della vita utile del focalizzatore, a) 100<velocità di avanzamento<1000 mm/min, b) 250<Pressione<350 MPa

In figura 5.10 e nelle tabelle 5.5 e 5.7 i costi di usura sono espressi in €/h: i costi inferiori si registrano per la combinazione sperimentale che prevede l'utilizzo di pressione e portata minima di abrasivo (250 MPa e 252 g/min); ovviamente tale espressione dei costi non tiene conto della *Velocità di avanzamento*.

L'utilizzo di pressioni superiori consente di lavorare alla velocità massima al limite di taglio, per cui, nella stima del costo totale in €/m, il valore massimo che tale parametro può assumere nelle suddette condizioni sperimentali risulta determinante (cfr. 5.4.1).

5.3.2 Calcolo vita dell'ugello pannelli 10 mm

L'approccio seguito per pannelli da 10 mm è il medesimo che è stato presentato al paragrafo 5.3.1 per pannelli da 30 mm. Anche per pannelli di questo spessore, in base ai risultati sperimentali che hanno permesso di ottenere un taglio passante, viene calcolato il valore di usura massima, e quindi vita minima, e il valore di usura minima, e quindi vita massima, dell'ugello focalizzatore, come presentato dalle funzioni espresse in 5.8.

I risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle 5.8 e 5.9: δdf rappresenta il tasso di usura in mm/h; tf rappresenta la vita utile del focalizzatore in h, cf/tf il costo orario dovuto all'usura del solo focalizzatore in €/h, $cf/tf+cug/tug$ il costo dovuto all'usura di focalizzatore e ugello primario in €/h.

I costi unitari relativi all'ugello primario e focalizzatore, così come per i pannelli da 30 mm, sono espressi nella tabella 5.3.

Tabella 5. 8 Valore dei parametri per ottenere massima e minima usura del focalizzatore, pannelli 10 mm

Massima usura dell'ugello-Vita minima, $d_f=0,2*d_{f,0}+d_{f,0}$			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
564	350	0,25	0,76
Minima usura dell'ugello-Vita massima, $d_f=0,2*df_0+d_{f0}$			
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dfoc (mm)
95	250	0,3	1

Tabella 5.9 Vita massima e minima dell'ugello in base al valore dei parametri, pannelli 10 mm

Massima usura dell'ugello-Vita minima, $d_f=0,2*d_{f,0}+d_{f,0}$				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00422	36,02	2,4985	2,6018	2,60
Minima usura dell'ugello-Vita massima, $d_f=0,2*d_{f,0}+d_{f,0}$				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00357	56,07	1,6052	1,7085	1,71

Rispetto ai pannelli da 30 mm, la variazione nel valore dei parametri di lavorazione e processo è più ampia (cfr.5.2); non solo è possibile l'utilizzo di ugelli dal diametro differente, ma il valore della pressione e della portata di abrasivo può spaziare dal livello "alto" al livello "basso" previsti dal piano fattoriale nella sperimentazione per l'analisi dello spessore tagliabile.

Per la portata di abrasivo i valori possono variare tra 564 g/min (foro n. ro 7), a cui corrisponde massimo tasso di usura, e i 95 g/min (foro n. ro 1), a cui corrisponde, invece, minimo tasso di usura.

Per la pressione i valori possono variare, invece, tra 350 MPa, a cui corrisponde massimo tasso di usura, e tra 250 MPa, a cui corrisponde invece il minimo tasso di usura. Per questo motivo il numero di ore di vita utile del focalizzatore potrà assumere valori massimi e minimi rispettivamente superiori e inferiori rispetto a quelli possibili per pannelli a spessore di 30 mm.

La vita utile aumenta da 49,39 – 45,36 h a 56,07 h passando da pannelli a 30 mm a pannelli da 10 mm (cfr. tabelle 5.5, 5.7, 5.9).

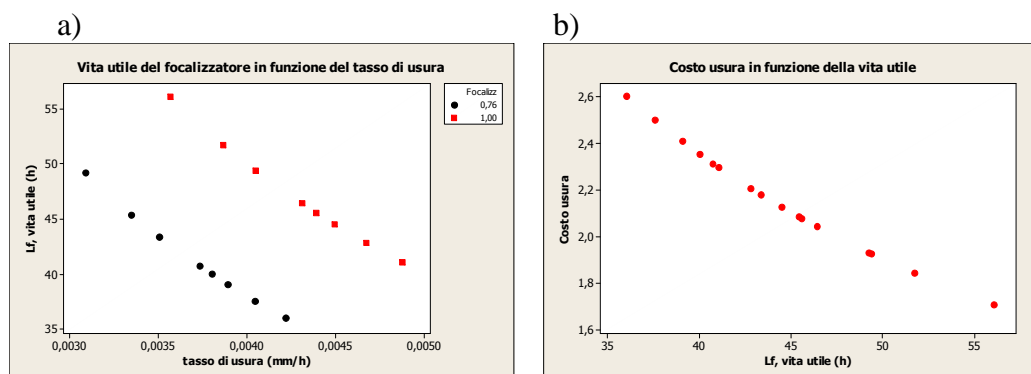


Figura 5.11 a) Vita utile dell'ugello focalizzatore in funzione del tasso di usura; b) costo di usura in funzione della vita utile, condizioni sperimentali per tagli passanti, pannelli da 10 mm

L'aumento della vita utile comporta una riduzione dei costi di usura. La massimizzazione della vita dell'ugello comporta una riduzione dei costi di usura del 34,23% rispetto alla condizione di vita utile minima.

5.4 Selezione dei parametri ottimali per pannelli in schiuma di 10 e 30 mm di spessore

I parametri ottimali per il processo di taglio verranno selezionati con lo scopo di minimizzare i costi di lavorazione.

Per ciascun pannello da 10 e 30 mm vengono selezionati i parametri ottimali applicando il modello di usura per la stima della vita utile del focalizzatore e considerandone la vita media pari a 100 h.

Applicando il modello di usura si selezioneranno i parametri per:

- minimizzare il costo totale di taglio, massimizzando la vita dell'ugello focalizzatore;
- minimizzare il costo totale di taglio senza vincoli sull'usura del focalizzatore.

È necessario definire alcune voci all'interno del modello di costo utilizzato per la stima delle spese totali del processo di taglio (cfr. 2.3). Nella tabella seguente vengono sintetizzati i costi unitari di abrasivo, energia elettrica, acqua e ugelli considerati all'interno del modello stesso. I costi unitari derivano da ricevute commerciali.

Tabella 5. 10 Costi unitari inseriti nel modello di costo

Costo unitario	Valore	Vita utile	Valore
Abrasivo, Ca'	0,454 €/kg	Focalizzatore	1- Vita media 100 h 2- Applicazione del modello di usura
Energia elettrica, ce	0,19 €/KWh		
Acqua, cw	1,86 €/m ³		
Ugello primario, cug	10,33 €/pezzo	Ugello primario	100 h
Focalizzatore, $cfoc$	90 €/pezzo		

La selezione dei parametri ottimali viene effettuata utilizzando la funzione "Risolutore" di Microsoft Excel ®: il foglio di lavoro è strutturato in modo che le celle dei parametri di taglio siano collegate alle celle rappresentative delle voci di costo, del costo totale e, nel caso di applicazione del modello di usura, alle celle corrispondenti al tasso di usura e alla vita utile del focalizzatore.

5.4.1 Selezione dei parametri ottimali per pannelli a 30 mm di spessore

La voce di costo relativa all'usura degli ugelli utilizza come vita utile il valore di vita media del focalizzatore, ma prevede anche l'applicazione di un modello di usura per la stima della vita utile del focalizzatore. Per ciascuno dei due approcci viene selezionato il valore da attribuire ai parametri per minimizzare il costo nelle due situazioni sperimentali che consentono di ottenere tagli passanti. Il confronto tra i costi minimi risultanti permetterà di individuare la combinazione sperimentale migliore e di conseguenza di assegnare ai parametri il valore ottimale che consente di ottenere il minimo costo.

5.4.1.1 Vita media dell'ugello focalizzatore

Caso 1: Massima velocità di avanzamento (mm/min)

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ h = f(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \end{array} \right. \quad (5.11)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 1000 \\ \text{Pressione} = 350 \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \end{array} \right. \quad 5.12$$

Caso 2: 250 < Pressione < 350 MPa

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ h = f(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \end{array} \right. \quad (5.13)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 500 \text{ (mm/min)} \\ 250 < \text{Pressione} < 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.14)$$

5.4.1.2 Applicazione del modello di usura

Caso 1: Massima velocità di avanzamento (mm/min):

- Minimo costo per massima vita dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ \max [Lf = (d_f - d_{f0}) / \dot{\delta}_{df}] \\ \dot{\delta}_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.15)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 1000 \\ \text{Pressione} = 350 \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \\ 0,00439 < \dot{\delta}_f < 0,00487 \text{ mm/h} \end{array} \right. \quad (5.16)$$

- Minimo costo senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ Lf = (d_f - d_{f0}) / \dot{\delta}_{df} \\ \dot{\delta}_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.17)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 1000 \\ \text{Pressione} = 350 \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \end{array} \right. \quad (5.18)$$

Caso 2: $250 < \text{Pressione} < 350 \text{ MPa}$

- Minimo costo per massima vita dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ \max [Lf = (d_f - d_{f0}) / \dot{\delta}_{df}] \\ \dot{\delta}_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.19)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} , velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 500 \text{ (mm/min)} \\ 250 < \text{Pressione} < 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \\ 0,00405 < \dot{\delta}_f < 0,00487 \text{ mm/min} \end{array} \right. \quad (5.20)$$

- Minimo costo senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ Lf = (d_f - d_{f0}) / \dot{\delta}_{df} \\ \dot{\delta}_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.21)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 500 \text{ (mm/min)} \\ 250 < \text{Pressione} < 350 \text{ (MPa)} \\ 252 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.22)$$

È da notare che nella scelta dei parametri ottimali per i pannelli a massimo spessore, il risultato dell'ottimizzazione per minimo costo senza vincoli sull'usura del focalizzatore e minimo costo per massima vita dell'ugello, porterà alla selezione dei medesimi valori per i parametri di taglio.

Avendo selezionato, in base ai risultati sperimentali, un focalizzatore pari a 1 mm e quindi un ugello primario da 0,3 mm, non ci sono possibilità di variazione per il parametro $D_{ug}+D_{foc}$. Inoltre, la *Portata di abrasivo* e la *Pressione* che minimizzano il costo di taglio sono le medesime che massimizzano la vita dell'ugello.

5.4.2 Risultati ottenuti, pannelli 30 mm

Caso 1: Massimo velocità di avanzamento

Tabella 5. 11 Parametri ottimali per pannelli di spessore 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min

<i>MINIMO COSTO</i>				
<i>Cmin</i>				
<i>30 mm</i>				
Vita media dell'ugello, 100 h				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
252	350	0,3	1	1000
Modello d'usura, vita dell'ugello 45,56<Lf<41,03				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
252	350	0,3	1	1000

Caso 2: $250 < \text{Pressione} < 350 \text{ MPa}$

Tabella 5. 12 Parametri ottimali per pannelli di spessore 30 mm, $250 < \text{Pressione} < 350 \text{ MPa}$

MINIMO COSTO				
<i>C_{min}</i>				
30 mm				
Vita media dell'ugello, 100 h - $250 < P < 350 \text{ MPa}$				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
252	250	0,3	1	500
Modello d'usura, vita dell'ugello $49,39 < t_f < 41,03$, $250 < P < 350 \text{ mm/min}$				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
252	250	0,3	1	500

La minimizzazione dei costi di taglio coincide, per pannelli di 30 mm di spessore, con la minimizzazione dei valori di *Portata di abrasivo* e *Pressione*, e massimizzazione della velocità di avanzamento. Nel modello di costo infatti, l'aumento della portata di abrasivo utilizzata e della pressione di esercizio provocano rispettivamente un aumento dei costi di consumo di abrasivo C_{abrasivo} e nei consumi di acqua, C_{acqua} , ed energia, C_{energia} .

I parametri selezionati applicando il modello di usura e considerando un numero di ore di vita utile dell'ugello focalizzatore pari alla vita media dello stesso, non presentano variazioni: i valori di pressione e portata che minimizzano l'usura del focalizzatore sono i medesimi che ne minimizzano il costo di taglio; si otterranno risultati differenti invece, nel calcolo dei costi totali di taglio, poiché diversa è la stima della vita utile del focalizzatore.

Il calcolo del costo minimo permette di effettuare la scelta ottima tra le due situazioni sperimentali:

- operare a velocità di avanzamento maggiore (1000 mm/min), aumentando il valore di pressione a 350 MPa,
- operare a velocità di avanzamento inferiore (500 mm/min), ma diminuendo la pressione a 250 MPa.

5.4.3 Calcolo del costo minimo per pannelli a 30 mm di spessore

È immediato dedurre che i costi minimi per il consumo di abrasivo, acqua ed energia non variano considerando i due approcci di applicazione del modello di usura e considerando la vita media dell'ugello focalizzatore: l'unico costo di cui si potrà apprezzare la variazione è la spesa dovuta all'usura degli ugelli.

Tabella 5. 13 Costi minimi, 100<velocità<1000 mm/min, pannelli 30 mm

Costi minimi - 100<velocità <1000 mm/min					
Costo abrasivo (€/m)		Costo acqua (€/m)		Costo en. elettrica (€/m)	
Vita media dell'ugello	Modello usura	Vita media dell'ugello	Modello usura	Vita media dell'ugello	Modello usura
0,10685		0,00429		0,05326	

Tabella 5. 14 Costi minimi, 250<Pressione<350 MPa, pannelli 30 mm

Costi minimi - 250<P<350 MPa					
Costo abrasivo (€/m)		Costo acqua (€/m)		Costo en. elettrica (€/m)	
Vita media dell'ugello	Modello usura	Vita media dell'ugello	Modello usura	Vita media dell'ugello	Modello usura
0,21370		0,00725		0,06430	

L'analisi dei costi dimostra che la spesa per il consumo di abrasivo rappresenta la voce di costo predominante.

Analizzando i costi derivanti dalle due condizioni sperimentali, si nota che la scelta di operare alla velocità di avanzamento massima possibile per lo spessore considerato (1000 mm/min), anche se a pressione maggiore (350 MPa), consente la diminuzione di ciascuna voce di costo.

Scegliendo di operare con la combinazione sperimentale che comprende pressione pari a 250 MPa è possibile diminuire i costi orari di consumo di energia e di consumo di acqua. Questa soluzione non è ottimale per il caso analizzato, in quanto la combinazione sperimentale in esame comporta la riduzione della velocità di avanzamento fino a 500 mm/min e, di conseguenza, l'aumento delle singole voci di costo in esame, se espresse in €/m.

Tabella 5. 15 Costi minimi di usura, 100<velocità<1000 mm/min, pannelli 30 mm

Costi di usura (€/m) - 100<velocità <1000 mm/min	
Vita media dell'ugello	Modello usura
0,01672	0,03465
Differenza %	
51,74	

La vita utile dell'ugello focalizzatore, stimata tramite applicazione del modello di usura, risulta pari a 45,56 h selezionando i parametri 252 g/min *Portata di abrasivo*, *Pressione* 350 MPa, *Dfoc+Dug* 1 mm e *Velocità di avanzamento* pari a 1000 mm/min.

La differenza percentuale dei costi di usura è del 51,74% rispetto al costo di usura, secondo modello. La vita media del focalizzatore è pari a 100 h.

**Costi di usura (€/m), pannelli 30 mm,
100<velocità<1000 mm/min**

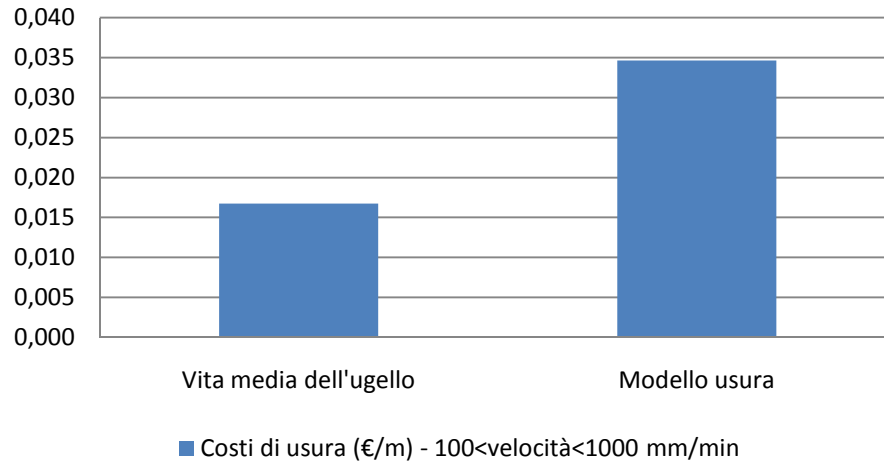


Figura 5. 12 Costi di usura, pannelli 30 mm, 100<velocità<1000 mm/min

**Tabella 5. 16 Costi minimi di usura, 250<Pressione<350 MPa,
pannelli 30 mm**

Costi di usura (€/m) -250<P<350 MPa	
Vita media dell'ugello	Modello usura
0,03344	0,064185
Differenza %	
47,90	

La vita utile dell'ugello focalizzatore, stimata tramite applicazione del modello di usura, risulta pari a 49,39 h selezionando i parametri 252 g/min di *Portata di abrasivo*, *Pressione* 250 MPa, *Dfoc+Dug* 1 mm e *Velocità di avanzamento* pari a 500 mm/min.

I costi di usura stimati considerando la vita utile dell'ugello pari a 49,39 h sono maggiori del 47,9% rispetto ai costi di usura stimati considerando la vita media dell'ugello pari a 100 h.

Rispetto al caso precedente, la vita utile stimata tramite il modello di usura aumenta e diminuisce, quindi, la differenza rispetto alla vita media del focalizzatore. Diminuisce quindi anche la differenza percentuale tra i costi di usura.

L'aumento della vita utile del focalizzatore è determinata dalla scelta di una pressione inferiore che contribuisce alla diminuzione del tasso di usura e quindi aumenta il numero delle ore di vita utile del focalizzatore.

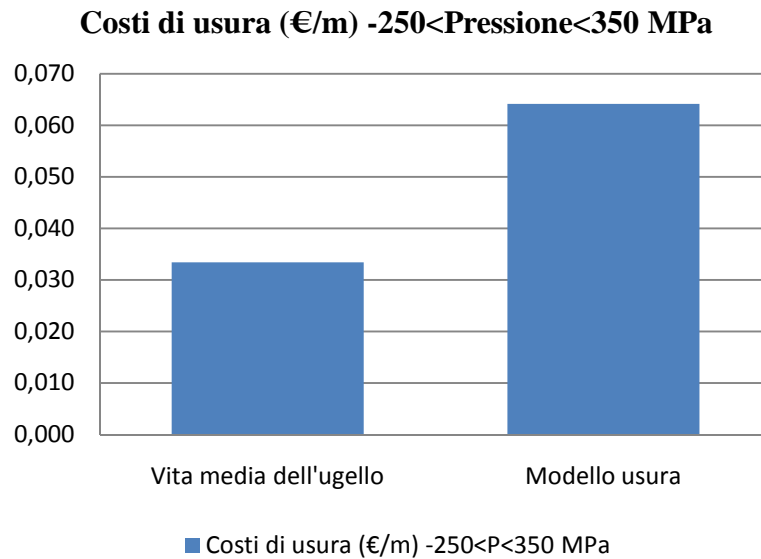


Figura 5. 13 Costi di usura, pannelli 30 mm, 250<Pressione<350 MPa

5.4.4 Conclusioni, pannelli 30 mm

Per pannelli da 30 mm il costo minimo si ottiene attribuendo ai parametri di taglio i seguenti valori:

- Pressione:* 350 MPa;
- Velocità di avanzamento:* 1000 mm/min;
- Dfoc+Dug:* 1 mm
- Portata di abrasivo:* 252 g/min

Tabella 5. 17 Costo minimo totale, pannelli 30 mm

Costi Totali (€/m)	
Minimo costo, parametri ottimizzati	
Vita media dell'ugello	Modello usura
0,18	0,20

I costi totali subiscono una riduzione del 10 % passando da 0,20 €/m a 0,18 €/m. Si deve ricordare che la vita utile, stimata tramite il modello di usura, corrisponde al numero di ore che comportano un aumento di diametro del focalizzatore pari al 20% del suo valore iniziale, operando in modo continuato gli stessi valori nei parametri di taglio.

Attribuendo ai parametri i valori di *Pressione:* 250 MPa; *Velocità di avanzamento:* 500 mm/min; *Dfoc+Dug:* 1 mm; *Portata di abrasivo:* 252 g/min, il costo minimo ammonterebbe a 0,32 €/m considerando la vita media

dell'ugello focalizzatore, e 0,35 €/m applicando il modello di usura. La velocità di avanzamento gioca un ruolo determinante: il costo totale minimo si ottiene operando alla massima velocità di avanzamento possibile.

È fondamentale minimizzare la portata di abrasivo al valore che consente di ottenere tagli passanti, a pari valori per i restanti parametri: lavorando a portate di abrasivo pari a 408 g/min (foro n. ro 5) con *Pressione* pari a 350 MPa, *Dug+Dfoc* pari a 1 mm e velocità 1000 mm/min, il costo di lavorazione passa da 0,18 (condizione di minimo abrasivo) a 0,25 €/m considerando la vita media dell'ugello, mentre aumenta da 0,20 (condizione di minimo abrasivo) a 0,27 €/m applicando il modello di usura nella stima della vita utile. L'operazione di taglio alla minima *Portata di abrasivo* consentita (252 g/min) permette di ridurre i costi rispettivamente del 28% (stima dei costi con vita media dell'ugello) e del 25,9% (stima dei costi con modello di usura) rispetto all'esecuzione dei tagli alla portata successiva (408 g/min).

Diminuendo la *Velocità di avanzamento* dal valore ottimale di 1000 mm/min al valore immediatamente inferiore pari a 700 mm/min, lasciando inalterati i valori ottimali dei restanti parametri, i costi di taglio:

- aumentano del 44% passando da 0,18 €/m a 0,26 €/m (stima dei costi con vita media del focalizzatore);
- aumentano del 40% passando da 0,20 €/m a 0,28 €/m (stima dei costi applicando il modello di usura).

Selezionati i parametri che consentono di ottenere il costo minimo è possibile valutare l'incidenza percentuale delle quattro voci di costo sul costo totale di taglio.

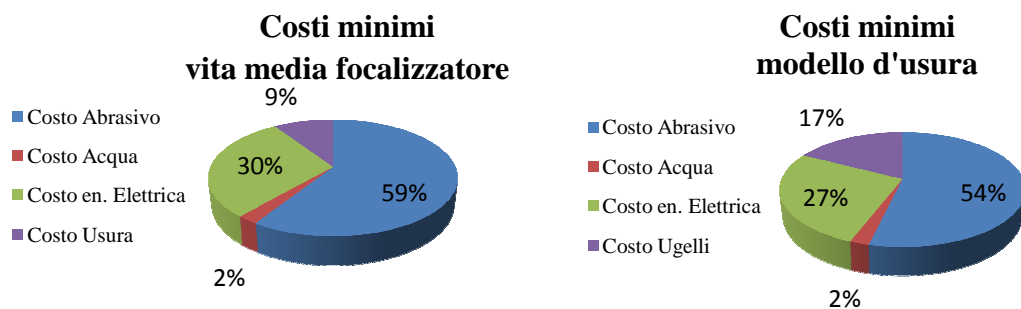


Figura 5. 14 Incidenza percentuale delle singole voci di costo sul costo totale minimo, pannelli 30 mm

L'incidenza percentuale maggiore è registrata dal costo relativo al consumo di abrasivo, che è responsabile di circa la metà dei costi totali; seguono la spesa per il consumo di energia elettrica e il costo dovuto all'usura degli ugelli.

Infine il costo per il consumo dell'acqua rappresenta solo il 2% dei costi totali in entrambi i casi (sia per la stima dei costi applicando la vita media dell'ugello, sia stimando i costi mediante il modello di usura). Come prevedibile aumenta l'incidenza percentuale dei costi relativi all'usura degli ugelli stimando la vita media dell'ugello mediante il modello di usura. Poiché il numero di ore di vita utile dell'ugello focalizzatore risulta inferiore alla vita media, si assiste a un aumento dei costi di usura. La percentuale di incidenza del costo di usura passa dal 9% al 17%, mentre diminuiscono rispettivamente di 5 e di 3 punti percentuali i costi dell'abrasivo e dell'energia elettrica.

5.4.5 Selezione dei parametri ottimali per pannelli a 10 mm di spessore

Anche in questo caso, così come per pannelli da 30 mm di spessore, la voce di costo relativa all'usura degli ugelli utilizza come vita utile il valore di vita media del focalizzatore, ma prevede anche l'applicazione di un modello di usura per la stima della vita utile del focalizzatore stesso.

5.4.5.1 Vita media dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \end{array} \right. \quad (5.23)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), velocità_{av} velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < \text{Velocità}_{av} < 5000 \text{ (mm/min)} \\ 250 < \text{Pressione} < 350 \text{ (MPa)} \\ 95 < \text{Portata}_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 0,76 - 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.24)$$

5.4.5.2 Applicazione del modello di usura

- Minimo costo per massima vita dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, \text{velocità}_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ \max [Lf = (d_f - d_{f0}) / \dot{\delta}_{df}] \\ \dot{\delta}_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.25)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), $velocità_{av}$ velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 5000 \text{ (mm/min)} \\ 250 < Pressione < 350 \text{ (MPa)} \\ 95 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 0,76 - 1 \text{ mm} \\ 0,00357 < \delta_{df} < 0,00422 \end{array} \right. \quad (5.26)$$

- Minimo costo senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [C_{tot} = C_{abrasivo} + C_{acqua} + C_{energia} + C_{usura}] \\ \mathbf{h} = \mathbf{f}(\dot{m}_a, P_w, velocità_{av}, D_{ug} + D_{foc}) \\ Lf = (d_f - d_{f0}) / \delta_{df} \\ \delta_{df} = 0,0015 \cdot \frac{P_w^{0,24} \cdot \dot{m}_a^{0,13} \cdot d_{ori}^{1,8}}{d_{f,0}^{0,67} \cdot l_f^{0,05}} \end{array} \right. \quad (5.27)$$

La variazione dei parametri \dot{m}_a portata di abrasivo (g/min), P_w pressione dell'acqua (MPa), $velocità_{av}$ velocità di avanzamento (mm/min), $D_{ug} + D_{foc}$ accoppiamento ugello primario e focalizzatore (mm) è vincolata ai risultati sperimentali:

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 < Velocità_{av} < 5000 \text{ (mm/min)} \\ 250 < Pressione < 350 \text{ (MPa)} \\ 95 < Portata_{abrasivo} < 564 \text{ g/min} \\ D_{ug} + D_{foc} : 0,76 - 1 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (5.28)$$

I risultati sperimentali in pannelli da 10 mm consentono l'assenza di vincoli sul tipo di accoppiamento $D_{foc} + D_{ug}$.

Diversamente da quanto dimostrato per pannelli da 30 mm, le ottimizzazioni per cui si ricercano il minimo costo e il minimo costo per massima vita dell'ugello, non mostreranno gli stessi valori per i parametri di taglio.

Il minimo costo di taglio senza vincoli sull'usura dell'ugello focalizzatore si ottiene scegliendo un accoppiamento $D_{ug} + D_{foc}$ pari a 0,76 mm, a pari valori nei restanti parametri di processo e di lavorazione. I costi di energia elettrica e di consumo dell'acqua sono, infatti, direttamente proporzionali al diametro dell'ugello primario, da cui dipende la portata di acqua Q_w (m³/s) (cfr.2.3).

Il minimo costo per vita massima del focalizzatore si ottiene scegliendo $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm, e i valori di pressione e portata di abrasivo che minimizzano il costo di taglio sono i medesimi che massimizzano la vita dell'ugello (la *Velocità di avanzamento* non è influente nel modello di usura utilizzato).

È necessario quindi valutare se il risparmio derivante dalla minimizzazione dei costi di usura compensa gli aumenti di costo di energia elettrica e consumo di acqua.

5.4.6 Risultati ottenuti, pannelli 10 mm

Tabella 5. 18 Parametri ottimali per pannelli di spessore 10 mm

MINIMO COSTO				
<i>C_{min}</i>				
10 mm				
Vita media dell'ugello, 100 h				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
95	250	0,25	0,76	5000
Modello d'usura, costo minimo di taglio per vita massima dell'ugello, $36 < t_f < 56$				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
95	250	0,3	1	5000
Modello d'usura, costo minimo di taglio				
Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
95	250	0,25	0,76	5000

La minimizzazione dei costi di taglio coincide, per pannelli di 10 mm di spessore, con la minimizzazione dei valori di portata di abrasivo e pressione, e massimizzazione della velocità di avanzamento. Nel modello di costo, infatti, l'aumento della portata di abrasivo utilizzata e della pressione di esercizio, provocano rispettivamente un aumento dei costi di consumo di abrasivo $C_{abrasivo}$ e nei consumi di acqua, C_{acqua} , ed energia, $C_{energia}$.

I parametri selezionati ricercando il costo minimo senza vincoli sull'usura del focalizzatore e considerando un numero di ore di vita utile dell'ugello focalizzatore pari alla vita media dello stesso, non presentano variazioni.

Si otterranno risultati differenti, invece, nel calcolo dei costi totali di taglio, poiché diversa è la stima della vita utile del focalizzatore.

Applicando il modello d'usura, il focalizzatore che minimizza il costo di taglio è pari a 0,76 mm, mentre la vita massima dello stesso si ottiene con diametri pari a 1 mm, a parità di valori associati ai restanti parametri di taglio.

Il calcolo del costo minimo nelle due condizioni (minimo costo senza vincoli sull'usura del focalizzatore e minimo costo per massima vita del focalizzatore) consente di valutare se il risparmio derivante dalla minimizzazione dei costi di usura compensa l'aumento dei costi derivanti dal consumo di acqua ed energia.

5.4.7 Calcolo del costo minimo per pannelli a 10 mm di spessore

Tabella 5. 19 Costo minimo per il consumo di abrasivo, pannelli 10 mm

Costi minimi		
Costo abrasivo (€/m)		
Vita media del focalizzatore	Applicazione modello di usura: costo minimo	Applicazione del modello di usura: costo minimo, vita massima del focalizzatore
0,0081		

Il costo relativo al consumo di abrasivo è uguale in ciascuna condizione: la minimizzazione della portata di abrasivo comporta la minimizzazione dei costi e la massimizzazione della vita dell'ugello focalizzatore.

Tabella 5. 20 Costo minimo per il consumo di acqua, pannelli 10 mm

Costi minimi		
Costo acqua (€/m)		
Vita media del focalizzatore	Applicazione modello di usura: costo minimo	Applicazione del modello di usura: costo minimo, vita massima del focalizzatore
0,0005		0,0007

Tabella 5. 21 Costo minimo per il consumo di energia, pannelli 10 mm

Costi minimi		
Costo en. Elettrica €/m		
Vita media del focalizzatore	Applicazione modello di usura: costo minimo	Applicazione del modello di usura: costo minimo, vita massima del focalizzatore
0,0045		0,0064

I costi relativi al consumo di acqua ed energia elettrica sono maggiori nel caso massimizzazione della vita dell'ugello focalizzatore: in questo caso, infatti, l'accoppiamento $Dug+Dfoc$ comprende l'ugello focalizzatore a diametro pari a 1 mm e ugello primario pari a 0,3 mm.

Senza vincoli sul tasso di usura e per vita media dell'ugello è invece possibile selezionare un ugello primario con diametro pari a 0,25 mm che consente di ottenere costi inferiori per il consumo di acqua ed energia; a tale ugello primario è associato un focalizzatore di 0,76 mm.

Tabella 5. 22 Costi minimi di usura, pannelli 10 mm

Costi Minimi		
Costo usura (€/m)		
Vita media del focalizzatore	Applicazione modello di usura: costo minimo	Applicazione del modello di usura: costo minimo, vita massima del focalizzatore
0,003	0,00644	0,00570

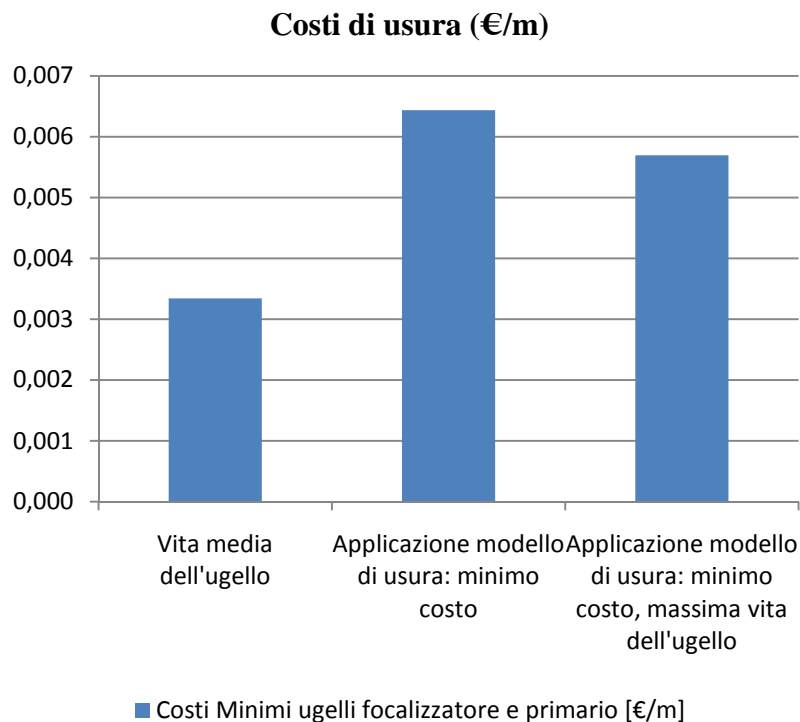


Figura 5. 15 Costi di usura, pannelli 10 mm

I costi di usura diminuiscono all'aumentare del numero di ore di vita utile dell'ugello focalizzatore.

Massimizzando la vita del focalizzatore, la vita utile stimata risulta pari a 56,07 h ($Dug+Dfoc$ 1 mm; $Portata$ di abrasivo pari a 95 g/min; $Pressione$ 250 MPa).

Applicando il modello di usura e minimizzando i costi totali senza vincoli sulla durata dell'ugello focalizzatore, la vita utile risultante in funzione dei valori che minimizzano il costo è pari a 49,23 h ($Dug+Dfoc$ 0,76 mm; $Portata$ di abrasivo pari a 95 g/min; $Pressione$ 250 MPa). La vita media dell'ugello è invece sempre stimata a 100 h.

Tabella 5. 23 Vita utile degli ugelli per costo minimo e costo minimo per massima vita utile del focalizzatore, pannelli 10 mm

Vita utile dell'ugello (P=250MPa, Port. Abrasivo 95 g/min, Dug+Dfoc 0,76 mm)				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00309	49,23	1,8283	1,9316	1,93
Minima usura dell'ugello-Vita massima (P=250MPa, Port. Abrasivo 95 g/min, Dug+Dfoc 1 mm)				
δdf (mm/h)	tf (h)	cf/tf (€/h)	cf/tf+cug/tug (€/h)	cf/tf+cug/tug arrotondato al centesimo (€/h)
0,00357	56,07	1,6052	1,7085	1,71

I costi totali di taglio sono sintetizzati nella tabella seguente:

Tabella 5. 24 Confronto costi totali, pannelli 10 mm

Costi Totali (€/m)		
Minimo costo, parametri ottimizzati		
Vita media dell'ugello	Applicazione del modello di usura: minimo costo	Applicazione del modello di usura: minimo costo, massima vita dell'ugello
0,0164	0,0195	0,0209

Il risparmio derivante dalla minimizzazione dei costi di usura, non compensa l'aumento del costo per il consumo di acqua ed energia elettrica.

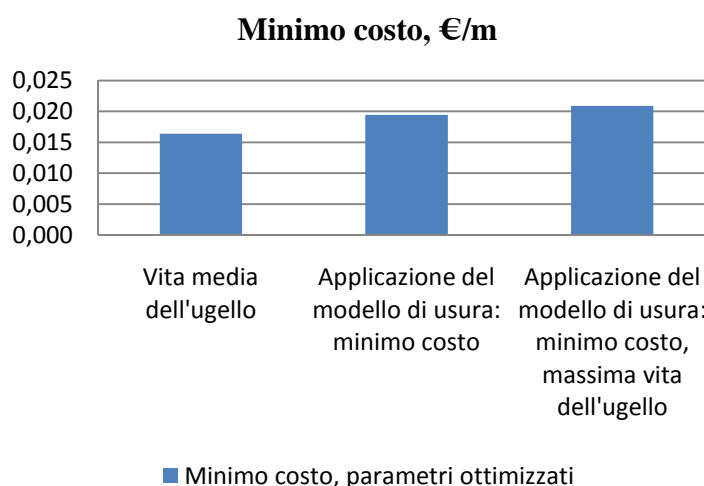


Figura 5. 16 Minimo costo, pannelli 10 mm

5.4.8 Conclusioni, pannelli 10 mm

Per pannelli da 10 mm il costo minimo si ottiene attribuendo ai parametri di taglio i seguenti valori:

Pressione: 250 MPa;

Velocità di avanzamento: 5000 mm/min;

Dfoc+Dug: 0,76 mm

Portata di abrasivo: 95 g/min

Tabella 5. 25 Costi totali, parametri ottimizzati, pannelli 10 mm

Costi Totali (€/m)	
Minimo costo, parametri ottimizzati	
Vita media dell'ugello	Modello usura
0,0164	0,0195

I costi totali subiscono una riduzione del 15,9% passando da 0,0195 €/m a 0,0164 €/m. Si deve ricordare che la vita utile, stimata tramite il modello di usura, corrisponde al numero di ore che garantiscono un incremento di diametro del focalizzatore pari al 20% del suo valore iniziale, operando in modo continuato gli stessi valori nei parametri di taglio.

Selezionati i parametri che consentono di ottenere il costo minimo è possibile valutare l'incidenza percentuale delle quattro voci di costo sul costo totale di taglio.

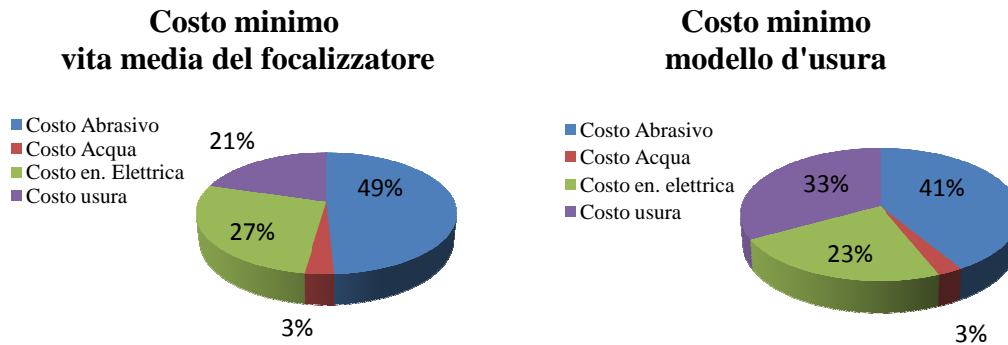


Figura 5. 17 Incidenza percentuale delle singole voci di costo sul costo totale minimo, pannelli 10 mm

L'incidenza percentuale maggiore è registrata dal costo relativo al consumo di abrasivo, che è responsabile di circa la metà dei costi totali. Segue la spesa per il consumo di energia elettrica e il costo dovuto all'usura degli ugelli.

Infine il costo per il consumo dell'acqua rappresenta solo il 3% dei costi totali in entrambi i casi, sia per la stima dei costi applicando la vita media dell'ugello, sia stimando i costi mediante il modello di usura.

Come prevedibile aumenta l'incidenza percentuale del costo relativo all'usura degli ugelli stimando la vita media del focalizzatore mediante il modello di usura. Poiché il numero di ore di vita utile dell'ugello focalizzatore risulta in quel caso inferiore alla vita media, si assiste a un aumento di tale voce di costo. La percentuale di incidenza del costo di usura passa dal 21% al 33%. Si abbassano, invece, rispettivamente di 4 e 8 punti percentuali i costi relativi all'abrasivo e al consumo di acqua.

5.4.9 Costo di taglio senza abrasivo

Dai risultati sperimentali si è potuto verificare che la velocità massima al limite di taglio raggiunge i 5000 mm/min. Si è voluto verificare inoltre, a quale velocità di avanzamento fosse possibile ottenere tagli passanti, anche senza particolare finitura superficiale (cfr. capitolo 4), effettuando tagli a solo getto d'acqua. Si è notato in quel caso che, a parità di *Pressione* e *Dug+Dfoc*, la velocità di avanzamento si riduce di due ordini di grandezza. È immediato dedurre che il costo di taglio sarà notevolmente superiore.

Il costo dovuto al consumo di abrasivo costituisce circa la metà del costo totale, l'eliminazione di tale voce di costo potrebbe essere vantaggiosa solo se il mancato utilizzo di abrasivo non costringesse ad operare a velocità di avanzamento non più vantaggiose. La figura 5.18, riportata in seguito, mostra che, eliminando la voce di costo relativa al consumo di abrasivo, l'incidenza percentuale maggiore sui costi totali è dovuta al consumo di energia elettrica e, a seguire, all'usura degli ugelli e infine al consumo dell'acqua.

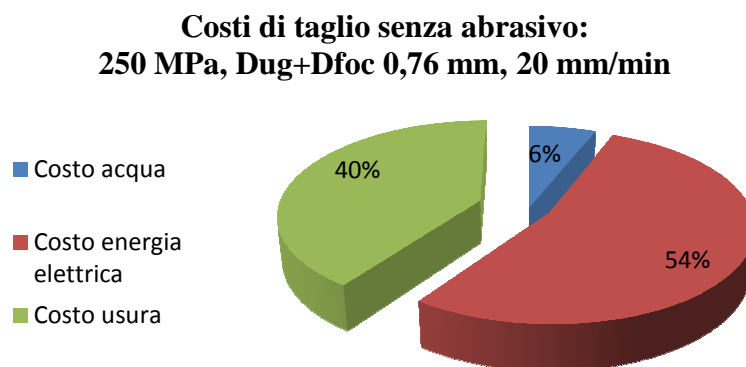


Figura 5. 18 Incidenza percentuale delle singole voci sul costo totale, taglio con solo getto d'acqua, pannelli 10 mm

Per valutare l'effettivo vantaggio economico derivante dall'eliminazione dei costi dovuti al consumo di abrasivo si stimano i costi di taglio nelle due condizioni di taglio a solo getto d'acqua e di taglio a getto idro-abrasivo: la stima dei costi di taglio con utilizzo di abrasivo prevederà l'utilizzo della minima portata possibile.

Tabella 5. 26 Confronto dei costi di taglio con e senza l'utilizzo di abrasivo, pannelli 10 mm

Minima Portata 95 g/min, foro 1			
Pressione MPa	Diametro focalizzatore	Con abrasivo, Velocità avanzamento 2000 mm/min	Senza abrasivo, Velocità avanzamento 20 mm/min
250	1	2000	20
COSTO €/m		0,046	2,625
250	0,76	2000	20
COSTO €/m		0,041	2,078
350	1	2000	20
COSTO €/m		0,057	3,713
350	0,76	2000	20
COSTO €/m		0,048	2,834

Il mancato utilizzo del getto idro-abrasivo riduce notevolmente la velocità di avanzamento possibile a parità di valore nei restanti fattori. I costi di taglio a 20 mm/min superano i 3 €/m. Ipotizzando di effettuare la lavorazione a 2000 mm/min (due ordini di grandezza superiore rispetto alla velocità consentita senza l'utilizzo di abrasivo), il costo di taglio è compreso tra i 0,04 e 0,05 €/m.

Confronto costi senza e con abrasivo a minima portata

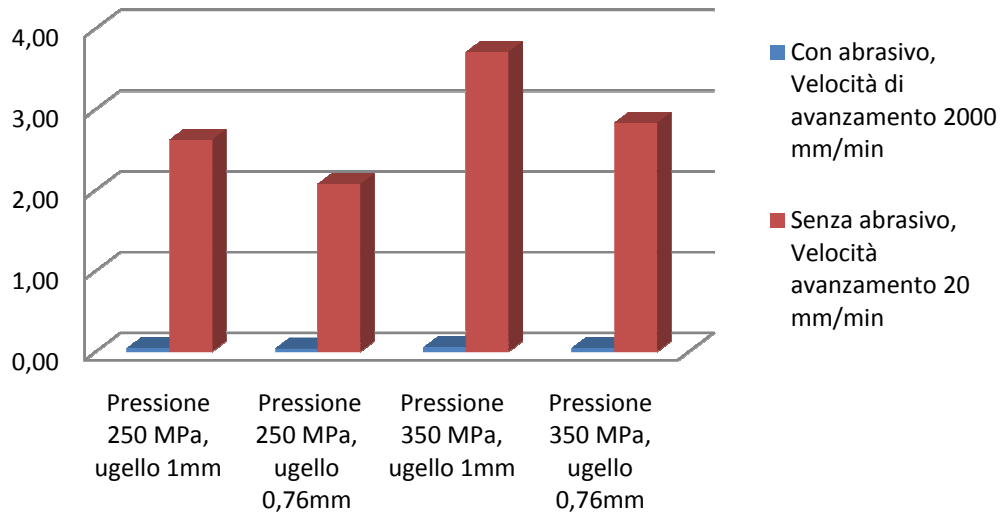


Figura 5. 19 Confronto dei costi per taglio con e senza abrasivo, pannelli 10 mm

In sintesi:

- La diminuzione della velocità d'avanzamento (fino a 100 volte), obbligata per la scelta di non utilizzare getto idro-abrasivo, aumenta notevolmente il costo del taglio.
- La diminuzione della velocità di avanzamento ha un peso sul costo totale di taglio notevolmente superiore rispetto all'incidenza del consumo di abrasivo.
- Il taglio senza abrasivo, in queste condizioni di taglio, non è economicamente vantaggioso.

5.5 Analisi di sensibilità

Per ciascuna ottimizzazione effettuata:

- *Vita media dell'ugello nella funzione costo:*
 1. Minimo costo, pannelli a massimo spessore, 30 mm
100 < Velocità < 1000 mm/min
 2. Minimo costo, pannelli a massimo spessore, 30 mm
250 < Pressione < 350 MPa
 3. Minimo costo, pannelli a 10 mm
100 < Velocità < 5000 mm/min

- *Modello d'usura nella funzione di costo:*
 1. Minimo costo, pannelli a massimo spessore, 30 mm
100<Velocità<1000 mm/min
 2. Minimo costo, pannelli a massimo spessore, 30 mm
250 <Pressione<350 MPa
 3. Minimo costo per massima vita dell'ugello focalizzatore, pannelli a 10 mm
100<Velocità<5000 mm/min
 4. Minimo costo senza vincoli sull'usura dell'ugello, pannelli a 10 mm
100<Velocità <5000 mm/min.

(I risultati dell'ottimizzazione per minimo costo senza vincoli sull'usura del focalizzatore e minimo costo per massima vita del focalizzatore sono i medesimi per pannelli di 30 mm di spessore: l'analisi di sensibilità si riduce pertanto alla valutazione dei costi per una sola condizione).

Si incrementano del 10% i costi unitari di abrasivo, acqua, energia elettrica e di ugello focalizzatore e primario.

5.5.1 Applicazione della vita media dell'ugello focalizzatore

Tabella 5. 27 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di abrasivo

MINIMO COSTO		
VITA MEDIA DELL'UGELLO		
COSTO ABRASIVO		
Ca'	0,424	€/kg
Ca' +10%	0,4664	€/kg
Ca' -10%	0,3816	€/kg
Variazione sul costo totale, 100<v. avanzamento (mm/min)<1000 - 30 mm -		
±5,89		
Variazione sul costo totale, 250<Pressione (MPa)<350 - 30 mm -		
±6,7		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm-		
±4,92		

Tabella 5. 28 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di acqua

MINIMO COSTO		
VITA MEDIA DELL'UGELLO		
COSTO ACQUA		
cw	1,86	€/m3
cw +10%	2,046	€/m3
cw -10%	1,674	€/m3
Variazione sul costo totale, 100<v. avanzamento (mm/min)<1000 -30 mm -		
±0,23		
Variazione sul costo totale, 250< Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±0,22		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm-		
±0,31		

Tabella 5. 29 Variazione percentuale del costo relativo al consumo di energia elettrica

MINIMO COSTO		
VITA MEDIA DELL'UGELLO		
COSTO ENERGIA ELETTRICA		
ce	0,19	€/KWh
ce +10%	0,209	€/KWh
ce -10%	0,171	€/KWh
Variazione sul costo totale, 100<v. avanzamento (mm/min)<1000 -30 mm -		
±2,94		
Variazione sul costo totale, 250< Pressione (MPa)<350 – 30 mm		
±2,01		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm-		
±2,73		

Tabella 5. 30 Variazione percentuale del costo di usura

MINIMO COSTO		
VITA MEDIA DELL'UGELLO		
COSTO DI USURA		
C. ug. Primario	10,33	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore	90	€/pezzo
C. ug. Primario +10%	11,363	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore +10%	99	€/pezzo
C. ug. Primario -10%	9,297	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore -10%	81	€/pezzo
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<1000 -30 mm -		
±0,92		
Variazione sul costo totale, 250< Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±1,05		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm-		
±2,04		

5.5.2 Applicazione del modello di usura

Tabella 5. 31 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di abrasivo, modello di usura

MINIMO COSTO		
APPLICAZIONE MODELLO USURA		
COSTO ABRASIVO		
Ca'	0,424	€/kg
Ca' +10%	0,4664	€/kg
Ca' -10%	0,3816	€/kg
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<1000 – 30 mm-		
±5,37		
Variazione sul costo totale, 250<Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±6,12		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000, vita massima focalizzatore- 10 mm -		
±3,27		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm -		
±4,13		

Tabella 5. 32 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di acqua, modello di usura

MINIMO COSTO		
APPLICAZIONE MODELLO USURA		
COSTO ACQUA		
cw	1,86	€/m3
cw +10%	2,046	€/m3
cw -10%	1,674	€/m3
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<1000 – 30 mm-		
±0,22		
Variazione sul costo totale, 250<Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±0,21		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000, vita massima focalizzatore- 10 mm -		
±0,29		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm -		
±0,26		

Tabella 5. 33 Variazione percentuale del costo dovuto al consumo di energia elettrica, modello di usura

MINIMO COSTO		
APPLICAZIONE MODELLO USURA		
COSTO ENERGIA ELETTRICA		
ce	0,19	€/KWh
ce +10%	0,209	€/KWh
ce -10%	0,171	€/KWh
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<1000 – 30 mm-		
±2,68		
Variazione sul costo totale, 250<Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±1,84		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000, vita massima focalizzatore - 10 mm		
±2,61		
Variazione sul costo totale, 100<velocità (mm/min)<5000 - 10 mm -		
±2,29		

Tabella 5. 34 Variazione percentuale del costo di usura, modello di usura

MINIMO COSTO		
APPLICAZIONE MODELLO USURA		
COSTO UGELLI		
C. ug. Primario	10,33	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore	90	€/pezzo
C. ug. Primario +10%	11,363	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore +10%	99	€/pezzo
C. ug. Primario -10%	9,297	€/pezzo
C. ug. Focalizzatore -10%	81	€/pezzo
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<1000 – 30 mm-		
±1,64		
Variazione sul costo totale, 250<Pressione (MPa)<350 – 30 mm-		
±1,84		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000, vita massima focalizzatore - 10 mm-		
±3,83		
Variazione sul costo totale, 100<Velocità (mm/min)<5000 - 10 mm -		
±3,3		

L'aumento del costo unitario di abrasivo, acqua, energia elettrica e costo degli ugelli al pezzo, causano un incremento percentuale dei costi, come riportato; non provocano, però, la variazione dei parametri ottimizzati.

Capitolo 6: Analisi della qualità del taglio, selezione dei parametri ottimali

Il presente capitolo è dedicato alla rielaborazione dei risultati ottenuti dal piano sperimentale per l'analisi della qualità del taglio.

L'obiettivo della sperimentazione consiste nella valutazione della significatività del parametro "conicità media" per la valutazione della qualità macrogeometrica del solco di taglio nella lavorazione di pannelli in schiuma metallica.

A fianco del parametro "conicità media", sarà necessario introdurre un parametro in grado di descrivere quantitativamente la variabilità della larghezza del solco di taglio. Il solco tagliato nel lato di uscita si presenta, infatti, molto frastagliato: per questo motivo non è possibile trascurarne la sua variabilità.

Il capitolo è strutturato presentando inizialmente l'effetto dei parametri di processo sull'ampiezza del solco e sulla conicità nei materiali tradizionali e omogenei in base agli studi presenti in letteratura. Si prosegue con la presentazione del metodo utilizzato per la misurazione delle larghezze dei solchi in ingresso e in uscita per pannelli in schiuma metallica. La tecnica utilizzata prevede la misurazione della larghezza del solco tagliato attraverso l'analisi dell'immagine. Il programma ImageJ consente la misurazione delle larghezze dei solchi nei provini scannerizzati.

L'elaborazione dei dati ottenuti dall'analisi dell'immagine, si basa sull'analisi della varianza (ANOVA) utilizzando il pacchetto software Minitab15, uno strumento specifico per l'analisi statistica delle rilevazioni.

Il valore dei fattori significativi sui parametri che descrivono la qualità macrogeometrica nel taglio delle schiume metalliche, sarà selezionato in base ai risultati dell'elaborazione statistica. Il valore dei parametri che non risulteranno significativi sarà invece selezionato per minimizzare anche in questo caso i costi di taglio.

6.1 Qualità del taglio nei materiali omogenei

La qualità macrogeometrica viene analizzata tramite la misurazione delle larghezza dei solchi in ingresso e in uscita e tramite la conicità del solco tagliato.

6.1.1 Ampiezza del solco di taglio

L'ampiezza del solco di taglio ottenuta tramite taglio con tecnologia AWJ dipende dal valore assunto dai parametri di processo e lavorazione.

Perché risulti un solco di taglio con ampiezza più contenuta sono auspicabili [Ann99]:

- un aumento della velocità di avanzamento

- una diminuzione della pressione;
- una diminuzione della portata di abrasivo (cfr. Fig. 6.1);
- una bassa s.o.d.;
- un piccolo diametro del focalizzatore.

Il mesh # ha un effetto dipendente dalla profondità di taglio: alle basse profondità, un aumento del mesh # porta ad un aumento dell'ampiezza del solco, mentre a profondità più elevate si ha un comportamento inverso. Ciò è dovuto al fatto che abrasivi più grossolani tagliano più in profondità, asportano più materiale e di conseguenza determinano un'ampiezza del solco maggiore [Ann99].

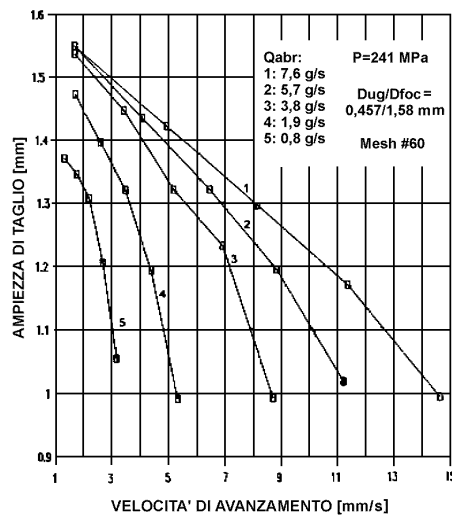


Figura 6. 1 Ampiezza del solco di taglio i funzione della velocità di avanzamento e della portata di abrasivo [Ann99]

6.1.2 Conicità del solco di taglio

La forma del solco tagliato dipende dalla forma spaziale del getto. Quest'ultima è legata direttamente alla velocità di avanzamento utilizzata e al valore degli altri parametri tecnologici: per questo motivo non è assimilabile a quella di un utensile a geometria determinata e fissa.

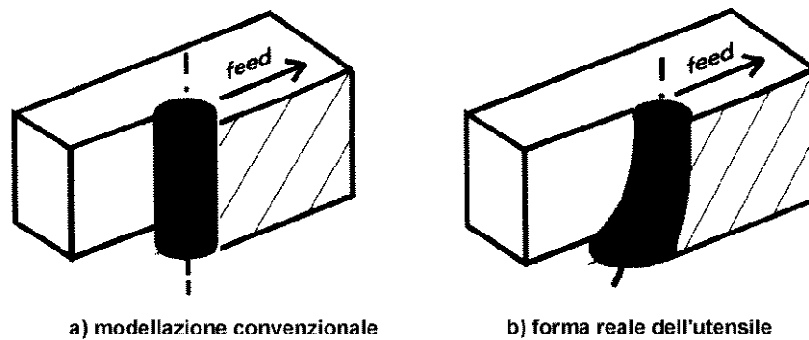


Figura 6. 2 Modelli di forma del getto per CAM [Hen98]

La figura 6.2 mostra le principali differenze geometriche tra il getto ideale e il getto reale: è evidente la curvatura assunta dal getto e l'aumento della sezione dovuto alla divergenza [Ann00].

Per il calcolo della conicità si utilizza la formula riportata in seguito (6.1), funzione dell'ampiezza in ingresso (b_{top}) e dell'ampiezza in uscita dal pezzo (b_{bottom}) [Ann99].

$$Conicità = \frac{b_{top} - b_{bottom}}{2} \text{ (mm)} \quad (6.1)$$

La conicità assume il significato geometrico rappresentato in figura 6.3 e presenta un'unità di misura corrispondente a quella delle ampiezze (mm).

Studi precedenti condotti, per valutare la conicità del solco in materiali tradizionali e omogenei hanno calcolato l'ampiezza del taglio a 1 mm di profondità rispetto alla superficie per non considerare l'arrotondamento dei bordi e quindi, ovviare ai problemi di indecisione nella rilevazione delle ampiezze (cfr. Fig. 6.3) [Ann99].

Per la stima della conicità nel taglio delle schiume metalliche si applica la formula riportata in 6.1; in tal caso, però, la misurazione corrisponde alla ampiezze superficiali dei solchi: data la morfologia interna della schiuma non è possibile effettuare misurazioni di larghezze a profondità differenti per la presenza di vuoti interni corrispondenti alle bolle. Inoltre, nel taglio delle schiume metalliche, la problematica sulla misurazione dei solchi non si riferisce all'arrotondamento dei bordi nel solco tagliato, ma alla variabilità del profilo generata della morfologia intrinseca della schiuma.

Si noti come il solco possa ritenersi simmetrico nel taglio perpendicolare al pezzo (cfr. Fig. 6.3).

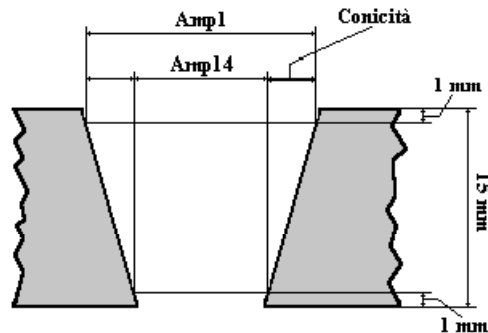


Figura 6. 3 Significato fisico del parametro conicità [Ann99]

La velocità di avanzamento ha un'influenza notevole sulla forma del solco di taglio: la sua diminuzione provoca il decrescere dell'inclinazione delle pareti del solco stesso, portando la conicità a trasformarsi da conicità convergente verso il fondo del solco (conicità >0) a divergente (conicità <0) [Ann00]; in questo modo si attraversa una condizione particolarmente notevole per la macrogeometria: le pareti generate dal taglio possono risultare parallele (conicità nulla) al raggiungimento del valore di *velocità di inversione della conicità* [Ann00]. Tale valore corrisponde alla velocità alla quale si verifica, per un dato set di parametri di processo, la condizione di conicità nulla, situazione in cui la geometria reale del solco è molto simile a quella generata da un getto ipoteticamente cilindrico e rigido [Ann00].

Questo comportamento è presentato nella figura seguente (cfr. Fig.6.4), lo spessore tagliato influisce sulla conicità del solco: al suo aumentare il getto perde sempre più la sua energia determinando ampiezze ridotte e convergenza delle superfici di taglio.

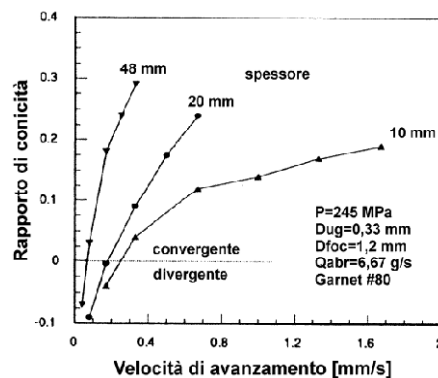


Figura 6. 4 Rapporto di conicità in funzione della velocità di avanzamento [Mom98]

Non solo la velocità di avanzamento, ma anche altri parametri di processo hanno influenza sulla conicità del solco di taglio [Ann99]:

- pressione;
- velocità di avanzamento;
- portata di abrasivo;
- dimensione dei grani di abrasivo.

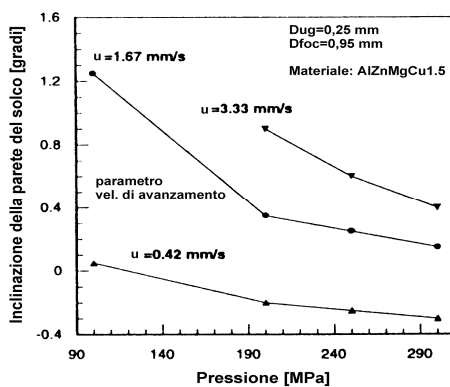
La loro influenza varia con la profondità di taglio: nella zona di ingresso l'arrotondamento dei bordi risulta minore con un aumento della velocità di avanzamento e una diminuzione della portata di abrasivo e del mesh #.

A profondità maggiori l'influenza dei parametri cambia per poi assestarsi: una diminuzione di conicità è data da un aumento della portata di abrasivo e della pressione e da una diminuzione della velocità di avanzamento e del mesh #. Risulta evidente che il passaggio a maggiori profondità inverte l'effetto di alcuni parametri [Ann99].

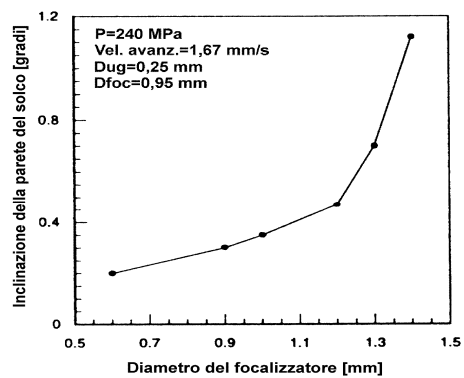
Esistono altri lavori basati sullo studio della conicità del solco di taglio e sull'ampiezza dello stesso alle diverse profondità; riportiamo di seguito una descrizione dei risultati più significativi [Mom98].

Le tendenze rilevate sono valide per materiali duttili:

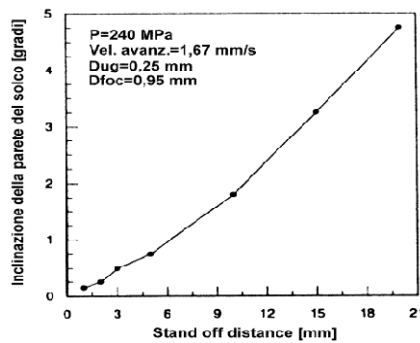
- la conicità del solco aumenta con l'aumento della velocità di avanzamento, del diametro del focalizzatore (D_{foc}) e della s.o.d. [Ann99]



a)



b)



c)

Figura 6. 5 a) effetto della pressione, b) del diametro del focalizzatore e c) della s.o.d sull'inclinazione della parete del solco [Ann99]

- la conicità diminuisce con l'aumento della pressione (cfr. Fig. 6.5), con la dimensione delle particelle di abrasivo e manifesta un andamento incerto (per alcuni autori lievemente decrescente) con l'aumento della portata di abrasivo (cfr. Fig.6.6) [Ann99].

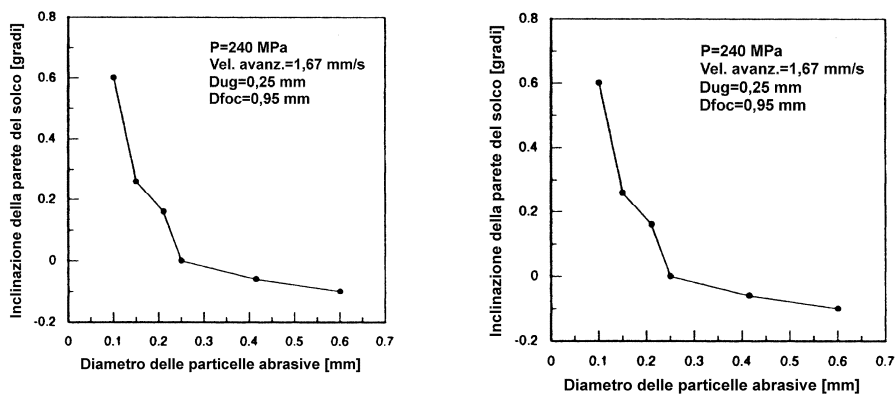


Figura 6. 6 Effetto a) del diametro delle particelle di abrasivo e b) della portata di abrasivo sull'inclinazione delle pareti del solco [Mom98]

6.2 Qualità del taglio nelle schiume metalliche

Al fine di una ottimizzazione globale nel processo di taglio di pannelli in schiuma metallica, appare necessario determinare le relazioni tra i parametri tecnologici selezionabili dall'utente e i risultati qualitativi ottenuti dall'assegnazione di determinati valori ai parametri stessi. Lo studio dell'analisi della qualità del solco di taglio in schiume metalliche si propone come obiettivo l'approfondimento di lavori precedenti condotti nell'ambito del progetto "Tilas" [Mon06], in pannelli in sola schiuma e in pannelli di schiuma e pelli per

spessore di 10 mm. Per dare continuità agli studi precedenti, la sperimentazione viene completata analizzando i risultati in pannelli in sola schiuma per spessori di 30 mm. Si vuole valutare la significatività dei parametri di taglio sulle larghezze del solco in ingresso e in uscita e sulla conicità media del solco e, soprattutto, si vuole analizzare la significatività della conicità media nella definizione della qualità macrogeometrica del solco tagliato. La selezione dei valori ottimali da associare ai parametri sarà effettuata sulla base della significatività dei parametri stessi. Il valore dei parametri che non risulteranno significativi sarà, invece, selezionato per minimizzare anche in questo caso i costi di taglio.

L'analisi della qualità delle schiume metalliche si articola in tre fasi come riassunto in figura 6.7.



Figura 6.7 Fasi sperimentali e di rielaborazione dei dati per l'analisi della qualità del solco di taglio

L'approccio seguito prevede quindi tre fasi distinte:

- *preparazione dei provini*: fase sperimentale che prevede il calcolo della densità di ciascun provino, la scelta del sistema di fissaggio in base alle dimensioni del provino stesso e l'esecuzione dei tagli secondo il piano sperimentale impostato per l'analisi della qualità. Il dimensionamento dei provini, in base alle necessità del piano sperimentale, e la tipologia del sistema di fissaggio utilizzato sono stati presentati nel capitolo 4 (cfr.4.5.2, cfr.4.5.3). Una volta fissato il provino, prima di procedere all'esecuzione dei tagli a pettine, il provino viene rifilato in direzione X

in modo da garantire la rettilineità del provino e facilitare quindi, la fase successiva di analisi dell'immagine. Per ritagliare la medesima porzione di immagine in ciascun solco, è necessario che l'immagine scannerizzata, corrispondente a ciascun provino, presenti un profilo perfettamente rettilineo lungo il bordo di attacco per l'esecuzione dei tagli.

In seguito all'esecuzione dei tagli, il provino viene verniciato di colore bianco opaco per facilitare il contrasto tra solco tagliato e bordi di taglio.

- *analisi dell'immagine*: fase propedeutica per l'analisi statistica dei risultati. L'analisi dell'immagine prevede la misurazione dei solchi di taglio per il lato in ingresso "fronte" e per il lato in uscita "retro". Per effettuare la misurazione dei solchi si utilizza il programma ImageJ che consente tramite il comando "Analyze Particles" di misurare l'area dei solchi delle immagini scannerizzate e, conoscendo la lunghezza del solco tagliato, di ricavare la larghezza del solco stesso.
- *analisi dei dati*: fase finale che prevede il calcolo della conicità media per ciascun solco tagliato e l'analisi della significatività dei fattori considerati nel piano fattoriale sui parametri che descrivono la qualità del solco tagliato.

6.2.1 Analisi della densità dei provini

In questa fase sperimentale si vuole verificare che non siano presenti eccessive variazioni di densità nei quattro provini oggetto dei tagli. L'analisi della qualità del solco tagliato, nei pannelli in schiuma metallica, non può prescindere dalla morfologia della schiuma: eventuali diversità nella distribuzione delle bolle potrebbero influire sulla variabilità del solco in uscita.

Sono possibili due approcci per questo tipo di indagine:

- Valutazione della *densità media* del provino,
- Valutazione della *densità locale* del provino in prossimità del solco tagliato.

La prima consiste in una valutazione "*a priori*" della densità del provino, prima, cioè, che siano effettuati i tagli. Questo approccio prevede il calcolo del volume del provino e la valutazione della sua massa prima della lavorazione: la densità viene stimata come rapporto *Massa/Volume*.

La seconda, invece, consiste in una valutazione "*a posteriori*" della densità locale, in seguito, cioè, all'esecuzione dei tagli. Questo approccio prevede infatti, una volta effettuata la lavorazione, di tagliare il provino in blocchetti e di misurarne la densità come rapporto *Massa/Volume*.

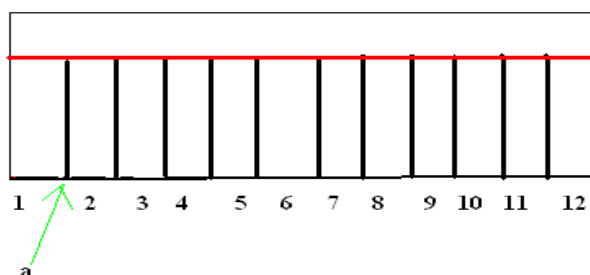


Figura 6. 8 Esempio pratico per la valutazione della densità locale del provino

Come illustrato in figura 6.8, la conicità del solco in “a” è associata alla densità risultante dalla media delle densità dei blocchetti 1 e 2. Questo secondo approccio prevede, quindi, la distruzione del pezzo.

Si deduce che la valutazione della densità locale non potrebbe essere di utilità a livello industriale, poiché prevede la distruzione del pezzo stesso. Questo approccio consentirebbe un approfondimento del processo di taglio e della meccanica di asportazione del materiale nelle schiume, ma poiché questo non costituisce l’obiettivo del presente studio si opta per la scelta di valutare solamente la *densità media* di ciascun provino: non solo in questo modo è comunque possibile scartare quei provini la cui densità si scosta rispetto a quella media dei restanti provini (questo inciderebbe sulla qualità dei tagli eseguiti su quel provino), ma questo approccio è anche di utilità a livello industriale poiché la lamiera viene lavorata indipendentemente dalla conoscenza della densità locale in prossimità del taglio.

Per calcolare il volume di ciascun provino vengono effettuate, per le dimensioni di lunghezza e larghezza, 3 misure per la base inferiore e 3 per quella superiore, per un totale di sei misure per dimensione tramite calibro.

Le ripetizioni di misura tengono conto dell’irregolarità del bordo tagliato soprattutto sulla base inferiore: il taglio è stato effettuato, infatti, sempre utilizzando tecnologia AWJ. Per la valutazione dello spessore vengono effettuate sei misure sul provino tramite micrometro, per non tralasciare la presenza di eventuali avvallamenti o sporgenze sulla lamiera.

Prima di procedere alla pesatura dei provini, questi vengono fatti asciugare in forno e puliti tramite aria compressa per eliminare residui di abrasivo. In questo modo si escludono gli effetti di acqua e di abrasivo nella variazione del peso dei provini.

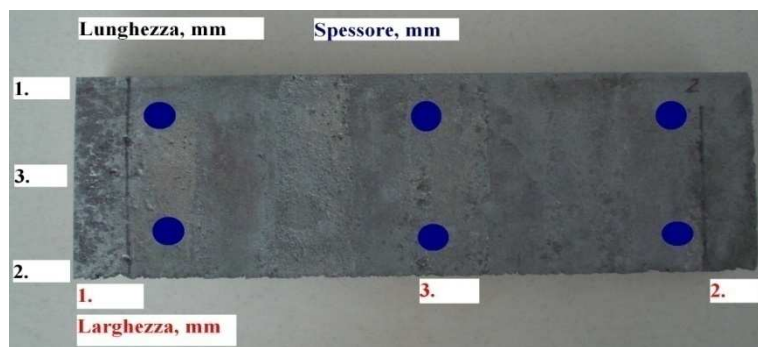


Figura 6. 9 Calcolo del volume: misurazione di larghezza, lunghezza e spessore del provino, faccia superiore

Tabella 6. 1 Dimensioni medie provino 1

Provino 1	Mis 1	Mis 2	Mis 3
Base inferiore			
Larghezza (mm)	76,3	77,1	75,5
Lunghezza (mm)	245	245,6	245,6
Base superiore			
Larghezza (mm)	77,6	76,9	76,7
Lunghezza (mm)	246,4	246,4	246,5
Altezza (mm)	30,08	30,22	30,14
	29,81	29,85	30,07
Dimensioni medie			
Altezza (mm)	30,03		
Larghezza media (mm)	76,68		
Lunghezza media (mm)	245,92		
Volume medio (m ³)	0,000566		

Tabella 6. 2 Dimensioni medie provino 2

Provino 2	Mis 1	Mis 2	Mis 3
Base inferiore			
Larghezza (mm)	78,4	78,4	78,4
Lunghezza (mm)	246,9	246,8	246,8
Base superiore			
Larghezza (mm)	77,1	77,6	77,5
Lunghezza (mm)	245,5	245,6	246,4
Altezza (mm)	29,58	29,78	30,09
	29,68	29,8	30,05
Dimensioni medie			
Altezza (mm)	29,83		
Larghezza media (mm)	77,9		
Lunghezza media (mm)	246,33		
Volume medio (m ³)	0,000572		

Tabella 6. 3 Dimensioni medie provino 3

Provino 3	Mis 1	Mis 2	Mis 3
Base inferiore			
Larghezza (mm)	76,6	75	76,2
Lunghezza (mm)	246,6	246,8	246,6
Base superiore			
Larghezza (mm)	75,5	75,6	75,6
Lunghezza (mm)	245,8	245,8	245,9
Altezza (mm)	29,79	29,78	29,69
	30,01	29,88	29,81
Dimensioni medie			
Altezza (mm)	29,82666667		
Larghezza media (mm)	75,75		
Lunghezza media (mm)	246,25		
Volume medio(m ³)	0,000556		

Tabella 6. 4 Dimensioni medie provino 4

Provino 4	Mis 1	Mis 2	Mis 3
Base inferiore			
Larghezza (mm)	78,2	78,8	77,9
Lunghezza (mm)	246,9	246,9	247,6
Base superiore			
Larghezza (mm)	78,7	78,1	77,8
Lunghezza (mm)	246,9	247,5	247,3
Altezza (mm)	29,53	29,93	30,03
	29,3	29,82	30,01
Dimensioni medie			
Altezza (mm)	29,77		
Larghezza media (mm)	78,25		
Lunghezza media (mm)	246,25		
Volume medio(m ³)	0,000574		

Si effettuano infine tre pesature per ciascun provino e si calcola quindi il peso medio.

Tabella 6. 5 Risultato delle pesature dei quattro provini

Provino 1				
Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media (g)	Media (kg)
229,52	229,5	229,53	229,52	0,22952
Provino 2				
Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media (g)	Media (kg)
221,24	221,23	221,23	221,23	0,22123
Provino 3				
Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media (g)	Media (kg)
227,72	227,71	227,71	227,71	0,2277133
Provino 4				
Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media (g)	Media (kg)
229,01	229,01	228,99	0,2290033	0,2290033

Come si vede dai risultati riassunti in tabella seguente, i valori di densità media per ciascun provino non presentano scostamenti rilevanti nei valori medi: la densità media è compresa tra i 386 kg/m³ e i 409 kg/m³. Per questo motivo tutti e quattro i provini possono essere utilizzati per l'esecuzione dei tagli necessari all'analisi della qualità di taglio.

Tabella 6. 6 Densità media dei provini per l'analisi della qualità del taglio

Provino 1		
Volume medio (m ³)	Peso medio (kg)	Densità media (kg/m ³)
0,000566	0,22952	405
Provino 2		
Volume medio (m ³)	Peso medio (kg)	Densità media (kg/m ³)
0,000572	0,22123	386
Provino 3		
Volume medio (m ³)	Peso medio (kg)	Densità media (kg/m ³)
0,000556	0,22771	409
Provino 4		
Volume medio (m ³)	Peso medio (kg)	Densità media (kg/m ³)
0,000574	0,22900	398

6.2.2 Analisi dell'immagine

La misurazione della larghezza di ciascun solco di taglio è effettuata utilizzando il software ImageJ, che tramite il comando "Analyze Particles" consente la misurazione dell'area di ciascun taglio e, conoscendone la lunghezza, permette di ricavare la larghezza. Tale software è in grado di effettuare numerose analisi sulle immagini grazie alla possibilità di creare macro personalizzate.

L'utilizzo di questa tecnica di misura è stata in precedenza utilizzata per le medesime analisi nell'ambito del progetto "Tilas"[Mon06].

6.2.2.1 Acquisizione delle immagini

L'acquisizione delle immagini è effettuata utilizzando lo scanner commerciale Canon LIDE 25 di cui si riporta in appendice la scheda completa (cfr. Appendice F). Per ciascuno dei quattro provini viene effettuata la scansione di "fronte" e "retro" del provino stesso a 600 dpi (23,6 pixel/mm) in toni di grigio; vengono disabilitate, inoltre, tutte le funzioni per la correzione dell'immagine nella finestra dello scanner. La risoluzione ottica massima dello scanner corrisponde a 1200x2400 dpi (cfr. Appendice F). Poiché si sceglie di acquisire le immagini a 600 dpi non si risente della diversa risoluzione lungo gli assi X e Y nell'acquisizione dell'immagine (la risoluzione di acquisizione dell'immagine è dimezzata rispetto alla risoluzione massima).

Le acquisizioni delle immagini di “fronte” e “retro” di ciascun provino, per un totale di otto scansioni (4 provini *2 scansioni ciascuno), sono effettuate una in seguito all'altra a intervalli regolari che non solo consentono di operare nelle medesime condizioni di luce, ma che non causano eccessivo riscaldamento dello scanner. Ciascuna delle otto immagini viene salvata in formato “.tiff”.

Per valutare che il riscaldamento dello scanner non influenzi in nessun modo la misurazione del solco di taglio si è effettuata un'appropriata verifica sperimentale: i risultati confermano che per un totale di 20 scansioni effettuate di seguito, il riscaldamento dello scanner è di 0,5°C e che la scansione non ha influenza sull'area misurata tramite software ImageJ. Per la trattazione completa della valutazione del riscaldamento dello scanner sulla misurazione dell'area, si rimanda all'Appendice F.

Nella fase di acquisizione delle immagini è importante che le scansioni siano effettuate nelle medesime condizioni di luce. Per questo motivo per l'acquisizione dell'immagine di entrambi i lati, si utilizza una mascheratura nera che ha la funzione ulteriore di accentuare il contrasto tra i margini bianchi del provino verniciato e il solco tagliato.



Figura 6. 10 Rivestimento del provino per la scansione

6.2.2.2 Scelta del livello di soglia da applicare alle immagini

Il software di analisi effettua le misure a partire dal numero di pixel neri individuati nell'immagine. Per questo motivo è evidente come la scelta della soglia per la conversione dei toni di grigio dell'immagine scannerizzata in toni di solo bianco e nero abbia ripercussioni sulle misure effettuate.

Il livello di soglia ottimo, identificato nel programma dal termine “Theresold”, viene individuato attraverso un preciso procedimento di taratura (per la trattazione completa si rimanda all'Appendice E) che consente di minimizzare l'errore quadratico medio tra la larghezza locale del solco misurata manualmente tramite calibro e la larghezza corrispondente misurata dal software. Il livello di soglia ottimo corrisponde, sia per il “fronte” che per il “retro” del provino, a 145.

Tabella 6. 7 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione del livello di soglia per fronte e retro del provino

Soglia	EQM fronte	Soglia	EQM retro
125	0,463%	110	1,477%
130	0,403%	120	1,372%
134	0,358%	131	1,306%
140	0,335%	140	1,257%
145	0,325%	145	1,250%
150	0,334%	150	1,255%
155	0,374%	155	1,270%

Errore Quadratico Medio - Acquisizioni Fronte

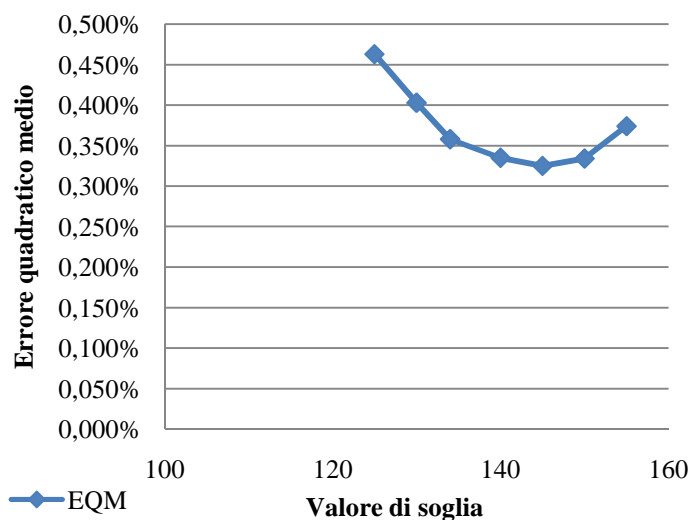


Figura 6. 11 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni fronte del provino

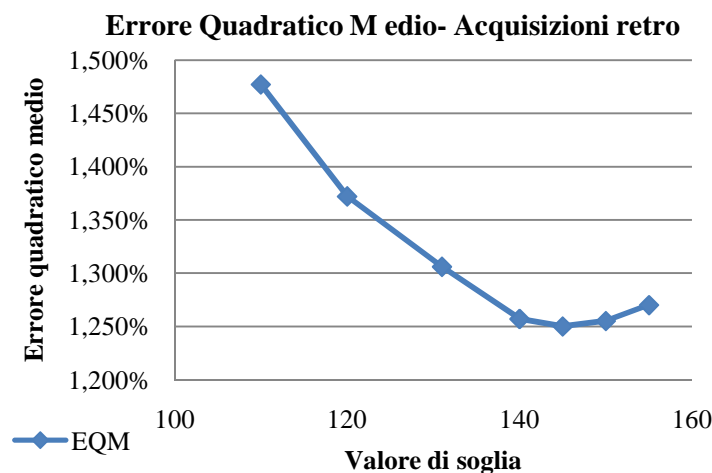


Figura 6. 12 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni retro del provino

6.2.2.3 Procedura di misurazione

La procedura di misurazione si suddivide in due fasi differenti:

Fase 1: Applicazione del livello di soglia all'immagine

Inizialmente ciascuna delle otto delle immagini scannerizzate viene aperta tramite il programma ImageJ, viene impostata la scala spaziale (pixel/mm) e l'immagine viene ruotata di 90° in senso orario e, nel caso di immagini relative al "retro" del provino (lato di uscita) i solchi vengono specchiati per garantire la corrispondenza dei solchi sul "fronte" (lato in ingresso) e sul "retro" (lato in uscita) e si numerano i solchi. Si ritagliano i 40 mm centrali dei solchi in modo da eliminare le zone corrispondenti all'accelerazione e alla decelerazione della macchina (i 10 mm superiori e i 10 mm inferiori di ciascun solco). Infine viene applicato il livello di soglia ottimo a ciascuna immagine: si crea così la "maschera" dell'immagine in soli toni di bianco e nero.



Figura 6. 13 Ritaglio dei 40 mm centrali per ciascuna immagine scannerizzata, lato fronte e retro del provino

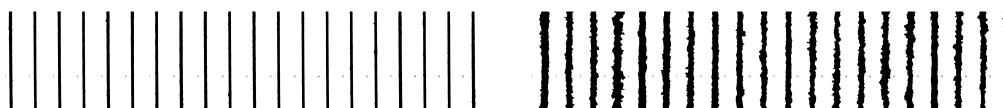


Figura 6. 14 Applicazione del livello di soglia al provino, creazione della maschera del provino, lato fronte e retro del provino

Fase 2: Misura puntuale sui solchi

Nella misurazione della larghezza dei solchi, in particolare del solco in uscita, non si può prescindere dalla considerazione della larghezza locale del solco. Come visibile nelle figura 6.13, sopra riportata, si nota che il bordo di uscita presenta un'elevata variabilità a causa della morfologia interna della schiuma, che obbliga il getto ad attraversare gli spazi vuoti corrispondenti alle bolle.

Per tenere conto della variabilità della larghezza del solco in uscita si decide di effettuare una misurazione locale della larghezza. Ciascuno dei 20 tagli di ogni provino viene suddiviso in 80 strisce delle medesime dimensioni. La misurazione locale dell'area di ciascuna striscia viene effettuata tramite il comando "Analyze Particle", che restituisce:

- il valore dell'area della striscia misurata (mm);
- le coordinate X e Y del centroide (mm);
- le posizioni BX e BY corrispondenti rispettivamente alle posizioni X e Y dello spigolo superiore sinistro del più piccolo rettangolo circoscritto all'area del solco;
- la larghezza del più piccolo rettangolo circoscritto all'area misurata;
- l'altezza del più piccolo rettangolo circoscritto all'area misurata;
- il numero del solco di taglio considerato;
- il numero di parti individuate all'interno della striscia considerata: può capitare infatti che, data la variabilità della larghezza del solco in uscita, siano presenti aree multiple.

Tabella 6. 8 Esempio di parte di tabella restituita dalla funzione "Analyze Particles" all'interno di un'opportuna macro

		Label	Area (mm)	X	Y	BX	BY	Width (mm)	Height (mm)	Cut	Particles
PROVINO 1	1	prov_1_lato_ing_Mask.png	0,437	4,949	0,255	4,487	0	0,931	0,508	1	1
	2	prov_1_lato_ing_Mask.png	0,439	4,962	0,761	4,53	0,508	0,889	0,508	1	1

La *Larghezza* della striscia corrisponde alla larghezza di un rettangolo di pari area e pari altezza a quelle restituite dalla funzione; la *Larghezza* è quindi calcolata come rapporto tra *Area* misurata e *Altezza* del solco, $Area/Altezza$.

Il sistema di riferimento considerato è illustrato in figura 6.15.

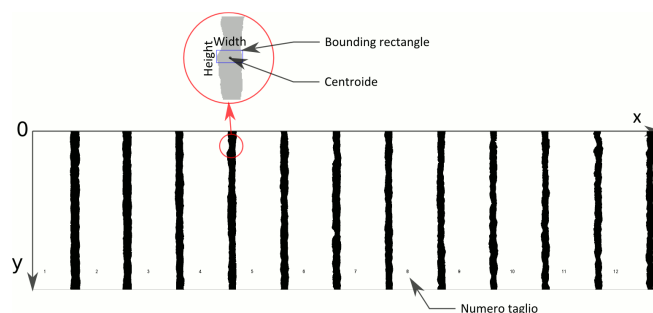


Figura 6. 15 Sistema di riferimento utilizzato per la definizione delle coordinate di centroide e *bounding rectangle* [Mon06]

Nel caso di particelle doppie presenti all'interno della striscia selezionata, si utilizza un'opportuna procedura di misura in cui lo spigolo superiore sinistro del *bounding rectangle* è individuato dalle minime coordinate X e Y tra le particelle trovate, mentre lo spigolo inferiore destro è individuato dalle massime coordinate X e Y delle particelle [Mon06].

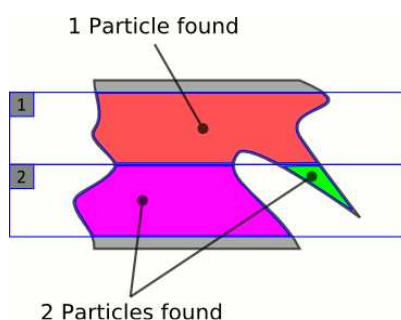


Figura 6. 16 Esempio di doppie aree individuate all'interno della striscia

Le coordinate dello spigolo superiore sinistro sono individuate da [Mon06]:

$$BXT_{eq} = \min(BXT_j); BYT_{eq} = \min(BYT_j) \quad (6. 2)$$

Le coordinate dello spigolo inferiore destro sono individuate da [Mon06]:

$$BXB_{eq} = \max(BXB_j); BYB_{eq} = \max(BYB_j) \quad (6. 3)$$

Ciascun solco di taglio viene quindi suddiviso in 80 strisce. Una macro opportunamente impostata permette di suddividere ciascuno dei tagli in strisce della medesima altezza (cfr. Appendice G) per un totale di 1600 misurazioni a scansione (20 tagli a provino* 80 strisce). Le misurazioni sono ripetute per tutte

le 8 immagini scannerizzate (4 immagini per il “fronte” e 4 immagini per il “retro”), per un totale di 6400 misurazioni per il “fronte” (lato ingresso del provino) e 6400 misurazioni per il “retro” (lato uscita del provino).

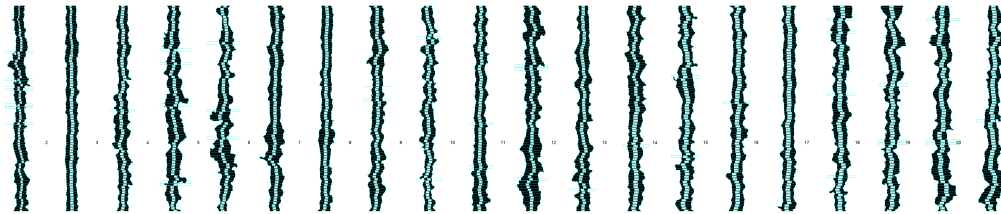


Figura 6. 17 Esempio di suddivisione di ciascun solco di taglio in 80 strisce della medesima altezza, lato “retro”

Per ciascun valore di larghezza locale in ingresso e in uscita si calcola il corrispondente valore di conicità locale.

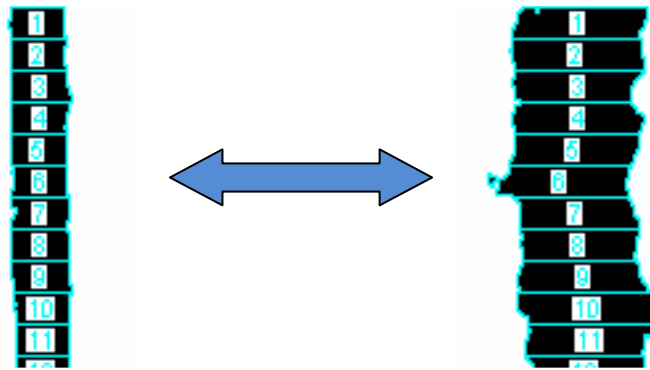


Figura 6. 18 corrispondenza tra larghezza della striscia in ingresso e della larghezza della striscia in uscita per il calcolo della conicità locale.

La conicità locale viene calcolata secondo la formula:

$$Conicità = \frac{b_{top} - b_{bottom}}{2} (mm) \quad (6.4)$$

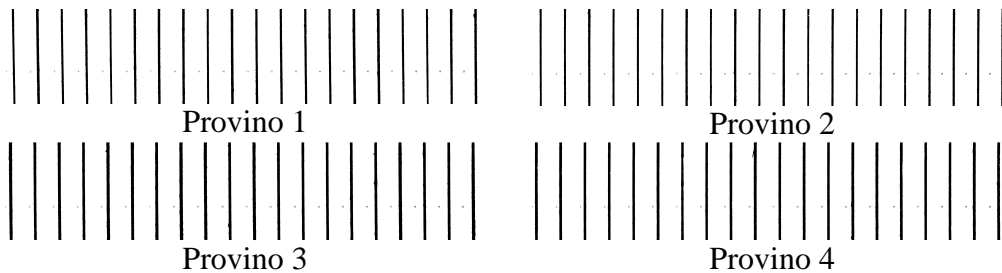
Per il calcolo della conicità si utilizza la formula riportata sopra (6.4), funzione dell’ampiezza in ingresso (b_{top}) e dell’ampiezza in uscita dal pezzo (b_{bottom}) [Ann99].

Dati i valori di larghezza locale in ingresso e in uscita e conicità locale, si passa al calcolo della *Larghezza media in ingresso*, *Larghezza media in uscita* e *Conicità media* come risultato della media dei rispettivi 80 valori locali per ciascun solco di taglio. Per ciascun valore medio si calcolano inoltre la *Deviazione standard della larghezza in ingresso*, *Deviazione standard della larghezza in uscita* e *Deviazione standard sulla conicità media*. I valori mediati sono riportati in Appendice H.

6.2.3 Analisi dei dati

In questa sezione viene riportata l'analisi statistica condotta sui risultati ottenuti per ciascun solco di taglio per le grandezze *Larghezza media in ingresso*, *Larghezza media in uscita* e *Conicità media*, *Deviazione standard della larghezza in ingresso*, *Deviazione standard della larghezza in uscita* e *Deviazione standard sulla conicità media*.

6.2.3.1 Analisi dell' ampiezza solco in ingresso



6. 5 Mascheratura delle immagini scannerizzate per ciascun provino, lato "fronte"

L'osservazione delle immagini mostra spigoli rettilinei a conferma del comportamento dei materiali omogenei. Da una prima analisi visiva dei solchi si nota che l'ampiezza in ingresso è inferiore per velocità di avanzamento maggiori e minori portate di abrasivo.

Influenza dei fattori sulla larghezza media del solco d'ingresso

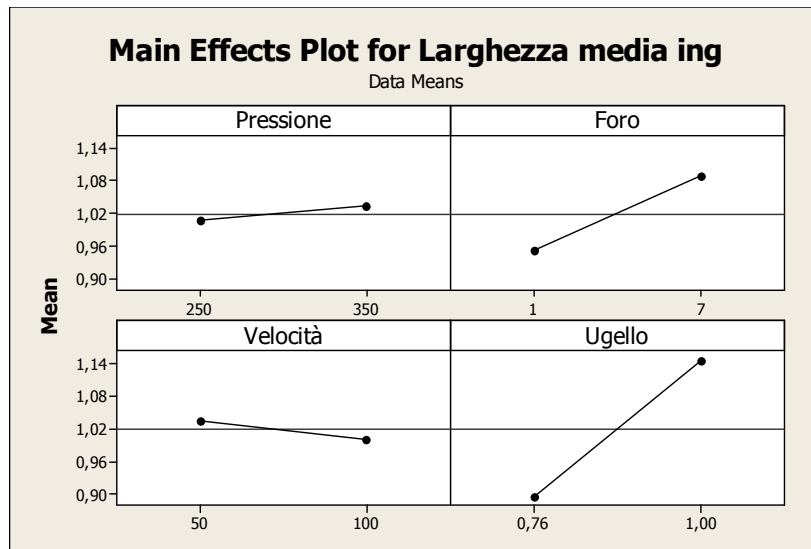


Figura 6. 19 Influenza dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo (Foro)*, *Velocità di avanzamento*, *Dug+Dfoc (Ugello)* sulla larghezza media del solco in ingresso

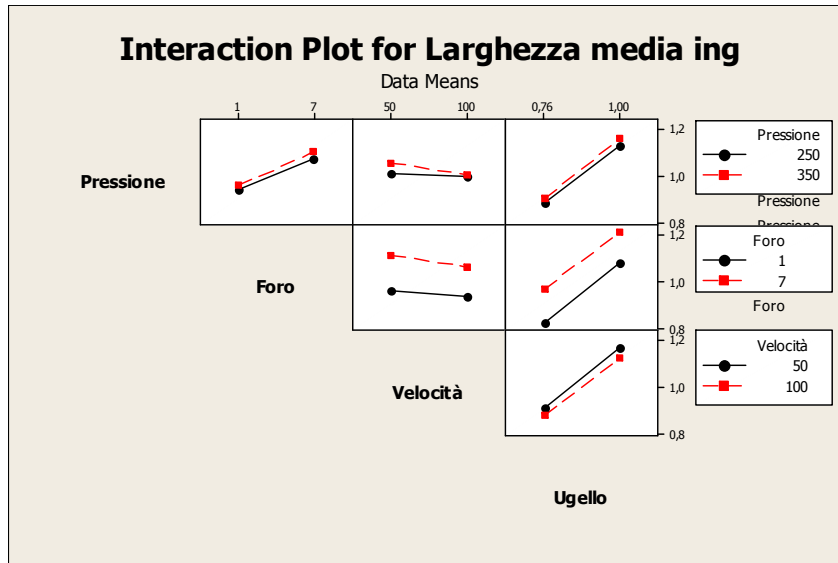


Figura 6. 20 Influenza dell'interazione dei fattori, larghezza media del solco in ingresso

Una prima stima dei fattori influenti sulla larghezza media del solco in ingresso viene riassunta dalle figure 6.19 e 6.20. Gli effetti medi della *Portata di abrasivo* (fattore Foro) e dell'accoppiamento *Dug+Dfoc* (fattore Ugello) sulla variabile *Larghezza media in ingresso* risultano maggiori degli effetti di *Pressione* (fattore Pressione) e *Velocità di avanzamento* (fattore Velocità). In particolare, in base alla pendenza della retta, l'accoppiamento *Dug+Dfoc* (fattore Ugello) sembra avere un effetto maggiore sulla larghezza del solco, seguito dal fattore foro corrispondente alla *Portata di abrasivo*. Analizzando gli effetti che le interazioni tra i fattori possono avere sulla larghezza del solco si nota che l'interazione *Velocità di avanzamento-Pressione* risulta più significativa delle altre, l'effetto delle quali sembrerebbe trascurabile.

General Linear Model: Larghezza media ing versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Larghezza media ing, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,01387	0,00903	0,00903	2,89	0,094
Foro	1	0,36888	0,38610	0,38610	123,40	0,000
Velocità	1	0,02538	0,02953	0,02953	9,44	0,003
Ugello	1	1,28313	1,27538	1,27538	407,63	0,000
Pressione*Foro	1	0,00007	0,00011	0,00011	0,04	0,849
Pressione*Velocità	1	0,00453	0,00467	0,00467	1,49	0,226
Pressione*Ugello	1	0,00049	0,00052	0,00052	0,17	0,685
Foro*Velocità	1	0,00407	0,00385	0,00385	1,23	0,272
Foro*Ugello	1	0,00121	0,00130	0,00130	0,41	0,522

Velocità*Ugello	1	0,00073	0,00064	0,00064	0,20	0,652
Pressione*Foro*Velocità	1	0,00167	0,00176	0,00176	0,56	0,457
Pressione*Foro*Ugello	1	0,00632	0,00629	0,00629	2,01	0,161
Pressione*Velocità*Ugello	1	0,00300	0,00289	0,00289	0,92	0,340
Foro*Velocità*Ugello	1	0,01332	0,01314	0,01314	4,20	0,045
Pressione*Foro*Velocità*Ugello	1	0,00253	0,00253	0,00253	0,81	0,372
Error	63	0,19711	0,19711	0,00313		
Total	78	1,92629				

S = 0,0559356 R-Sq = 89,77% R-Sq(adj) = 87,33%

General Linear Model: Larghezza media ing versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Larghezza media ing, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,01387	0,00865	0,00865	2,72	0,103
Foro	1	0,36888	0,38966	0,38966	122,68	0,000
Velocità	1	0,02538	0,03035	0,03035	9,55	0,003
Ugello	1	1,28313	1,28313	1,28313	403,99	0,000
Error	74	0,23504	0,23504	0,00318		
Total	78	1,92629				

S = 0,0563575 R-Sq = 87,80% R-Sq(adj) = 87,14%

L'influenza dei fattori sulla larghezza del solco di ingresso è valutata tramite ANOVA. Considerando il numero di fattori e le rispettive interazioni, α_i risulta pari a $0,05/15=0,0033$: il p-value risulta inferiore a 0,0033 solo per i fattori *Foro*, *Velocità*, *Ugello*.

L'ANOVA dimostra pertanto che la larghezza del solco in ingresso dipende da *Portata di abrasivo*, *Velocità* e dall'accoppiamento *Dug+Dfoc*. Nessuna delle interazioni tra i fattori risulta significativa, così come l'effetto della *Pressione*.

Senza considerare le interazioni tra i fattori ($\alpha_i/4=0,05/4=0,0125$), l'ANOVA conferma l'influenza di *Portata di abrasivo*, di *Velocità* e dell'accoppiamento *Dug+Dfoc* sulla larghezza del solco in ingresso.

Il comportamento della larghezza del solco in ingresso è paragonabile a quello dei materiali omogenei: le informazioni reperibili in letteratura confermano che l'ampiezza del solco di taglio risulta più contenuta se aumenta la velocità di avanzamento, se diminuisce la portata di abrasivo e se diminuisce il diametro del focalizzatore [Ann99].

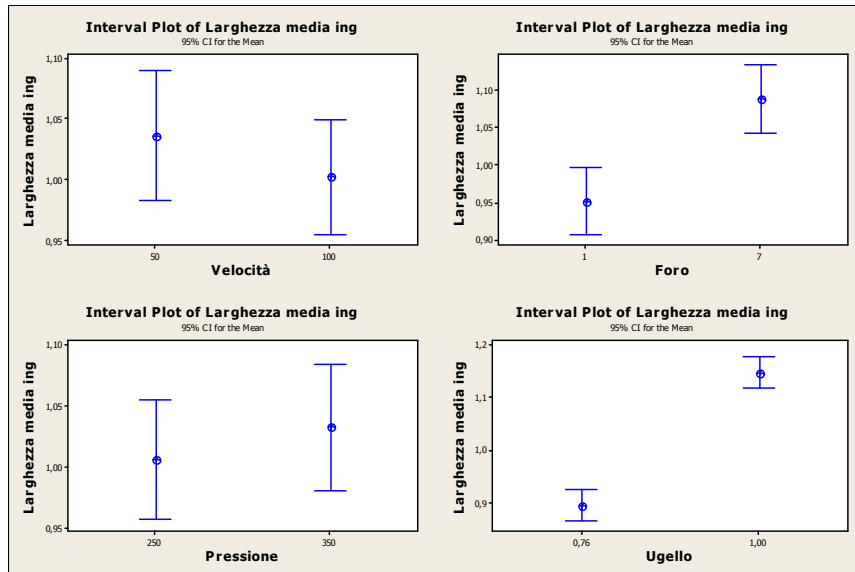


Figura 6. 21 Andamento medio della Larghezza media sul solco in ingresso al variare dei fattori

Come si vede in figura 6.21 i valori della *Larghezza media del solco in ingresso* sono mediamente superiori per pressioni da 250 a 350 MPa, ma il fattore non risulta significativo dall'ANOVA.

Conclusioni:

- *Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo, Dug+Dfoc* sono influenti sull'ampiezza del solco di taglio in ingresso.
- Le interazioni tra i fattori e il fattore *Pressione* non sono influenti sull'ampiezza del solco di taglio in ingresso.
- L'andamento del solco in ingresso in funzione dei fattori *Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo, Dug+Dfoc* rispecchia il comportamento dei materiali omogenei.
- La larghezza del solco in ingresso diminuisce mediamente all'aumentare della velocità di avanzamento.
- L'aumento della portata di abrasivo e l'utilizzo di ugelli a diametro maggiore contribuiscono all'aumento della larghezza del solco.
- I valori della larghezza del solco sono mediamente superiori per pressioni da 250 a 350 MPa, ma il fattore *Pressione* non risulta significativo

6.2.3.2 Analisi dell'ampiezza del solco di uscita

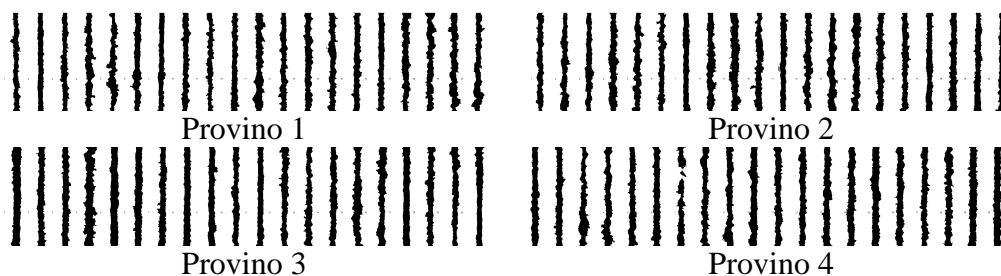


Figura 6. 22 Mascheratura delle immagini scannerizzate per ciascun provino, lato “retro”

Diversamente dal solco in ingresso, il solco di uscita nei pannelli in schiuma metallica è caratterizzato da una elevata variabilità per tutta la lunghezza del taglio: già visivamente è possibile notare che la variabilità del solco in uscita è nettamente superiore rispetto all'andamento della superficie tagliata all'ingresso. Questo fenomeno è strettamente legato alle caratteristiche della schiuma metallica: l'analisi della larghezza del solco di uscita non può prescindere quindi dall'analisi della morfologia del materiale che il getto attraversa a diversi livelli di profondità.

Nella schiuma metallica e nei materiali porosi in genere, le bolle che occupano la parte interna del pannello sono costituite da pareti sottili: quando il getto entra in contatto con una di queste è sufficiente il solo contatto per rimuoverle interamente; le zone del taglio non si presentano quindi rettilinee e uniformi, ma in corrispondenza di bolle il taglio presenta un profilo rotondeggiante.

Gestione dell'outlier

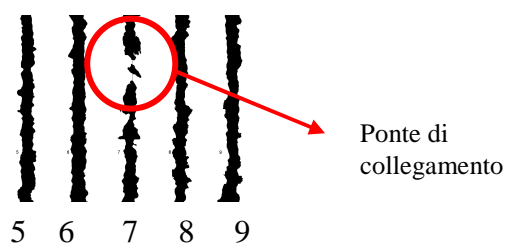


Figura 6. 23 Ponte di collegamento, taglio n. ro 7 provino 4, analisi della qualità di taglio

Osservando il taglio numero 7 del provino 4 è possibile notare che il solco di taglio non risulta perfettamente continuo, ma rimane un ponte di collegamento fra i due lembi della lamiera. Nel piano fattoriale per la conicità del solco, i parametri di taglio sono stati selezionati in modo tale da ottenere tagli che non solo garantiscano la separazione meccanica della lamiera, ma anche tali da ottenere tagli completamente passanti senza la presenza di ponti di collegamento (cfr. 4.5.1). Il taglio individuato non rispetta tali caratteristiche, contrariamente a

quanto dimostrato a parità di fattori nel piano dai risultati ottenuti nella fase di selezione dei parametri ottimali nell'analisi dello spessore tagliabile.

Il taglio individuato può essere gestito come outlier per causa individuabile: durante il taglio si è visto che per un intervallo di pochi secondi l'abrasivo non è fluito alla camera di miscelazione (la tramoggia non era sufficientemente colma di abrasivo). Il taglio precedente, n. ro 6, era settato per portata alta (foro7) e velocità alta (100 mm/min). Il taglio n. ro 7, è stato effettuato a livelli bassi di velocità di avanzamento (50 mm/min) incrementando il tempo di taglio rispetto al precedente; inoltre l'intervallo di tempo intercorso tra il taglio precedente (numero 6) e quello successivo (numero 7) non è stato sufficiente a garantire il rimbocco della tramoggia. Nel tempo intercorso tra i due tagli e durante il taglio stesso la pressione nel serbatoio di adduzione di abrasivo non ha garantito il rimbocco adeguato della tramoggia a monte della testa di taglio. La pressione del serbatoio è stata pertanto aumentata a 2 bar. I tagli consecutivi a portata massima (foro numero 7) sono stati monitorati con attenzione per verificare il corretto rimbocco della tramoggia.

Provino	N. ro taglio	Pressione (MPa)	Foro	Velocità avanzamento (mm/min)	Dug+Dfoc (mm)
4	6	350	7	100	1
4	7	250	7	50	1

Figura 6. 24 condizioni sperimentali tagli n. ro 6 e 7, provino 4, analisi della qualità del taglio

Influenza dei fattori sulla larghezza media del solco di uscita

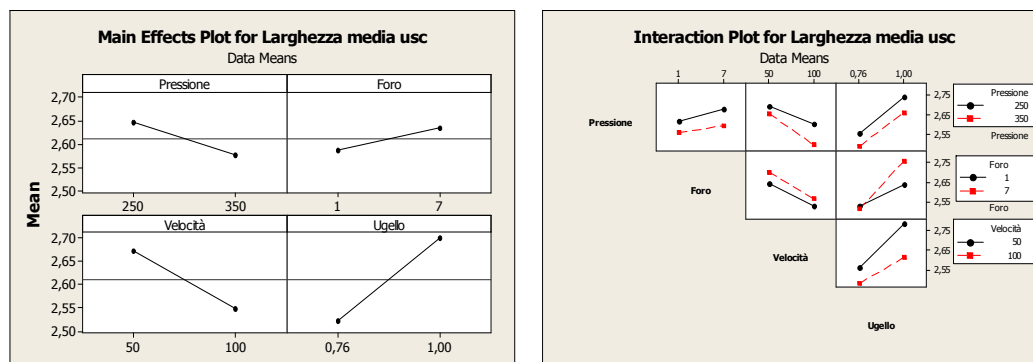


Figura 6. 25 Influenza dei fattori Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo (Foro), Pressione, Dug+Dfoc (Ugelli) e delle loro interazioni sulla larghezza media del solco in uscita

Una prima stima dei fattori influenti sulla larghezza media del solco in uscita viene riassunta dalla figura 6.25. L'effetto medio dell'accoppiamento *Dug+Dfoc*

(fattore Ugello) sulla variabile *Larghezza media in ingresso* risulta maggiore degli effetti di *Pressione* (fattore Pressione), *Velocità di avanzamento* (fattore Velocità) e *Portata di abrasivo* (fattore Foro). In particolare, in base alla pendenza della retta, l'accoppiamento *Dug+Dfoc* (fattore Ugello) sembra avere un effetto maggiore sulla larghezza del solco, seguito dai fattori *Pressione* e *Velocità*. La *Portata di abrasivo* (fattore Foro) sembra avere l'effetto più basso in base alla pendenza della retta. Analizzando gli effetti che le interazioni tra i fattori possono avere sulla larghezza del solco si nota che l'interazione *Dug+Dfoc-Portata di abrasivo* risulta più significativa delle altre, il cui effetto sembrerebbe trascurabile.

General Linear Model: Larghezza media usc versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for *Larghezza media usc*, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,09654	0,11002	0,11002	1,91	0,172
Foro	1	0,04834	0,05672	0,05672	0,99	0,325
Velocità	1	0,31587	0,32792	0,32792	5,70	0,020
Ugello	1	0,64355	0,64330	0,64330	11,17	0,001
Pressione*Foro	1	0,00625	0,00619	0,00619	0,11	0,744
Pressione*Velocità	1	0,02157	0,02103	0,02103	0,37	0,548
Pressione*Ugello	1	0,00159	0,00168	0,00168	0,03	0,865
Foro*Velocità	1	0,00393	0,00396	0,00396	0,07	0,794
Foro*Ugello	1	0,10053	0,09776	0,09776	1,70	0,197
Velocità*Ugello	1	0,04866	0,04542	0,04542	0,79	0,378
Pressione*Foro*Velocità	1	0,05150	0,05331	0,05331	0,93	0,340
Pressione*Foro*Ugello	1	0,28949	0,28516	0,28516	4,95	0,030
Pressione*Velocità*Ugello	1	0,00170	0,00135	0,00135	0,02	0,879
Foro*Velocità*Ugello	1	0,03451	0,03512	0,03512	0,61	0,438
Pressione*Foro*Velocità*Ugello	1	0,01155	0,01155	0,01155	0,20	0,656
Error	63	3,62684	3,62684	0,05757		
Total	78	5,30243				

S = 0,239935 R-Sq = 31,60% R-Sq(adj) = 15,31%

General Linear Model: Larghezza media usc versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for *Larghezza media usc*, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,09654	0,10976	0,10976	1,93	0,168
Foro	1	0,04834	0,05649	0,05649	1,00	0,322

Velocità	1	0,31587	0,32779	0,32779	5,78	0,019
Ugello	1	0,64355	0,64355	0,64355	11,34	0,001
Error	74	4,19813	4,19813	0,05673		
Total	78	5,30243				

S = 0,238184 R-Sq = 20,83% R-Sq(adj) = 16,55%

L'influenza dei fattori sulla larghezza del solco di uscita è valutata tramite ANOVA. Considerando il numero di fattori e le rispettive interazioni, α_i risulta pari a $0,05/15=0,0033$: il p-value risulta inferiore a 0,0033 solo per il fattore *Dug+Dfoc*. L'ANOVA dimostra pertanto che la larghezza del solco in uscita dipende dall'accoppiamento *Dug+Dfoc*. Nessuna delle interazioni tra i fattori risulta significativa, così come i restanti fattori (*Pressione*, *Velocità di avanzamento*, *Portata di abrasivo*).

Senza considerare le interazioni tra i fattori ($\alpha_i/4=0,05/4=0,0125$), l'ANOVA conferma l'influenza dell'accoppiamento *Dug+Dfoc*.

Nell'analisi del solco di uscita diventa rilevante la variabilità del taglio lungo tutto il solco. Come già evidenziato in precedenza il profilo di uscita risente della morfologia interna del materiale. La larghezza media del solco di uscita non può essere considerato l'unico parametro caratteristico per la definizione della geometria del solco, ma tale valore dovrà essere affiancato da un parametro che valuti la variabilità della larghezza del solco lungo tutto il singolo taglio.

La diminuzione delle dimensioni dell'ugello focalizzatore è responsabile di dimensioni più contenute nella larghezza del solco di uscita.

I fattori *Portata di abrasivo*, *Pressione* e *Velocità di avanzamento* non risultano significativi dall'ANOVA, ma l'andamento medio della *Larghezza media in uscita* in funzione dei fattori dimostra che all'aumento della *Velocità di avanzamento* e della *Pressione* diminuisce l'ampiezza del solco, mentre quest'ultima aumenta all'aumento della *Portata di abrasivo* (cfr. Fig. 6.26).

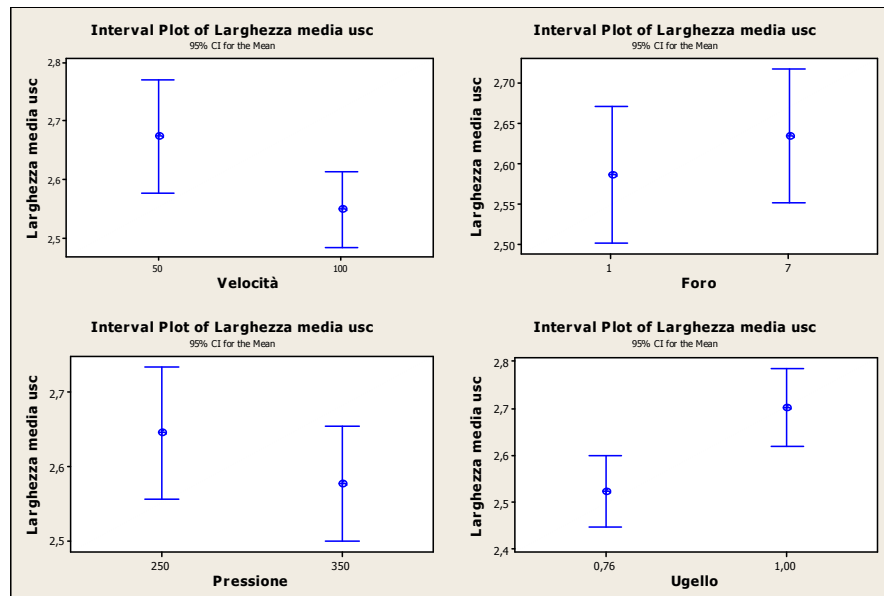


Figura 6. 26 Andamento medio della Larghezza media sul solco in uscita al variare dei fattori

Conclusioni:

- Solo l'accoppiamento $Dug+Dfoc$ risulta un fattore influente sull'ampiezza del solco di taglio in uscita considerando tutte le interazioni tra i fattori.
- Nessuna delle interazioni tra i fattori risulta influente sull'ampiezza del solco di taglio in uscita.
- L'andamento medio del solco in uscita in funzione dei fattori *Velocità di avanzamento*, *Portata di abrasivo*, $Dug+Dfoc$ è il medesimo del solco in ingresso.
- La larghezza media del solco in uscita diminuisce mediamente all'aumentare della *Velocità di avanzamento*.
- La larghezza media del solco in uscita aumenta mediamente all'aumentare di *Portata di abrasivo* e $Dug+Dfoc$.
- I valori della larghezza del solco sono mediamente inferiori per pressioni da 250 a 350 MPa.
- Il solco di uscita non può essere descritto dalla sola definizione della sua larghezza media, la variabilità del solco lungo il singolo taglio è notevole.
- È necessario introdurre un parametro quantitativo che tenga conto della variabilità della larghezza lungo il taglio.
- L'elevata variabilità della larghezza del solco in uscita può mascherare l'effetto dei fattori sulla *Larghezza media in uscita*.

6.2.3.3 Deviazione standard della larghezza del solco in uscita

Per quantificare la variabilità della larghezza del solco per tutta la lunghezza del taglio è necessario affiancare alla misura della larghezza media anche la deviazione standard della larghezza sul singolo solco.

Se per i solchi di ingresso il profilo si mostra rettilineo e gli spigoli ben definiti, per il solco di uscita la morfologia della schiuma diventa determinante e la variabilità del solco non può essere trascurata.

Poiché la variabilità della larghezza del solco in uscita risulta notevole, a fianco del valor medio della larghezza è necessario aggiungere il valore della deviazione standard calcolata sul singolo taglio.

Già i profili dei solchi lasciano intuire che la variabilità del solco in ingresso è trascurabile rispetto alla variabilità del solco di uscita; la valutazione numerica dimostra inoltre che la deviazione standard del solco di ingresso risulta inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quella del solco di uscita (Figura 6.27).

Osservando l'andamento della deviazione standard per ingresso e uscita è possibile notare che gli andamenti sono opposti tra ingresso e uscita, a eccezione del fattore pressione, il cui aumento causa una diminuzione della variabilità per entrambi i solchi. Inoltre, studi precedenti condotti su pannelli in sola schiuma di spessore inferiore (10 mm) [Mon06] hanno dimostrato che la variabilità del solco di uscita aumenta con la velocità di avanzamento: questo comportamento è evidenziato anche da questa campagna sperimentale, poiché si nota come la deviazione standard assuma valori mediamente crescenti all'aumentare della velocità di avanzamento (Fig. 6.28); l'effettiva significatività dei fattori deve essere valutata da un'opportuna ANOVA.

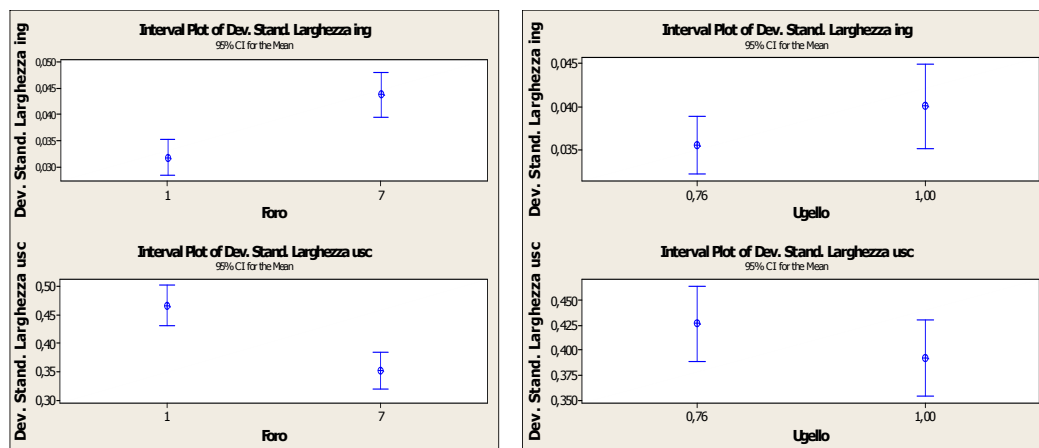


Figura 6. 27 Andamento delle Deviazioni standard in ingresso e in uscita in funzione di *Portata di abrasivo e Dug+Dfoc*

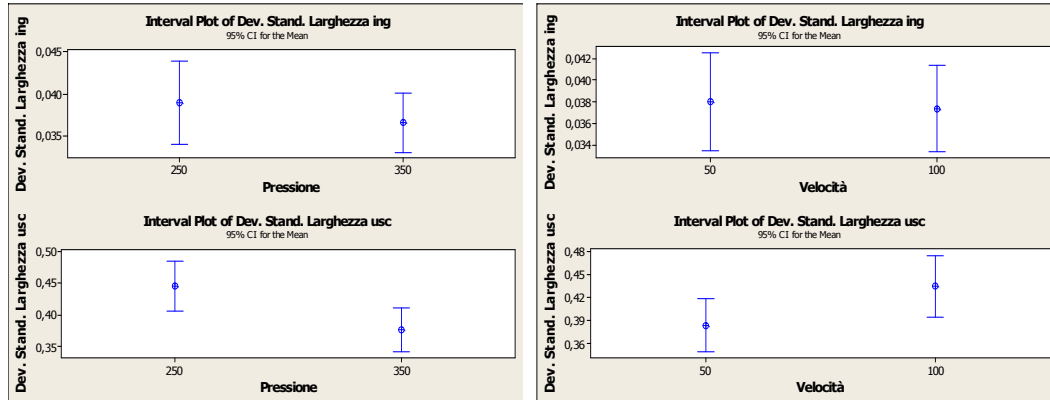


Figura 6. 28 Andamento delle Deviazioni standard in ingresso e in uscita in funzione di *Pressione e Velocità di avanzamento*

Influenza dei fattori sulla deviazione standard sulla larghezza media del solco di uscita

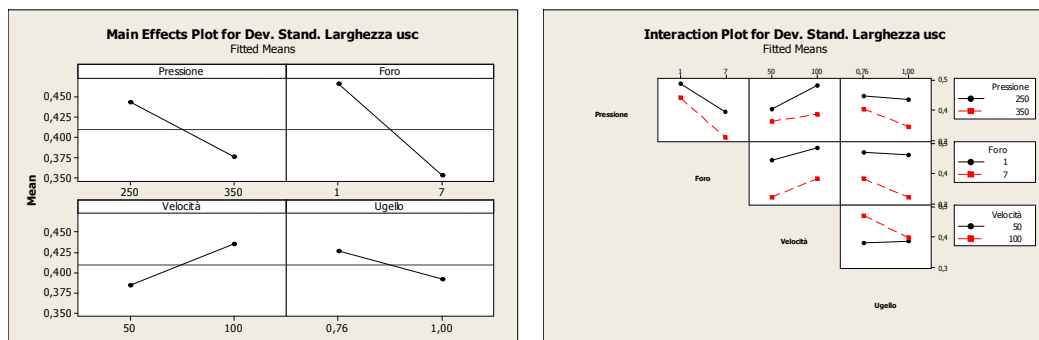


Figura 6. 29 Influenza dei fattori *Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo (Foro), Pressione, Dug+Dfoc (Ugelli)* e delle loro interazioni sulla dev. Stand. larghezza media del solco in uscita

Una prima stima dei fattori influenti sulla larghezza media del solco in uscita viene riassunta dalla figura 6.29. L'effetto medio della *Portata di abrasivo* (fattore Foro) sulla variabile *Deviazione standard della larghezza in uscita* risulta maggiore degli effetti di *Pressione* (fattore Pressione), *Velocità di avanzamento* (fattore Velocità) e *Dug+Dfoc* (fattore Ugello). In particolare, in base alla pendenza della retta, la *Portata di abrasivo* sembra avere un effetto maggiore sulla larghezza del solco, seguito dai fattori *Pressione* e *Velocità*. L'accoppiamento *Dug+Dfoc* (fattore Ugello) sembra avere l'effetto più basso in base alla pendenza della retta. Analizzando gli effetti che le interazioni tra i fattori possono avere sulla larghezza del solco si nota che l'interazione

Dug+Dfoc-Velocità risulta più significativa delle altre, il cui effetto sembrerebbe trascurabile.

General Linear Model: Dev. Stand. Larg versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Dev. Stand. Larghezza usc, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,093579	0,088428	0,088428	10,63	0,002
Foro	1	0,250804	0,251858	0,251858	30,26	0,000
Velocità	1	0,051396	0,050712	0,050712	6,09	0,016
Ugello	1	0,025251	0,024149	0,024149	2,90	0,093
Pressione*Foro	1	0,006670	0,007026	0,007026	0,84	0,362
Pressione*Velocità	1	0,016360	0,015331	0,015331	1,84	0,180
Pressione*Ugello	1	0,010339	0,010851	0,010851	1,30	0,258
Foro*Velocità	1	0,002923	0,002570	0,002570	0,31	0,580
Foro*Ugello	1	0,014554	0,013349	0,013349	1,60	0,210
Velocità*Ugello	1	0,029255	0,030111	0,030111	3,62	0,062
Pressione*Foro*Velocità	1	0,005296	0,005515	0,005515	0,66	0,419
Pressione*Foro*Ugello	1	0,040317	0,038512	0,038512	4,63	0,035
Pressione*Velocità*Ugello	1	0,003726	0,004172	0,004172	0,50	0,482
Foro*Velocità*Ugello	1	0,000866	0,001059	0,001059	0,13	0,722
Pressione*Foro*Velocità*Ugello	1	0,041164	0,041164	0,041164	4,95	0,030
Error	63	0,524298	0,524298	0,008322		
Total	78	1,116797				

S = 0,0912261 R-Sq = 53,05% R-Sq(adj) = 41,88%

General Linear Model: Dev. Stand. Larg versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Dev. Stand. Larghezza usc, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,09358	0,08666	0,08666	9,22	0,003
Foro	1	0,25080	0,25579	0,25579	27,20	0,000
Velocità	1	0,05140	0,05234	0,05234	5,57	0,021
Ugello	1	0,02525	0,02525	0,02525	2,69	0,106
Error	74	0,69577	0,69577	0,00940		
Total	78	1,11680				

S = 0,0969652 R-Sq = 37,70% R-Sq(adj) = 34,33%

L'influenza dei fattori sulla deviazione standard del solco di uscita è valutata tramite ANOVA. Considerando il numero di fattori e le rispettive interazioni, α_i risulta pari a $0,05/15=0,0033$: il p-value risulta inferiore a 0,0033 solo per i

fattori *Pressione* e *Foro*. Nessuna delle interazioni risulta significativa, così come i restanti fattori (*Dug+Dfoc*, *Velocità di avanzamento*).

Senza considerare le interazioni tra i fattori ($\alpha_i/4=0,05/4=0,0125$), l'ANOVA conferma l'influenza dei fattori *Pressione* e *Foro*. Studi precedenti in pannelli di spessore 10 mm hanno dimostrato che la velocità di avanzamento è un fattore significativo sulla variabilità del solco [Mon06].

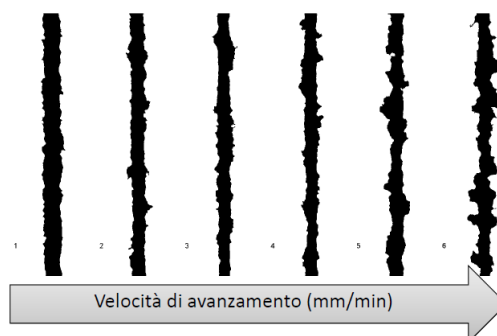


Figura 6. 30 Profilo del solco in uscita all'aumento della velocità di avanzamento [Mon06]

I risultati ottenuti per pannelli da 30 mm confermano l'aumento della variabilità all'aumento di velocità di avanzamento (Fig. 6.28), ma l'intervallo di variabilità del fattore nel piano considerato non è sufficientemente ampio per garantirne la significatività sulla risposta.

La scelta del livello alto di velocità di avanzamento pari a 100 mm/min è dedotto dai risultati ottenuti nella selezione dei parametri ottimali per lo spessore tagliabile: per non escludere a priori nessun fattore e poter considerare i livelli minimi di portata di abrasivo e pressione è necessario contenere la velocità di avanzamento massima (cfr. 4.5.1).

6.2.3.4 Conicità media

La conicità media per singolo solco viene ottenuta mediando i valori di conicità locale di ciascuna delle strisce in cui la maschera di ogni solco è stata suddivisa. La stima della conicità media è influenzata dall'elevata variabilità della larghezza del solco di uscita.

I valori di conicità ottenuti attribuendo ai parametri di processo i valori "alto" e "basso" dal piano fattoriale risultano sempre negativi: il solco di taglio presenta quindi pareti di taglio sempre divergenti dalla superficie di ingresso a quella di uscita.

Gli andamenti della conicità dimostrano che mediamente la divergenza tra le pareti diminuisce per valori crescenti di velocità, portata di abrasivo, pressione e per ugelli di diametro superiore.

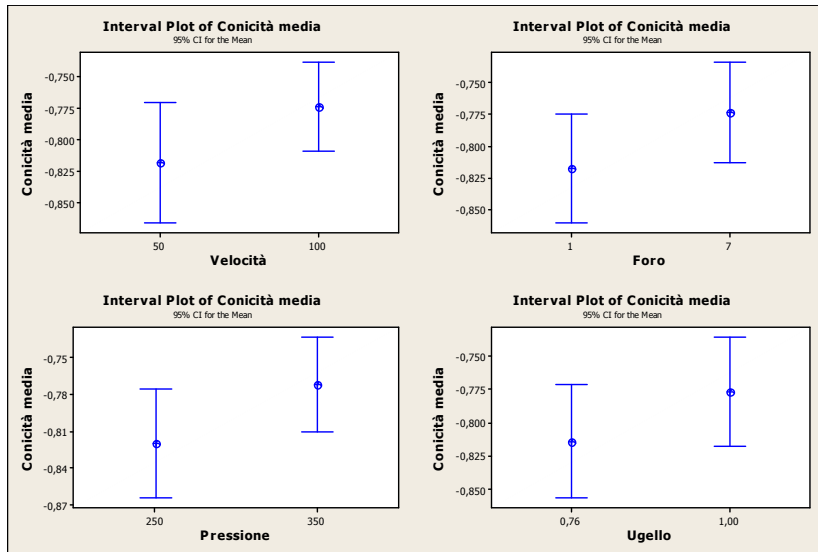


Figura 6. 31 Andamento medio della Conicità media al variare dei fattori

Influenza dei fattori sulla conicità media del solco

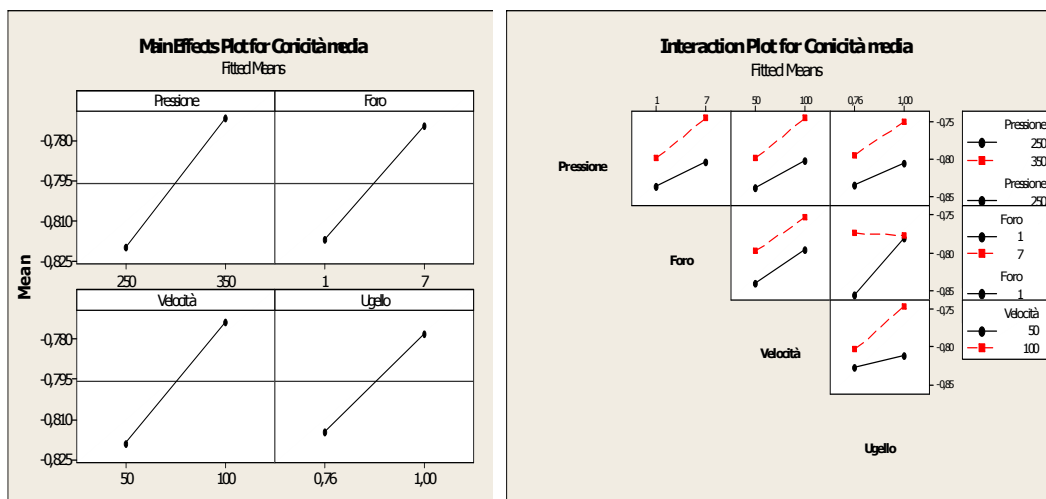


Figura 6. 32 Influenza dei fattori *Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo (Foro), Pressione, Dug+Dfoc (Ugelli)* e delle loro interazioni sulla conicità media del solco in uscita

Una prima stima dei fattori influenti sulla larghezza media del solco in uscita viene riassunta dalla figura 6.32. L'effetto medio dei singoli fattori sulla conicità media del solco sembra essere il medesimo: le pendenze delle rette non risultano differenti. Osservando le interazioni tra i fattori l'interazione tra *Portata di abrasivo-Dug+Dfoc* sembra essere più significativa delle altre.

General Linear Model: Conicità media versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Conicità media, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,04590	0,04552	0,04552	2,68	0,107
Foro	1	0,03754	0,03671	0,03671	2,16	0,147
Velocità	1	0,04055	0,04016	0,04016	2,36	0,129
Ugello	1	0,02731	0,02678	0,02678	1,57	0,214
Pressione*Foro	1	0,00192	0,00200	0,00200	0,12	0,733
Pressione*Velocità	1	0,00158	0,00147	0,00147	0,09	0,770
Pressione*Ugello	1	0,00096	0,00102	0,00102	0,06	0,807
Foro*Velocità	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,997
Foro*Ugello	1	0,03095	0,03039	0,03039	1,79	0,186
Velocità*Ugello	1	0,00937	0,00882	0,00882	0,52	0,474
Pressione*Foro*Velocità	1	0,00865	0,00893	0,00893	0,53	0,471
Pressione*Foro*Ugello	1	0,05257	0,05169	0,05169	3,04	0,086
Pressione*Velocità*Ugello	1	0,00005	0,00007	0,00007	0,00	0,948
Foro*Velocità*Ugello	1	0,00124	0,00132	0,00132	0,08	0,781
Pressione*Foro*Velocità*Ugello	1	0,00622	0,00622	0,00622	0,37	0,547
Error	63	1,07110	1,07110	0,01700		
Total	78	1,33591				

S = 0,130390 R-Sq = 19,82% R-Sq(adj) = 0,73%

General Linear Model: Conicità media versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Conicità media, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,04590	0,04501	0,04501	2,81	0,098
Foro	1	0,03754	0,03736	0,03736	2,33	0,131
Velocità	1	0,04055	0,03967	0,03967	2,48	0,120
Ugello	1	0,02731	0,02731	0,02731	1,71	0,196
Error	74	1,18461	1,18461	0,01601		
Total	78	1,33591				

S = 0,126524 R-Sq = 11,33% R-Sq(adj) = 6,53%

L'influenza dei fattori sulla deviazione standard del solco di uscita è valutata tramite ANOVA. Considerando il numero di fattori e le rispettive interazioni, α_i risulta pari a $0,05/15=0,0033$: il p-value non risulta inferiore a 0,0033 per nessun fattore e per nessuna delle interazioni.

Il medesimo risultato si ottiene anche senza considerare le interazioni tra i fattori ($\alpha_i/4=0,05/4=0,0125$).

Poiché la conicità media del solco è definita come:

$$\text{Conicità} = \frac{b_{top} - b_{bottom}}{2} \text{ (mm)} \quad (6.6)$$

La variabilità del solco in uscita influisce sulla stima della conicità media e l'eccessiva variabilità maschera l'effetto dei fattori.

È necessario introdurre a fianco della conicità media il parametro deviazione standard della conicità per considerare simultaneamente l'effetto combinato della variabilità della larghezza del solco in ingresso e in uscita sulla conicità del solco.

Conclusioni:

- La conicità media non è un parametro significativo per la stima della qualità macrogeometrica del solco.
- La variabilità del processo maschera l'effetto dei fattori.
- È necessario introdurre un parametro prestazionale che quantifichi simultaneamente la variabilità solco in ingresso e in uscita.
- I risultati ottenuti confermano quanto già stimato da precedenti studi [Mon06] in pannelli di spessore inferiore (10 mm). L'ANOVA dimostra anche in quel caso che non c'è evidenza statistica per confermare la significatività dei fattori considerati (*Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento*) sulla conicità media [Mon06].

6.2.3.5 Deviazione standard della Conicità

La sola conicità media non è un parametro significativo per descrivere la qualità macrogeometrica del solco: la variabilità del processo maschera l'effetto dei fattori. È necessario, a questo punto, introdurre un parametro che valuti quantitativamente la variabilità del processo. Si introduce pertanto il parametro deviazione standard della conicità: tale parametro è indicativo della variabilità della conicità nel singolo solco e valuta contemporaneamente la variabilità della larghezza lungo il profilo tagliato sia in ingresso che in uscita.

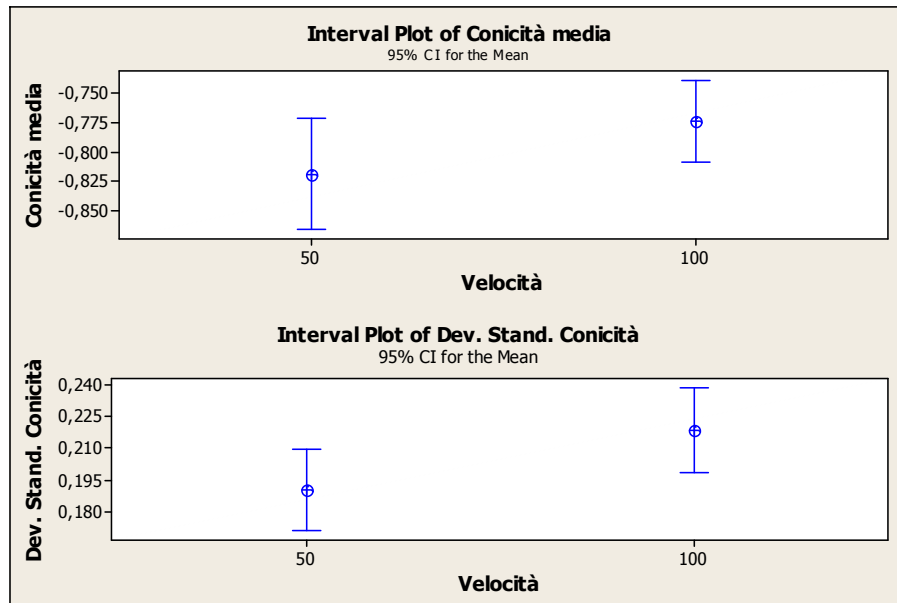


Figura 6. 33 Andamento della Conicità media e della dev. stand. sulla Conicità al variare della Velocità di avanzamento

Come si osserva nella figura 6.33, la deviazione standard della conicità non è trascurabile rispetto al valor medio: infatti entrambe presentano lo stesso ordine di grandezza. Inoltre, l'andamento medio della deviazione standard della conicità dimostra che l'instabilità del processo aumenta mediamente all'aumentare della velocità di avanzamento; l'analisi ANOVA consentirà di valutare l'effettiva significatività del fattore "Velocità di avanzamento" sulla risposta "Deviazione standard della Conicità" in base ai risultati del piano fattoriale considerato.

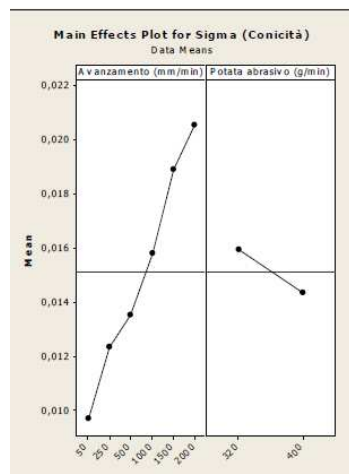


Figura 6. 34 Effetto medio di Velocità di avanzamento e portata di abrasivo sulla dev. Stand. della conicità, pannelli 10 mm [Mon06]

Influenza dei fattori sulla Dev. Standard della Conicità

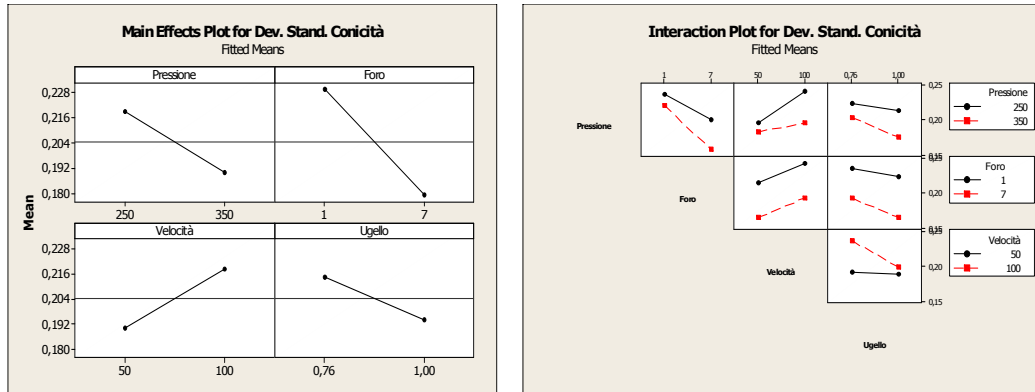


Figura 6. 35 Influenza dei fattori *Velocità di avanzamento, Portata di abrasivo (Foro), Pressione, Dug+Dfoc (Ugelli)* e delle loro interazioni sulla dev. stand. della Conicità

Una prima stima dei fattori influenti sulla deviazione standard della conicità viene riassunta dalla fig. 6.35. L'effetto medio dei singoli fattori sulla deviazione standard della conicità del solco sembra essere il medesimo: le pendenze delle rette non risultano differenti. Osservando le interazioni tra i fattori l'interazione tra *Velocità-Ugello* e *Pressione-Foro* sembrano essere più significative delle altre.

General Linear Model: Dev. Stand. Conicità versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Dev. Stand. Conicità, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,017572	0,016820	0,016820	6,20	0,015
Foro	1	0,050190	0,049978	0,049978	18,44	0,000
Velocità	1	0,016038	0,015541	0,015541	5,73	0,020
Ugello	1	0,008526	0,007956	0,007956	2,93	0,092
Pressione*Foro	1	0,003232	0,003490	0,003490	1,29	0,261
Pressione*Velocità	1	0,005568	0,005078	0,005078	1,87	0,176
Pressione*Ugello	1	0,001266	0,001471	0,001471	0,54	0,464
Foro*Velocità	1	0,000005	0,000000	0,000000	0,00	0,992
Foro*Ugello	1	0,001509	0,001256	0,001256	0,46	0,499
Velocità*Ugello	1	0,005344	0,005684	0,005684	2,10	0,153
Pressione*Foro*Velocità	1	0,002575	0,002738	0,002738	1,01	0,319
Pressione*Foro*Ugello	1	0,006243	0,005810	0,005810	2,14	0,148
Pressione*Velocità*Ugello	1	0,000384	0,000486	0,000486	0,18	0,673
Foro*Velocità*Ugello	1	0,001471	0,001619	0,001619	0,60	0,442
Pressione*Foro*Velocità*Ugello	1	0,015086	0,015086	0,015086	5,56	0,021
Error	63	0,170793	0,170793	0,002711		
Total	78	0,305802				

S = 0,0520673 R-Sq = 44,15% R-Sq(adj) = 30,85%

General Linear Model: Dev. Stand. Conicità versus Pressione; Foro; ...

Factor	Type	Levels	Values
Pressione	fixed	2	250; 350
Foro	fixed	2	1; 7
Velocità	fixed	2	50; 100
Ugello	fixed	2	0,76; 1,00

Analysis of Variance for Dev. Stand. Conicità, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressione	1	0,017572	0,016077	0,016077	5,57	0,021
Foro	1	0,050190	0,051462	0,051462	17,84	0,000
Velocità	1	0,016038	0,016344	0,016344	5,67	0,020
Ugello	1	0,008526	0,008526	0,008526	2,96	0,090
Error	74	0,213476	0,213476	0,002885		
Total	78	0,305802				

S = 0,0537104 R-Sq = 30,19% R-Sq(adj) = 26,42%

L'influenza dei fattori sulla deviazione standard della conicità è valutata tramite ANOVA. Considerando il numero di fattori e le rispettive interazioni, α_i risulta pari a $0,05/15=0,0033$: il p-value risulta inferiore a 0,0033 solo per il fattore *Portata di abrasivo* e per nessuna delle interazioni.

Il medesimo risultato si ottiene anche senza considerare le interazioni tra i fattori ($\alpha_i/4=0,05/4=0,0125$).

Studi precedenti nell'ambito del progetto "Tilas" [Mon06] in pannelli di spessore inferiore (10 mm) hanno dimostrato che il fattore *Velocità di avanzamento* è significativo sulla deviazione standard della conicità. Così come per la deviazione standard sulla larghezza del solco in uscita, anche per la deviazione standard sulla conicità l'intervallo di variabilità del fattore non è sufficientemente ampio per garantirne la significatività sulla risposta.

L'andamento medio della deviazione standard della conicità dimostra che anche per pannelli da 30 mm la variabilità del processo aumenta all'aumentare della velocità di avanzamento, ma il fattore non è risultato significativo.

Per stabilizzare il processo, in base alla significatività del fattore, è necessario aumentare portata di abrasivo.

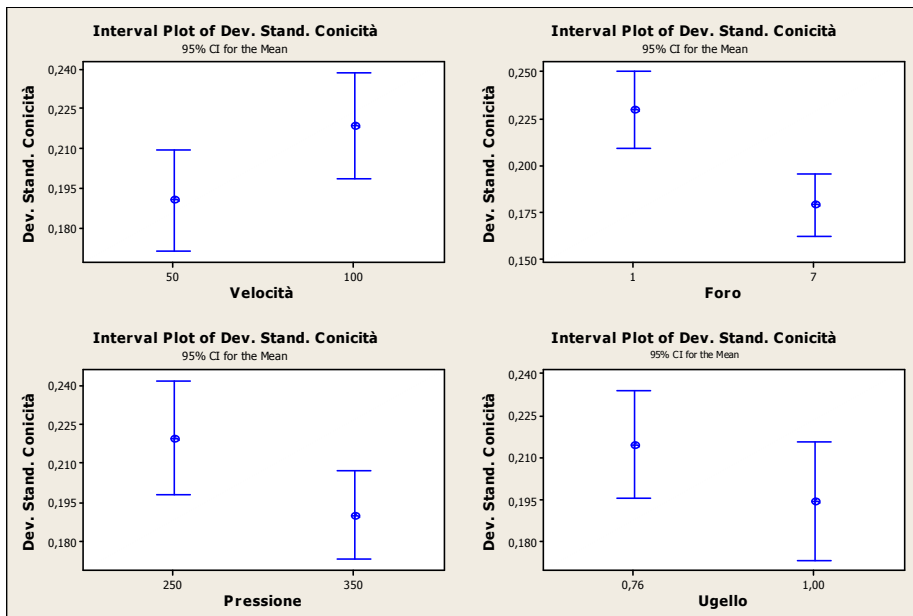


Figura 6. 36 Andamento della dev. stand. della Conicità al variare dei fattori

Conclusioni:

- Sia per pannelli a 10 mm che 30 mm la conicità media non è un parametro significativo per la stima della qualità macrogeometrica del solco.
- La variabilità del processo maschera l'effetto dei fattori.
- I valori di conicità dal piano fattoriale sono sempre negativi.
- È necessario introdurre un parametro prestazionale che quantifichi simultaneamente la variabilità solco in ingresso e in uscita.
- La deviazione standard della conicità e la conicità media calcolate sul singolo solco hanno lo stesso ordine di grandezza.
- La variabilità del processo aumenta all'aumentare della velocità di avanzamento: l'andamento medio della deviazione standard della conicità aumenta all'aumentare della velocità di avanzamento.
- Dal piano fattoriale non c'è evidenza statistica per affermare che la velocità di avanzamento è significativa sulla deviazione standard (scelta dei livelli di velocità vincolata alla necessità di aver tagli passanti senza escludere fattori a priori).
- C'è evidenza statistica per affermare che la portata di abrasivo è significativa sulla deviazione standard della conicità.
- Per stabilizzare il processo (andamento medio della Dev. Stand. a valori inferiore) è necessario aumentare portata di abrasivo, la scelta degli altri parametri, non significativi dall'ANOVA, è dettata da vincoli economici.

Influenza dei fattori sulle grandezze considerate.

Tabella 6. 9 Significatività dei fattori

Larghezza media in ingresso	
Velocità di avanzamento	<i>Significativo</i>
Portata di abrasivo	<i>Significativo</i>
Ugello	<i>Significativo</i>
Pressione	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Larghezza media in uscita	
Velocità di avanzamento	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Portata di abrasivo	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Ugello	<i>Significativo</i>
Pressione	<i>Non significativo, vincolo economico</i>

Tabella 6. 10 Significatività dei fattori

Conicità media	
<i>Parametro non significativo</i>	
Dev. Standard larghezza solco in uscita	
Velocità di avanzamento	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Portata di abrasivo	<i>Significativo</i>
Ugello	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Pressione	<i>Significativo</i>
Dev. Standard Conicità	
Velocità di avanzamento	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Portata di abrasivo	<i>Significativo</i>
Ugello	<i>Non significativo, vincolo economico</i>
Pressione	<i>Non significativo, vincolo economico</i>

6.2.4 Valutazione dell'incertezza di misura

Le misurazioni della *Larghezza media del solco in ingresso*, *Larghezza media del solco in uscita* e *Conicità media*, presentate nei paragrafi precedenti sono affette da incertezza.

In questa sezione viene presentata una procedura di calcolo per stimare l'incertezza di misura sulle grandezze sopra illustrate [Rod01].

Le fonti di errore che verranno sommate in quadratura riguardano:

- GUM – Incertezza unità di formato dello scanner
- GUM – Incertezza unità di formato del calibro
- Errore di misura nella valutazione della larghezza locale dei solchi tramite calibro, nella fase di taratura per la definizione dell'errore di soglia (cfr. Appendice E)
- Errore quadratico medio dovuto alla definizione della soglia ottima (cfr. 6.2.2.2)

GUM – Incertezza unità di formato dello scanner

L'acquisizione delle immagini è effettuata a 600 dpi che corrisponde a una risoluzione di 23,62 pixel/mm, ovvero 0,042 mm/pixel. Sapendo che l'errore di calibrazione nella finestra del software che coinvolge entrambi gli assi è fissato a ± 2 pixel/mm [Rod01], la somma in quadratura per entrambi gli assi X e Y è pari a 0,120 mm. L'incertezza standard viene calcolata dividendo il risultato così ottenuto per $2 \cdot \sqrt{3}$, da cui 0,0346 mm.

Si ricorda che la risoluzione ottica massima dello scanner in dotazione corrisponde a 1200x2400 dpi (cfr. Appendice F); poiché si sceglie di acquisire le immagini a 600 dpi, non si risente della diversa risoluzione lungo gli assi X e Y nell'acquisizione dell'immagine (la risoluzione di acquisizione dell'immagine è dimezzata rispetto alla risoluzione massima).

GUM – Incertezza unità di formato del calibro

L'incertezza di unità di formato del calibro si ottiene semplicemente dividendo la risoluzione dello strumento, pari a 0,05 mm, per $2 \cdot \sqrt{3}$. Si ottiene quindi 0,0144 mm.

Incertezza di misura sulla larghezza media del solco in ingresso, in uscita e sulla conicità media

Tabella 6. 11 Fonti di errore per la stima dell'incertezza di misura sulla larghezza media in ingresso

Fronte	
Errore in taratura	0,00325
GUM-inc unità di formato scanner	0,0346
GUM-inc unità di formato calibro	0,0144
Errore di misura con calibro	0,033

Sommando i contributi in taratura si ottiene un valore di incertezza standard pari a 0,05 mm, a cui corrisponde l'incertezza di misura al 95% del valore di 0,10 mm ($k=2$).

Si ricorda che l'errore quadratico medio derivante dalla definizione della soglia ottima è pari allo 0,325% per le immagini scannerizzate sul "fronte" del provino (cfr. Appendice E e 6.2.2.2), mentre l'incertezza standard sulla misura delle larghezze locali dei solchi in ingresso, in fase di definizione della soglia ottima, è pari a 0,033 mm. Questo valore è calcolato considerando la deviazione standard nel caso peggiore diviso \sqrt{N} , dove N è pari a 3 misurazioni per solco (cfr. Appendice E).

Tabella 6. 12 Fonti di errore per la stima dell'incertezza di misura sulla larghezza media in uscita

Retro	
Errore in taratura	0,0125
GUM-inc unità di formato scanner	0,0346
GUM-inc unità di formato calibro	0,0144
Errore di misura con calibro	0,05

Sommando i contributi in taratura si ottiene un valore di incertezza standard pari a 0,06 mm, a cui corrisponde l'incertezza di misura al 95% del valore di 0,12 mm ($k=2$).

Si ricorda che l'errore quadratico medio derivante dalla definizione della soglia ottima è pari a 1,25% per le immagini scannerizzate sul "retro" del provino (cfr. Appendice E e 6.2.2.2), mentre l'incertezza di misura sulle larghezze locali dei solchi in uscita, in fase di definizione della soglia ottima, è pari a 0,05 mm. Questo valore è calcolato considerando la deviazione standard nel caso peggiore diviso \sqrt{N} , dove N è pari a 3 misurazioni per solco (cfr. appendice E).

Tenendo conto delle incertezze standard sulle misure della larghezza media dei solchi in ingresso e in uscita e sommandole in quadratura, l'incertezza standard sul valore di conicità media misurato è pari a 0,081 mm, cui corrisponde un valore di incertezza al 95% pari a 0,162 ($k=2$).

6.3 Selezione dei parametri ottimali

La selezione dei parametri ottimali per il taglio di pannelli in schiuma metallica era stata impostata nell'ambito dell'analisi per lo spessore tagliabile senza vincoli sulla qualità del taglio, con il solo obiettivo di minimizzazione dei costi e al fine di garantire un taglio passante senza definire vincoli per la qualità macrogeometrica del solco.

In questa fase la selezione dei parametri è vincolata ai risultati ottenuti dal piano sperimentale per l'analisi della qualità e non potrà quindi essere impostata prescindendo dal monitoraggio della qualità macrogeometrica ottenibile.

L'idea è quella di selezionare il valore ottimo dei parametri di processo e lavorazione con lo scopo di contenere la variabilità del processo di taglio. Poiché la sola conicità media non può essere considerata un parametro significativo nella definizione della qualità macrogeometrica del processo di taglio, il valore dei parametri sarà selezionato per minimizzare i valori di deviazione standard sulla larghezza del solco in uscita e il valore della deviazione standard sulla conicità media, in modo tale da contenere la variabilità sul processo di taglio.

Ai parametri per i quali si è riscontrata evidenza statistica per affermarne la significatività sulle grandezze sopra citate, viene attribuito il valore che minimizza tali grandezze in base ai livelli "alto" e "basso" del piano sperimentale, mentre ai parametri che non sono risultati significativi viene attribuito il valore ottimo per la minimizzazione dei costi.

I parametri i cui valori sono scelti sulla base di vincoli economici sono: *Pressione*, *Velocità di avanzamento*, *Dug+Dfoc*. Sulla base dei risultati ottenuti dall'ottimizzazione economica effettuata nell'ambito dell'analisi per lo spessore tagliabile, si è visto che il minimo costo deriva dalla massimizzazione della *Velocità di avanzamento*, dalla minimizzazione della *Pressione* e dalla scelta dell'accoppiamento *Dug+Dfoc* pari a 0,76 mm per l'ugello focalizzatore (cfr. Capitolo 5). Per questo motivo sono loro associati i valori "alto" e "basso" contemplati dal piano fattoriale.

Per la minimizzazione della variabilità sul solco in uscita risultano significativi i fattori *Pressione* e *Portata di abrasivo*, mentre per la minimizzazione della deviazione standard della Conicità la sola *Portata di abrasivo*. In base ai risultati riportati al paragrafo 6.2.3 è necessario massimizzare i valori di *Pressione* e *Portata di abrasivo* per ridurre la variabilità del processo di taglio: per questo

motivo i parametri saranno fissati al valore “alto” previsto dal piano fattoriale, ovvero 564 g/min e 350 MPa.

Tabella 6. 13 Valori ottimali da attribuire ai parametri di processo e lavorazione, analisi della qualità del taglio

Conicità media		
<i>Parametro non significativo</i>		
Dev. Standard larghezza solco in uscita		
Velocità di avanzamento	100 mm/min	Minimizzazione economica
Portata di abrasivo	Foro 7 – 564 g/min	Minimizzazione variabilità del processo
Dug+Dfoc	0,76 mm – 0,25 mm	Minimizzazione economica
Pressione	350 MPa	Minimizzazione variabilità del processo
Dev. Standard Conicità		
Velocità di avanzamento	100 mm/min	Minimizzazione economica
Portata di abrasivo	Foro 7- 564 g/min	Minimizzazione variabilità del processo
Dug+Dfoc	0,76 mm – 0,25 mm	Minimizzazione economica
Pressione	250 MPa	Minimizzazione economica

6.4 Calcolo dei costi

In questa sezione vengono illustrati i costi di taglio ottenuti attribuendo ai parametri di processo e lavorazione i valori ottimali sulla base delle considerazioni riassunte nel paragrafo precedente. Le celle in verde delle tabelle sottostanti pongono in evidenza i fattori la cui significatività sulle grandezze *Deviazione standard della larghezza in uscita* e *Deviazione standard della conicità* è valutata tramite ANOVA.

Minima Dev.Stand. della Larghezza in uscita – Vita media dell’ugello -

Tabella 6. 14 Costo totale per minima deviazione standard larghezza in uscita, vita media dell’ugello

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)	COSTO TOTALE €/m
564	350	foro 7	0,25	0,76	100	2,96

Minimizzazione dev. stand. larghezza in uscita

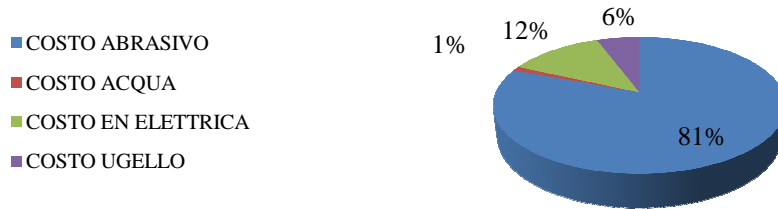


Figura 6. 37 Incidenza percentuale dei costi

Minima Dev.Stand. della Larghezza in uscita – Applicazione del modello di usura

Sulla base delle considerazioni espone nel capitolo 5 relativo alla valutazione dei valori ottimi da attribuire ai parametri di processo per la minimizzazione dei costi di taglio, si deduce che nel caso analizzato è necessario associare alla velocità di avanzamento il valore “alto” del piano fattoriale per minimizzare i costi di taglio. Si confrontano i costi totali ottenuti selezionando *Dug+Dfoc* sia pari a 1mm, sia pari a 0,76: si vuole valutare se la massimizzazione della vita dell’ugello focalizzatore coincide con la minimizzazione dei costi. Per ciascun focalizzatore selezionato, a parità dei valori nei restanti parametri, si calcolano il numero di ore di vita utile e si stima il costo totale.

Tabella 6. 15 Valori ottimali, *Dug+Dfoc* pari a 0,76 mm

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
564	350	7	0,25	0,76	100

Tabella 6. 16 Costo totale, *Dug+Dfoc* pari a 0,76 mm

Ore di vita utile (20% diametro)	Costo ugello (€/m)	Costo acqua (€/m)	Costo en. Elettrica (€/m)	COSTO TOTALE (€/m)
36,02	0,43	0,03	0,37	3,23

Tabella 6. 17 Valori ottimali, *Dug+Dfoc* pari a 1 mm

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
564	350	7	0,3	1	100

Tabella 6. 18 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm

Ore di vita utile (20% diametro)	Costo ugello (€/m)	Costo acqua (€/m)	Costo en. Elettrica (€/m)	COSTO TOTALE (€/m)
41,03	0,38	0,04	0,53	3,35

Si nota che il risparmio derivante dalla massimizzazione della vita dell'ugello focalizzatore ottenuta selezionando $Dug+Dfoc$ pari a 1 mm, non compensa la spesa dovuta all'aumento dei costi di energia elettrica e acqua derivanti dall'utilizzo di un ugello primario a diametro superiore ($Dug=0,3$ mm, $Dfoc=1$ mm).

Minima Dev.Stand. della Conicità – Vita media dell'ugello

Tabella 6. 19 Costo totale per minima deviazione standard conicità, vita media dell'ugello

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)	COSTO TOTALE €/m
564	250	foro 7	0,25	0,76	100	2,81

Minimizzazione dev. st. conicità

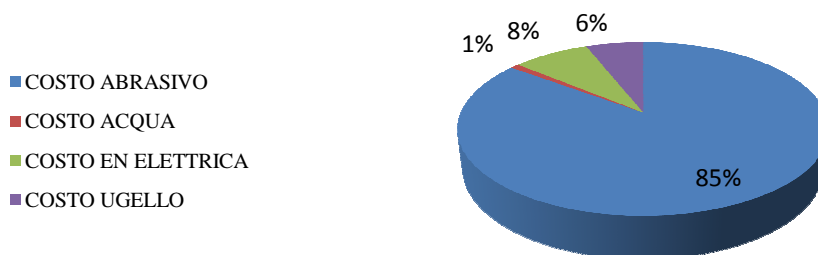


Figura 6. 38 Incidenza percentuale dei costi

Minima Dev.Stand. della Conicità – Applicazione del modello di usura

Tabella 6. 20 Valori ottimali, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
564	250	7	0,25	0,76	100

Tabella 6. 21 Costo totale, $Dug+Dfoc$ pari a 0,76 mm

Ore di vita utile (20% diametro)	Costo ugello (€/m)	Costo acqua (€/m)	Costo en. Elettrica (€/m)	COSTO TOTALE (€/m)
39,05	0,40	0,03	0,22	3,04

Tabella 6. 22 Valori ottimali, *Dug+Dfoc* pari a 1 mm

Portata abrasivo (g/min)	Pressione (MPa)	Portata abrasivo	Dug primario (mm)	Dug+Dfoc (mm)	Velocità avanzamento (mm/min)
564	250	7	0,3	1	100

Tabella 6. 23 Costo totale, *Dug+Dfoc* pari a 1 mm

Ore di vita utile (20% diametro)	Costo ugello (€/m)	Costo acqua (€/m)	Costo en. Elettrica (€/m)	COSTO TOTALE (€/m)
44,48	0,35	0,04	0,32	3,10

Anche in questo caso, così come per la minimizzazione della deviazione standard sulla larghezza in uscita, il costo minimo si ottiene selezionando *Dug+Dfoc* pari a 0,76 mm e *velocità di avanzamento* pari a 100 mm/min. In questo caso la *Pressione* non è risultata significativa dall'ANOVA. È possibile selezionare il valore del parametro che minimizza il costo: per tale motivo il costo totale derivante dalla minimizzazione della *Deviazione standard sulla conicità* è inferiore al costo totale derivante dalla minimizzazione della *Deviazione standard sulla larghezza in uscita*.

Capitolo 7: Conclusioni e sviluppi futuri

L'ottimizzazione del processo di taglio per pannelli in schiuma metallica di spessore 10 e 30 mm è stata impostata per far fronte alle necessità applicative a cui i pannelli in schiuma possono rispondere.

Dall'analisi delle applicazioni a cui le schiume metalliche sono adatte è risultato che tali materiali sono utili soprattutto per l'alleggerimento strutturale in diversi settori industriali (aeronautico, automobilistico, trasporti, settore dell'edilizia civile ed industriale), ma anche per l'assorbimento di energia agli urti, isolamento acustico, smorzamento delle vibrazioni (cfr. Capitolo 3).

In base alle applicazioni possibili si sono riscontrate due necessità:

- Ottenere un taglio passante che garantisca la separazione meccanica della lamiera, senza vincoli sulla finitura del taglio e sulla qualità macrogeometrica: l'obiettivo consiste nella massimizzazione della produttività e minimizzazione dei costi di lavorazione.
- Monitorare la qualità macrogeometrica del pezzo, principalmente per garantire saldabilità tra i pezzi.

I risultati sperimentali riguardanti l'analisi dello spessore tagliabile senza particolari richieste sulla qualità macrogeometrica del solco hanno dimostrato che (cfr. Capitolo 4):

Pannelli 30 mm

- I risultati del piano fattoriale preliminare dimostrano che si possono ottenere tagli completamente passanti per velocità di avanzamento pari a 100 mm/min con qualsiasi combinazione tra i valori "alto" e "basso" dei fattori *Pressione*, *Portata di abrasivo*, *Dug+Dfoc*. Tagli passanti a 1000 mm/min si ottengono solo con *Pressione*=350 MPa, *Portata di abrasivo*=564 g/min, *Dug+Dfoc*=1 mm.
- I risultati del piano fattoriale a quattro livelli per i fattori *Velocità di avanzamento* e *Portata di abrasivo* mostrano che il valore dei parametri da selezionare per ottenere tagli passanti, per comprendere la massima velocità di avanzamento, corrisponde a: $100 < \text{Velocità}_{\text{avanz}} < 1000$ mm/min; *Pressione* 350 MPa; $252 < \text{Portata}_{\text{abrasivo}} < 564$ g/min; *Dug+Dfoc*=1 mm.
- Per ottenere tagli passanti nell'intervallo di *Pressione* compreso tra 250 e 350 MPa, con il minimo livello di portata di abrasivo, i valori da attribuire ai parametri di taglio risultano: $100 < \text{Velocità}_{\text{avanz}} < 500$ mm/min; $252 < \text{Portata}_{\text{abrasivo}} < 564$ g/min; *Dug+Dfoc*=1 mm.

Pannelli 10 mm

- Nella combinazione sperimentale $Pressione=250$ MPa; $Dug+D_{foc} = 0,76$ mm, la velocità massima al limite di taglio senza abrasivo risulta pari a 20 mm/min: ai fini della minimizzazione del costo di taglio questa combinazione sperimentale non risulta essere economicamente vantaggiosa. La diminuzione della velocità d'avanzamento (fino a 100 volte), obbligata per la scelta di non utilizzare getto idro-abrasivo, aumenta notevolmente il costo del taglio da 0,041 €/m ($Pressione=250$ MPa; $Dug+D_{foc}=0,76$ mm; $Portata\ di\ abrasivo=95$ g/min, $Velocità\ di\ avanzamento=2000$ mm/min) a 2,078 €/m ($Pressione=250$ MPa; $Dug+D_{foc}=0,76$ mm; $Velocità\ di\ avanzamento=20$ mm/min).
- Le combinazioni sperimentali che consentono di ottenere un taglio passante consentono di arrivare a velocità di avanzamento pari a 5000 mm/min, consentendo elevata produttività e costi convenienti in €/m.
I tagli passanti si ottengono dalle condizioni sperimentali che prevedono:
 $100 < Velocità_{avanz} < 1000$ mm/min; $250 < Pressione < 350$ MPa;
 $Dug+D_{foc}=1$ mm; $95 < Portata_{abrasivo} < 564$ g/min;

In prima analisi la selezione dei parametri ottimali viene effettuata per minimizzare i costi di taglio imponendo come vincoli i risultati derivanti dalle analisi sperimentali per l'ottenimento di un taglio passante.

Dai risultati dell'ottimizzazione è possibile notare che:

- per pannelli a 10 mm applicando un modello di usura per la stima della vita dell'ugello il minimo costo per massima vita dell'ugello focalizzatore è superiore rispetto al costo minimo senza porre vincoli sulla vita utile del focalizzatore stesso (cfr. Capitolo 5).
- per pannelli a 30 mm di spessore i valori dei parametri di processo che consentono la minimizzazione dei costi coincidono con i valori che comportano la massimizzazione della vita dell'ugello focalizzatore: in questo caso, infatti, i valori di Pressione e Portata di abrasivo che minimizzano il tasso di usura sono i medesimi che minimizzano il costo di taglio; la scelta dell'accoppiamento $Dug+D_{foc}$ è invece vincolata ai risultati sperimentali, per cui i valori da attribuire ai parametri di processo coincidono in entrambi i casi (minimo costo senza vincoli sulla vita utile del focalizzatore e minimo costo per massima vita dell'ugello) (cfr. Capitolo 5).
- Il parametro che gioca un ruolo decisivo nella minimizzazione del costo di taglio coincide con la *Velocità di avanzamento*: i costi minimi si ottengono applicando il massimo valore per spessore e tipologia di materiale tagliato.

- I costi legati al consumo di abrasivo rappresentano la voce di costo che in percentuale grava maggiormente sul costo totale rispetto alle altre: è opportuno minimizzare la portata di abrasivo in modo da ottenere tagli passanti alla massima velocità di avanzamento consentita per il materiale e lo spessore tagliato.

La selezione dei parametri ottimali per la minimizzazione del costo di taglio in pannelli di schiuma metallica di spessore 10 e 30 mm è pari a (cfr. Capitolo 5):

- *Pannelli da 10 mm: Pressione 250 MPa, Portata di abrasivo 95 g/min, Dug+Dfoc 0,76 mm, Velocità di avanzamento 5000 mm/min per un costo totale di 0,0164 €/m (considerando la vita media dell'ugello focalizzatore pari a 100 h) e 0,0195 €/m (considerando una vita utile del focalizzatore pari a 56 h, derivante dall'applicazione del modello di usura).*
- *Pannelli 30 mm: Pressione 350 MPa, Portata di abrasivo 252 g/min, Dug+Dfoc 1 mm, Velocità avanzamento 1000 mm/min per un costo totale di 0,18 €/m (considerando la vita media dell'ugello focalizzatore pari a 100 h) e per un totale di 0,2 €/m (considerando una vita utile del focalizzatore pari a 46,56 h, derivante dall'applicazione del modello di usura).*

L'analisi per la qualità macrogeometrica del solco di taglio condotta in pannelli di 30 mm di spessore ha dimostrato che:

- La morfologia interna della schiuma metallica influenza notevolmente la qualità del solco in uscita. Mentre i solchi in ingresso rispettano il comportamento dei materiali omogenei, presentando spigoli rettilinei e ben definiti, ciò non si può dire per il profilo dei solchi in uscita. Il solco è caratterizzato da una elevata variabilità per tutta la lunghezza del taglio: già visivamente è possibile notare che la variabilità del solco in uscita è nettamente superiore rispetto all'andamento della superficie tagliata all'ingresso. Nella schiuma metallica e nei materiali porosi in genere, le bolle che occupano la parte interna del pannello sono costituite da pareti sottili: quando il getto entra in contatto con una di queste è sufficiente il solo contatto per rimuoverle interamente; le zone del taglio non si presentano quindi rettilinee e uniformi, ma in corrispondenza di bolle il taglio presenta un profilo rotondeggiante e irregolare (cfr. Capitolo 6).
- La variabilità del processo ha influenza sulla valutazione della significatività dei fattori del piano fattoriale considerato sulla risposta "larghezza media del solco in uscita" e "conicità media del solco". La

variabilità del processo maschera l'effetto dei fattori stessi (cfr. Capitolo 6).

- È necessario affiancare ai valori medi di conicità e larghezza del solco in uscita i corrispondenti valori di deviazione standard come valutazione della variabilità del processo (cfr. Capitolo 6).
- Il valore ottimale dei parametri di processo è stabilito in modo da minimizzare la deviazione standard sulla larghezza media in uscita e sulla conicità media, sulla base dei risultati dell'analisi statistica. Ai parametri risultati significativi sulle deviazioni standard viene attribuito il valore che ne consente la minimizzazione in base ai livelli "alto" e "basso" del piano sperimentale, mentre ai parametri che non sono risultati significativi viene attribuito il valore ottimo per la minimizzazione dei costi (cfr. Capitolo 6).
- Per la minimizzazione della deviazione standard sulla larghezza media del solco in uscita i valori ottimali da associare ai parametri risultano: *Velocità di avanzamento* 100 mm/min, *Portata di abrasivo* 564 g/min, *Dug+Dfoc* 0,76 mm, *Pressione* 350 MPa (cfr. Capitolo 6).
- Per la minimizzazione della deviazione standard sulla conicità media del solco in uscita i valori ottimali da associare ai parametri risultano: *Velocità di avanzamento* 100 mm/min, *Portata di abrasivo* 564 g/min, *Dug+Dfoc* 0,76 mm, *Pressione* 250 MPa (cfr. Capitolo 6).

Dai costi ottenuti dall'attribuzione dei valori ottimali per l'analisi dello spessore tagliabile e per la qualità del taglio si ottiene:

Tabella 7. 1 Costi di taglio per vita media dell'ugello, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi

Vita media	Costo di taglio (€/m)
Minimo costo, nessun vincolo per la qualità	0,18
Minimizzazione dev. St. larghezza solco in uscita	2,96
Minimizzazione dev. St. conicità	2,81

Tabella 7. 2 Costi di taglio, applicazione modello di usura, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi

Modello di usura	Costo di taglio (€/m)
Minimo costo, nessun vincolo per la qualità	0,2
Minimizzazione dev. St. larghezza solco in uscita	3,23
Minimizzazione dev. St. conicità	3,04

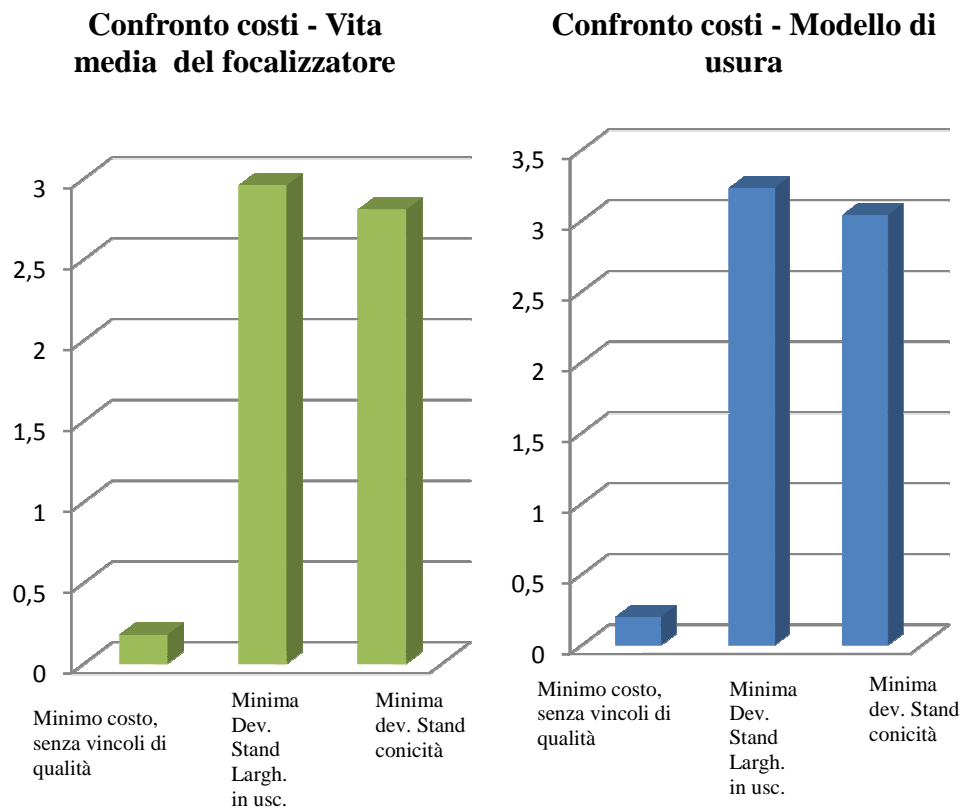


Figura 7. 1 Confronto di costi totali per vita media e applicazione del modello di usura, analisi della qualità del solco e minimo costo senza vincoli qualitativi

La differenza di costi è riconducibile alla necessità di diminuire la velocità di avanzamento di un ordine di grandezza (da 1000 a 100 mm/min) nel caso di analisi della qualità del solco; inoltre la minimizzazione della variabilità del processo richiede la massimizzazione della portata di abrasivo.

Le diverse fasi del lavoro hanno fornito vari spunti per un ulteriore approfondimento degli argomenti trattati.

- La selezione dei parametri ottimali per pannelli in schiuma metallica si potrebbe inserire in un progetto più ampio di determinazione dei complessi rapporti che legano le grandezze coinvolte nel processo di asportazione AWJ e le peculiarità del materiale trattato. In questa fase del lavoro ci si è limitati alla selezione dei valori ottimali da attribuire ai parametri di processo per la minimizzazione del costo di taglio e il monitoraggio della qualità. Solamente nell'ambito dell'analisi della qualità del taglio ci si è soffermati sulla valutazione delle caratteristiche di densità media del

materiale (scelta di maggior interesse industriale) senza approfondimenti sull'effettiva densità locale e distribuzione delle bolle all'interno della schiuma, caratteristiche che potrebbero influenzare i risultati sia qualitativi che prestazionali del taglio.

- Per approfondire l'analisi della qualità del taglio in pannelli da 30 mm, si potrebbero impostare altri piani fattoriali che prevedano una maggiore variabilità per il fattore *Velocità di avanzamento*. Si potrebbe selezionare il valore di uno o più fattori in modo da garantire comunque un taglio passante e poter valutare la larghezza del solco in uscita e il valore di conicità anche a velocità di avanzamento maggiori del valore "alto" pari a 100 mm/min fissato nel piano fattoriale considerato nel presente studio.
- Per approfondire l'analisi dello spessore tagliabile si potrebbero indagare i risultati del taglio di pannelli di 30 mm a velocità di avanzamento comprese tra i 100 e 500 mm/min. Nel piano fattoriale a quattro livelli per i fattori *Velocità di avanzamento* e *Portata di abrasivo*, la velocità è stata fatta variare sui livelli 100, 500, 700, 1000 in modo da monitorare il risultato del taglio per velocità di avanzamento il più alte possibile, poiché l'obiettivo consisteva nella minimizzazione dei costi di taglio e massimizzazione della produttività. I risultati ottenuti dal nuovo piano fattoriale potrebbero essere utili per la stesura di un successivo piano fattoriale per l'analisi della qualità del taglio a velocità di avanzamento superiori a 100 mm/min.
- Lo studio presentato si è concentrato sul taglio di pannelli in sola schiuma di spessore 10 e 30 mm. Un'immediata estensione dello stesso potrebbe riguardare sia gli spessori tagliati (ad esempio 20 mm, tra quelli disponibili), ma anche l'analisi di tagli di pannelli in schiuma e pelli di diverso spessore per le loro numerose possibili applicazioni.

Appendice A

Taratura del sistema di adduzione dell'abrasivo

A.1 Descrizione del sistema di taratura

Il sistema di regolazione della portata di abrasivo utilizza un disco caratterizzato da otto fori di diverse dimensioni.

Ruotando il disco a valle della tramoggia si porta il foro desiderato sotto la tramoggia stessa regolando, in questo modo, il quantitativo di abrasivo che giunge alla testa di taglio.

Le dimensioni dei fori sono crescenti con il numero che li identifica, per cui, scegliendo fori a dimensione maggiore, si determina maggiore adduzione di abrasivo alla testa di taglio.

Tabella A. 1 Dimensioni dei fori a seconda del numero che li identifica

Diametro	Foro							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Misura 1 (mm)	2,8	4	4,5	4,8	5,4	5,8	6,2	6,3
Misura 2 (mm)	2,8	3,9	4,6	5	5,5	5,6	6,1	6,4
Misura 3 (mm)	2,9	3,9	4,6	4,9	5,5	5,7	6	6,4
Misura 4 (mm)	2,9	3,8	4,5	4,9	5,5	5,7	6,1	6,4
Media	2,850	3,900	4,550	4,900	5,475	5,700	6,100	6,375
Dev. Stand.	0,058	0,082	0,058	0,082	0,050	0,082	0,082	0,050
Area di passaggio (mm ²)	51,82	181,7	336,62	452,766	705,71	829,07	1087,45	1297,21

Si può osservare che i valori assunti dall'area di passaggio in relazione al foro considerato sono crescenti e in prima approssimazione aumentano linearmente all'aumentare del numero del foro stesso.

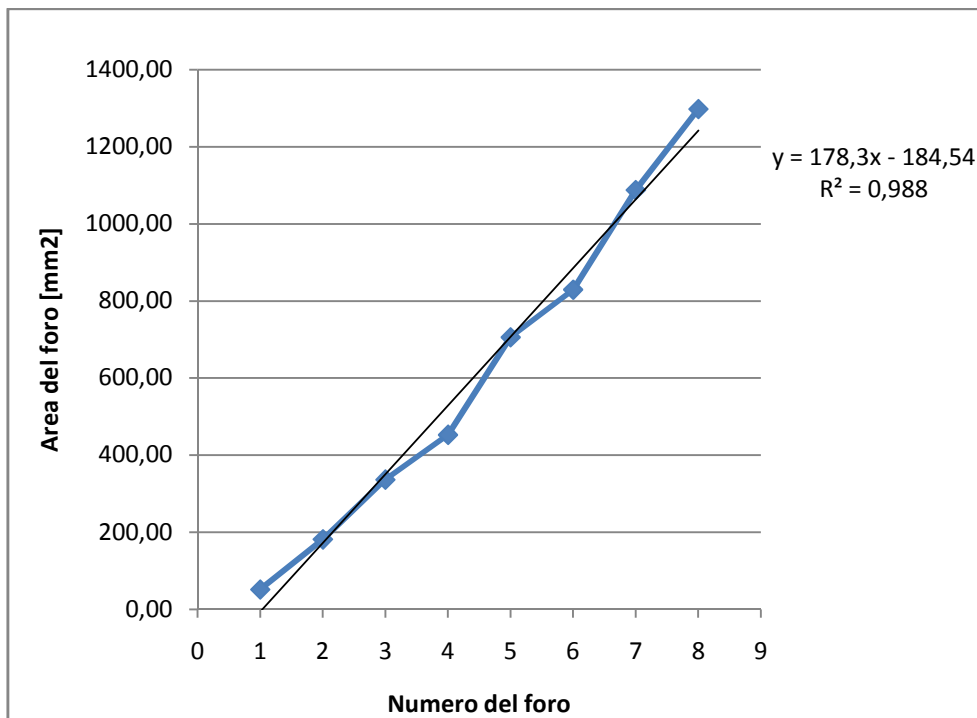


Figura A. 1 Andamento dell'area del foro in funzione del numero che li identifica

Per una prima approssimazione, il processo di taratura viene effettuato mantenendo chiuso il getto d'acqua, aprendo e chiudendo esclusivamente il getto di abrasivo. In questo modo la taratura viene effettuata per gravità, attraverso la semplice caduta dell'abrasivo tramite la luce del foro a valle della tramoggia.

Si deve precisare che in questo modo non è possibile valutare la reale portata di abrasivo del sistema, poiché il fenomeno non prescinde dall'azione del getto d'acqua. Il processo che consente all'abrasivo di arrivare dalla tramoggia alla testa di taglio è regolato, infatti, sia da semplice caduta per gravità, sia dalla spinta dell'aria sulle particelle di abrasivo stesso. Nella camera di miscelazione il getto d'acqua particolarmente veloce crea una depressione: in questo modo l'aria aspirata risucchia le particelle di abrasivo per effetto Venturi (cfr. Capitolo 1).

A fianco di una prima stima di taratura per sola gravità, si deve aggiungere la taratura a getto aperto per valutare l'influenza del risucchio dell'aria sulle particelle di abrasivo, al fine di stimare in modo preciso il reale quantitativo di abrasivo in grado di fluire nel processo di taglio.

A.2 Taratura per gravità a getto spento

Questa prima fase rappresenta una stima approssimata del reale valore di portata di abrasivo che il sistema è in grado di smaltire.

Per rendere la prova più vicina alle condizioni di reale funzionamento della macchina, si è optato per mantenere aperta la pompa di abrasivo. In questo modo è, inoltre, possibile facilitare la sperimentazione: per fori maggiori al numero 3, il tempo di tre minuti utilizzato per il cronometraccio, necessitava infatti il rimbocco manuale della tramoggia con ulteriore abrasivo; mantenendo aperta la pompa, l'abrasivo viene automaticamente aggiunto alla tramoggia.

Una volta posizionato il disco al di sotto della tramoggia sul foro voluto, si apre la valvola che regola l'afflusso di abrasivo e si lascia scorrere l'abrasivo stesso per il tempo di tre minuti; infine, si procede con la pesatura dell'abrasivo raccolto sotto la tramoggia.

Nel processo di taratura si deve tenere conto del fatto che a monte del disco tarato è presente una valvola pneumatica a membrana comandata dal controllo numerico in apertura e chiusura.

Il funzionamento della valvola pneumatica è caratterizzato da un transitorio d'apertura trascurabile e da un transitorio di chiusura più rilevante; per eliminarne l'influenza, il contenitore per la raccolta dell'abrasivo è stato tolto nel momento in cui si è dato l'ordine di chiusura.

Sintetizzando: il processo di taratura per semplice gravità viene effettuato come segue.

- Regolazione del disco sul foro considerato;
- Posizionamento del contenitore per la raccolta dell'abrasivo al di sotto della tramoggia;
- Apertura dell'abrasivo tramite controllo numerico;
- Inizio del cronometraccio in contemporanea all'apertura dell'abrasivo per un tempo prefissato pari a tre minuti;
- Spostamento del contenitore posto sotto la tramoggia al termine del tempo prefissato;
- Chiusura dell'abrasivo;
- Pesatura dell'abrasivo raccolto.

Per ciascun foro vengono eseguite quattro prove, i cui risultati sono presentati nella tabella sottostante:

Tabella A. 2 Risultati della taratura a getto spento

Foro	MIS 1	MIS 2	MIS 3	MIS 4	MEDIA	dev. stand.	Min.	g/min
1	200,73	202,13	197,94	201,68	200,62	1,880	3 min	66,87
2	478,22	478,56	478,66	471,51	476,74	3,490	3 min	158,91
3	766,66	774,58	769,8	771,11	770,54	3,279	3 min	256,85
4	960,42	628,39	607,31	952,86	787,25	195,814	3 min	262,42
5	630,72	611,47	1078,82	626,06	736,77	228,182	3 min	245,59
6	632,9	634,54	631,46	625,13	631,01	4,115	3 min	210,34
7	634,28	613,44	629,14	619,08	623,99	9,448	3 min	208,00
8	635,15	645,24	621,27	636,82	634,62	9,935	3 min	211,54

Data la variabilità dei risultati per i fori 4 e 5, la prova è stata eseguita per altre due volte.

Tabella A. 3 ripetizione della misura per i fori 4 e 5

	MISURA 5	MISURA 6	Minuti
FORO 4	956,98	963,18	3 min
FORO 5	1082,83	1064,83	3 min

Ciò che si può dedurre dai risultati è che non sempre l'abrasivo riesce a fluire uniformemente dalla tramoggia nella luce di passaggio: questo fatto può essere dovuto alla formazione di un cono stagnante di abrasivo nella tramoggia stessa, in grado di impedire il passaggio di portate costanti di particelle.

Tralasciando i fenomeni di intasamento, la portata maggiore risulta in modo evidente dal passaggio dell'abrasivo dai fori 4 e 5. Per fori successivi, che presentano, da misurazione, diametri maggiori, il valore di portata si assesta a valori pressoché costanti e inferiori a quelli per i diametri minori dei fori 4 e 5.

Dopo aver smontato il disco forato dalla tramoggia, si è notato che a valle del foro di regolazione la luce che consente il passaggio dell'abrasivo fino alla camera di miscelazione è di misura inferiore rispetto ai fori successivi al 5.

A getto spento, tale luce controlla, di fatto, la taratura: in questo modo la reale portata è controllata e imposta dal foro a valle del disco forato.



Figura A. 2 Disco forato per la regolazione dell'abrasivo

A.3 Taratura a getto aperto

Dopo una prima stima sul quantitativo di abrasivo in grado di fluire per semplice gravità, si procede con la taratura a getto aperto.

La sperimentazione richiede in questo caso di operare a pompa di abrasivo spenta e a tramoggia aperta, per controllare il livello raggiunto dall'abrasivo nella tramoggia stessa.

Conoscendo la quantità di abrasivo nella tramoggia, cronometrandone il tempo impiegato per lo svuotamento e misurando il residuo di abrasivo non smaltito nel tempo cronometrato, è possibile misurare la carica netta effettivamente smaltita e, a seguire, la portata.

Per fare questo la tramoggia viene caricata con un quantitativo noto di abrasivo pari a 500 g; quantità di abrasivo inferiori rendono troppo veloce lo svuotamento per fori superiori al numero 5 e, per conseguenza, il transitorio di chiusura dell'abrasivo risulterebbe non trascurabile.

Dopo la carica della tramoggia si procede all'accensione del getto d'acqua e dell'abrasivo tramite controllo numerico.

Il cronometraggio del tempo che consente alla tramoggia di svuotarsi inizia con la contemporanea accensione manuale dell'abrasivo tramite il comando ON-OFF posto sul display e termina quando l'abrasivo lascia riaffiorare la maglia del setaccio posta nella tramoggia; contemporaneamente avviene lo spegnimento dell'abrasivo tramite comando manuale e successivamente lo spegnimento del getto da controllo numerico.

Sintetizzando la procedura risulta quindi:

- Caricamento della tramoggia con un quantitativo noto di abrasivo pari a 500 g;

- Apertura del getto d'acqua;
- Apertura dell'abrasivo;
- Cronometraggio dell'intervallo temporale che intercorre dall'apertura dell'abrasivo allo svuotamento della tramoggia fino a vedere la maglia del setaccio nella tramoggia stessa;
- Spegnimento del getto d'acqua;
- Raccolta in un contenitore dell'abrasivo rimasto nella tramoggia;
- Pesatura del quantitativo di abrasivo rimasto nella tramoggia e raccolto nel contenitore;
- Calcolo della carica netta effettivamente smaltita;
- Calcolo della portata di abrasivo nel tempo cronometrato.

a)



b)



Figura A. 3 a) l'abrasivo lascia riaffiorare la maglia del setaccio: questo istante corrisponde allo stop nel cronometraggio; b) raccolta dell'abrasivo residuo in un contenitore, per procedere alla pesatura successiva.

Per ottimizzare l'utilizzo di abrasivo, la taratura viene effettuata per i fori dispari 1-3-5-7 mantenendo costanti:

- il livello di pressione: livello "alto", pari a 350 MPa,

- il numero della mesh# pari a 80 (valore diffuso in commercio e disponibile in laboratorio),
- il diametro del focalizzatore e dell'ugello primario viene fatto variare su due livelli e gli ugelli vengono accoppiati per ottenere il rapporto ottimale D_{foc} / D_{ug} pari a 3 [Cha91]. Le due coppie risultano quindi: 0,76-0,25 mm; 1-0,30 mm

La scelta di effettuare le prove per un solo valore di pressione e per fori dispari è dettata dalla possibilità di limitare il consumo di abrasivo. Dall'analisi dei risultati si valuterà l'influenza sulla risposta dei parametri variabili in gioco ($Dug+Dfoc$ e numero del foro). Le conclusioni saranno la base per una sperimentazione di verifica successiva sul livello "basso" di pressione pari a 250 MPa.

La casualizzazione nell'ordine degli esperimenti è fondamentale nella programmazione del piano sperimentale. In alcuni casi si può incorrere nella presenza di fattori che rendono complicata la completa casualizzazione: il continuo cambiamento degli ugelli può non assicurare l'uniformità di condizioni per tutte le prove oltre a una possibile rottura degli stessi.

Per questo motivo le prove sono suddivise in due blocchi, corrispondenti ai livelli del fattore $Dug+Dfoc$ [Mon01].

Tabella A. 4 Fattori variabili e costanti per le prove di taratura

FATTORI VARIABILI	
<i>N. ro Foro</i>	1-3-5-7
<i>Dug+Dfoc</i>	0,76-0,25 mm; 1-0,30 mm
FATTORI COSTANTI	
<i>Pressione</i>	350 MPa
<i>Mesh #</i>	80

Le ripetizioni per ciascuna condizione sono fissate a 3, per un totale di 24 prove casualizzate in due blocchi da 12 prove ciascuna.

Tabella A. 5 Casualizzazione delle prove sperimentali, 350 MPa

BLOCCO 1			BLOCCO 2		
Dug+Dfoc (mm)	Pressione (MPa)	Foro	Dug+Dfoc (mm)	Pressione (MPa)	Foro
0,76	350	1	1	350	1
0,76	350	1	1	350	3
0,76	350	3	1	350	7
0,76	350	3	1	350	5
0,76	350	5	1	350	3
0,76	350	7	1	350	7
0,76	350	7	1	350	3
0,76	350	5	1	350	1
0,76	350	7	1	350	5
0,76	350	5	1	350	7
0,76	350	1	1	350	5
0,76	350	3	1	350	1

A.3.1 Analisi dei risultati

La tabella riportata sotto sintetizza i risultati ottenuti nella sperimentazione: i calcoli intermedi sono riportati in seguito nel paragrafo A.4.

Tabella A. 6 Risultati della sperimentazione a 350 MPa

Dug+Dfoc (mm)	Pressione (MPa)	Num. foro	Portata (g/min)				
			Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	Dev. Stand.
0,76	350	1	75,09	75,44	79,18	76,57	2,27
0,76	350	3	276,48	278,12	284,8	279,80	4,41
0,76	350	5	387,2	380,94	395,52	387,89	7,31
0,76	350	7	566,63	555,57	585,1	569,10	14,92
1	350	1	90,35	84,64	82,05	85,68	4,25
1	350	3	279,8	285,92	288,87	284,86	4,63
1	350	5	391,09	392,07	387,28	390,15	2,53
1	350	7	547,69	561,77	578,81	562,76	15,58

È possibile sintetizzare graficamente i dati attraverso l'andamento della portata misurata rispetto al valore di foro e ugello focalizzatore.

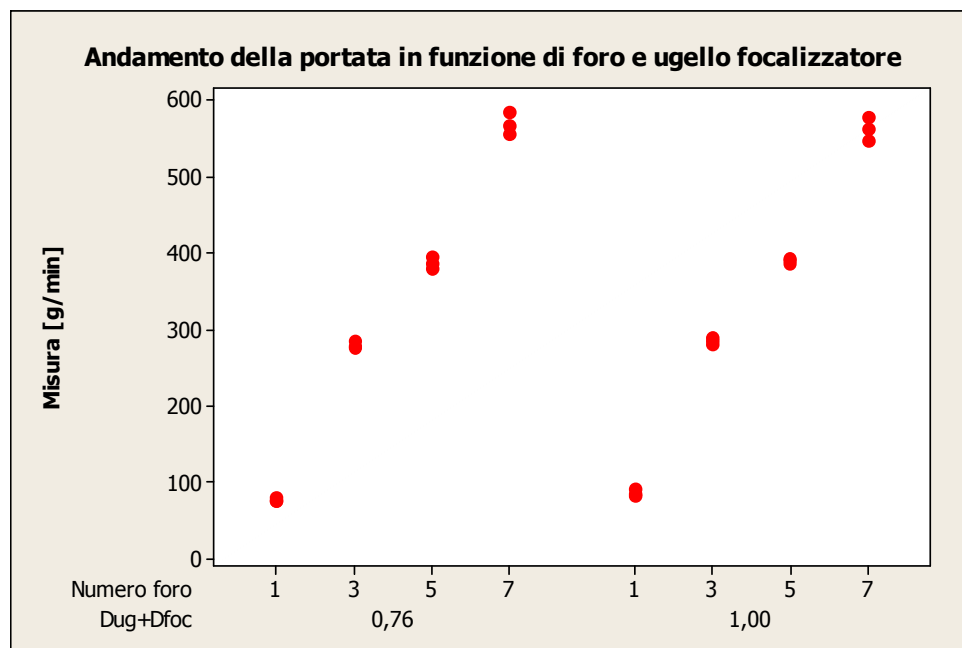


Figura A. 4 Andamento della portata in funzione di foro e *Dug+Dfoc*

L'andamento dei valori di portata a getto aperto corregge la prima stima ottenuta dalla taratura a getto chiuso. I valori di portata, che dalla prima stima sembravano assestarsi dal foro n. ro 5, risultano invece sempre crescenti dalla sperimentazione a getto aperto.

Una prima indagine grafica testimonia il medesimo andamento della portata misurata per entrambi i livelli del fattore *Dug+Dfoc* (0,76 e 1 m). Come previsto i valori di portata sono crescenti con fattore *Numero del foro*, mentre la variabilità della risposta sembra trascurabile rispetto al livello del fattore *Dug+Dfoc*.

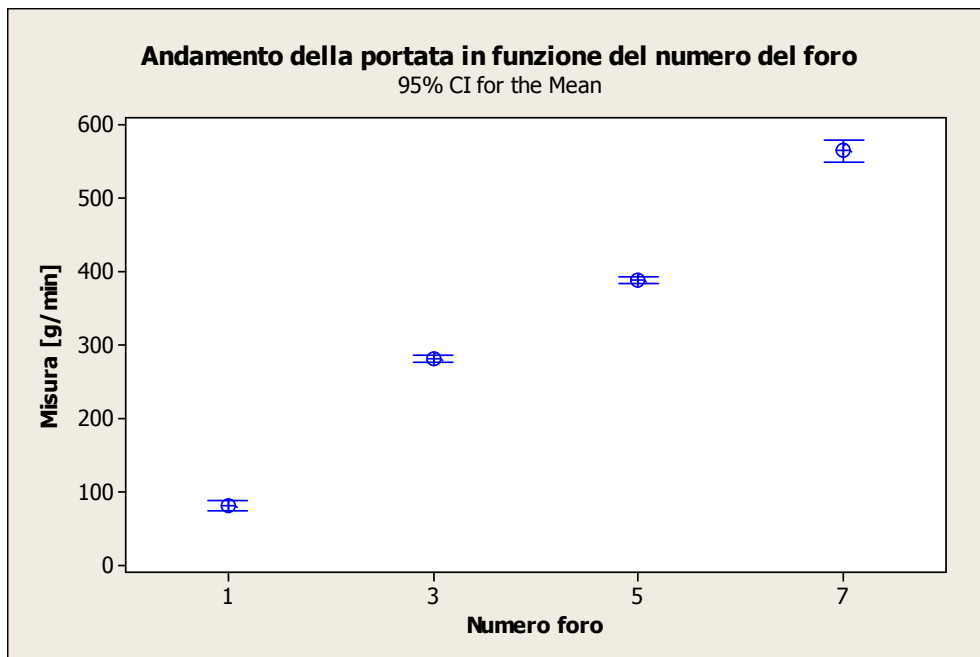


Figura A. 5 Andamento della portata in funzione del n. ro del foro

Per avere effettiva conferma della non influenza del valore dell'ugello si procede all'analisi ANOVA, tramite software Minitab®.

Una prima indagine preliminare viene effettuata graficamente sia per stimare l'effetto medio del singolo fattore che l'effetto dell'interazione dei fattori.

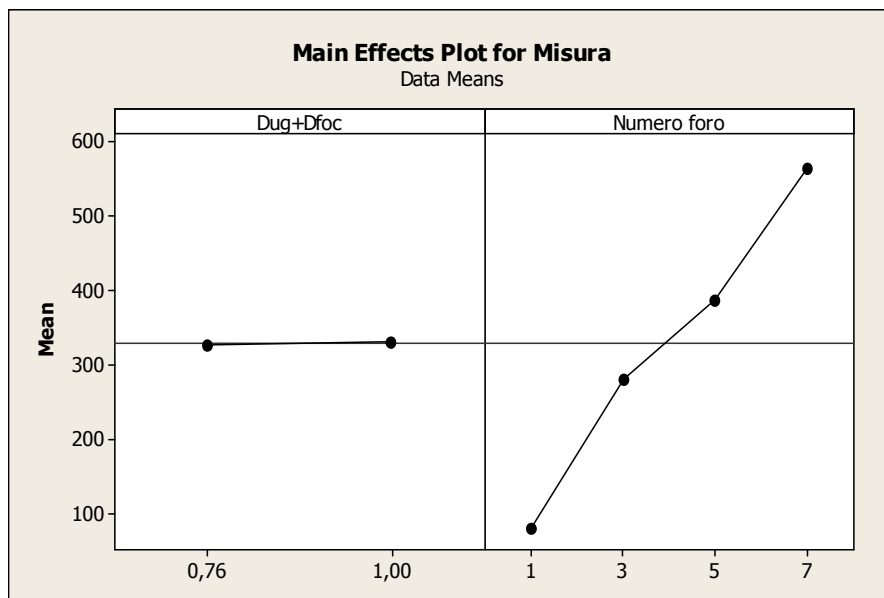


Figura A. 6 Effetto medio dei fattori *Dug+Dfoc* e Numero foro

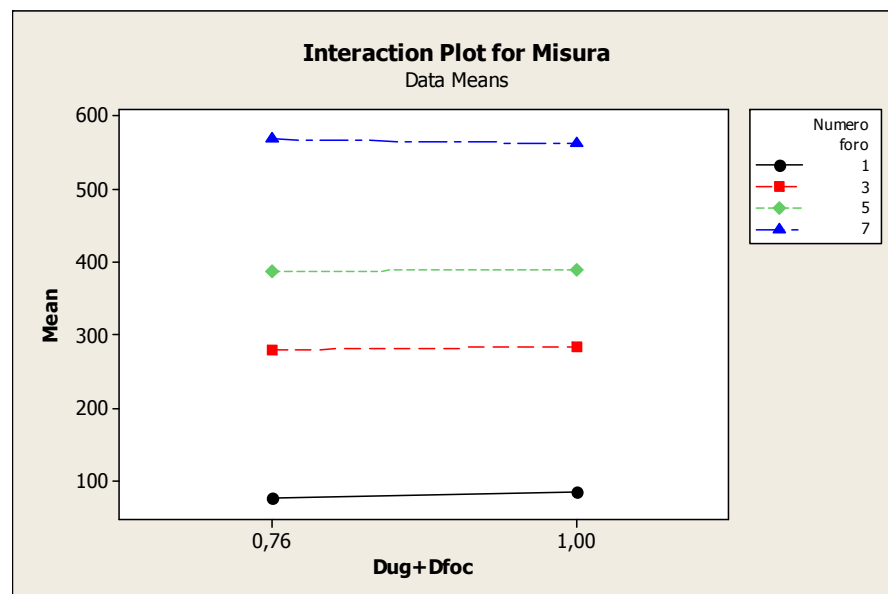


Figura A. 7 Effetto medio dell'interazione tra i fattori *Dug+Dfoc* e Numero del foro

Two-way ANOVA: Misura versus Numero foro; Dug+Dfoc

Source	DF	SS	MS	F	P
Numero foro	3	740133	246711	3349,07	0,000
Dug+Dfoc	1	38	38	0,52	0,482
Interaction	3	193	64	0,87	0,476
Error	16	1179	74		
Total	23	741543			

S = 8,583 R-Sq = 99,84% R-Sq(adj) = 99,77%

L'ANOVA dimostra che c'è evidenza statistica per affermare che il fattore "Numero foro" ha influenza sulla risposta "portata di abrasivo", come prevedibile, mentre il fattore *Dug+Dfoc* non influenza la risposta.

La verifica delle ipotesi di *normalità dei residui*, *omogeneità della varianza* e *indipendenza dei residui* per la validità dell'ANOVA viene riportata in seguito (cfr. A.4).

Le future tarature a livello "basso" di pressione (250 MPa) verranno effettuate tralasciando il fattore *Dug+Dfoc* del quale è stata valutata la non influenza.

A.3.2 Modello per la taratura

Dall'analisi dei dati sperimentali ottenuti è possibile ricavare un modello generale che consente di ottenere il valore della portata per ciascuno degli otto fori del disco regolabile.

Regression Analysis: Misura versus Numero foro

The regression equation is
 Misura = 17,38 + 78,05 Numero foro

S = 21,7815 R-Sq = 98,6% R-Sq(adj) = 98,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	731105	731105	1541,00	0,000
Error	22	10438	474		

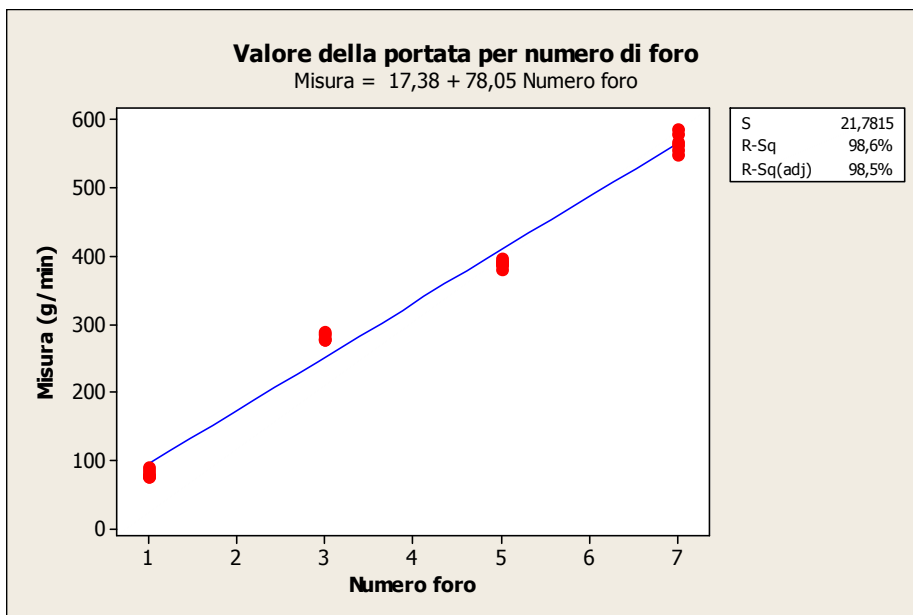


Figura A. 8 Modello lineare per la portata di abrasivo (g/min)

Applicando il modello ottenuto dalla regressione lineare si trovano i valori di portata associati a ciascun foro.

Tabella A. 7 Valore di portata di abrasivo (g/min) a seconda del numero del foro

FORO	PORTATA g/min
1	95
2	173
3	252
4	330
5	408
6	486
7	564
8	642

Per completezza la sperimentazione deve essere terminata con le misurazioni della portata per pressioni a 250 MPa, valutando l'influenza del fattore sulla portata di abrasivo. La trascurabilità del fattore pressione sul fenomeno fisico consentirebbe di applicare il modello di taratura a qualsiasi valore di pressione.

A.3.3 Verifica dell'effetto della pressione

Per poter valutare significatività del fattore *Pressione* sulla risposta “portata di abrasivo”, è necessario impostare una sperimentazione a valori di pressione pari a 250 MPa.

Poiché dalle analisi precedenti (cfr. A.3.1) il fattore “Dug+Dfoc” non è risultato significativo, le prove vengono eseguite per un solo livello del fattore, pari a 0,76 mm; in questo modo è possibile limitare e ottimizzare il consumo di abrasivo.

Vengono compiute tre ripetizioni per ciascun foro dispari, per un totale di 12 misurazioni casualizzate e riportate nella tabella seguente.

Tabella A. 8 Casualizzazione delle condizioni sperimentali a 250 MPa

Dug+Dfoc (mm)	Pressione (MPa)	Numero foro
0,76	250	3
0,76	250	1
0,76	250	3
0,76	250	5
0,76	250	5
0,76	250	3
0,76	250	5
0,76	250	1
0,76	250	1
0,76	250	7
0,76	250	7
0,76	250	7

I risultati ottenuti sono sintetizzati in seguito e i calcoli intermedi sono riportati al paragrafo A.4.

A.3.3.1 Confronto risultati a 250 MPa e 350 MPa

Le tabelle A.9 e A.10 riportano i risultati di portata (g/min) ottenuti per entrambe le sperimentazioni a 350 e 250 MPa. È possibile calcolare, inoltre, il valore dell'incertezza di misura associata a ciascuna condizione.

Tabella A. 9 Incertezza di misura sul valore di portata per ciascun livello del fattore numero foro, pressione 250 MPa e Dug+Dfoc pari a 0,76 mm

P MPa	Foro	Portata (g/min)					INC.68%	INC.95%	INC.99,7%
		Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	Dev.Stand.			
250	1	106,61	81,25	80,67	89,51	12,10	6,98	13,97	20,95
250	3	302,15	292,34	283,55	292,68	7,59	4,38	8,77	13,15
250	5	413,32	391,96	400,43	401,91	8,78	5,07	10,14	15,21
250	7	600,59	588,29	584,48	591,12	6,87	3,97	7,94	11,90

La sperimentazione a 250 MPa è stata condotta fissando il livello del fattore Dug+Dfoc a 0,76 mm.

Tabella A. 10 Incertezza di misura sul valore di portata di abrasivo per ciascuna condizione sperimentale a 350 MPa

Dug+Dfoc mm	P MPa	Foro	Portata (g/min)					INC. 68%	INC. 95%	INC 99,7%
			Mis 1	Mis 2	Mis 3	Media	Dev.Stand.			
0,76	350	1	75,09	75,44	79,18	76,57	2,27	1,31	2,62	3,93
0,76	350	3	276,48	278,12	284,8	279,80	4,41	2,54	5,09	7,63
0,76	350	5	387,2	380,94	395,52	387,89	7,31	4,22	3,45	12,67
0,76	350	7	566,63	555,57	585,1	569,10	14,92	8,61	17,23	25,84
1	350	1	90,35	84,64	82,05	85,68	4,25	2,45	4,90	7,36
1	350	3	279,8	285,92	288,87	284,86	4,63	2,67	5,34	8,01
1	350	5	391,09	392,07	387,28	390,15	2,53	1,46	2,92	4,38
1	350	7	547,69	561,77	578,81	562,76	15,58	9,00	17,99	26,99

Confrontando i risultati delle condizioni sperimentali che prevedono medesimo livello nel fattore Dug+Dfoc (0,76 mm) a diverse pressioni, si può notare che la deviazione standard del processo è maggiore per le misurazioni a 250 MPa, così come per i valori di incertezza di misura.

Per il foro 7 il valore di deviazione standard e di incertezza di misura è superiore relativamente alle prove sperimentali eseguite a 350 MPa. Da questa prima analisi risulta che il processo è controllabile e presenta minore variabilità per pressioni elevate, pari a 350 MPa (cfr. tabelle A.9 e A.10).

Gli intervalli di misura al 95% ottenuti sperimentalmente per ciascun foro a 250 e 350 MPa e Dug+Dfoc pari a 0,76 mm, sono sovrapponibili in entrambi i casi sopra descritti, eccetto che per il foro numero 5 i cui intervalli di misura sono sovrapponibili valutando l'incertezza stessa al 99,7%.

Poiché il fattore *Dug+Dfoc* non è risultato significativo dalla sperimentazione a 350 MPa, è possibile calcolare un unico valore medio di portata di abrasivo al variare del livello del fattore *Numero di Foro* alla pressione di 350 MPa.

Il valore della media campionaria è stimato mediando il risultato ottenuto dalle ripetizioni per ciascun livello del fattore *Numero foro* (6 ripetizioni in totale: tre ripetizioni per Dug+Dfoc pari a 0,76 mm e tre ripetizioni per Dug+Dfoc pari a 1 mm).

Tabella A. 11 Incertezza di misura per ciascun livello del fattore Numero Foro, Pressione 350 MPa

Numero Foro	MEDIA CAMP g/min	DEV. STAND	INC. AL 68% g/min	INC. AL 95% g/min	INC. AL 99,7% g/min
1	81	6	2	5	7
3	282	5	2	4	6
5	389	5	2	4	6
7	566	14	6	11	17

È possibile sintetizzare i risultati nella tabella seguente A.11, in cui i valori di media campionaria, deviazione standard campionaria e incertezze di misura sono arrotondati all'unità:

Tabella A. 12 Incertezza di misura calcolate per ciascun livello del fattore Pressione e Numero del foro

N. RO FORO	MEDIA CAMP (g/min)	DEV.STAND	PRESSIONE (MPa)	INC.68%	INC.95%	INC.99,7%
1	81	6	350	2	5	7
3	282	5	350	2	4	6
5	389	5	350	2	4	6
7	566	14	350	6	11	17
1	90	12	250	7	14	21
3	293	8	250	4	9	13
5	402	9	250	5	10	15
7	591	7	250	4	8	12

Gli intervalli di misura al 95%, ottenuti sperimentalmente per ciascun foro a 250 e 350 MPa, sono sovrapponibili in entrambi i casi sopra descritti, eccetto che per il foro numero 7 i cui intervalli di misura sono sovrapponibili valutando l'incertezza stessa al 99,7%.

A.3.3.2 Analisi Grafica e ANOVA

Per valutare l'effetto dei fattori *Pressione* e *Numero del foro* si considerano i valori della risposta ottenuti dalla sperimentazione condotta a 250 MPa e *Dug+Dfoc* pari a 0,76 mm (cfr. tabella A.10) e con i valori della risposta ottenuti per medesimo livello del fattore *Dug+Dfoc* dalla sperimentazione condotta a 350 MPa (cfr. tabella A.9), per un totale di 24 dati.

È possibile sintetizzare graficamente i dati dalle due campagne sperimentali attraverso l'andamento della portata misurata rispetto al valore di pressione e di numero di foro.

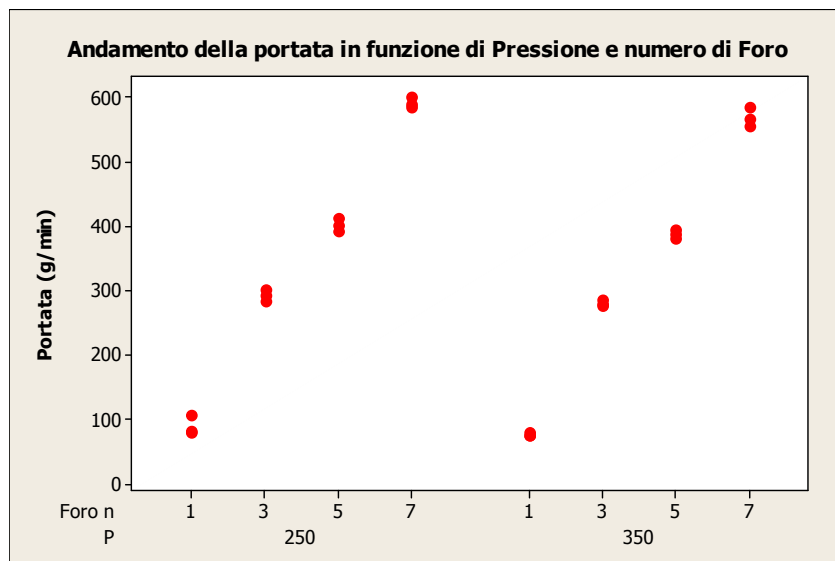


Figura A. 9 Andamento della portata di abrasivo in funzione della pressione e del numero di foro

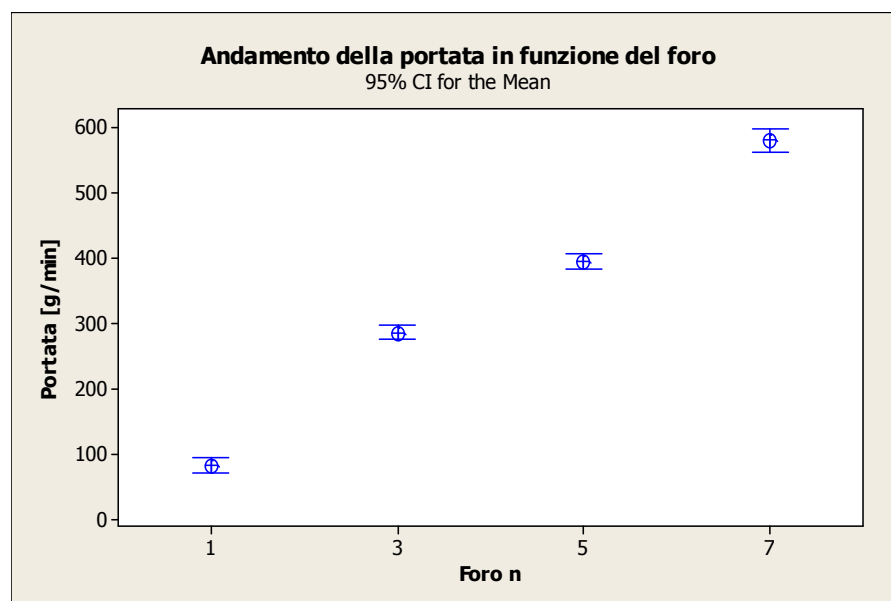


Figura A. 10 Andamento della portata di abrasivo del numero di foro

L'andamento della portata di abrasivo in funzione del numero del foro è crescente e i valori individuati dalla sperimentazione per entrambe le pressioni non mostrano variazioni notevoli (Fig.A.9); anche la distribuzione dei dati

attorno alla media per entrambe le pressioni risulta compatta per ciascun foro (Fig.A.10).

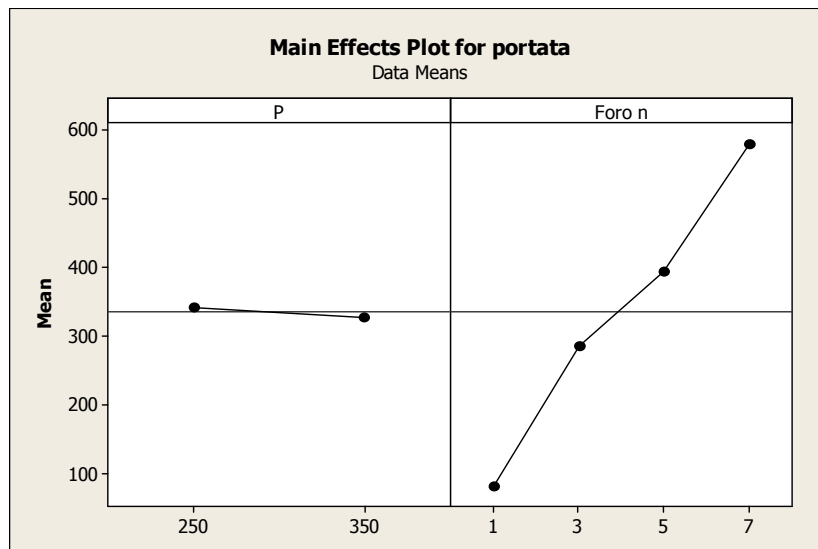


Figura A. 11 Effetto medio dei fattori Pressione e Numero del foro sulla Portata di abrasivo

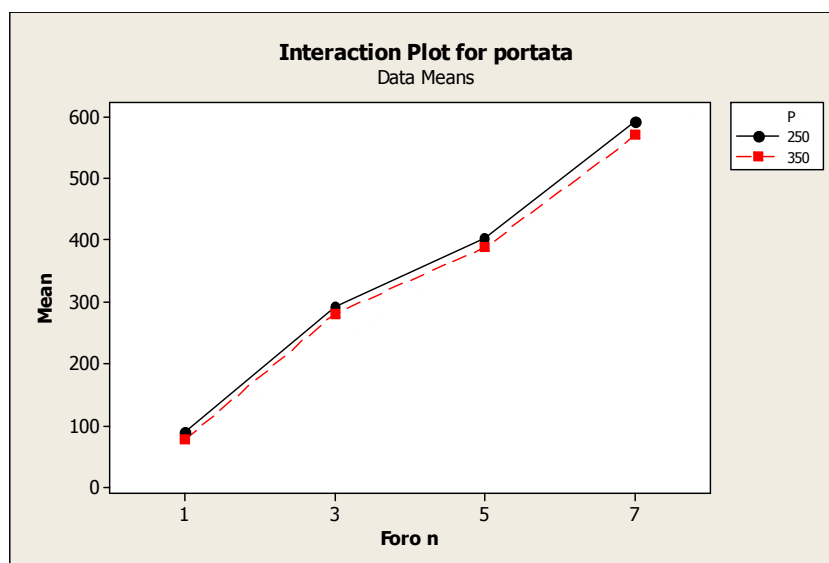


Figura A. 12 Effetto medio dell'interazione tra i fattori Pressione e Numero del foro sulla Portata di abrasivo

Two-way ANOVA: portata versus P; Foro n

Source	DF	SS	MS	F	P
P	1	1435	1435	14,47	0,002
Foro n	3	777137	259046	2612,47	0,000
Interaction	3	87	29	0,29	0,830
Error	16	1587	99		
Total	23	780246			

S = 9,958 R-Sq = 99,80% R-Sq(adj) = 99,71%

L'ANOVA non conferma quanto deducibile da una prima indagine grafica dalla quale l'effetto medio del fattore "Pressione" sembra trascurabile; viene confermata, invece, la non influenza dell'interazione dei due fattori.

Dall'ANOVA non c'è quindi evidenza statistica per affermare che il fattore "Pressione" non sia influente sul processo di taratura.

Analizzando, però, il fenomeno dal punto di vista fisico l'unico fattore rilevante nella sperimentazione è rappresentato dal fattore "Numero del foro" il cui effetto sulla variazione della portata è notevolmente superiore rispetto alla variazione della portata stessa a parità di numero di foro, variando solamente la pressione. Inoltre è possibile verificare che i valori di portata di abrasivo sono mediamente superiori a pressione pari a 250 MPa rispetto a 350 MPa (cfr. tabelle A.9 e A.10).

Come ulteriore verifica sul processo, si procede all'individuazione di un modello empirico lineare che tenga conto di entrambi i fattori "Numero del foro" e "Pressione" attraverso una regressione lineare compiuta sui 24 valori di portata di abrasivo ottenuti dalle sperimentazioni a pressione 250 e 350 MPa (12 dati per pressione 250 MPa, ugello 0,76 mm e 12 dati per pressione 350 MPa, ugello 0,76 mm).

Regression Analysis: portata versus Pressione; Numero foro

The regression equation is
 portata = 62,5 - 0,155 Pressione + 80,0 Numero foro

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	62,49	29,54	2,12	0,047
Pressione	-0,15464	0,09319	-1,66	0,112
Numero foro	79,993	2,084	38,39	0,000

S = 22,8262 R-Sq = 98,6% R-Sq(adj) = 98,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	769304	384652	738,24	0,000
Residual Error	21	10942	521		
Total	23	780246			

Source	DF	Seq SS
Pressione	1	1435
Numero foro	1	767869

Il coefficiente relativo al fattore *Pressione* risulta trascurabile all'interno del modello di regressione.

Per questo motivo il modello presentato al paragrafo precedente (cfr A.3.3), non tenendo conto del fattore "Pressione", può essere ritenuto valido, poiché la considerazione del fattore stesso nel modello di regressione porta comunque a un coefficiente trascurabile.

A.3.4 Conclusioni

Nella scelta del modello di taratura si propende alla considerazione del modello con il solo fattore "Numero di foro" poiché:

- Gli intervalli di misura ottenuti sperimentalmente per i due livelli di pressione sono sovrapponibili: la pressione non gioca quindi un ruolo decisivo nella diversificazione delle portate considerando l'incertezza sulle misure effettuate.
- I risultati sperimentali dimostrano maggior stabilità e controllabilità del processo a 350 MPa.
- Nonostante l'analisi ANOVA mostri significatività del fattore "Pressione", il p-value nel modello di regressione esclude la significatività dello stesso.

Inoltre bisogna sottolineare che a livello industriale è consuetudine lavorare a pressioni pari a 350 MPa. Nello studio del massimo spessore tagliabile, nel taglio delle schiume metalliche, la scelta di operare a pressione pari a 350 MPa risulta vincente rispetto al taglio a 250 MPa a parità di variazione dei restanti fattori (ugello, velocità avanzamento, portata), rafforzando questa scelta iniziale (cfr. Capitolo 4).

A.4 Tabelle e verifica delle ipotesi dell'ANOVA

Questa sezione è dedicata alla raccolta e all'analisi dei dati relativi alla sperimentazione per il processo di taratura, le cui modalità sono state illustrate nella parte precedente (cfr.A.3).

Le tabelle sono organizzate per raccogliere le misurazioni e successivamente calcolare il valore della portata in g/min.

La sperimentazione è organizzata in due fasi: una prima indagine a 350 MPa e una seconda indagine a 250 MPa.

In seguito sono riportate le tabelle e i dati per entrambe le sperimentazioni.

Le tabelle relative alla sperimentazione di taratura (raccolta misurazioni e pesature di abrasivo) sono organizzate riportando:

- il valore del diametro dell'ugello focalizzatore considerando l'accoppiamento $D_{ug}+D_{foc}$,

- il valore della pressione,
- la carica di partenza della tramoggia,
- il tempo cronometrato per lo svuotamento della tramoggia fino a vedere le maglie del setaccio posizionato nella tramoggia stessa,
- il valore del residuo di abrasivo,
- il calcolo della carica netta smaltita nel tempo cronometrato,
- il valore di portata in g/min.

Ad ogni ugello focalizzatore viene associato un preciso ugello primario, in modo da rendere verificato il rapporto ottimale D_{foc}/D_{ug} .

Tabella A. 13 Combinazione 1 per l'accoppiamento tra ugello primario e ugello focalizzatore

Daimetro ugello primario	0,01 pollici	0,25 mm
Diametro focalizzatore	0,03 pollici	0,76 mm
Rapporto D_{foc}/D_{ug}	3	

Tabella A. 14 Combinazione 2 per l'accoppiamento tra ugello primario e ugello focalizzatore

Diametro ugello primario	0,012 pollici	0,30 mm
Daimetro focalizzatore	0,04 pollici	1 mm
Rapporto D_{foc}/D_{ug}	3,33	

Per ogni sperimentazione vengono anche riportate le analisi che confermano la validità dell'ANOVA applicata in più occasioni per stimare l'influenza dei fattori considerati. Le ipotesi di validità dell'ANOVA sono organizzate in *normalità dei residui, omogeneità della varianza e indipendenza dei residui*.

A.4. 1 Sperimentazione 350 MPa, Calcolo portata di abrasivo (g/min)

Tabella A. 15 Calcolo della portata (g/min) sperimentazione a pressione di 350 MPa

Dug+Dfoc (mm)	P (MPa)	Foro n	Carica (g)	T tot (sec)	Residuo (g)	Carica netta (g)	g/sec	g/min
0,76	350	1	500,44	307	116,21	384,23	1,25	75,09
0,76	350	1	500,3	312	108,02	392,28	1,26	75,44
0,76	350	3	500,63	87	99,73	400,9	4,61	276,48
0,76	350	3	500,32	86	101,68	398,64	4,64	278,12
0,76	350	5	500,6	63	94,04	406,56	6,45	387,20
0,76	350	7	500,11	43	85,15	414,96	9,44	566,63
0,76	350	7	500,78	49	40,49	460,29	9,26	555,57
0,76	350	5	500,8	65	88,12	412,68	6,35	380,94
0,76	350	7	500,44	42	90,38	410,06	9,75	585,10
0,76	350	5	500,18	61	98,07	402,11	6,59	395,52
0,76	350	1	500,08	301	102,85	397,23	1,32	79,18
0,76	350	3	500,16	91	68,22	431,94	4,75	284,80
1	350	1	500,38	267	97,19	403,19	1,51	90,35
1	350	3	500,15	89	80,47	419,68	4,72	279,80
1	350	7	500,64	50	39,76	460,88	9,13	547,69
1	350	5	500,24	65	76,56	423,68	6,52	391,09
1	350	3	500,09	85	95,03	405,06	4,77	285,92
1	350	7	500,55	45	75,1	425,45	9,36	561,77
1	350	3	500,01	85	90,78	409,23	4,81	288,87
1	350	1	500,36	270	119,48	380,88	1,41	84,64
1	350	5	500,13	64	81,92	418,21	6,53	392,07
1	350	7	500,26	44	70,3	429,96	9,65	578,81
1	350	5	500,1	64	87	413,1	6,45	387,28
1	350	1	500,46	282	114,81	385,65	1,37	82,05

A.4.2 Analisi dell'influenza dei fattori “Dug+Dfoc” e “Numero del foro”

La tabella in seguito riporta i fattori (“Dug+Dfoc”, “Numero Foro”) e la risposta “portata di abrasivo” (“Misura”) sui quali viene effettuata l’ANOVA.

Tabella A. 16 Valore dei fattori e della risposta per l’analisi dell’influenza dei fattori Dug+Dfoc e numero del foro

Dug+Dfoc (mm)	Pressione (MPa)	Foro n	Misura (g/min)	RES1	FITS1
0,76	350	1	75,09	-1,47763	76,57144
0,76	350	1	75,44	-1,13298	76,57144
0,76	350	3	276,48	-3,31701	279,7998
0,76	350	3	278,12	-1,67883	279,7998
0,76	350	5	387,20	-0,68447	387,8845
0,76	350	7	566,63	-2,47311	569,1003
0,76	350	7	555,57	-13,53	569,1003
0,76	350	5	380,94	-6,94909	387,8845
0,76	350	7	585,10	16,00312	569,1003
0,76	350	5	395,52	7,63356	387,8845
0,76	350	1	79,18	2,610616	76,57144
0,76	350	3	284,80	4,99584	279,7998
1	350	1	90,35	4,667182	85,68019
1	350	3	279,80	-5,06276	284,8651
1	350	7	547,69	-15,0691	562,7578
1	350	5	391,09	0,941779	390,1475
1	350	3	285,92	1,059617	284,8651
1	350	7	561,77	-0,98399	562,7578
1	350	3	288,87	4,003146	284,8651
1	350	1	84,64	-1,04019	85,68019
1	350	5	392,07	1,924423	390,1475
1	350	7	578,81	16,0531	562,7578
1	350	5	387,28	-2,8662	390,1475
1	350	1	82,05	-3,627	85,68019

A.4.2.1 Verifica delle ipotesi di applicabilità dell'ANOVA

Per l'applicabilità dell'ANOVA si devono verificare le ipotesi di normalità dei residui, omogeneità della varianza, indipendenza dei residui.

Normalità dei residui.

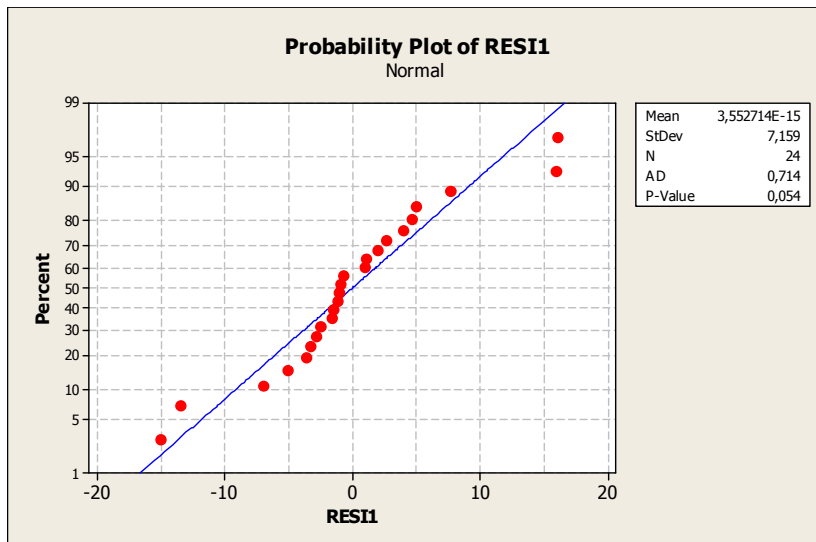


Figura A. 13 Normalità dei residui, sperimentazione 350 MPa

Omogeneità della varianza

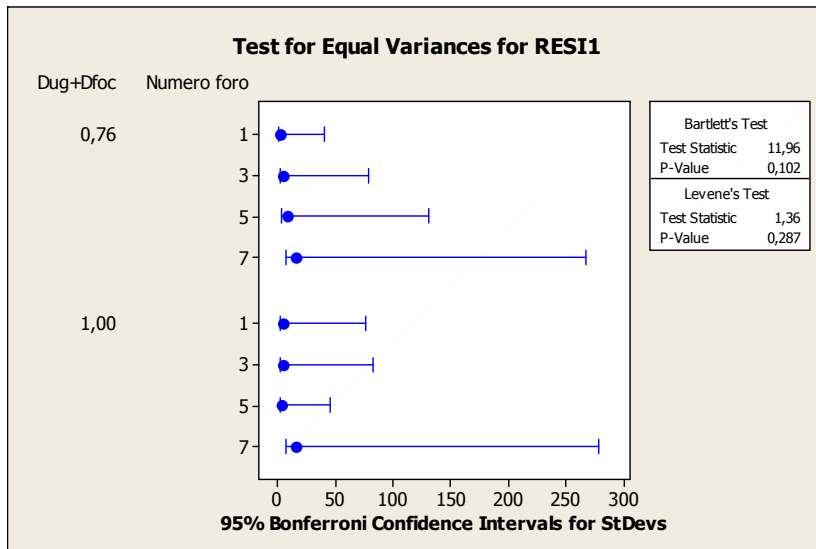


Figura A. 14 Omogeneità della varianza, sperimentazione a 350 MPa

Indipendenza dei residui

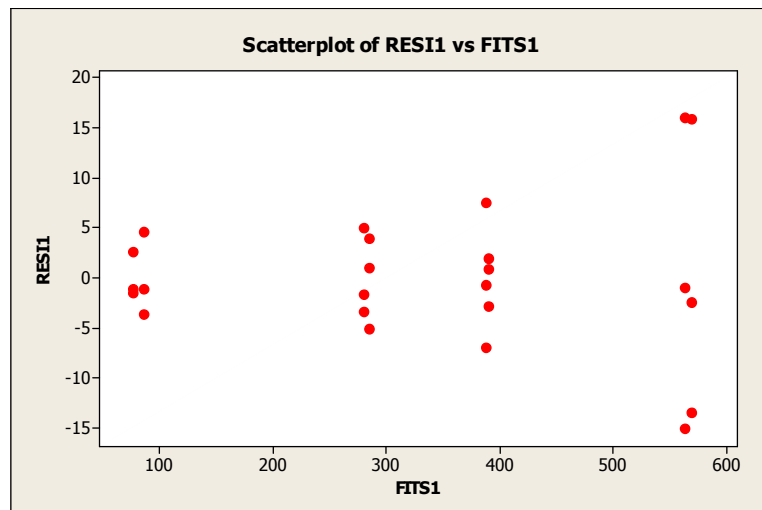


Figura A. 15 Indipendenza dei residui, sperimentazione 350 MPa

A.4.3 Sperimentazione 250 MPa, Calcolo portata di abrasivo (g/min)

Tabella A. 17 Calcolo della portata (g/min) sperimentazione a pressione di 350 MPa

Dug (mm)	P (MPa)	Foro n	Carica (g)	T tot (sec)	Residuo (g)	Carica netta (g)	g/sec	g/min
0,76	250	3	500,84	85	72,8	428,04	5,04	302,15
0,76	250	1	500,57	220	109,66	390,91	1,78	106,61
0,76	250	3	500,3	86	81,28	419,02	4,87	292,34
0,76	250	5	500,23	63	66,24	433,99	6,89	413,32
0,76	250	5	500,26	64	82,17	418,09	6,53	391,96
0,76	250	3	500,52	90	75,19	425,33	4,73	283,55
0,76	250	5	500,36	64	73,23	427,13	6,67	400,43
0,76	250	1	500,3	298	96,78	403,52	1,35	81,25
0,76	250	1	500,43	305	90,37	410,06	1,34	80,67
0,76	250	7	500,63	44	60,2	440,43	10,01	600,59
0,76	250	7	500,01	44	68,6	431,41	9,80	588,29
0,76	250	7	500,18	44	71,56	428,62	9,74	584,48

A.4.4 Analisi dell'influenza dei fattore "Pressione" e "Numero Foro"

La tabella seguente riporta i fattori ("Pressione", "Numero Foro") e la risposta ("Portata") sui quali viene effettuata l'ANOVA.

Per valutare l'effetto dei fattori *Pressione* e *Numero del foro* si considerano i valori della portata ottenuti dalla sperimentazione condotta a 250 MPa e Dug+Dfoc pari a 0,76 mm e con i valori della portata ottenuti per medesimo livello del fattore *Dug+Dfoc* dalla sperimentazione condotta a 350 MPa per un totale di 24 dati.

Tabella A. 18 Valore dei fattori e della risposta per l'analisi dell'influenza dei fattori Dug+Dfoc e numero del foro

Dug +Dfoc (mm)	P (MPa)	Foro n	Portata (g/min)	RESI2	FITS2
0,76	350	1	75,09	-1,47763	76,57144
0,76	350	1	75,44	-1,13298	76,57144
0,76	350	3	276,48	-3,31701	279,7998
0,76	350	3	278,12	-1,67883	279,7998
0,76	350	5	387,20	-0,68447	387,8845
0,76	350	7	566,63	-2,47311	569,1003
0,76	350	7	555,57	-13,53	569,1003
0,76	350	5	380,94	-6,94909	387,8845
0,76	350	7	585,10	16,00312	569,1003
0,76	350	5	395,52	7,63356	387,8845
0,76	350	1	79,18	2,610616	76,57144
0,76	350	3	284,80	4,99584	279,7998
0,76	250	3	302,15	9,466299	292,6796
0,76	250	1	106,61	17,10349	89,50833
0,76	250	3	292,34	-0,34005	292,6796
0,76	250	5	413,32	11,41796	401,9059
0,76	250	5	391,96	-9,94648	401,9059
0,76	250	3	283,55	-9,12625	292,6796
0,76	250	5	400,43	-1,47148	401,9059
0,76	250	1	81,25	-8,26269	89,50833
0,76	250	1	80,67	-8,84079	89,50833
0,76	250	7	600,59	9,468182	591,1182
0,76	250	7	588,29	-2,83182	591,1182
0,76	250	7	584,48	-6,63636	591,1182

A.4.4.1 Verifica delle ipotesi di applicabilità dell'ANOVA

Per l'applicabilità dell'ANOVA si devono verificare le ipotesi di normalità dei residui, omogeneità della varianza, indipendenza dei residui.

Normalità dei residui

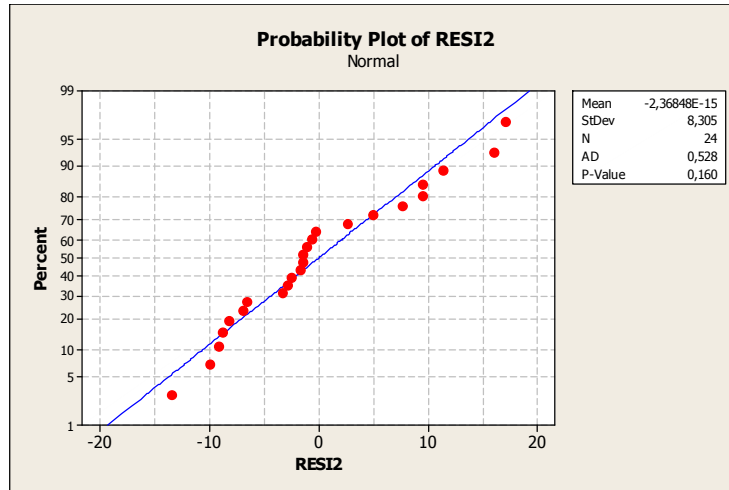


Figura A. 16 Normalità dei residui, sperimentazione 250 MPa

Omogeneità della varianza

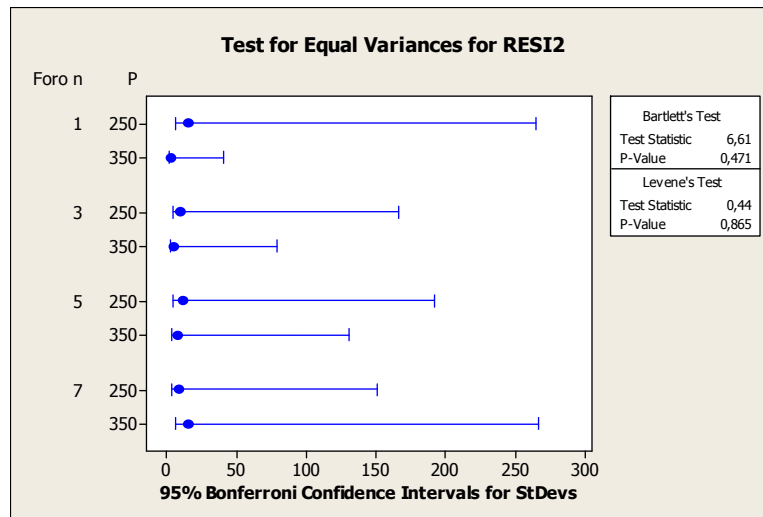


Figura A. 17 Omogeneità della Varianza, sperimentazione 250 MPa

Indipendenza dei residui

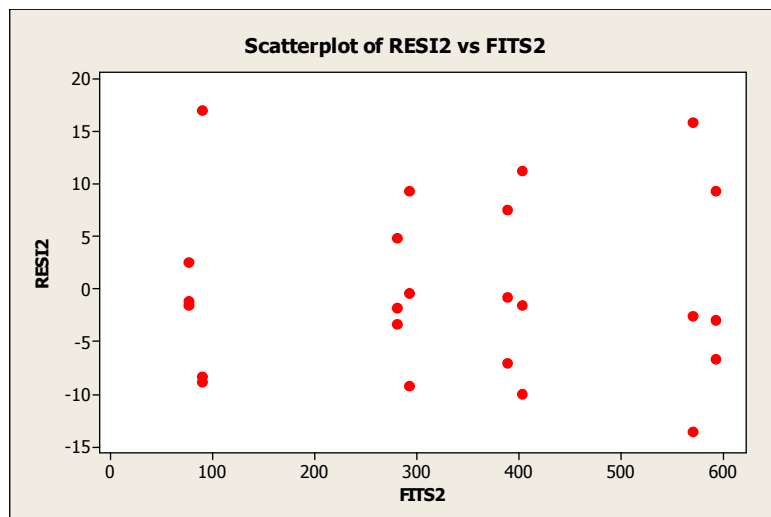


Figura A. 18 Indipendenza dei residui, sperimentazione a 250 MPa

Appendice B

Programmi per il taglio

In questa sezione vengono riportati i programmi ISO impostati sul sistema a controllo numerico della macchina per l'esecuzione dei tagli a pettine nella fase sperimentale.

B.1 Programmi per tagli preliminari

Il codice riportato in seguito viene utilizzato per l'esecuzione dei tagli condotti in pannelli da 10 mm e in pannelli da 30 mm per la determinazione della velocità al limite di taglio (cfr. paragrafo 4.4.2.1; 4.4.3.1).

I tagli presentano una lunghezza di 30 mm lungo l'asse Y e sono distanziati l'uno dall'altro di 5 mm.

Lanciando il programma sarà possibile immettere di volta in volta la distanza tra le passate (5 mm) e la velocità di avanzamento corrispondente alla condizione sperimentale in esame. Prima di ogni taglio la testa si posizionerà a 20 mm dal bordo del provino per consentirne l'accelerazione (per il primo taglio la testa viene posizionata manualmente in coordinate 0,-20).

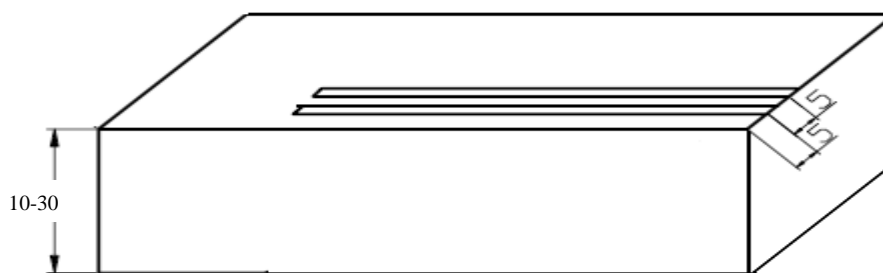


Figura B. 1 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 10-30 mm, massima velocità di avanzamento al limite di taglio

Programma per i tagli preliminari

P1=? [Velocità mm/min

P2=? [Distanza passate mm

M3

M11012

G04K10

Y50IFP1

M12012
 G04K30
 M5
 G04K20
 G0Y-50IXP2I

B.2 Programmi per i tagli dei piani fattoriali a due e quattro livelli per i fattori *Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento*

Il codice riportato in seguito viene utilizzato per l'esecuzione dei tagli condotti in pannelli da 30 mm secondo l'ordine casuale dai piani fattoriali a due e quattro livelli per i fattori *Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento* (cfr. paragrafo 4.4.3.2; 4.4.3.3).

I tagli presentano una lunghezza di 60 mm lungo l'asse Y e sono distanziati l'uno dall'altro di 5 mm per i tagli del piano fattoriale a due livelli, a 10 mm per il piano fattoriale a quattro livelli.

Lanciando il programma sarà possibile immettere di volta in volta la distanza tra le passate (10 mm) e la velocità di avanzamento corrispondente alla condizione sperimentale in esame. Prima di ogni taglio la testa si posizionerà a 20 mm dal bordo del provino per consentirne l'accelerazione (per il primo taglio la testa viene posizionata manualmente in coordinate 0,-20).

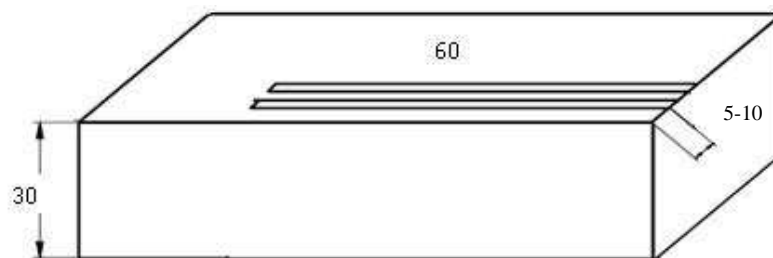


Figura B. 2 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 30 mm, piani fattoriali a due e quattro livelli per i fattori *Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento*

Programma per i tagli del piano fattoriale a 2 e 4 livelli per i fattori *Portata di abrasivo* e *Velocità di avanzamento*

P1=? [Velocità mm/min
 P2=? [Distanza passate mm
 M3
 M11012
 G04K10
 Y80IFP1
 M12012
 G04K30
 M5
 G04K20
 G0Y-80IXP2I
 M30

B.3 Programmi per i tagli del piano fattoriale per l'analisi della qualità

Il codice riportato in seguito viene utilizzato per l'esecuzione dei tagli condotti in pannelli da 30 mm secondo l'ordine casuale del piano fattoriale a due livelli per l'analisi della qualità del taglio (cfr. paragrafo 4.5.1).

I tagli presentano una lunghezza di 60 mm lungo l'asse Y e sono distanziati l'uno dall'altro di 10 mm.

Lanciando il programma sarà possibile immettere di volta in volta la distanza tra le passate (10 mm) e la velocità di avanzamento corrispondente alla condizione sperimentale in esame. Prima di ogni taglio la testa si posizionerà a 20 mm dal bordo del provino per consentirne l'accelerazione (per il primo taglio la testa viene posizionata manualmente in coordinate 0,-20).

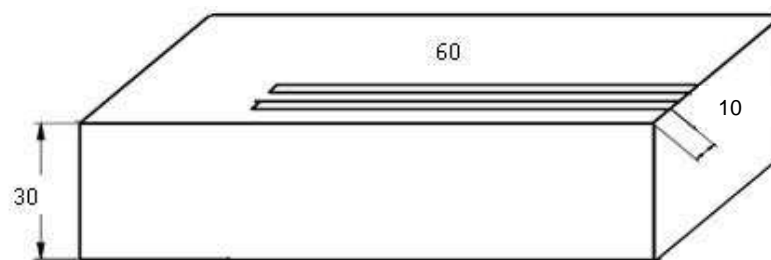


Figura B. 3 Schematizzazione dei tagli a pettine da eseguire, pannelli 30 mm, piani fattoriali a due livelli per l'analisi della qualità del taglio

Programma per i tagli del piano a due livelli per l'analisi della qualità

```
P1=? [Velocità mm/min
P2=? [Distanza passate mm
M3
M11012
G04K10
Y-80IFP1
M12012
G04K30
M5
G04K20
G0Y80IX-P2I
M30
```


Appendice C

Piani fattoriali per l'analisi dello spessore tagliabile e per l'analisi della qualità del taglio

C.1 Piano fattoriale a quattro livelli per i fattori *Velocità di avanzamento e Portata di abrasivo*

Questa fase sperimentale non prevede la preventiva preparazione di provini. Per ottimizzare tutto il materiale a disposizione, i tagli a pettine della lunghezza di 60 mm, vengono effettuati uno in seguito all'altro sulla lamiera secondo la casualizzazione generata dal programma Minitab®. Per evitare la continua sostituzione dell'ugello primario e dell'ugello focalizzatore anche in questo caso, come per la sperimentazione corrispondente al piano fattoriale preliminare (cfr. 4.4.3.2), i tagli sono suddivisi in due blocchi in corrispondenza del fattore $Dug+Dfoc$.

Terminata la sperimentazione, per rendere più facile la catalogazione e la numerazione dei tagli, i due blocchi della lamiera soggetta al taglio sono stati suddivise in provini 5 in cui il numero dei tagli per provino non necessariamente è costante. Si riporta in tabella la casualizzazione delle condizioni di taglio che corrisponde all'ordine di esecuzione dei tagli.

Tabella C. 1 Valori dei livelli nel piano fattoriale

FATTORI	LIVELLI			
Pressione (MPa)	250		350	
Dug+Dfoc (mm)	0,76		1	
Portata di abrasivo – n°ro foro	1	3	5	7
Velocità di avanzamento (mm/min)	100	500	700	1000

Per ciascuna condizione vengono effettuate due ripetizioni per un totale di 128 tagli (64 condizioni *2 ripetizioni).

Tabella C. 2 Piano fattoriale a quattro livelli per velocità di avanzamento e portata di abrasivo per pannelli a 30 mm

		N°ro taglio	Portata (n°ro foro)	Pressione (MPa)	Velocità (mm/min)	Dug+Dfoc (mm)	Passante?	
Blocco 1	Provino 1	1	5	350	1000	1	Sì	
		2	5	250	100	1	Sì	
		3	1	350	100	1	Sì	
		4	7	350	100	1	Sì	
		5	1	350	1000	1	No	
		6	5	350	700	1	Sì	
		7	7	350	1000	1	Sì	
		8	1	250	100	1	Sì	
		9	7	350	100	1	Sì	
		10	5	350	500	1	Sì	
		11	3	250	700	1	No	
		12	1	250	500	1	No	
		13	5	250	1000	1	No	
		14	1	350	500	1	No	
		15	3	250	100	1	Sì	
		16	3	350	500	1	Sì	
		17	7	350	1000	1	Sì	
		18	1	350	100	1	Sì	
		19	7	250	1000	1	No	
		20	7	250	700	1	No	
		21	1	250	500	1	No	
		Provino 3	22	3	350	100	1	Sì
			23	7	250	100	1	Sì
			24	7	250	100	1	Sì

Segue

Blocco 1	Provino 2	25	5	250	700	1	No
		26	5	250	700	1	No
		27	1	250	1000	1	No
		28	5	350	500	1	Sì
		29	7	250	500	1	Sì
		30	3	350	1000	1	Sì
		31	1	250	700	1	No
		32	5	250	500	1	Sì
		33	3	350	700	1	Sì
		34	5	350	100	1	Sì
		35	7	350	700	1	Sì
		36	5	350	700	1	Sì
		37	1	250	700	1	No
		38	5	250	500	1	Sì
		39	5	350	100	1	Sì
		40	7	250	1000	1	No
		41	3	350	700	1	Sì
		42	7	250	700	1	No
		43	5	350	1000	1	Sì
		44	3	350	1000	1	No
		45	1	350	700	1	No
		46	3	250	100	1	Sì
		47	1	350	1000	1	No
		48	7	350	500	1	Sì
		49	3	350	100	1	Sì
		50	3	250	1000	1	No
		51	3	250	1000	1	No
		52	7	350	700	1	Sì
		53	1	350	700	1	No
		54	1	250	100	1	Sì
		55	3	350	500	1	Sì
		56	1	250	1000	1	No
		57	5	250	1000	1	No
		58	3	250	500	1	Sì
		59	1	350	500	1	No
		60	3	250	700	1	No

segue

Blocco 1	Provino 2	61	7	250	500	1	Si
		62	7	350	500	1	Si
		63	3	250	500	1	Si
		64	5	250	100	1	Si
Blocco 2	Provino 4	65	1	250	1000	0,76	No
		66	5	250	100	0,76	Si
		67	7	250	100	0,76	Si
		68	5	350	1000	0,76	No
		69	1	250	500	0,76	No
		70	7	350	500	0,76	Si
		71	7	250	100	0,76	Si
		72	3	350	100	0,76	Si
		73	3	350	1000	0,76	No
		74	5	250	1000	0,76	No
		75	5	250	500	0,76	No
		76	5	250	100	0,76	Si
		77	3	350	700	0,76	No
		78	3	250	1000	0,76	No
		79	5	350	100	0,76	Si
		80	5	350	1000	0,76	No
		81	5	250	500	0,76	No
		82	5	250	700	0,76	No
		83	5	350	700	0,76	No
		84	7	250	700	0,76	No
		85	3	250	1000	0,76	No
		86	3	250	500	0,76	No
		87	7	350	100	0,76	Si
		88	5	250	700	0,76	No
		89	1	250	1000	0,76	No
		90	7	350	500	0,76	Si
		91	5	250	1000	0,76	No
		92	3	350	1000	0,76	No
		93	1	350	700	0,76	No
		94	3	350	100	0,76	Si
		95	7	250	1000	0,76	No

segue

Blocco 2	Provino 4	96	7	350	700	0,76	No
		97	1	350	100	0,76	Sì
		98	3	350	500	0,76	No
		99	1	250	700	0,76	No
		100	1	350	100	0,76	Sì
		101	3	250	100	0,76	Sì
		102	7	250	700	0,76	No
		103	3	350	500	0,76	No
		104	1	350	500	0,76	No
		105	7	250	1000	0,76	No
		106	7	350	1000	0,76	No
		107	7	250	500	0,76	Sì
		108	3	250	500	0,76	No
		109	7	350	700	0,76	No
		110	1	350	700	0,76	No
		111	7	350	100	0,76	Sì
	112	5	350	100	0,76	Sì	
	113	7	350	1000	0,76	No	
	114	1	350	500	0,76	No	
	115	3	250	700	0,76	No	
	116	5	350	700	0,76	No	
	Provino 5	117	3	250	700	0,76	No
		118	1	250	100	0,76	Sì
		119	5	350	500	0,76	Sì
		120	3	350	700	0,76	No
		121	3	250	100	0,76	Sì
		122	1	250	100	0,76	Sì
		123	5	350	500	0,76	Sì
124		1	250	700	0,76	No	
125		1	350	1000	0,76	No	
126		1	250	500	0,76	No	
127		1	350	1000	0,76	No	
128		7	250	500	0,76	No	

C. 2 Piano fattoriale per l'analisi della qualità del solco di taglio

Come già ampiamente illustrato nel Capitolo 4, il piano prevede quindi l'esecuzione di 80 tagli (16 condizioni *5 ripetizioni).

Tutte le condizioni sono state casualizzate sfruttando una serie di numeri casuali generati dal programma Minitab® e suddivise in due blocchi corrispondenti al livello del fattore *Dug+Dfoc*. La continua sostituzione degli ugelli potrebbe risultare difficoltosa e oltre alla possibile rottura degli stessi, potrebbe non essere garantita l'uniformità nelle condizioni di prova.

Necessità di misure successive (stima della densità del pezzo e analisi dell'immagine) implicano la preparazione preventiva di provini. I tagli sono suddivisi in 4 provini da 20 tagli ciascuno.

Tabella C. 3 Piano fattoriale per l'analisi della qualità del taglio

FATTORE	LIVELLO BASSO	LIVELLO ALTO
Pressione (MPa)	250	350
Portata di abrasivo – n°ro foro	1	7
Dug+Dfoc (mm)	0,76	1
Velocità di avanzamento (mm/min)	50	100

In seguito si riporta la successione dei tagli per ciascuna condizione sperimentale.

Tabella C. 4 piano fattoriale a due livelli per l'analisi della qualità del taglio

		N°ro taglio	Pressione (MPa)	Portata (n°ro Foro)	Velocità (mm/min)	Dug+Dfoc (mm)
Blocco 1	Provino 3	1	350	7	50	1
		2	250	1	50	1
		3	250	7	100	1
		4	250	1	50	1
		5	350	7	50	1
		6	350	7	50	1
		7	350	1	50	1
		8	350	7	50	1
		9	250	7	100	1
		10	350	1	100	1
		11	350	7	100	1
		12	350	1	50	1
		13	250	1	100	1
		14	350	1	100	1
		15	250	1	100	1
		16	250	1	100	1
		17	350	7	50	1
		18	350	1	100	1
		19	250	1	50	1
		20	250	7	50	1
	Provino 4	1	350	7	100	1
		2	350	7	100	1
		3	250	1	100	1
		4	250	1	50	1
		5	350	1	50	1
		6	350	7	100	1
		7	250	7	50	1
		8	350	1	100	1

Segue

Blocco 1	Provino 4	9	350	1	50	1
		10	250	7	50	1
		11	250	1	50	1
		12	250	7	100	1
		13	350	1	50	1
		14	250	7	100	1
		15	250	7	50	1
		16	250	7	100	1
		17	350	1	100	1
		18	250	1	100	1
		19	250	7	50	1
		20	350	7	100	1
Blocco 2	Provino 2	1	350	1	50	0,76
		2	350	1	100	0,76
		3	350	7	100	0,76
		4	350	1	50	0,76
		5	250	1	50	0,76
		6	250	1	100	0,76
		7	250	7	50	0,76
		8	350	1	100	0,76
		9	250	7	50	0,76
		10	250	1	100	0,76
		11	250	7	50	0,76
		12	250	1	100	0,76
		13	250	7	100	0,76
		14	250	1	50	0,76
		15	250	1	50	0,76
		16	250	1	50	0,76
		17	350	7	100	0,76
		18	350	7	50	0,76
		19	350	7	100	0,76
		20	350	7	50	0,76

segue

Blocco 2	Provino 1	1	350	1	100	0,76
		2	350	7	50	0,76
		3	350	1	50	0,76
		4	250	7	100	0,76
		5	250	1	100	0,76
		6	250	7	50	0,76
		7	350	7	100	0,76
		8	250	7	100	0,76
		9	250	1	100	0,76
		10	350	7	100	0,76
		11	350	1	50	0,76
		12	250	1	50	0,76
		13	350	7	50	0,76
		14	350	1	50	0,76
		15	250	7	50	0,76
		16	350	7	50	0,76
		17	350	1	100	0,76
		18	350	1	100	0,76
		19	250	7	100	0,76
		20	250	7	100	0,76

Appendice D

Caratteristiche dell'abrasivo utilizzato

In questa sezione vengono illustrate, nelle tabelle in seguito, le caratteristiche dell'abrasivo GMA GARNET (Australian GMA Garnet) utilizzato nella sperimentazione (le informazioni relative sono rintracciabili al sito web www.GARNETsales.com). L'abrasivo a disposizione presenta Mesh # 80.

D.1 Caratteristiche chimiche dell'abrasivo utilizzato

Tabella D. 1 Composizione chimica dell'abrasivo GMA Garnet

COMPOSIZIONE CHIMICA	
SiO ₂	36%
Al ₂ O ₃	20%
FeO	30%
MgO	6%
TiO ₂	2%
CaO	2%
Fe ₂ O ₃	2%
MnO	1%

Tabella D. 2 Composizione mineraria dell'abrasivo GMA Garnet

COMPOSIZIONE MINERARIA	
Garnet	97 - 98%
Limonite	1 - 2%
Zirconio	0,2%
Quarzo	<0,5%
Altro	0,25%

D.2 Caratteristiche fisiche dell'abrasivo utilizzato

Tabella D. 3 Caratteristiche fisiche dell'abrasivo GMA Garnet

CARATTERISTICHE FISICHE	
Densità in massa	2,3 T/m ³
Peso specifico	4,1
Durezza (mohs)	7,5 - 8
Punto di fusione	1250°C
Forma dei grani naturali	Sub-angular

D.3 Altre caratteristiche

Tabella D. 4 Altre caratteristiche dell'abrasivo GMA Garnet

ALTRE CARATTERISTICHE	
Radioattività	Non rilevata
Assorbimento umidità	Non igroscopica
Cloruri totali	10-15 ppm (max 25 ppm)
Ferrite	Inferiore al 0,01%
Rame	Inferiore al 0,005%
Altri metalli pesanti	Inferiore al 0,01%
Zolfo	Inferiore al 0,01%

Appendice E

Definizione del livello di soglia ottima per la taratura dello scanner

In questa sezione viene presentato il procedimento sperimentale che ha consentito la definizione del livello di soglia ottima da applicare alle immagini dei quattro provini scannerizzati.

Il software di analisi ImageJ, utilizzato per la misurazione della larghezza del solco di taglio, effettua le misure a partire dal numero di pixel neri individuati nell'immagine. Per questo motivo è evidente come la scelta della soglia per la conversione dei toni di grigio dell'immagine scannerizzata, in toni di solo bianco e nero, abbia ripercussioni sulle misure effettuate.

Il livello di soglia ottimo, identificato nel programma dal termine "Thersold", viene individuato attraverso un preciso procedimento di taratura, che avrà l'obiettivo minimizzare l'errore quadratico medio tra la larghezza locale del solco misurata manualmente tramite calibro e la larghezza corrispondente misurata dal software.

E.1 Procedura sperimentale per la definizione della soglia ottima

La procedura sperimentale deve consentire di stimare l'errore quadratico medio tra la misura locale del solco di taglio effettuata tramite calibro, e la misura nello stesso punto tramite il comando "Analyze Particles" di ImageJ. Per questo motivo la misura media del solco di taglio ottenuta dalle misurazioni ripetute tramite calibro, viene confrontata con la misura ottenuta tramite software applicando diversi livelli di soglia. Il livello di soglia che corrisponderà al minimo errore verrà applicato come "Thersold" nella misurazione dei solchi di tutti i provini. Il livello di soglia ottimale deve essere definito sia per le acquisizioni del "fronte" sia per le acquisizioni del "retro" del provino.

La procedura sperimentale prevede:

- Scelta casuale di un solo provino (n. ro 3), la taratura viene effettuata sulla misurazione delle venti larghezze locali nei due lati "fronte" e "retro" del provino.
- Sul provino si traccia una linea sottile a 10 mm dal bordo di taglio sul "fronte" (lato tagli in ingresso) e sul "retro" (lato tagli in uscita) per tutta

la lunghezza del provino in modo da coinvolgere tutti i venti solchi presenti sul provino.

- Si effettua tramite calibro la misura della larghezza puntuale del solco nel punto evidenziato dalla linea. Vengono effettuate tre misurazioni per solco: 20x3 misurazioni, lato “fronte”, e 20x3 misurazioni, lato “retro”. Data la delicatezza e la precisione che le misurazioni richiedono (non si deve accentuare la pressione sul calibro nella misurazione per non contribuire ad allargare i solchi), le misure vengono casualizzate sul fronte e sul retro del provino. Ovviamente le misurazioni locali per i solchi in uscita richiedono più attenzione, poiché la variabilità nella larghezza del solco si accentua sul retro del provino, rimanendo invece trascurabile in ingresso. I risultati delle misurazione della larghezza del solco nelle tre ripetizioni, sono sintetizzate nella sezione tabelle E.2 (cfr. tabelle E.3, E.4)
- Il provino viene scannerizzato sul lato di ingresso e sul lato di uscita con le stesse modalità che saranno poi utilizzate per le scansioni di tutti e quattro i provini. Il provino selezionato viene rivestito con una copertura nera in modo da evitare, per tutte le acquisizioni, interazioni con la luce esterna. L’acquisizione viene effettuata a 600 dpi in toni di grigio, vengono disabilitate, inoltre, tutte le funzioni per la correzione dell’immagine nella finestra dello scanner.
- Si aprono le immagini delle scannerizzazioni del retro e del fronte del provino. Si ritaglia l’immagine in corrispondenza della sottile linea tracciata per la misurazione manuale dei solchi.



Figura E. 1 Ritaglio dell’immagine scannerizzata relativa al “fronte” del provino, definizione della soglia



Figura E. 2 Ritaglio dell’immagine scannerizzata relativa al “retro” del provino, definizione della soglia

- Impostazione della scala spaziale pixel/mm.
- Applicazione del livello di soglia: si parte dal valore che il software fornisce di Default per poi aumentarlo e diminuirlo in modo da valutare l’entità della variazione della misura a seconda del livello applicato. Nella figura E.3 si riporta la finestra per l’applicazione della soglia desiderata.

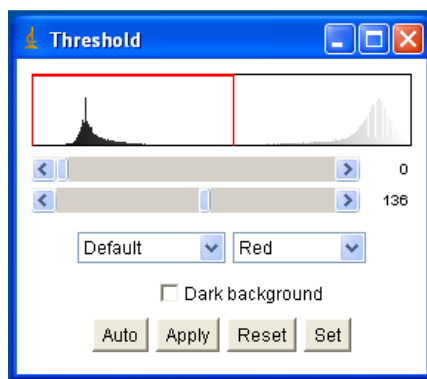


Figura E. 3 Applicazione del livello di soglia

- Infine si applica il comando “Analyze Particles” che restituisce per ciascuno dei venti solchi:
 1. il valore dell’area della striscia misurata (mm);
 2. le coordinate X e Y del centroide (mm);
 3. le posizioni BX e BY corrispondenti rispettivamente alle posizioni X e Y dello spigolo superiore sinistro del più piccolo rettangolo circoscritto all’area del solco;
 4. la larghezza del più piccolo rettangolo circoscritto all’area misurata (mm);
 5. l’altezza del più piccolo rettangolo circoscritto all’area misurata (mm).

Tabella E. 1 Esempio dei primi tre risultati restituiti dalla funzione “Analyze Particles”, “fronte” del provino

	PROVINO 3, LATO INGRESSO	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Larghezza solco
1	prov_3_lato_ing_rit,TIF	4,211	1,697	1,679	0,889	0,000	1,524	3,344	1,259
2	prov_3_lato_ing_rit,TIF	4,244	11,697	1,759	10,626	0,000	1,820	3,344	1,269
3	prov_3_lato_ing_rit,TIF	4,163	21,926	1,662	21,209	0,000	1,355	3,344	1,245

La *Larghezza* del solco misurato corrisponde alla larghezza di un rettangolo di pari area e pari altezza a quelle restituite dalla funzione del software; la *Larghezza* è quindi calcolata come rapporto tra *Area* misurata e *Altezza* del solco (colonna *Larghezza solco*).

I risultati intermedi che hanno permesso di valutare l’andamento dell’errore quadratico medio tra misura locale effettuata manualmente e la misura valutata tramite la funzione “Analyze Particles” sono riportati nella sezione tabelle.

In seguito si riportano i risultati ottenuti che indirizzato alla scelta dei livello ottimo a 145 sia per le scannerizzazioni relative al “fronte” che al “retro” del provino.

Tabella E. 2 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione del livello di soglia per fronte e retro del provino

Soglia	EQM fronte	Soglia	EQM retro
125	0,463%	110	1,477%
130	0,403%	120	1,372%
134	0,358%	131	1,306%
140	0,335%	140	1,257%
145	0,325%	145	1,250%
150	0,334%	150	1,255%
155	0,374%	155	1,270%

Errore Quadratico Medio - Acquisizioni Fronte

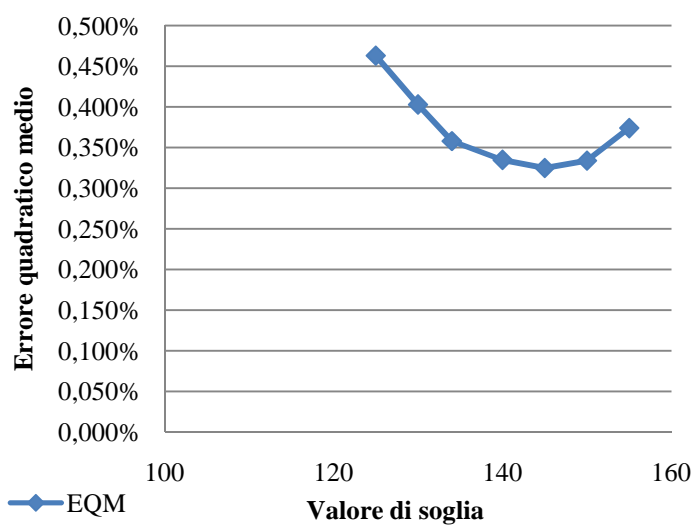


Figura E. 4 Andamento dell'errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni fronte del provino

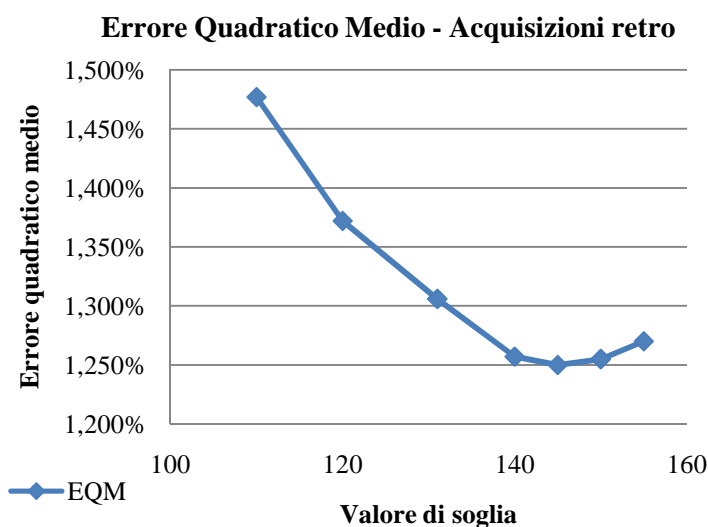


Figura E. 5 Andamento dell’errore quadratico medio in funzione della soglia fissata, acquisizioni retro del provino

E.2 Tabelle riassuntive

In questa sezione si riportano le tabelle che contengono i risultati delle misurazioni locali dei solchi tramite calibro e i risultati derivanti dalle misurazioni dei solchi tramite il programma ImageJ a seconda del livello di soglia applicato.

Tabella E. 3 Misure locali dei solchi tramite calibro, lato “fronte”

FRONTE					
Taglio	Mis 1 (mm)	Mis 2 (mm)	Mis 3 (mm)	Media (mm)	Dev. Stand
1	1,2	1,2	1,2	1,20	0,000
2	1,2	1,25	1,2	1,22	0,029
3	1,3	1,3	1,3	1,30	0,000
4	1,15	1,1	1,1	1,12	0,029
5	1,4	1,4	1,3	1,37	0,058
6	1,1	1,2	1,2	1,17	0,058
7	1,35	1,3	1,3	1,32	0,029
8	1,3	1,2	1,3	1,27	0,058
9	1,25	1,2	1,25	1,23	0,029

segue

10	1,2	1,1	1,2	1,17	0,058
11	1,2	1,3	1,2	1,23	0,058
12	1,1	1,1	1,1	1,10	0,000
13	1,2	1,2	1,15	1,18	0,029
14	1,35	1,3	1,3	1,32	0,029
15	1,2	1,2	1,2	1,20	0,000
16	1,2	1,2	1,3	1,23	0,058
17	1,3	1,3	1,4	1,33	0,058
18	1,35	1,35	1,3	1,33	0,029
19	1,2	1,2	1,3	1,23	0,058
20	1,45	1,4	1,45	1,43	0,029

Tabella E. 4 Misure locali dei solchi tramite calibro, lato “retro”

RETRO					
Taglio	Mis 1 (mm)	Mis 2 (mm)	Mis 3 (mm)	Media (mm)	Dev. Stand
1	3,8	3,85	3,85	3,83	0,02887
2	2,6	2,6	2,6	2,60	0,00000
3	2,95	2,95	2,8	2,90	0,08660
4	3,2	3,2	3,15	3,18	0,02887
5	3,05	3,05	3	3,03	0,02887
6	3,1	3,05	3,05	3,07	0,02887
7	3,4	3,4	3,4	3,40	0,00000
8	2,95	2,9	2,95	2,93	0,02887
9	1,85	1,8	1,85	1,83	0,02887
10	3,3	3,25	3,3	3,28	0,02887
11	3,05	3,05	2,95	3,02	0,05774
12	2,45	2,5	2,5	2,48	0,02887
13	2,4	2,4	2,5	2,43	0,05774
14	3,3	3,3	3,3	3,30	0,00000
15	3,05	3,05	3,05	3,05	0,00000
16	2,2	2,1	2,05	2,12	0,07638
17	3,1	3,1	3,1	3,10	0,00000
18	2,2	2,05	2,1	2,12	0,07638
19	2,1	2,1	2,1	2,10	0,00000
20	2,2	2,2	2,2	2,20	0,00000

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 134

Tabella E. 5 Livello di soglia: Default - 134

Num. solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,211	1,697	1,679	0,889	0	1,524	3,344	1,259	4,71%	0,222%
2	1,22	4,244	11,697	1,759	10,626	0	1,820	3,344	1,269	4,13%	0,171%
3	1,30	4,163	21,926	1,662	21,209	0	1,355	3,344	1,245	-4,42%	0,196%
4	1,12	3,581	32,012	1,668	31,369	0	1,228	3,344	1,071	-4,28%	0,183%
5	1,37	4,375	42,195	1,683	41,487	0	1,397	3,344	1,308	-4,46%	0,199%
6	1,17	3,968	52,234	1,651	51,393	0	1,524	3,344	1,187	1,68%	0,028%
7	1,32	4,487	62,316	1,702	61,510	0	1,524	3,344	1,342	1,87%	0,035%
8	1,27	4,427	72,570	1,676	71,670	0	1,651	3,344	1,324	4,32%	0,187%
9	1,23	4,233	82,690	1,661	81,957	0	1,439	3,344	1,266	2,57%	0,066%
10	1,17	3,898	92,815	1,654	92,117	0	1,312	3,344	1,166	-0,09%	0,000%
11	1,23	4,412	102,976	1,668	102,235	0	1,482	3,344	1,319	6,52%	0,425%
12	1,10	3,681	113,120	1,668	112,522	0	1,185	3,344	1,101	0,07%	0,000%
13	1,18	3,930	123,280	1,637	122,470	0	1,566	3,344	1,175	-0,69%	0,005%
14	1,32	3,918	133,398	1,658	132,673	0	1,397	3,344	1,172	-12,38%	1,532%
15	1,20	3,887	143,503	1,706	142,875	0	1,270	3,344	1,162	-3,24%	0,105%
16	1,23	3,932	153,634	1,674	152,908	0	1,397	3,344	1,176	-4,89%	0,239%
17	1,33	4,597	163,770	1,660	163,026	0	1,524	3,344	1,375	3,01%	0,091%
18	1,33	3,794	173,866	1,661	173,228	0	1,355	3,344	1,135	-17,52%	3,069%
19	1,23	3,912	183,993	1,657	183,388	0	1,228	3,344	1,170	-5,43%	0,294%
20	1,43	4,643	194,151	1,620	193,294	0	1,651	3,344	1,388	-3,23%	0,104%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-1,59%	0,358%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 140

Tabella E. 6 Livello di soglia: Default - 140

Num. solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,258	1,698	1,678	0,889	0	1,566	3,344	1,273	5,76%	0,332%
2	1,22	4,287	11,692	1,762	10,626	0	1,820	3,344	1,282	5,10%	0,260%
3	1,30	4,190	21,926	1,663	21,209	0	1,397	3,344	1,253	-3,75%	0,141%
4	1,12	3,627	32,011	1,664	31,327	0	1,270	3,344	1,085	-2,95%	0,087%
5	1,37	4,421	42,192	1,679	41,487	0	1,397	3,344	1,322	-3,37%	0,114%
6	1,17	4,020	52,232	1,649	51,393	0	1,524	3,344	1,202	2,95%	0,087%
7	1,32	4,539	62,312	1,703	61,510	0	1,524	3,344	1,357	3,00%	0,090%
8	1,27	4,475	72,566	1,670	71,670	0	1,651	3,344	1,338	5,35%	0,286%
9	1,23	4,308	82,693	1,649	81,957	0	1,524	3,344	1,288	4,26%	0,182%
10	1,17	3,932	92,812	1,653	92,117	0	1,312	3,344	1,176	0,78%	0,006%
11	1,23	4,439	102,975	1,666	102,235	0	1,482	3,344	1,327	7,09%	0,503%
12	1,10	3,701	113,120	1,668	112,522	0	1,228	3,344	1,107	0,61%	0,004%
13	1,18	3,961	123,281	1,639	122,470	0	1,566	3,344	1,185	0,10%	0,000%
14	1,32	3,950	133,394	1,658	132,673	0	1,397	3,344	1,181	-11,47%	1,315%
15	1,20	3,923	143,500	1,706	142,875	0	1,270	3,344	1,173	-2,29%	0,052%
16	1,23	3,959	153,633	1,672	152,908	0	1,397	3,344	1,184	-4,17%	0,174%
17	1,33	4,629	163,770	1,658	163,026	0	1,524	3,344	1,384	3,68%	0,135%
18	1,33	3,835	173,868	1,659	173,228	0	1,397	3,344	1,147	-16,26%	2,645%
19	1,23	3,935	183,991	1,658	183,388	0	1,228	3,344	1,177	-4,81%	0,231%
20	1,43	4,679	194,152	1,620	193,294	0	1,651	3,344	1,399	-2,44%	0,059%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-0,64%	0,335%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 145

Tabella E. 7 Livello di soglia: Default - 145

Num. solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,301	1,699	1,678	0,889	0	1,566	3,344	1,2861842	6,70%	0,449%
2	1,22	4,34	11,687	1,763	10,626	0	1,863	3,344	1,2978469	6,25%	0,391%
3	1,30	4,237	21,924	1,663	21,167	0	1,439	3,344	1,2670455	-2,60%	0,068%
4	1,12	3,67	32,008	1,661	31,327	0	1,27	3,344	1,097488	-1,75%	0,031%
5	1,37	4,453	42,191	1,677	41,487	0	1,397	3,344	1,3316388	-2,63%	0,069%
6	1,17	4,056	52,229	1,651	51,393	0	1,524	3,344	1,2129187	3,81%	0,145%
7	1,32	4,609	62,303	1,706	61,468	0	1,566	3,344	1,3782895	4,47%	0,200%
8	1,27	4,52	72,562	1,667	71,628	0	1,693	3,344	1,3516746	6,29%	0,396%
9	1,23	4,342	82,693	1,642	81,915	0	1,566	3,344	1,298445	5,01%	0,251%
10	1,17	3,957	92,811	1,649	92,117	0	1,355	3,344	1,1833134	1,41%	0,020%
11	1,23	4,466	102,974	1,666	102,235	0	1,524	3,344	1,3355263	7,65%	0,586%
12	1,10	3,751	113,118	1,67	112,522	0	1,228	3,344	1,1217105	1,94%	0,037%
13	1,18	4,029	123,282	1,636	122,428	0	1,651	3,344	1,2048445	1,79%	0,032%
14	1,32	3,991	133,393	1,657	132,673	0	1,397	3,344	1,1934809	-10,32%	1,065%
15	1,20	3,944	143,498	1,705	142,875	0	1,27	3,344	1,1794258	-1,74%	0,030%
16	1,23	3,995	153,634	1,668	152,908	0	1,439	3,344	1,194677	-3,24%	0,105%
17	1,33	4,665	163,768	1,657	163,026	0	1,524	3,344	1,3950359	4,42%	0,196%
18	1,33	3,882	173,866	1,659	173,228	0	1,397	3,344	1,1608852	-14,85%	2,207%
19	1,23	3,953	183,989	1,657	183,346	0	1,27	3,344	1,1821172	-4,33%	0,188%
20	1,43	4,713	194,151	1,62	193,294	0	1,651	3,344	1,40939	-1,70%	0,029%
										errore % medio	errore quadratico medio
										0,33%	0,325%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 130

Tabella E. 8 Livello di soglia: Default - 130

Num solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,183	1,695	1,680	0,889	0	1,524	3,344	1,2508971	4,07%	0,17%
2	1,22	4,208	11,697	1,760	10,626	0	1,820	3,344	1,2583732	3,31%	0,110%
3	1,30	4,125	21,930	1,663	21,209	0	1,355	3,344	1,2335526	-5,39%	0,290%
4	1,12	3,559	32,011	1,668	31,369	0	1,228	3,344	1,0642943	-4,92%	0,242%
5	1,37	4,339	42,196	1,681	41,487	0	1,397	3,344	1,2975478	-5,33%	0,284%
6	1,17	3,912	52,235	1,653	51,393	0	1,524	3,344	1,1698565	0,27%	0,001%
7	1,32	4,439	62,317	1,700	61,553	0	1,482	3,344	1,3274522	0,81%	0,007%
8	1,27	4,380	72,574	1,676	71,713	0	1,609	3,344	1,3098086	3,29%	0,108%
9	1,23	4,190	82,692	1,658	81,957	0	1,439	3,344	1,2529904	1,57%	0,025%
10	1,17	3,871	92,818	1,654	92,160	0	1,270	3,344	1,1575957	-0,78%	0,006%
11	1,23	4,376	102,977	1,670	102,277	0	1,397	3,344	1,3086124	5,75%	0,331%
12	1,10	3,658	113,119	1,668	112,522	0	1,185	3,344	1,0938995	-0,56%	0,003%
13	1,18	3,909	123,277	1,637	122,470	0	1,524	3,344	1,1689593	-1,23%	0,015%
14	1,32	3,871	133,399	1,657	132,673	0	1,397	3,344	1,1575957	-13,74%	1,888%
15	1,20	3,851	143,505	1,701	142,875	0	1,270	3,344	1,1516148	-4,20%	0,177%
16	1,23	3,887	153,636	1,676	152,993	0	1,312	3,344	1,1623804	-6,10%	0,373%
17	1,33	4,575	163,771	1,663	163,026	0	1,524	3,344	1,368122	2,54%	0,065%
18	1,33	3,763	173,865	1,663	173,228	0	1,355	3,344	1,125299	-18,49%	3,418%
19	1,23	3,892	183,994	1,659	183,388	0	1,228	3,344	1,1638756	-5,97%	0,356%
20	1,43	4,591	194,147	1,622	193,294	0	1,609	3,344	1,3729067	-4,40%	0,194%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-2,47%	0,403%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 125

Tabella E. 9 Livello di soglia: Default - 125

Num solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,149	1,698	1,68	0,931	0	1,439	3,344	1,2407297	3,28%	0,108%
2	1,22	4,161	11,7	1,758	10,668	0	1,778	3,344	1,2443182	2,22%	0,049%
3	1,30	4,091	21,932	1,662	21,209	0	1,355	3,344	1,2233852	-6,26%	0,392%
4	1,12	3,543	32,012	1,665	31,369	0	1,228	3,344	1,0595096	-5,39%	0,291%
5	1,37	4,312	42,196	1,678	41,529	0	1,355	3,344	1,2894737	-5,99%	0,358%
6	1,17	3,867	52,237	1,653	51,393	0	1,524	3,344	1,1563995	-0,89%	0,008%
7	1,32	4,378	62,321	1,706	61,553	0	1,482	3,344	1,3092105	-0,57%	0,003%
8	1,27	4,36	72,576	1,675	71,713	0	1,609	3,344	1,3038278	2,85%	0,081%
9	1,23	4,113	82,695	1,655	82	0	1,397	3,344	1,2299641	-0,27%	0,001%
10	1,17	3,83	92,817	1,658	92,16	0	1,27	3,344	1,1453349	-1,86%	0,035%
11	1,23	4,33	102,978	1,668	102,277	0	1,397	3,344	1,2948565	4,75%	0,226%
12	1,10	3,629	113,121	1,665	112,564	0	1,143	3,344	1,0852273	-1,36%	0,019%
13	1,18	3,885	123,277	1,637	122,47	0	1,524	3,344	1,1617823	-1,85%	0,034%
14	1,32	3,833	133,401	1,655	132,715	0	1,312	3,344	1,1462321	-14,87%	2,211%
15	1,20	3,817	143,505	1,694	142,917	0	1,228	3,344	1,1414474	-5,13%	0,263%
16	1,23	3,855	153,635	1,677	152,993	0	1,312	3,344	1,152811	-6,98%	0,488%
17	1,33	4,548	163,773	1,662	163,026	0	1,524	3,344	1,3600478	1,96%	0,039%
18	1,33	3,728	173,864	1,662	173,27	0	1,312	3,344	1,1148325	-19,60%	3,841%
19	1,23	3,849	183,998	1,655	183,388	0	1,228	3,344	1,1510167	-7,15%	0,511%
20	1,43	4,547	194,148	1,625	193,294	0	1,609	3,344	1,3597488	-5,41%	0,293%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-3,43%	0,463%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 150

Tabella E. 10 Livello di soglia: Default - 150

Num solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadrati co
1	1,20	4,342	1,695	1,679	0,889	0	1,566	3,344	1,298445	7,58%	0,575%
2	1,22	4,387	11,685	1,765	10,626	0	1,863	3,344	1,3119019	7,26%	0,527%
3	1,30	4,297	21,925	1,668	21,167	0	1,439	3,344	1,284988	-1,17%	0,014%
4	1,12	3,704	32,006	1,658	31,327	0	1,27	3,344	1,1076555	-0,81%	0,007%
5	1,37	4,486	42,19	1,676	41,487	0	1,397	3,344	1,3415072	-1,88%	0,035%
6	1,17	4,106	52,225	1,657	51,393	0	1,524	3,344	1,2278708	4,98%	0,248%
7	1,32	4,649	62,303	1,703	61,468	0	1,566	3,344	1,3902512	5,29%	0,280%
8	1,27	4,557	72,561	1,662	71,628	0	1,736	3,344	1,3627392	7,05%	0,497%
9	1,23	4,394	82,697	1,632	81,915	0	1,566	3,344	1,3139952	6,14%	0,377%
10	1,17	3,982	92,809	1,65	92,117	0	1,355	3,344	1,1907895	2,03%	0,041%
11	1,23	4,498	102,974	1,665	102,235	0	1,524	3,344	1,3450957	8,31%	0,690%
12	1,10	3,787	113,119	1,668	112,522	0	1,228	3,344	1,1324761	2,87%	0,082%
13	1,18	4,097	123,281	1,633	122,428	0	1,651	3,344	1,2251794	3,42%	0,117%
14	1,32	4,029	133,392	1,657	132,673	0	1,397	3,344	1,2048445	-9,28%	0,861%
15	1,20	3,97	143,496	1,71	142,875	0	1,312	3,344	1,187201	-1,08%	0,012%
16	1,23	4,034	153,635	1,667	152,908	0	1,439	3,344	1,2063397	-2,24%	0,050%
17	1,33	4,694	163,767	1,657	163,026	0	1,524	3,344	1,4037081	5,01%	0,251%
18	1,33	3,925	173,865	1,657	173,228	0	1,397	3,344	1,173744	-13,60%	1,849%
19	1,23	3,968	183,989	1,654	183,346	0	1,27	3,344	1,1866029	-3,94%	0,155%
20	1,43	4,74	194,149	1,618	193,252	0	1,693	3,344	1,4174641	-1,12%	0,013%
										errore % medio	errore quadrati co medio
										1,24%	0,334%

Fronte

Provino 3 lato ingresso

Livello di soglia: Default - 155

Tabella E. 11 Livello di soglia: Default - 155

Num solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
1	1,20	4,41	1,692	1,678	0,847	0	1,651	3,344	1,3187799	9,01%	0,811%
2	1,22	4,446	11,686	1,765	10,626	0	1,863	3,344	1,3295455	8,49%	0,721%
3	1,30	4,348	21,924	1,663	21,167	0	1,439	3,344	1,3002392	0,02%	0,000%
4	1,12	3,738	32,005	1,663	31,327	0	1,27	3,344	1,117823	0,10%	0,000%
5	1,37	4,521	42,189	1,676	41,487	0	1,439	3,344	1,3519737	-1,09%	0,012%
6	1,17	4,152	52,224	1,654	51,393	0	1,524	3,344	1,2416268	6,04%	0,364%
7	1,32	4,715	62,299	1,701	61,468	0	1,609	3,344	1,409988	6,62%	0,438%
8	1,27	4,581	72,561	1,662	71,628	0	1,736	3,344	1,3699163	7,54%	0,568%
9	1,23	4,439	82,696	1,633	81,915	0	1,566	3,344	1,3274522	7,09%	0,503%
10	1,17	4,014	92,809	1,647	92,117	0	1,355	3,344	1,2003589	2,81%	0,079%
11	1,23	4,541	102,972	1,665	102,235	0	1,524	3,344	1,3579545	9,18%	0,842%
12	1,10	3,815	113,12	1,668	112,48	0	1,27	3,344	1,1408493	3,58%	0,128%
13	1,18	4,154	123,284	1,629	122,428	0	1,693	3,344	1,2422249	4,74%	0,225%
14	1,32	4,057	133,389	1,661	132,673	0	1,397	3,344	1,2132177	-8,53%	0,727%
15	1,20	4,013	143,495	1,708	142,875	0	1,312	3,344	1,2000598	0,00%	0,000%
16	1,23	4,057	153,637	1,666	152,908	0	1,439	3,344	1,2132177	-1,66%	0,027%
17	1,33	4,72	163,767	1,659	163,026	0	1,524	3,344	1,4114833	5,54%	0,307%
18	1,33	3,955	173,862	1,658	173,228	0	1,397	3,344	1,1827153	-12,73%	1,622%
19	1,23	3,995	183,985	1,652	183,346	0	1,27	3,344	1,194677	-3,24%	0,105%
20	1,43	4,778	194,146	1,617	193,252	0	1,693	3,344	1,4288278	-0,32%	0,001%
										errore % medio	errore quadratico medio
										2,16%	0,374%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default - 131

Tabella E. 12 Livello di soglia: Default - 131

Num solco	Largh. media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	B Y	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,72	3,054	1,268	1,778	0	2,54	2,54	2,2519685	2,31%	0,053%
19	2,10	5,471	13,284	1,272	11,98	0	2,582	2,54	2,153937	2,50%	0,063%
18	2,12	5,78	23,448	1,29	22,013	0	3,006	2,54	2,2755906	6,84%	0,467%
17	3,10	7,238	33,29	1,337	31,369	0	3,471	2,54	2,8496063	-8,79%	0,772%
16	2,12	5,129	43,43	1,332	42,037	0	2,921	2,54	2,0192913	-4,99%	0,249%
15	3,05	9,69	53,895	1,198	51,223	0	5,038	2,54	3,8149606	20,05%	4,021%
14	3,30	6,391	63,793	1,36	62,23	0	3,598	2,54	2,5161417	-31,15%	9,705%
13	2,43	6,296	73,824	1,337	71,713	0	3,598	2,54	2,4787402	1,97%	0,039%
12	2,48	6,344	84,176	1,27	82,296	0	3,514	2,54	2,4976378	0,71%	0,005%
11	3,02	7,905	94,315	1,295	92,287	0	3,725	2,54	3,1122047	2,96%	0,088%
10	3,28	8,287	104,18	1,242	102,362	0	3,895	2,54	3,2625984	-0,53%	0,003%
9	1,83	6,459	114,521	1,122	112,734	0	3,387	2,54	2,5429134	28,04%	7,860%
8	2,93	7,663	124,853	1,253	123,275	0	3,514	2,54	3,0169291	2,88%	0,083%
7	3,40	8,754	134,853	1,326	132,884	0	3,979	2,54	3,4464567	1,35%	0,018%
6	3,07	7,891	144,996	1,26	143,256	0	3,598	2,54	3,1066929	1,18%	0,014%
5	3,03	7,364	155,045	1,253	153,374	0	3,217	2,54	2,8992126	-4,51%	0,204%
4	3,18	8,833	165,196	1,257	163,026	0	4,657	2,54	3,4775591	8,56%	0,732%
3	2,90	6,835	175,413	1,217	173,778	0	3,133	2,54	2,6909449	-7,77%	0,604%
2	2,60	7,108	185,515	1,366	183,727	0	3,768	2,54	2,7984252	7,09%	0,503%
1	3,83	9,007	195,474	1,239	193,125	0	4,53	2,54	3,546063	-8,01%	0,641%
										errore % medio	errore quadratico medio
										1,03%	1,306%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default – 140

Tabella E. 13 Livello di soglia: Default – 140

Num solco	Largh, media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,756	3,052	1,267	1,778	0	2,54	2,54	2,2661417	2,92%	0,085%
19	2,10	5,509	13,284	1,273	11,938	0	2,667	2,54	2,1688976	3,18%	0,101%
18	2,12	5,833	23,45	1,286	22,013	0	3,048	2,54	2,2964567	7,68%	0,590%
17	3,10	7,283	33,288	1,338	31,369	0	3,471	2,54	2,8673228	-8,11%	0,658%
16	2,12	5,22	43,442	1,326	42,037	0	2,963	2,54	2,0551181	-3,16%	0,100%
15	3,05	9,746	53,891	1,196	51,223	0	5,038	2,54	3,8370079	20,51%	4,207%
14	3,30	6,516	63,793	1,353	62,188	0	3,641	2,54	2,5653543	-28,64%	8,201%
13	2,43	6,382	73,822	1,34	71,713	0	3,641	2,54	2,5125984	3,29%	0,108%
12	2,48	6,389	84,175	1,271	82,296	0	3,514	2,54	2,5153543	1,41%	0,020%
11	3,02	7,97	94,315	1,295	92,287	0	3,725	2,54	3,1377953	3,75%	0,141%
10	3,28	8,349	104,18	1,242	102,32	0	3,937	2,54	3,2870079	0,21%	0,000%
9	1,83	6,487	114,519	1,121	112,734	0	3,387	2,54	2,553937	28,35%	8,035%
8	2,93	7,724	124,856	1,252	123,232	0	3,556	2,54	3,0409449	3,65%	0,133%
7	3,40	8,823	134,856	1,327	132,884	0	4,022	2,54	3,473622	2,12%	0,045%
6	3,07	7,957	144,999	1,26	143,256	0	3,598	2,54	3,1326772	2,00%	0,040%
5	3,03	7,4	155,045	1,252	153,331	0	3,302	2,54	2,9133858	-4,00%	0,160%
4	3,18	8,91	165,198	1,258	163,026	0	4,657	2,54	3,507874	9,35%	0,874%
3	2,90	6,9	175,414	1,218	173,778	0	3,175	2,54	2,7165354	-6,75%	0,456%
2	2,60	7,194	185,524	1,37	183,684	0	3,852	2,54	2,8322835	8,20%	0,673%
1	3,83	9,075	195,474	1,238	193,125	0	4,53	2,54	3,5728346	-7,20%	0,518%
										errore % medio	errore quadratico medio
										1,94%	1,257%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default – 145

Tabella E. 14 Livello di soglia: Default – 145

Num solco	Largh media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,785	3,052	1,267	1,736	0	2,582	2,54	2,2775591	3,41%	0,116%
19	2,10	5,532	13,285	1,274	11,938	0	2,667	2,54	2,1779528	3,58%	0,128%
18	2,12	5,864	23,451	1,285	22,013	0	3,048	2,54	2,3086614	8,17%	0,668%
17	3,10	7,308	33,286	1,338	31,327	0	3,514	2,54	2,8771654	-7,74%	0,600%
16	2,12	5,262	43,448	1,325	42,037	0	2,963	2,54	2,0716535	-2,33%	0,054%
15	3,05	9,785	53,889	1,194	51,223	0	5,038	2,54	3,8523622	20,83%	4,338%
14	3,30	6,575	63,795	1,354	62,188	0	3,641	2,54	2,5885827	-27,48%	7,553%
13	2,43	6,435	73,822	1,342	71,628	0	3,768	2,54	2,5334646	4,08%	0,167%
12	2,48	6,432	84,175	1,271	82,254	0	3,556	2,54	2,5322835	2,06%	0,043%
11	3,02	8,013	94,317	1,295	92,244	0	3,81	2,54	3,1547244	4,27%	0,182%
10	3,28	8,38	104,181	1,242	102,32	0	3,937	2,54	3,2992126	0,58%	0,003%
9	1,83	6,521	114,517	1,122	112,734	0	3,387	2,54	2,5673228	28,72%	8,248%
8	2,93	7,756	124,856	1,252	123,232	0	3,556	2,54	3,0535433	4,05%	0,164%
7	3,40	8,871	134,858	1,328	132,842	0	4,064	2,54	3,4925197	2,65%	0,070%
6	3,07	7,986	145,002	1,259	143,256	0	3,598	2,54	3,1440945	2,36%	0,056%
5	3,03	7,441	155,042	1,252	153,331	0	3,302	2,54	2,9295276	-3,43%	0,118%
4	3,18	8,941	165,201	1,258	163,026	0	4,657	2,54	3,5200787	9,66%	0,933%
3	2,90	6,941	175,417	1,219	173,778	0	3,175	2,54	2,7326772	-6,12%	0,375%
2	2,60	7,263	185,528	1,373	183,684	0	3,852	2,54	2,8594488	9,07%	0,823%
1	3,83	9,17	195,489	1,237	193,125	0	4,699	2,54	3,6102362	-6,09%	0,371%
										errore % medio	errore quadratico medio
										2,51%	1,250%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default - 120

Tabella E. 15 Livello di soglia: Default - 120

Num solco	Largh media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,661	3,06	1,267	1,778	0	2,498	2,54	2,2287402	1,29%	0,017%
19	2,10	5,403	13,28	1,27	11,98	0	2,582	2,54	2,1271654	1,28%	0,016%
18	2,12	5,708	23,445	1,292	22,013	0	3,006	2,54	2,2472441	5,66%	0,321%
17	3,10	7,158	33,294	1,336	31,538	0	3,302	2,54	2,8181102	-10,00%	1,001%
16	2,12	4,982	43,412	1,339	42,037	0	2,752	2,54	1,9614173	-8,09%	0,654%
15	3,05	9,627	53,903	1,202	51,223	0	5,038	2,54	3,7901575	19,53%	3,814%
14	3,30	6,274	63,787	1,362	62,23	0	3,556	2,54	2,4700787	-33,60%	11,289%
13	2,43	6,183	73,826	1,332	71,755	0	3,514	2,54	2,434252	0,17%	0,000%
12	2,48	6,287	84,176	1,269	82,338	0	3,471	2,54	2,4751969	-0,19%	0,000%
11	3,02	7,83	94,31	1,296	92,287	0	3,683	2,54	3,0826772	2,03%	0,041%
10	3,28	8,231	104,179	1,241	102,362	0	3,895	2,54	3,2405512	-1,22%	0,015%
9	1,83	6,396	114,521	1,121	112,734	0	3,387	2,54	2,5181102	27,33%	7,467%
8	2,93	7,608	124,852	1,253	123,275	0	3,471	2,54	2,9952756	2,18%	0,047%
7	3,40	8,649	134,842	1,323	132,884	0	3,937	2,54	3,4051181	0,15%	0,000%
6	3,07	7,806	144,99	1,26	143,256	0	3,598	2,54	3,0732283	0,11%	0,000%
5	3,03	7,303	155,043	1,253	153,374	0	3,217	2,54	2,8751969	-5,38%	0,290%
4	3,18	8,751	165,194	1,258	163,068	0	4,572	2,54	3,4452756	7,70%	0,593%
3	2,90	6,762	175,411	1,22	173,778	0	3,133	2,54	2,6622047	-8,93%	0,798%
2	2,60	7	185,501	1,363	183,727	0	3,683	2,54	2,7559055	5,66%	0,320%
1	3,83	8,953	195,477	1,237	193,167	0	4,445	2,54	3,5248031	-8,66%	0,750%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-0,15%	1,372%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default - 110

Tabella E. 16 Livello di soglia: Default - 110

Num solco	Largh media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,625	3,064	1,265	1,82	0	2,455	2,54	2,2145669	0,66%	0,004%
19	2,10	5,344	13,278	1,271	11,98	0	2,582	2,54	2,103937	0,19%	0,000%
18	2,12	5,651	23,44	1,297	22,013	0	2,963	2,54	2,2248031	4,71%	0,222%
17	3,10	7,109	33,299	1,335	31,581	0	3,217	2,54	2,7988189	-10,76%	1,158%
16	2,12	4,894	43,402	1,346	42,079	0	2,625	2,54	1,9267717	-10,03%	1,006%
15	3,05	9,529	53,907	1,204	51,266	0	4,995	2,54	3,7515748	18,70%	3,497%
14	3,30	6,151	63,782	1,364	62,23	0	3,556	2,54	2,4216535	-36,27%	13,156%
13	2,43	6,102	73,826	1,331	71,755	0	3,514	2,54	2,4023622	-1,15%	0,013%
12	2,48	6,229	84,173	1,269	82,338	0	3,429	2,54	2,4523622	-1,13%	0,013%
11	3,02	7,742	94,3	1,294	92,287	0	3,683	2,54	3,0480315	0,92%	0,008%
10	3,28	8,176	104,177	1,241	102,362	0	3,895	2,54	3,2188976	-1,90%	0,036%
9	1,83	6,339	114,521	1,117	112,734	0	3,387	2,54	2,4956693	26,67%	7,114%
8	2,93	7,552	124,848	1,253	123,275	0	3,471	2,54	2,9732283	1,45%	0,021%
7	3,40	8,547	134,833	1,319	132,884	0	3,895	2,54	3,3649606	-1,04%	0,011%
6	3,07	7,737	144,985	1,26	143,256	0	3,556	2,54	3,046063	-0,79%	0,006%
5	3,03	7,246	155,042	1,253	153,374	0	3,175	2,54	2,8527559	-6,21%	0,386%
4	3,18	8,654	165,182	1,254	163,068	0	4,487	2,54	3,4070866	6,67%	0,444%
3	2,90	6,686	175,411	1,22	173,821	0	3,048	2,54	2,6322835	-10,17%	1,034%
2	2,60	6,891	185,492	1,358	183,727	0	3,641	2,54	2,7129921	4,16%	0,173%
1	3,83	8,876	195,478	1,236	193,167	0	4,445	2,54	3,4944882	-9,60%	0,922%
										errore % medio	errore quadratico medio
										-1,25%	1,477%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default - 150

Tabella E. 17 Livello di soglia: Default - 150

Num. solco	Largh media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,797	3,051	1,266	1,736	0	2,582	2,54	2,2822835	3,61%	0,130%
19	2,10	5,545	13,285	1,274	11,938	0	2,667	2,54	2,1830709	3,81%	0,145%
18	2,12	5,889	23,454	1,284	22,013	0	3,048	2,54	2,3185039	8,56%	0,733%
17	3,10	7,323	33,287	1,337	31,327	0	3,514	2,54	2,8830709	-7,52%	0,566%
16	2,12	5,283	43,451	1,324	42,037	0	2,963	2,54	2,0799213	-1,93%	0,037%
15	3,05	9,806	53,887	1,193	51,223	0	5,038	2,54	3,8606299	21,00%	4,409%
14	3,30	6,606	63,797	1,355	62,188	0	3,641	2,54	2,6007874	-26,88%	7,228%
13	2,43	6,471	73,827	1,342	71,628	0	3,768	2,54	2,5476378	4,62%	0,213%
12	2,48	6,452	84,178	1,271	82,254	0	3,556	2,54	2,5401575	2,37%	0,056%
11	3,02	8,036	94,318	1,295	92,244	0	3,81	2,54	3,1637795	4,54%	0,207%
10	3,28	8,398	104,18	1,243	102,32	0	3,937	2,54	3,3062992	0,80%	0,006%
9	1,83	6,536	114,517	1,122	112,734	0	3,387	2,54	2,5732283	28,88%	8,342%
8	2,93	7,781	124,857	1,252	123,232	0	3,556	2,54	3,0633858	4,35%	0,190%
7	3,40	8,896	134,862	1,328	132,842	0	4,064	2,54	3,5023622	2,92%	0,085%
6	3,07	8,011	145,005	1,26	143,256	0	3,641	2,54	3,153937	2,66%	0,071%
5	3,03	7,452	155,041	1,253	153,331	0	3,302	2,54	2,9338583	-3,28%	0,107%
4	3,18	8,977	165,204	1,258	163,026	0	4,657	2,54	3,534252	10,02%	1,005%
3	2,90	6,957	175,416	1,218	173,736	0	3,217	2,54	2,7389764	-5,88%	0,346%
2	2,60	7,289	185,531	1,373	183,684	0	3,852	2,54	2,869685	9,40%	0,883%
1	3,83	9,195	195,489	1,238	193,125	0	4,699	2,54	3,6200787	-5,80%	0,336%
										errore % medio	errore quadratico medio
										2,81%	1,255%

Retro

Provino 3 lato uscita

Livello di soglia: Default - 155

Tabella E. 18 Livello di soglia: Default - 155

Num solco	Largh media calibro (mm)	Area	X	Y	BX	BY	Width	Height	Largh. solco (mm)	Errore %	Errore quadratico
20	2,20	5,805	3,051	1,266	1,736	0	2,582	2,54	2,2854331	3,74%	0,140%
19	2,10	5,557	13,286	1,274	11,938	0	2,667	2,54	2,1877953	4,01%	0,161%
18	2,12	5,923	23,454	1,284	21,971	0	3,09	2,54	2,3318898	9,09%	0,826%
17	3,10	7,357	33,283	1,337	31,327	0	3,556	2,54	2,8964567	-7,03%	0,494%
16	2,12	5,319	43,455	1,322	42,037	0	3,006	2,54	2,0940945	-1,24%	0,015%
15	3,05	9,909	53,9	1,191	51,223	0	5,038	2,54	3,9011811	21,82%	4,760%
14	3,30	6,652	63,801	1,355	62,188	0	3,683	2,54	2,6188976	-26,01%	6,764%
13	2,43	6,538	73,823	1,347	71,628	0	3,81	2,54	2,5740157	5,59%	0,313%
12	2,48	6,477	84,178	1,272	82,254	0	3,556	2,54	2,55	2,75%	0,075%
11	3,02	8,068	94,321	1,293	92,244	0	3,81	2,54	3,176378	4,92%	0,242%
10	3,28	8,423	104,178	1,243	102,32	0	3,979	2,54	3,3161417	1,09%	0,012%
9	1,83	6,552	114,516	1,123	112,734	0	3,429	2,54	2,5795276	29,06%	8,443%
8	2,93	7,801	124,859	1,252	123,232	0	3,556	2,54	3,0712598	4,60%	0,212%
7	3,40	8,925	134,864	1,327	132,842	0	4,064	2,54	3,5137795	3,24%	0,105%
6	3,07	8,043	145,009	1,261	143,214	0	3,683	2,54	3,1665354	3,05%	0,093%
5	3,03	7,47	155,043	1,253	153,331	0	3,302	2,54	2,9409449	-3,03%	0,092%
4	3,18	8,995	165,204	1,258	163,026	0	4,657	2,54	3,5413386	10,20%	1,041%
3	2,90	6,984	175,415	1,218	173,736	0	3,26	2,54	2,7496063	-5,47%	0,299%
2	2,60	7,333	185,533	1,374	183,684	0	3,852	2,54	2,8870079	9,94%	0,988%
1	3,83	9,28	195,494	1,236	193,125	0	4,699	2,54	3,6535433	-4,83%	0,233%
										errore % medio	errore quadratico medio
										3,27%	1,27%

Appendice F

Valutazione dell'influenza del riscaldamento dello scanner sulla misurazione

La misura della larghezza dei solchi viene effettuata partendo dall'analisi dell'immagine. È importante quindi valutare che il riscaldamento dello scanner e quindi la scansione dell'immagine che verrà poi analizzata dal software ImageJ, non siano influenti sulla successiva misura.

La verifica si articola in due fasi: la prima ha l'obiettivo di quantificare il riscaldamento totale dello scanner su un totale di 20 immagini scannerizzate e valutare l'andamento dell'area misurata in funzione della temperatura rilevata; la seconda fase consiste nella valutazione della significatività del fattore "Scansione" sulla misura dell'area del solco tagliato.

F.1 Valutazione del riscaldamento dello scanner

Per l'analisi dell'immagine sono state condotte 8 scansioni: 4 per il "fronte" di ciascuno dei provini e 4 per "retro". L'indagine sperimentale per la valutazione del riscaldamento dello scanner prevede un totale di 20 scansioni, in questo modo è possibile monitorarne il riscaldamento stesso in un intervallo temporale che comprende un numero di doppio di scansioni rispetto a quelle necessarie per l'analisi della qualità del taglio.

Si applicano allo scanner due termocoppie di tipo K: una applicata sul retro per la valutazione del riscaldamento dello scanner, l'altra per il monitoraggio della temperatura ambiente.



Figura F. 1 Termocoppie applicate allo scanner

In seguito vengono eseguite venti scansioni del provino n. ro 3 sul solo lato in uscita senza mai muovere il provino dallo scanner per garantire le medesime condizioni nella scannerizzazione dell'immagine. Le acquisizioni delle immagini sono effettuate utilizzando la stessa procedura che ha interessato la fase sperimentale per l'analisi della qualità del taglio. Le immagini sono acquisite a 600 dpi in toni di grigio e salvate in formato ".tiff" e il livello di soglia è fissato a 145.

In seguito tramite il software ImageJ viene misurata l'area dello stesso solco per tutte le venti scansioni. Si considera l'area in uscita del solco n.ro 1 in modo da analizzare il caso peggiore: la variabilità della misura sul "retro" è maggiore che sul "fronte".

Per ritagliare la medesima area del solco in ciascuna scansione, si ripetono gli stessi comandi per ognuna delle venti immagini, utilizzando la macro riportata in seguito.

```
makeRectangle(544, 624, 1024, 240);  
run("Crop");  
run("Set Scale...", "distance=600 known=25.4 pixel=1 unit=mm");  
setAutoThreshold("Default");  
//run("Threshold...");  
setThreshold(0, 145);  
run("Convert to Mask");  
run("Analyze Particles...", "size=5-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing  
display include");
```

Si riporta, come esempio, un' immagine del solco n. ro 1 ottenuta da una delle venti scansioni.



Figura F. 2 Solco n. ro 1, provino 3 lato "retro"

In seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla sperimentazione. Dall' andamento della temperatura dello scanner in funzione delle 20 ripetizioni si nota che l'innalzamento di temperatura è pari a 0,5°C.

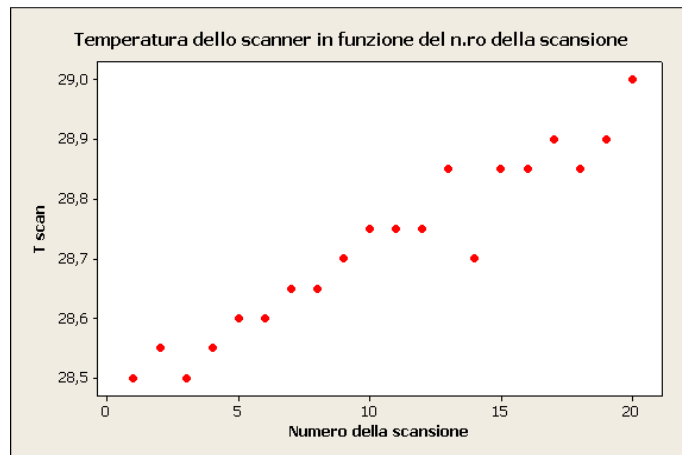


Figura F. 3 Temperatura dello scanner in funzione della scansione

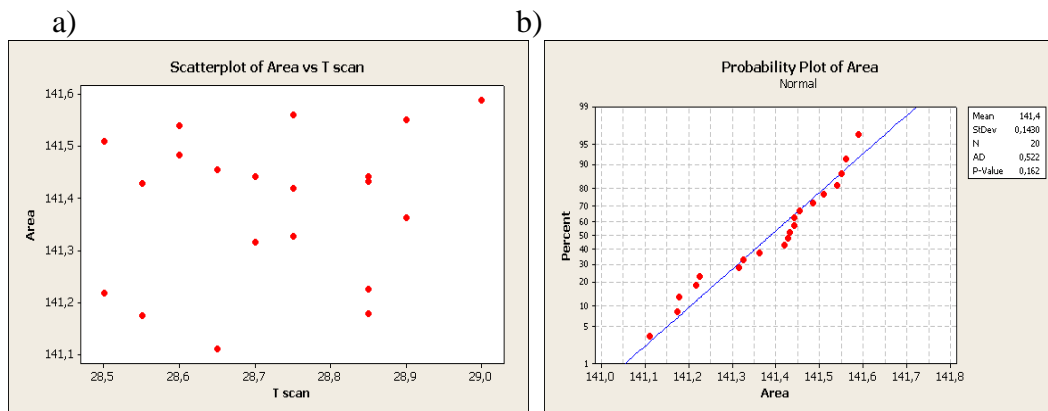


Figura F. 4 a) Andamento dell'area misurata in funzione della temperatura dello scanner; b) Distribuzione normale dei valori di area misurata

L'andamento dell'area misurata in funzione del riscaldamento dello scanner (Fig. F.4 a) dimostra che anche a temperature superiori il valore di area misurata può essere pari al valore misurato per temperature inferiori: a differenti valori di temperatura l'area misurata può essere la stessa. Inoltre, i valori dell'area misurata sono distribuiti secondo una normale (Fig. F.4.b): non sono presenti effetti sistematici sulla misura.

L'autocorrelation test dimostra, inoltre, che non sono presenti trend significativi nell'andamento dell'area misurata in funzione della temperatura dello scanner: i valori di area misurata non sono crescenti nel tempo e quindi con la temperatura (Fig. F.5).

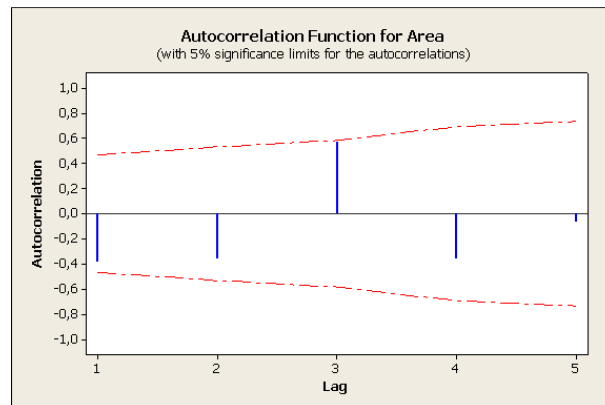


Figura F. 5 Autocorrelation test per la valutazione dell'andamento dell'Area in funzione della temperatura dello scanner

F.2 Valutazione dell'effetto della "Scansione" sulla misura

Una successiva verifica per escludere la significatività della scansione sulla successiva misura dell'area del solco prevede la ripetizione di 10 scansioni successive del "retro" del provino n. ro 3.

A intervalli di due ore ciascuna, in modo da consentire il raffreddamento dello scanner, vengono effettuate tre ripetizioni delle dieci scansioni; in questo modo il fattore "Scansione" è fatto variare in dieci livelli, per tre ripetizioni.

Sarà possibile valutare l'effetto del fattore "Scansione" sull' "Area misurata".

È importante ricordare che le scannerizzazioni dell'immagine sono effettuate nelle medesime condizioni. Tutte le 30 ripetizioni sono effettuate mantenendo il provino nella stessa posizione sullo scanner e rivestendo il provino con una mascheratura nera. Le immagini sono acquisite a 600 dpi in toni di grigio, sono salvate in formato ".tiff" e viene applicata la soglia ottima pari a 145.

Per garantire di tagliare correttamente l'immagine corrispondente al solco di uscita del taglio n. ro 1 del provino n. ro 3, a tutte le 30 ripetizioni viene applicata la macro riportata al paragrafo precedente.

I risultati dell'ANOVA confermano che non c'è quindi evidenza statistica per affermare che il fattore "Scansione" ha influenza sull' "Area misurata". La scansione non ha effetti sull'area misurata.

One-way ANOVA: Area versus Scansione

Source	DF	SS	MS	F	P
Scansione	9	0,2853	0,0317	0,78	0,639
Error	20	0,8156	0,0408		
Total	29	1,1009			

S = 0,2019 R-Sq = 25,91% R-Sq(adj) = 0,00%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	3	139,918	0,247	(-----*-----)
2	3	139,729	0,094	(-----*-----)
3	3	139,890	0,175	(-----*-----)
4	3	139,996	0,122	(-----*-----)
5	3	139,996	0,123	(-----*-----)
6	3	139,806	0,240	(-----*-----)
7	3	139,923	0,221	(-----*-----)
8	3	139,750	0,216	(-----*-----)
9	3	139,727	0,280	(-----*-----)
10	3	139,868	0,214	(-----*-----)

Pooled StDev = 0,202

Infine si riportano i risultati per la verifica della ipotesi dell'ANOVA: *normalità dei residui, omogeneità della varianza e indipendenza dei residui.*

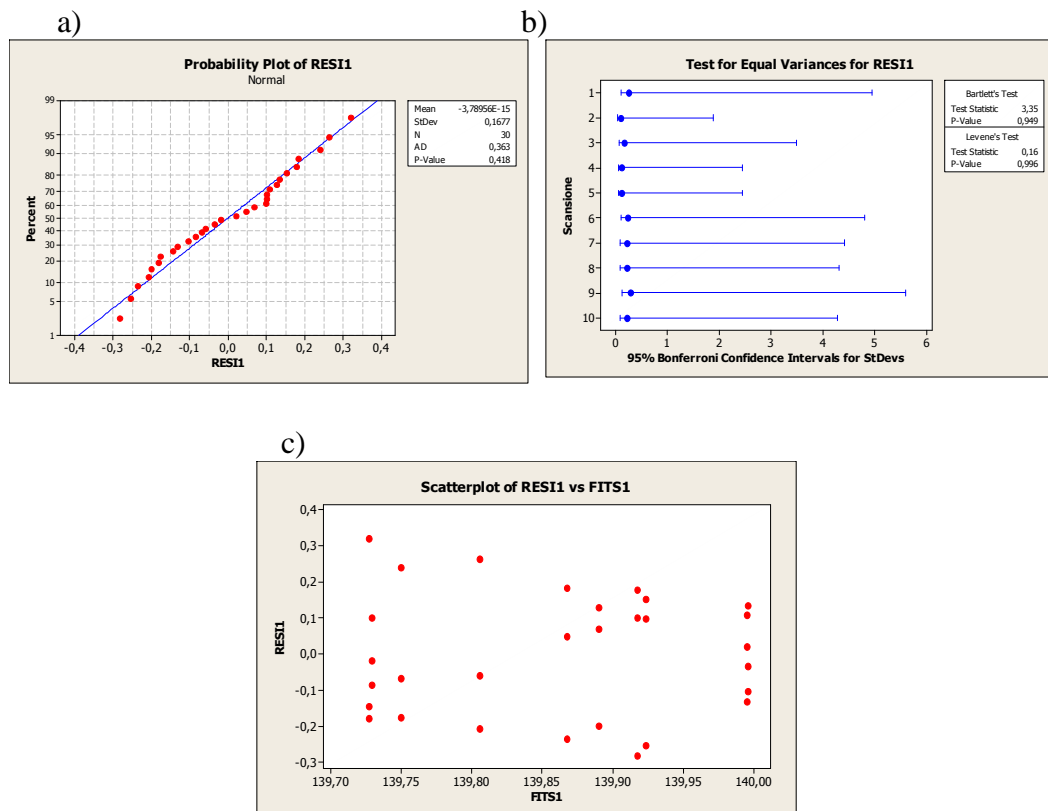


Figura F. 6 Verifica delle ipotesi dell'ANOVA: a) normalità dei residui, b) omogeneità della varianza, d) indipendenza dei residui.

Tabella F. 1 Area misurata a diverse temperature dello scanner

T amb °C	T scan °C	Area (mm ²)
27,75	28,5	141,218
27,75	28,55	141,428
27,7	28,5	141,51
27,7	28,55	141,175
27,75	28,6	141,484
27,55	28,6	141,539
27,8	28,65	141,111
27,7	28,65	141,455
27,75	28,7	141,315
27,7	28,75	141,419
27,7	28,75	141,561
27,65	28,75	141,326
27,9	28,85	141,432
27,85	28,7	141,441
27,85	28,85	141,179
27,9	28,85	141,441
27,9	28,9	141,55
27,8	28,85	141,226
27,85	28,9	141,362
27,9	29	141,588

Tabella F. 2 Risultati del piano fattoriale per la valutazione dell'effetto della scansione sull'area misurata

Ripetizione	Scansione	Area (mm ²)	RESI1	FITS1
1	1	140,019	0,101333	139,9177
1	2	139,711	-0,018	139,729
1	3	140,019	0,129	139,89
1	4	140,105	0,109333	139,9957
1	5	140,132	0,136	139,996
1	6	140,07	0,264333	139,8057
1	7	140,077	0,153667	139,9233
1	8	139,575	-0,17467	139,7497
1	9	139,548	-0,17933	139,7273
1	10	139,917	0,049	139,868
2	1	140,098	0,180333	139,9177
2	2	139,831	0,102	139,729

2	3	139,691	-0,199	139,89
2	4	140,018	0,022333	139,9957
2	5	139,894	-0,102	139,996
2	6	139,747	-0,05867	139,8057
2	7	140,023	0,099667	139,9233
2	8	139,683	-0,06667	139,7497
2	9	140,05	0,322667	139,7273
2	10	140,053	0,185	139,868
3	1	139,636	-0,28167	139,9177
3	2	139,645	-0,084	139,729
3	3	139,96	0,07	139,89
3	4	139,864	-0,13167	139,9957
3	5	139,962	-0,034	139,996
3	6	139,6	-0,20567	139,8057
3	7	139,67	-0,25333	139,9233
3	8	139,991	0,241333	139,7497
3	9	139,584	-0,14333	139,7273
3	10	139,634	-0,234	139,868

English

■ Specifications

		CanoScan LiDE 25	CanoScan LiDE 60
Scanner Type		Flatbed	
Scanning Element		CIS (Color Contact Image Sensor)	
Light Source		3-color (RGB) LED	
Optical Resolution(*1)		1200 x 2400 dpi	
Selectable Resolution		25 - 19200 dpi (ScanGear CS)	
Scanning Bit Depth	Color	16 bit input/8 bit output for eachcolor (RGB)	16 bit input/16 bit or 8 bit output for each color (RGB)
	Grayscale	16 bit input / 8 bit output	
Scanning Speed	Color	16 msec./line (600dpi), 32 msec./line (1200dpi) (*2)	6.4 msec./line (600dpi), 12.7 msec./line (1200dpi) (*3)
	Grayscale, B&W	5.3 msec./line (600dpi), 10.6 msec./line (1200dpi) (*2)	3.1 msec./line (600dpi), 4.2 msec./line (1200dpi) (*3)
Preview Speed		Approximately 16 sec. (*2,*4)	Approximately 9 sec. (*3,*4)
Interface		USB 1.1	USB 2.0 Hi-Speed/USB (USB1.1 equivalent)
Maximum Document Size		A4/Letter: 216 x 297 mm	
Scanner Buttons		3 buttons: COPY, SCAN, E-MAIL	4 buttons: COPY, SCAN, PDF, E-MAIL
Operating Range	Temperature	5°C to 35°C	
	Humidity	10% to 90% RH (without condensation formation)	
Power Requirements		Supplied via USB port (No external adapter required)	
Power Consumptions		In operation: 2.5watts maximum, Stand by: 1.4watts	In operation: 2.5watts maximum, Stand by: 1.5watts
Maximum Exterior Dimensions		256 x 383 x 34 mm	258 x 374 x 40 mm
Weight		Approximately 1.5 kg	Approximately 1.74 kg

*1 Optical resolution is a measure of maximum hardware sampling resolution, based on ISO 14473 standard.

*2 The fastest speed in USB 1.1 on Windows PC. Transfer time to computer is not included.

*3 The fastest speed in USB 2.0 Hi-Speed mode on Windows PC. Transfer time to computer is not included.

*4 Calibration processing time is not included.

• Note that only the initially equipped interface is supported.

• Specifications are subject to change without notice.

■ Warranty

- The warranty card is required to request a repair under warranty. Make sure you record the information and store it in a safe location.
- Guaranteed servicing for this equipment will expire five years after production ceases.

The socket-outlet shall be installed near the equipment and shall be easily accessible.

Use of a shielded cable with the ferrite core(s) provided with the scanner is necessary to comply with the technical requirements of the EMC Directive.

Warning

When you use this product, you should pay attention to the following legal issues:

- Scanning of certain documents, such as bank notes (bank bills), government bonds and public certificates, may be prohibited by law and may result in criminal and/or civil liability.
 - You may be required under law to obtain authorization from a person possessing copyrights or other legal rights to the item being scanned.
- If you are uncertain of the legality of scanning any particular item, you should consult your legal adviser in advance.

- Adobe® and Acrobat® are either registered trademarks or trademarks of Adobe Systems Incorporated in the U.S. and/or other countries.
- Microsoft® and Windows® are either registered trademarks or trademarks of Microsoft Corporation in the U.S. and/or other countries.
- Macintosh, Mac and the Mac logo are trademarks of Apple Computer, Inc., registered in the U.S. and other countries.
- ©ArcSoft, Inc. All rights reserved for PhotoStudio.

Figura F. 7 Dati tecnici dello scanner utilizzato

Appendice G

Macro utilizzate per l'analisi dell'immagine

In questa sezione vengono riportate le macro in formato .txt, utilizzate per l'analisi dell'immagine. Le macro, utilizzate in precedenza per l'analisi della qualità del taglio in pannelli in schiuma metallica di spessore 10 mm [Mon06], sono state riadattate per essere utilizzate anche nella presente sperimentazione in pannelli da 30 mm.

La prima macro consente l'apertura di ciascuna delle otto delle immagine scannerizzate, in seguito viene impostata la scala spaziale (pixel/mm) e l'immagine viene ruotata di 90° in verso orario e, nel caso di immagini relative al "retro" del provino (lato di uscita) i solchi vengono specchiati per garantire la corrispondenza dei solchi sul "fronte" (lato in ingresso) e sul "retro" (lato in uscita) e si numerano i solchi. Si ritagliano i 40 mm centrali dei solchi in modo da eliminare le zone corrispondenti all'accelerazione e decelerazione della macchina (10 mm superiori e inferiori di ciascun solco). Infine viene applicato il livello di soglia ottimo a ciascuna immagine, si crea così la "maschera" dell'immagine in soli toni di bianco e nero.

La seconda macro consente la misurazione locale dell'area del solco di taglio, per un totale di 1600 misurazioni a scansione (20 tagli a provino* 80 strisce). Le misurazioni sono ripetute per tutte le 8 immagini scannerizzate (4 immagini per il "fronte" e 4 immagini per il "retro"), per un totale di 6400 misurazioni per il "fronte" (lato ingresso del provino) e 6400 misurazioni per il "retro" (lato ingresso del provino).

Nel caso di particelle doppie presenti all'interno della striscia selezionata, si utilizza un'opportuna procedura di misura in cui lo spigolo superiore sinistro del *bounding rectangle* è individuato dalle minime coordinate X e Y tra le particelle trovate, mentre lo spigolo inferiore destro è individuato dalle massime coordinate X e Y delle particelle [Mon06].

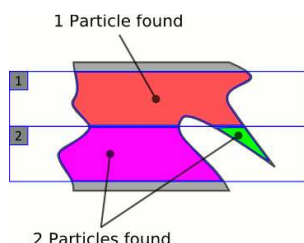


Figura G. 1 Esempio di particelle multiple nella striscia individuata [Mon06]

Si definiscono [Mon06]:

m: numero di particelle trovate nella selezione rettangolare;
 (BXB, BYB): coordinate dello spigolo superiore sinistro del bounding rectangle;
 (BXT, BYT): coordinate dello spigolo inferiore destro del bounding rectangle;
 BW: larghezza del bounding rectangle;
 BH: altezza del bounding rectangle;
 A: area;
 (CX, CY): coordinate del centroide.

Le coordinate dello spigolo superiore sinistro sono individuate da [Mon06]:

$$BXT_{eq} = \min(BXT_j); BYT_{eq} = \min(BYT_j) \quad (\text{G. 1})$$

Le coordinate dello spigolo inferiore destro sono individuate da [Mon06]:

$$BXB_{eq} = \max(BXB_j); BYB_{eq} = \max(BYB_j) \quad (\text{G. 2})$$

Per ogni *bounding rectangle* vale inoltre la seguente espressione [Mon06]:

$$BXB = BX + BW; BYB = BY + BH \quad (\text{G. 3})$$

$$A_{eq} = \sum_{j=1}^m A_j \quad (\text{G. 4})$$

Larghezza ed altezza valgono [Mon06]:

$$BW_{eq} = BXB_{eq} - BXT_{eq}; BH_{eq} = BYB_{eq} - BYT_{eq} \quad (\text{G. 5})$$

Le coordinate del centroide corrispondono a [Mon06]:

$$CX_{eq} = \frac{1}{A_{eq}} \cdot \sum_{j=1}^m CX_j \cdot A_j; \quad CY_{eq} = \frac{1}{A_{eq}} \cdot \sum_{j=1}^m CY_j \cdot A_j \quad (\text{G. 6})$$

MACRO 1: Applica i livelli di soglia all'immagine e crea la "maschera" dell'immagine stessa

```
// Applica vari livelli di soglia all'immagine aperta e salva l'immagine ottenuta nella directory BaseName
//Parametri
Fronte=1; // Vale 1 per fronte e 0 per retro
Prefisso=getDirectory("Choose Source Directory ");
Suffisso=".tif";
ValoreSoglia=145;
BaseX=118;
Altezza=960;
BaseY=1652-236-Altezza;
BaseX_StringaFronte=50;
BaseX_StringaRetro=50;
ParticleAnalysis=1; //Vale 1 se si vogliono misurare i solchi

NomiFile=newArray(4);
NomiFile[0]= "prov_1_lato_ing";
NomiFile[1]= "prov_2_lato_ing";
NomiFile[2]= "prov_3_lato_ing";
NomiFile[3]= "prov_4_lato_ing";

NumeroTagli=newArray(4);
NumeroTagli[0]= 20;
NumeroTagli[1]= 20;
NumeroTagli[2]= 20;
NumeroTagli[3]= 20;

//Macro
setBatchMode(true);
if (ParticleAnalysis==1){
    run("Clear Results");
}
for (i = 0; i <NomiFile.length; i++){
    showStatus("Processing: "+NomiFile[i]);
    showProgress(i+1, NomiFile.length);
    Larghezza=(236)*NumeroTagli[i]+116;
    open(Prefisso+NomiFile[i]+Suffisso);
    setForegroundColor(0, 0, 0);
    setFont("SansSerif", 20, "plain");
    run("Set Scale...", "distance=600 known=25.4 pixel=1 unit=mm");
    if (Fronte==1){
        run("Rotate 90 Degrees Right");
        BaseX_Stringa=BaseX_StringaFronte;
    } else {
        run("Rotate 90 Degrees Right");
        run("Flip Horizontally");
        BaseX_Stringa=BaseX_StringaRetro;
    }
    makeRectangle(BaseX, BaseY, Larghezza , Altezza);
    run("Crop");
}
```

```
for (j = 1; j <=NumeroTagli[i]; j++){
    drawString(toString(j), BaseX_Stringa+(j-1)*236.22, 650);
}
saveAs("Png", Prefisso+NomiFile[i]+"_Crop"+Suffisso);
setThreshold(0, ValoreSoglia);
run("Convert to Mask");
saveAs("Png", Prefisso+NomiFile[i]+"_Tres"+Suffisso);
if (ParticleAnalysis==1){
run("Analyze Particles...", "size=5-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Masks display include");
for (j = 1; j <=NumeroTagli[i]; j++){
    drawString(toString(j), BaseX_Stringa+(j-1)*236.22, 650);
}
saveAs("Png", Prefisso+NomiFile[i]+"_Mask"+Suffisso);
close();
}
close();
}
setBatchMode(false);
```

MACRO 2. Le “maschere” delle immagini rielaborate tramite la macro 1, vengono ora passate alla presente macro che provvede alla suddivisione di ciascun solco in 80 strisce di uguali dimensioni. Il comando “Analyze Particles” provvede alla misurazione locale dell’area dei solchi.

Macro per suddivisione del rettangolo ottenuto in strisce

```
NumeroStrisceOrizzontali=80; //Numero di parti in cui suddividere l’immagine in Y
OffsetSelezione=20; //larghezza aggiuntiva in pixel delle selezioni rettangolari rispetto alla larghezza del solco

//Timer inizio esecuzione
StartTime=getTime();

//Dichiarazioni interne
indexFile=0; //indice per ciclare sui files
indexCut=0; //indice per ciclare sui tagli
indexSelection=0; //indice per ciclare la selezione sul singolo taglio
indexParticle=0; //indice per ciclare sulle particles individuate in una selezione
resCounter=0; //contatore per i risultati

//Impostazioni preliminari di imageJ
run("Set Measurements...", "area centroid bounding display redirect=None decimal=3"); //Impostazione grandezze da misurare
print("\Clear"); // Svuota la finestra Log
roiManager("reset"); //Svuota il roimanager
run("Clear Results"); //Svuota la finestra results

//Input utente
pathImmagine=getDirectory("Selezionare la directory che contiene le immagini da elaborare (Mask files)"); //Chide la directory dove si trovano le immagini
NomiFile=split(File.openAsString(File.openDialog("Selezionare la lista dei file da elaborare")), "\n") //Chiede la lista dei files
//Logga i files da analizzare
print("[ "+timeString()+" ] "+ NomiFile.length + " files found to be analyzed:");
for (indexFile=0; indexFile<NomiFile.length; indexFile++){
    print("          "+NomiFile[indexFile]);
}
pathRisultati=getDirectory("Selezionare la directory dove salvare i risultati"); //Chiede la directory dove salvare

//Cicli di processo delle immagini
for (indexFile = 0; indexFile <NomiFile.length; indexFile++){
```

```

setBatchMode(true);
run("Clear Results");
autoUpdate(false);
open(pathImmagini+NomiFile[indexFile]);
setForegroundColor(0, 0, 0);
setFont("SansSerif", 50, "plain");
showStatus("Processing: "+NomiFile[indexFile]);
showProgress(indexFile+1, NomiFile.length);
AltezzaSelezione=floor(getHeight()/NumeroStrisceOrizzontali);
resCounter=nResults;

//Particle analysis preliminare sull'immagine per determinare numero, posizione e larghezza del bounding
rectangle di tutti i tagli
run("Set Scale...", "distance=1 known=1 pixel=1 unit=pixel");
resCounter=nResults;
run("Analyze Particles...", "size="+toString(500)+"-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
include");
NumeroTagli=nResults-resCounter; //Salva il numero di tagli nell'immagine
XTagli=newArray(NumeroTagli);
LarghezzaTagli=newArray(NumeroTagli);

//logga il numero dei tagli
print("[ "+timeString()+" ] Analyzing "+ NomiFile[indexFile]+ " --> " +NumeroTagli+" cuts found;");

for (indexCut = 0; indexCut <NumeroTagli; indexCut++){ //Salva posizione e larghezza del bounding rectangle di
tutti i tagli individuati nell'analisi preliminare
    XTagli[indexCut]=floor(getResult("BX",indexCut));
    LarghezzaTagli[indexCut]=floor(getResult("Width",indexCut));
    print("          Cut " + (indexCut) + ": Area="+getResult("Area",indexCut)+" X=
"+getResult("X",indexCut)+" Y="+getResult("Y",indexCut)+" BX= "+getResult("BX",indexCut)+"
BY="+getResult("BY",indexCut)+" Width= "+getResult("Width",indexCut)+"
Height="+getResult("Height",indexCut)+"
ColBEX="+parseFloat(getResult("Width",indexCut))+parseFloat(getResult("BX",indexCut))+
ColBEY="+parseFloat(getResult("Height",indexCut))+parseFloat(getResult("BY",indexCut));
}

//Setta la scala in mm (risoluzione scansioni 600dpi)
run("Set Scale...", "distance=600 known=25.4 pixel=1 unit=mm");

//Inizializza le variabili parcheggio per la posizione delle selezioni rettangolari
AngoloX=0;
AngoloY=0;

//elimina nella finestra results le righe trovate durante la particle analysis preliminare
for (indexCut = resCounter; indexCut <resCounter+NumeroTagli; indexCut++){
    run("delete Row",resCounter);
}

for (indexCut = 0; indexCut <NumeroTagli; indexCut++){ //Cicla la particle analysis su una area rettangolare
flottante su tutti i tagli
    AngoloY=0;
    if (XTagli[indexCut]-floor(OffsetSelezione/2)>0) { //La distanza tra il primo solco e il margine sx
dell'immagine è maggiore del margine di selezione attorno al solco impostato quindi usa quest'ultimo
        AngoloX=XTagli[indexCut]-floor(OffsetSelezione/2);
    } else { //La distanza è minore del margine quindi la selezione del primo solco parte dal margine
sx dell'immagine
        AngoloX=0;
    }
    if (XTagli[indexCut]+LarghezzaTagli[indexCut]+OffsetSelezione<getWidth()) { //La distanza tra
l'ultimo solco e il margine dx dell'immagine è maggiore del margine di selezione attorno al solco impostato quindi usa
quest'ultimo
        LarghezzaSelezione=LarghezzaTagli[indexCut]+OffsetSelezione;

```

```

    } else { //La distanza è minore del margine quindi la selezione dell'ultimo solco finisce sul margine
dx dell'immagine
        LarghezzaSelezione=getWidth()-(XTagli[indexCut]-floor(OffsetSelezione/2));
    }

    for (indexSelection = 0; indexSelection <NumeroStrisceOrizzontali; indexSelection++){ //Cicla la
selezione rettangolare su tutto il solco
        AngoloY=indexSelection*AltezzaSelezione; //Calcola la Y dell'angolo in alto a sinistra
per la striscia corrente
        makeRectangle(AngoloX, AngoloY, LarghezzaSelezione, AltezzaSelezione); //Crea la
selezione rettangolare
        resCounter=nResults; //Salva il numero di particelle già misurate nella finestra results
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
include add"); //Esegue la particle analysis sulla selezione aggiungendo le particelle al roimanager e ai results
resCounterAfter=nResults; //Salva il numero di particelle già misurate nella finestra
results dopo la particle analysis
        setResult("Cut",resCounter,indexCut+1); //Salva il numero del taglio nella riga della
prima particella trovata nella particle analysis appena fatta
        setResult("Particles",resCounter,resCounterAfter-resCounter); //Salva il numero di
particles trovate nella selezione rettangolare nella riga della prima particella trovata nella particle analysis appena fatta
        if (resCounterAfter-resCounter>1) { //Se sono state trovate più particles ricalcola le
misure come se si trattasse di una sola particle
            //logga un po'
            print("[ "+timeString()+"] "+ NomiFile[indexFile]+" --> "+ nResults-
resCounter+" areas found in rectangle "+(resCounter+1)+": X= "+AngoloX+" Y="+AngoloY+"
Width="+LarghezzaSelezione+" Height="+AltezzaSelezione);
//Inizializza le variabili di parcheggio
            AreaT=0;
            ColXT=0;
            ColYT=0;
            ColBXT=1e6;
            ColBYT=1e6;
            ColBEX=0;
            ColBEY=0;
            ColBEXT=0;
            ColBEYT=0;

            ColBWidth=0;
            ColBHeight=0;

            for (indexParticle=resCounter;
indexParticle<resCounterAfter;indexParticle++){ //Legge dalla finestra results le misure delle singole particles trovate e
calcola le misure equivalenti
                AreaT=AreaT+parseFloat(getResult("Area",indexParticle));
//Calcolo area

                ColXT=ColXT+getResult("X",indexParticle)*getResult("Area",indexParticle); //Calcolo X centroide

                ColYT=ColYT+getResult("Y",indexParticle)*getResult("Area",indexParticle); //Calcolo Y centroide

                ColBXT=minOf(parseFloat(getResult("BX",indexParticle)),ColBXT); //Calcolo X dello spigolo superiore sx
del bounding rectangle

                ColBYT=minOf(parseFloat(getResult("BY",indexParticle)),ColBYT); //Calcolo Y dello spigolo superiore sx
del bounding rectangle

                ColBEXT=maxOf(ColBEXT,parseFloat(getResult("Width",indexParticle))+parseFloat(getResult("BX",index
Particle))); //Calcolo X dello spigolo inferiore dx del bounding rectangle

                ColBEYT=maxOf(ColBEYT,parseFloat(getResult("Height",indexParticle))+parseFloat(getResult("BY",inde
xParticle))); //Calcolo Y dello spigolo inferiore dx del bounding rectangle

                //Logga i dati delle particelle
                print("          Particle "+ (indexParticle-resCounter+1) +":
Area="+getResult("Area",indexParticle)+" X= "+getResult("X",indexParticle)+" Y="+getResult("Y",indexParticle)+"
BX= "+getResult("BX",indexParticle)+" BY="+getResult("BY",indexParticle)+" Width=

```

```

"+getResult("Width",indexParticle)+" Height="+getResult("Height",indexParticle)+"
ColBEX="+parseFloat(getResult("Width",indexParticle))+parseFloat(getResult("BX",indexParticle))+
ColBEY="+parseFloat(getResult("Height",indexParticle))+parseFloat(getResult("BY",indexParticle));

        //Elimina le selezioni delle particelle individuate nella selezione rettangolare
        roiManager("select",roiManager("count")-1);
        roiManager("delete")
    }

    makeRectangle(AngoloX, AngoloY, LarghezzaSelezione,
AltezzaSelezione); //Ricrea la selezione rettangolare per inserirla nel roiManager (non viene usata per fare nessuna
misura)
        roiManager("add") //La selezione rettangolare viene aggiunta per far vedere
il rettangolo in cui è stata eseguita l'analisi senza le singole particelle
        for (indexParticle=resCounter+1;
indexParticle<resCounterAfter;indexParticle++){ //Elimina dalla finestra results tutte le particles trovate nella selezione
rettangolare tranne la prima

            run("delete Row",resCounter+1);
        }
        ColXT=ColXT/AreaT; //Completa il calcolo della X del centroide
        ColYT=ColYT/AreaT; //Completa il calcolo della Y del centroide
        ColBWidth=ColBEXT-ColBXT; //Calcola la larghezza del bounding
rectangle
        ColBHeight=ColBEYT-ColBYT; //Calcola l'altezza del bounding rectangle

        //Logga i dati equivalenti
        print("        Particle Sum: Area="+AreaT+" X="+ColXT+" Y="+ColYT+" BX=
"+ColBXT+" BY="+ColBYT+" Width="+ColBWidth+" Height="+ColBHeight+" ColBEXT="+ColBEXT+"
ColBEYT="+ColBEYT);

        //Scrive le misure della particella equivalente nella finestra results
sovriscrivendo quelli della prima particella trovata nella selezione rettangolare
        setResult("Area",resCounter,AreaT);
        setResult("X",resCounter,ColXT);
        setResult("Y",resCounter,ColYT);
        setResult("BX",resCounter,ColBXT);
        setResult("BY",resCounter,ColBYT);
        setResult("Width",resCounter,ColBWidth);
        setResult("Height",resCounter,ColBHeight);
    }
}
}
updateResults(); //Aggiorna la tabella dei risultati con le colonne user-defined
updateDisplay(); //Aggiorna il display dell'immagine
//Salva la selezione del roiManager
soloNome=substring(NomiFile[indexFile],0,indexOf(NomiFile[indexFile],"."));
roiManager("Save", pathRisultati+soloNome+"_Rois.zip");
print("[ "+timeString()+"]   "+ soloNome + "_Rois.zip" --> Rois saved");

setBatchMode(false); //Esce dalla modalità batch
run("Select None"); //Deseleziona tutto (altrimenti rimarrebbe selezionato l'ultimo rettangolo creato)
setOption("Show All",true); //Visualizza tutte le selezioni presenti nel roiManager

// Salva la finestra results come file di testo
selectWindow("Results");
saveAs("txt", pathRisultati+ soloNome + "_Results.txt");
print("[ "+timeString()+]   "+ soloNome + " --> Results file saved (" +nResults+" particles found)");

//Crea e salva uno screenshot dell'immagine con tutte le selezioni
//tra la riga che mostra le selzioni e lo screenshot è stato aggiunto il salvataggio per assicurarsi che passi
abbastanza tempo da visualizzare completamente l'immagine
selectWindow(NomiFile[indexFile]);
wait(1000); //Aspetta 1 secondo per essere sicuri che l'immagine sia completamente visualizzata
runMacro("Window_Grabber");

```

```

        selectWindow("Screenshot of "+NomiFile[indexFile]);
        saveAs("Png", pathRisultati+soloNome+"_Screenshot.png");
        print("[ "+timeString()+"] " + soloNome + "_Screenshot.png" --> Screenshot saved");
        //Chiude le finestre
        close(); //Chiude lo screenshot
        selectWindow(NomiFile[indexFile]);
        run("RGB Color");
        setForegroundColor(0, 255, 255);
        roiManager("deselect");
        run("In");
        run("In");
        run("In");
        run("In");
        run("In");
        roiManager("label");
        run("8-bit Color", "number=4");
        saveAs("Png", pathRisultati+soloNome+"_Labels.png");
        print("[ "+timeString()+"] " + soloNome + "_Labels.png" --> Labelled image saved");
        setForegroundColor(0, 0, 0);

        roiManager("reset");
        close(); //Chiude l'immagine aperta
    }
    run("Clear Results");
    print("[ "+timeString()+"]"+ " Analisis completed");
    print("[ "+timeString()+"]"+ " Elapsed time --> " +((getTime()-StartTime)/1000)+" s");
    selectWindow("Log");
    saveAs("txt", pathRisultati+"ImageJ Results_Log.txt");

// -----
// Funzioni

function timeString(){
    //Questa funzione è stata copiata e modificata velocemente e male dalla macro GetDateAndTime.txt nella directory
    delle macro di imagej
    //Ritorna una stringa contenente la data e l'ora attuale (tipo timestamp)
    requires("1.34m");
    GMTOffset=0;
    year = 31536000//365 days measured in seconds
    day = 86400;
    hour= 3600;
    minute=60;
    MonthDays=newArray(31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31);//days in each month
    BaseDay=4;//Monday = 1;
    CurrTime=getTime();//time in milliseconds since 12:00 AM on Thursday, 1-jan-1970
    CurrTime=CurrTime/1000;//convert to seconds
    CurrTime = CurrTime + GMTOffset*hour;
    AM1200_2100Mar01=47540*day;//elapsed time since 12:00AM on 1-jan-1970 at 12:00AM 01-Mar-2100,
in seconds
    if (CurrTime>AM1200_2100Mar01) {showMessage("Date is inaccurate after Feb. 28, 2100: year 2100 is
NOT a leap year");} //not likely to still be in use by 2100!
    Time73=CurrTime-(day+3*year);//time in seconds since 12:00 AM on 1-jan-1973. 1973 is beginning of new
leap year block.
    RemainTime = Time73;
    LeapCycle = day+4*year;
    NumLeaps = floor(Time73/LeapCycle);//4-year blocks
    RemainTime = RemainTime-NumLeaps*LeapCycle;
    NormYears=floor(RemainTime/year);//Full years since last leap year
    RemainTime = RemainTime-NormYears*year;
    if (NormYears==3) {MonthDays[1]=29;} //current year is a leap year, Feb index is 1.
    else {MonthDays[1]=28;}
    Days=floor(RemainTime/day);
}

```

```

RemainTime=RemainTime-Days*day;
MonthIndex=-1;
Index=0;
while (MonthIndex<0) {
    if (Days>MonthDays[Index]) {
        Days=Days-MonthDays[Index];
        Index++;
    }
    else {MonthIndex=Index;}
}
Hours = floor(RemainTime/hour);
RemainTime = RemainTime - Hours*hour;
Minutes = floor(RemainTime/minute);
RemainTime = RemainTime - Minutes*minute;
Seconds = floor(RemainTime/1);
MilliSecs = floor(1000*(RemainTime-Seconds));

CurrYear = 1973+NumLeaps*4+NormYears;
CurrMonth = MonthIndex+1;//index starts at 0, month count starts at 1...
DayOfMonth=Days+1;
DayOfWeek= floor(CurrTime/day);
DayOfWeek=BaseDay+(DayOfWeek-7*floor(DayOfWeek/7));
if (DayOfWeek>7) {DayOfWeek = DayOfWeek-7;}
Output = toString(CurrYear)+"-"+twoDigit(CurrMonth)+"-"+twoDigit(DayOfMonth)+"
"+twoDigit(Hours)+":"+twoDigit(Minutes)+":"+twoDigit(Seconds);
return Output;
}

function twoDigit(number){
//Se number è composto da un solo carattere lo converte in stringa e aggiunge uno 0 se no lo converte in stringa e basta
park=toString(number);
if (lengthOf(park)<2) {
    return "0"+park;
} else {
    return park;
}
}
}

```


Appendice H

H.1 Tabelle riassuntive

In questa sezione vengono raccolte le tabelle che comprendono i risultati della sperimentazione per l'analisi della qualità dell'immagine. Vengono riportati i valori di *Larghezza media in ingresso*, *Larghezza media in uscita* e *Conicità media*, *Deviazione standard della larghezza in ingresso*, *Deviazione standard della larghezza in uscita* e *Deviazione standard sulla conicità media*. Questi sono calcolati sulla base delle misure locali restituite dalla funzione “Analyze Particles” del programma ImageJ.

Tabella H. 1 Risultati ottenuti per l'analisi della qualità del solco di taglio

Dati mediati											
Provino	Taglio	Largh media ing	Dev. Stand. Largh. ing	Largh. media usc	Dev. Stand. Largh. usc	Conicità media	Dev. Stand. Conicità	P (MPa)	Foro	Vel (mm/Min)	Dug+ Dfoc (mm)
1	1	0,838951772	0,031110741	2,184128937	0,345697986	-0,672588583	0,174786564	350	1	100	0,76
1	2	1,059768701	0,037981652	2,186122047	0,199743737	-0,563176673	0,102569734	350	7	50	0,76
1	3	0,858193898	0,027661107	2,24375	0,364250704	-0,692778051	0,18009348	350	1	50	0,76
1	4	0,924311024	0,05361949	2,650984252	0,564874748	-0,863336614	0,283510942	250	7	100	0,76
1	5	0,776624016	0,034733979	2,478715551	0,740305852	-0,851045768	0,366430315	250	1	100	0,76
1	6	0,95226378	0,057695145	2,564025591	0,453991006	-0,805880906	0,21664108	250	7	50	0,76
1	7	1,001254921	0,032532176	2,147244094	0,288102582	-0,572994587	0,145363259	350	7	100	0,76
1	8	0,994758858	0,045579482	2,410629921	0,364877263	-0,707935531	0,174723946	250	7	100	0,76
1	9	0,821628937	0,023656271	2,071751969	0,357486185	-0,625061516	0,179065413	250	1	100	0,76
1	10	1,041978346	0,041268843	2,347687008	0,326770659	-0,652854331	0,156265749	350	7	100	0,76
1	11	0,921850394	0,03170004	3,00019685	0,580397833	-1,039173228	0,286757659	350	1	50	0,76
1	12	0,922047244	0,029949967	2,370447835	0,394935035	-0,724200295	0,193719159	250	1	50	0,76
1	13	0,911737205	0,034478094	2,667027559	0,386580193	-0,877645177	0,196925917	350	7	50	0,76
1	14	0,892470472	0,040343998	2,586811024	0,424765254	-0,847170276	0,211237898	350	1	50	0,76
1	15	1,086072835	0,031915279	2,511958661	0,329655957	-0,712942913	0,165956681	250	7	50	0,76
1	16	1,070423228	0,052975335	2,376181102	0,246383346	-0,652878937	0,128682851	350	7	50	0,76
1	17	0,857258858	0,028512562	2,696112205	0,503149085	-0,919426673	0,250897525	350	1	100	0,76
1	18	0,788902559	0,042039526	2,689148622	0,522279093	-0,950123031	0,258713092	350	1	100	0,76
1	19	0,969143701	0,050151783	2,831323819	0,531774386	-0,931090059	0,269591286	250	7	100	0,76
1	20	1,026427165	0,070942083	2,565452756	0,608270942	-0,769512795	0,304926295	250	7	100	0,76
2	1	0,806151575	0,028490157	2,321653543	0,368131835	-0,757750984	0,185793608	350	1	50	0,76

Appendici

2	2	0,806766732	0,027825533	2,395226378	0,603969778	-0,794229823	0,306898729	350	1	100	0,76
2	3	0,932185039	0,04750181	2,317372047	0,485090543	-0,692593504	0,253243713	350	7	100	0,76
2	4	0,827952756	0,023825909	2,829429134	0,519941714	-1,000738189	0,261389963	350	1	50	0,76
2	5	0,831742126	0,030007847	2,561663386	0,480741006	-0,86496063	0,245822937	250	1	50	0,76
2	6	0,788779528	0,02481181	2,302632874	0,409439684	-0,756926673	0,203498778	250	1	100	0,76
2	7	0,950319882	0,032441584	2,358316929	0,259322308	-0,703998524	0,131283533	250	7	50	0,76
2	8	0,76449311	0,026256102	2,731225394	0,570490356	-0,983366142	0,288964652	350	1	100	0,76
2	9	0,9375	0,041532723	3,15691437	0,441334072	-1,109707185	0,222017985	250	7	50	0,76
2	10	0,793011811	0,022763605	2,639936024	0,537522106	-0,923462106	0,272680285	250	1	100	0,76
2	11	0,964074803	0,035867165	2,372047244	0,249516579	-0,70398622	0,130471072	250	7	50	0,76
2	12	0,743503937	0,040687853	2,580684055	0,470317591	-0,918590059	0,234758842	250	1	100	0,76
2	13	0,876771654	0,032396733	2,743208661	0,56427966	-0,933218504	0,288315002	250	7	100	0,76
2	14	0,769931102	0,026412805	2,826968504	0,473729057	-1,028518701	0,235654159	250	1	50	0,76
2	15	0,80671752	0,02858318	2,712278543	0,379820277	-0,952780512	0,190563347	250	1	50	0,76
2	16	0,791633858	0,025654873	2,406988189	0,363030201	-0,807677165	0,184274191	250	1	50	0,76
2	17	0,917937992	0,031834672	2,405757874	0,297935851	-0,743909941	0,146667473	350	7	100	0,76
2	18	0,919685039	0,029544	2,730561024	0,41597302	-0,905437992	0,213584817	350	7	50	0,76
2	19	0,895054134	0,033442711	2,462450787	0,345715698	-0,783698327	0,179601022	350	7	100	0,76
2	20	0,939640748	0,030788779	2,488681102	0,309100982	-0,774520177	0,153816855	350	7	50	0,76
3	1	1,289886811	0,057696202	3,223277559	0,352583788	-0,966695374	0,174625501	350	7	50	1
3	2	1,104133858	0,034320038	2,633636811	0,299786795	-0,764751476	0,154617443	250	1	50	1
3	3	1,214591535	0,038822432	2,662524606	0,295038751	-0,723966535	0,153662411	250	7	100	1
3	4	1,094931102	0,030217974	3,676476378	0,614226104	-1,290772638	0,3089659	250	1	50	1
3	5	1,285260827	0,057634491	3,061048228	0,254966015	-0,887893701	0,137847735	350	7	50	1
3	6	1,245644685	0,054833217	2,913065945	0,263437047	-0,83371063	0,137060637	350	7	50	1
3	7	1,198917323	0,051123472	2,634940945	0,347676211	-0,718011811	0,168181759	350	1	50	1
3	8	1,359547244	0,045305482	2,685088583	0,205353808	-0,662770669	0,102877517	350	7	50	1
3	9	1,268602362	0,044840582	2,620300197	0,36043435	-0,675848917	0,177544318	250	7	100	1
3	10	1,128198819	0,060155677	2,346432087	0,356637162	-0,609116634	0,184831146	350	1	100	1
3	11	1,271653543	0,034824277	2,362844488	0,222676607	-0,545595472	0,115716165	350	7	100	1
3	12	1,121825787	0,038767432	2,570349409	0,47829008	-0,724261811	0,236407443	350	1	50	1
3	13	1,081126969	0,030705425	2,430659449	0,452949462	-0,67476624	0,227585726	250	1	100	1
3	14	1,091461614	0,020614801	2,517593504	0,339071892	-0,713065945	0,16976657	350	1	100	1
3	15	1,132824803	0,042521825	2,938681102	0,578185098	-0,90292815	0,28057842	250	1	100	1
3	16	1,123597441	0,069302391	2,826279528	0,57345614	-0,851341043	0,285448427	250	1	100	1
3	17	1,342765748	0,046833634	2,749237205	0,210722817	-0,703235728	0,112462349	350	7	50	1
3	18	1,118307087	0,044701112	2,614345472	0,43740909	-0,748019193	0,223255922	350	1	100	1
3	19	1,121653543	0,028224513	2,416683071	0,506915397	-0,647514764	0,256453996	250	1	50	1

3	20	1,315182087	0,075105482	2,498080709	0,408190331	-0,591449311	0,226733088	250	7	50	1
4	1	1,152411417	0,040126266	2,603346457	0,364424811	-0,72546752	0,1788293	350	7	100	1
4	2	1,139148622	0,031979179	2,591338583	0,343010185	-0,72609498	0,177300357	350	7	100	1
4	3	1,035875984	0,022277631	2,476771654	0,746328421	-0,720447835	0,373825799	250	1	100	1
4	4	1,033120079	0,027171484	2,635383858	0,599426069	-0,80113189	0,299818655	250	1	50	1
4	5	1,041437008	0,025606647	2,496825787	0,374454633	-0,72769439	0,190147901	350	1	50	1
4	6	1,148031496	0,022671409	2,681200787	0,392786477	-0,766584646	0,195689985	350	7	100	1
4	7	0,992150591	0,073827946	2,232726378	0,817345513	-0,620287894	0,390905452	250	7	50	1
4	8	1,023449803	0,026469976	2,465009843	0,403020969	-0,72078002	0,203202216	350	1	100	1
4	9	1,049163386	0,032154142	2,643061024	0,552099249	-0,796948819	0,275178807	350	1	50	1
4	10	1,197170276	0,08096348	2,88238189	0,411570259	-0,842605807	0,216929635	250	7	50	1
4	11	1,040354331	0,024771448	2,581865157	0,368490894	-0,770755413	0,024771448	250	1	50	1
4	12	1,124926181	0,027580305	2,523375984	0,336604683	-0,699224902	0,170478139	250	7	100	1
4	13	1,047933071	0,019532701	2,731766732	0,436247079	-0,841916831	0,218840993	350	1	50	1
4	14	1,149557087	0,052555154	2,789000984	0,380315814	-0,819721949	0,184690553	250	7	100	1
4	15	1,155093504	0,040459721	2,97878937	0,334191708	-0,911847933	0,170229951	250	7	50	1
4	16	1,110063976	0,046962091	2,775984252	0,319094673	-0,832960138	0,158067994	250	7	100	1
4	17	1,041018701	0,027170886	2,464468504	0,311376198	-0,711724902	0,156391145	350	1	100	1
4	18	1,031299213	0,025623307	2,734202756	0,454702778	-0,851451772	0,231454937	250	1	100	1
4	19	1,170570866	0,036558776	2,996481299	0,332739114	-0,912955217	0,167554032	250	7	50	1
4	20	1,149286417	0,045582172	2,881643701	0,288383531	-0,866178642	0,148790513	350	7	100	1

H.2 Verifica delle ipotesi di validità dell'ANOVA

Sono riportati di seguito i risultati dei test statistici eseguiti per l'analisi della varianza delle risposte ottenute con il piano sperimentale

- il risultato del test di Bartlett e Levene sull'*omogeneità della varianza* dei residui;
- il risultato del test di Anderson-Darling sulla *normalità dei residui* compreso nel *Normal Probability Plot*;
- il risultato dell'*indipendenza dei residui*.

Si ricorda che il valore ammesso per α è del 5%.

Nel caso di mancata verifica dell'ipotesi di *normalità dei residui* il test F è robusto (piccole deviazioni della normalità non compromettono l'esito del test); nel caso di mancata verifica dell'ipotesi di *omogeneità della varianza* il test F è robusto nel caso di medesimo numero di repliche per ogni livello. Nonostante questo è possibile operare una trasformazione monotona sulla variabile osservata per poter soddisfare le ipotesi fondamentali per l'Anova di *normalità dei residui* e *omogeneità della varianza*, utilizzando la funzione Box-Cox transformation del pacchetto Minitab 15.

Validità ANOVA - Larghezza Media ingresso

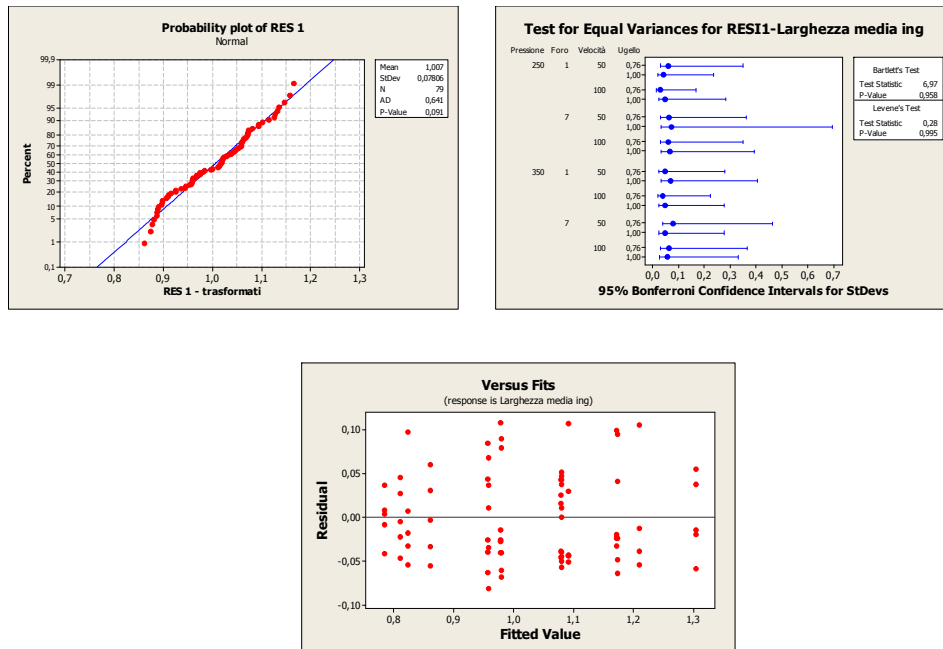


Figura H. 1 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in ingresso

Validità ANOVA - Larghezza media ingresso, senza interazioni tra fattori

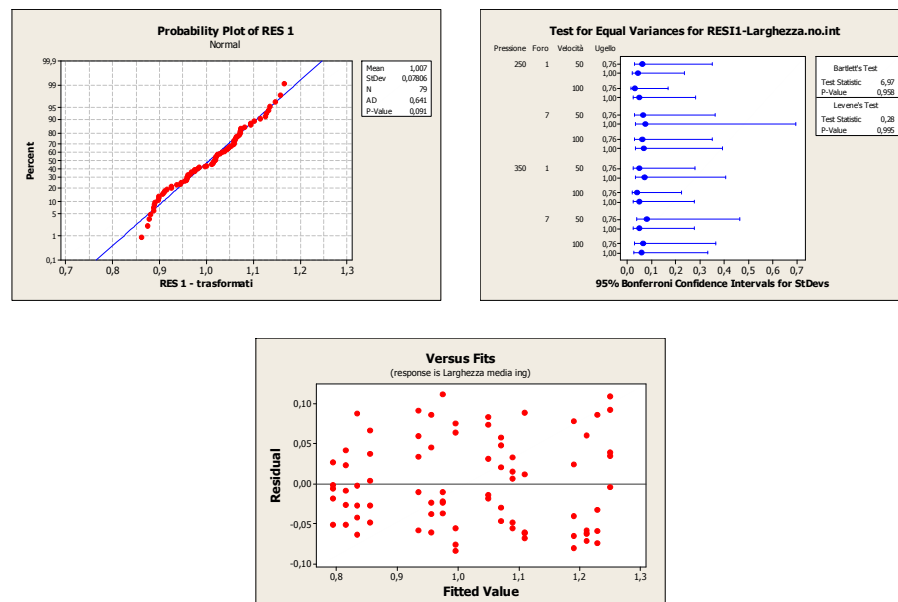


Figura H. 2 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in ingresso senza interazioni tra fattori

Validità ANOVA - Larghezza Media in uscita

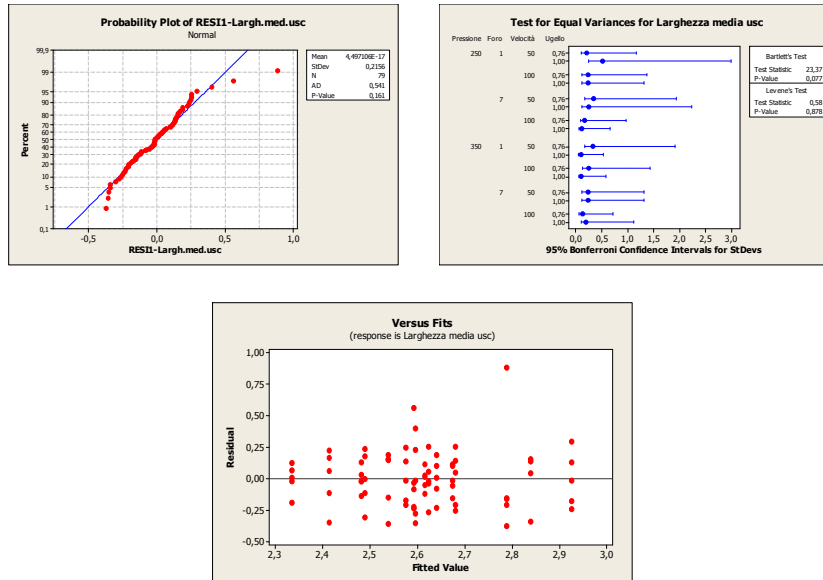


Figura H. 3 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in uscita

Validità ANOVA - Larghezza Media in uscita senza interazioni tra i fattori

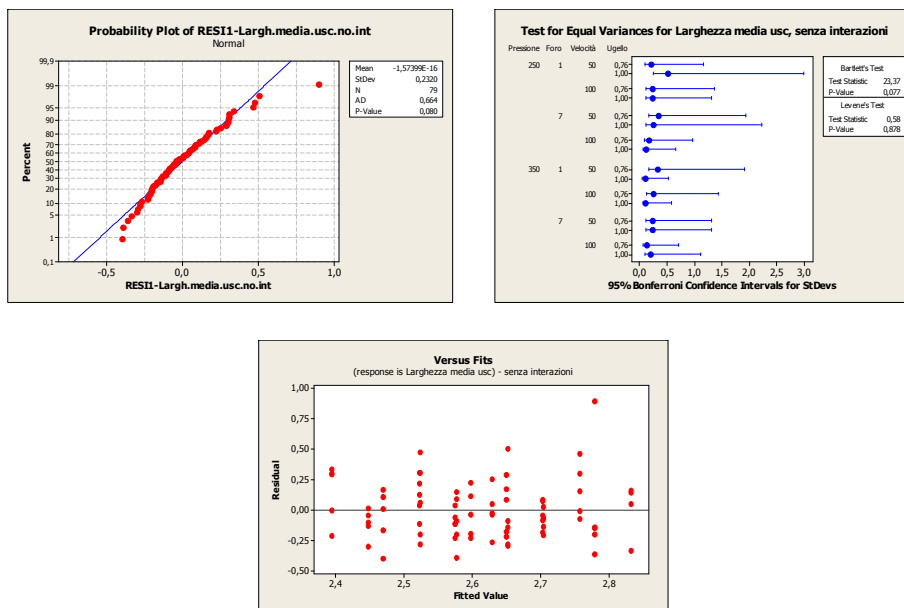


Figura H. 4 Verifica ipotesi validità ANOVA, Larghezza media in uscita senza interazioni tra i fattori

Validità ANOVA – Dev. Stand. sulla Larghezza in uscita

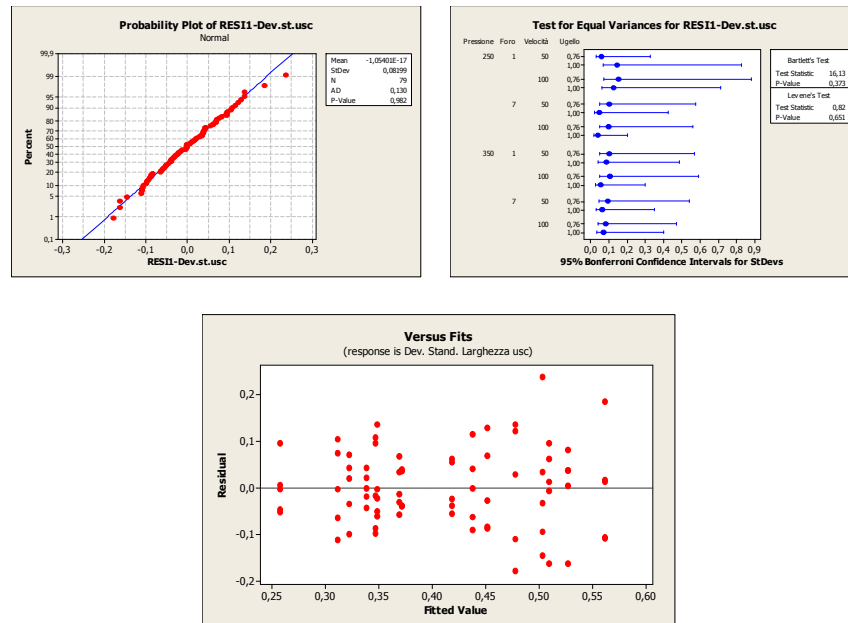


Figura H. 5 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. larghezza media in uscita

Validità ANOVA – Dev. Stand. sulla Larghezza in uscita senza interazioni

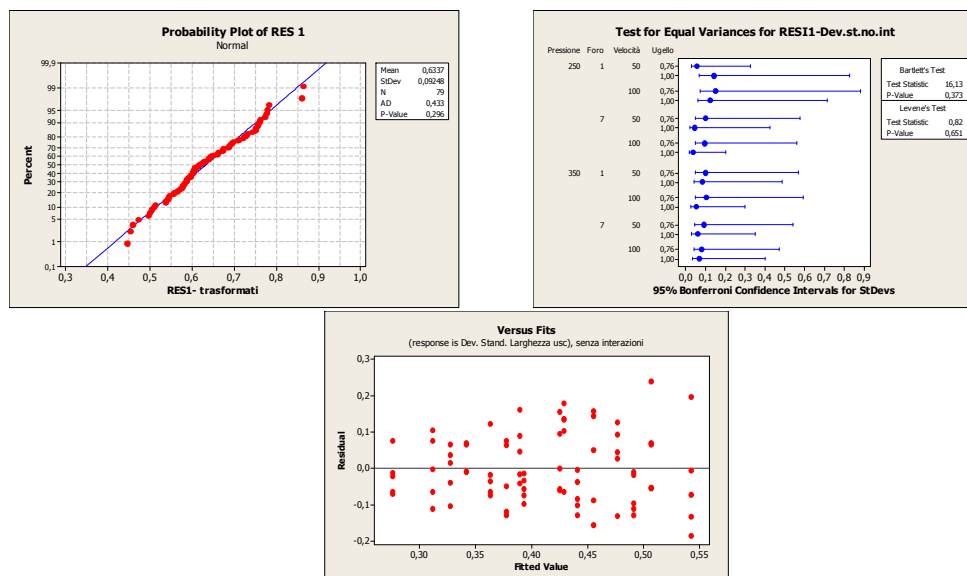


Figura H. 6 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. larghezza media in uscita, senza interazioni tra i fattori

Validità ANOVA – Conicità media

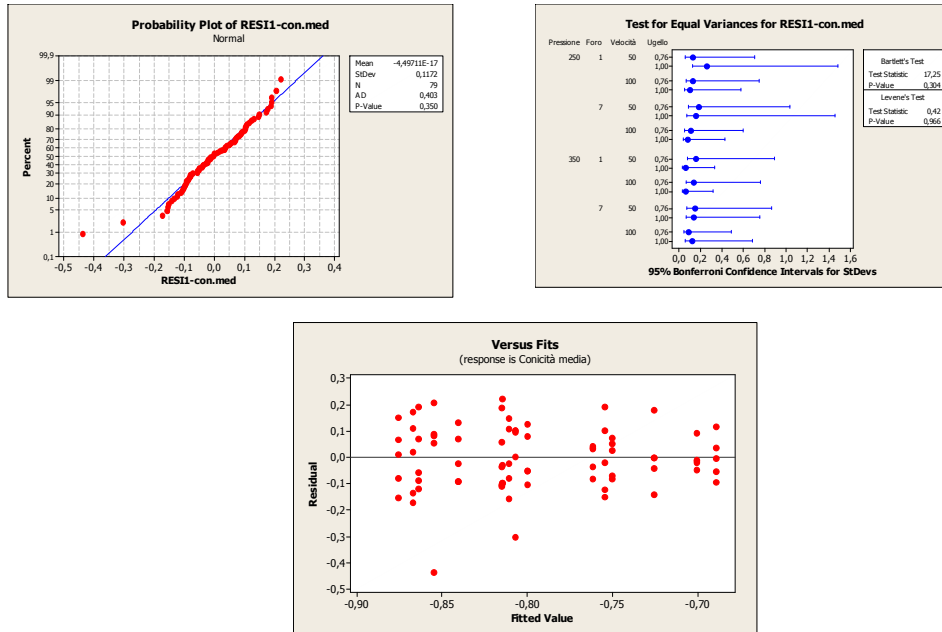


Figura H. 7 Verifica ipotesi validità ANOVA, Conicità media

Validità ANOVA – Conicità media, senza interazioni tra i fattori

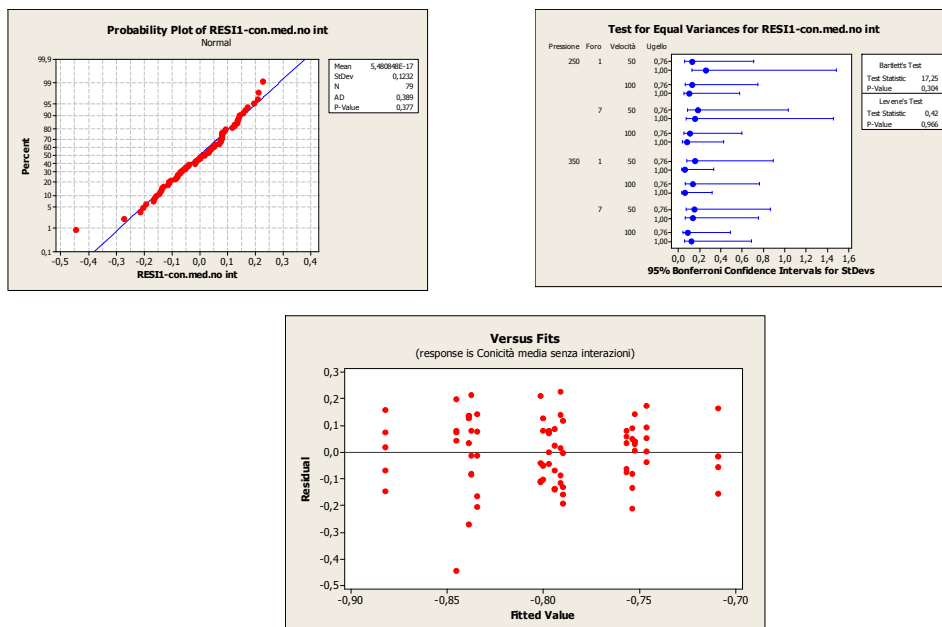


Figura H. 8 Verifica ipotesi validità ANOVA, Conicità media, senza interazione tra i fattori

Validità ANOVA – Dev. Stand. conicità

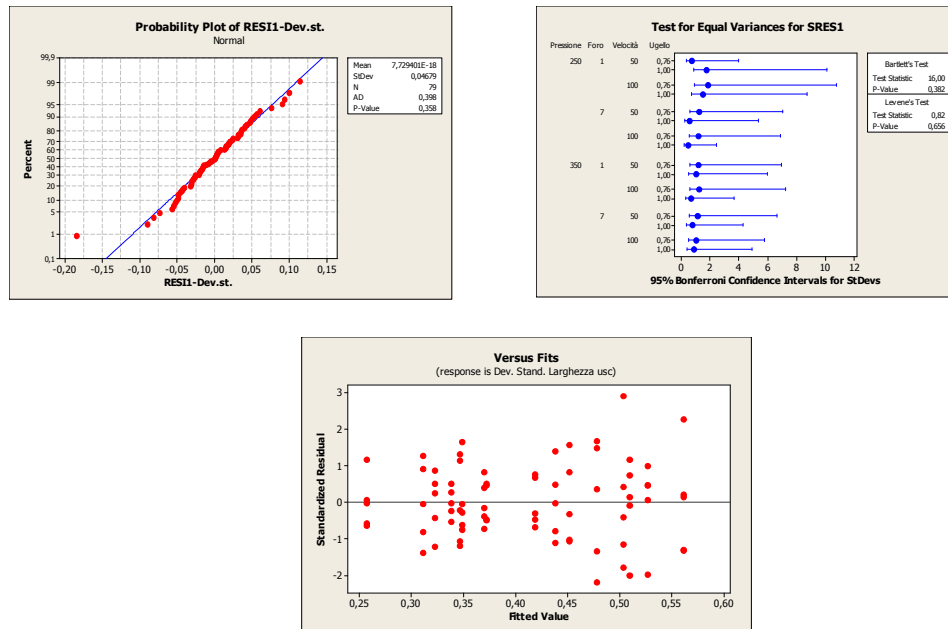


Figura H. 9 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. conicità

Validità ANOVA – Dev. Stand. Conicità senza interazioni tra i fattori

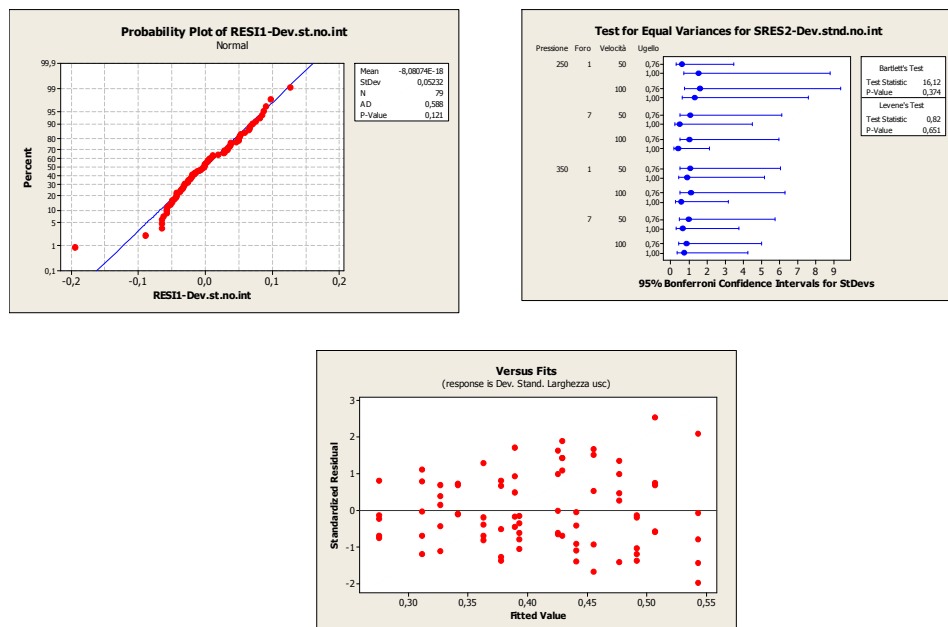


Figura H. 10 Verifica ipotesi validità ANOVA, dev. stand. conicità, senza interazioni tra i fattori

Bibliografia

- [Amj01] S. Amjad, “*Thermal Conductivity and noise attenuation of aluminium Foam*”. University of Cambridge, a.a. 2000/2001.
- [Ann99] M. Annoni, M. Barzaghi “*Qualità del solco di taglio AWJ e determinazione della velocità limite inferiore*”, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, a.a. 1998/1999.
- [Ann00] M. Annoni, M. Monno “*A lower limit for the feed rate in AWJ precision machining*”, 15th International Conference on Jetting Technology, 2000.
- [Ann03] M. Annoni, “*La tecnologia WJ/AWJ*”, lezioni accademiche, Dipartimento di Meccanica, Sezione Tecnologie Meccaniche e Produzione, Politecnico di Milano, a.a. 2003/2004.
- [Ann08] M. Annoni, “*Waterjet: funzione di costo*”, lezioni accademiche, Dipartimento di Meccanica, Sezione Tecnologie Meccaniche e Produzione, Politecnico di Milano, a.a. 2008/2009.
- [Ash00] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G Wadley, “*Metal foams: a design guide*”, Butterworth – Heinemann publications, 2000.
- [Ban99] J. Banhart, “*Foam Metal: the recipe*”, Europhysics News, Germany, 1999.
- [Ban00] J Banhart, “*Manufacturing routes for metallic foams*”, JOM, Solidification science: Overview, 2000, p. 22-27.
- [Ban01] J. Banhart, “*Manufacture, Characterisation and application of cellular metals and metal foams*”, Progress in materials science, 46, 2001, p. 559-632.

- [Bas07] D. Bassan, “*Applicazioni delle schiume metalliche nel campo automotive/industriale*”, Giornata di studio AIAS–Schiume strutturali, ed. Politecnico di Torino, versione 1, 2007.
- [Ber07] A. Bertocchi, F. Ludovico, “*Un materiale innovativo: la schiuma metallica, caratterizzazione ottimizzazione ed analisi FEM della lega AlSi10*”, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, a. a. 2006/2007.
- [Cap96] E. Capello, M. Monno, Q. Semeraro, W. Polini, “*AWJ Machining: Surface Quality as a Constraint*”, 13th International Symposium on Jet Cutting Technology, Cagliari, Ottobre 1996, p. 787-798.
- [Cha91] E. J. Chalmers, “*Effects of parameter selection on abrasive waterjet performance*”, 6th American Waterjet Conference, Houston, p. 345-354.
- [Cla98] X. Claude, A. Merlen, B. They, O. Gatti, “*Abrasive waterjet velocity measurements*”, 14th, International Conference on Jetting Technology, Belgium, 21-23 September 1998, p. 235-251.
- [Has89] M. Hashish “*Pressure effects in a waterjet machining*”, Journal of Engineering Material and Technology, 1989.
- [Has91] M. Hashish “*Optimization factors in abrasive waterjet machining*”, Journal of Engineering for Industry, 1991.
- [Has94] M. Hashish, “*Observations of Wear of Abrasive-Waterjet Nozzle Materials*”, Journal of tribology, January 1994.
- [Has97] M. Hashish, D.E. Steele, D.H. Bothell, “*Machining with super-pressure (690 MPa) Waterjets*”, International Journal of Tools Manufacturing, Vol. 37, No. 4, 1997, p. 465- 479.
- [Has02] M. Hashish, “*Abrasive-waterjet (AWJ) studies*”, BHR’s conferece 2002, 16-18 October, Aix-en- Provence, France, p. 13-47.

- [Hen98] A. Henning, S. Sanders, “*Cutting-edge quality improvements trough geometrical modeling*”, 14th International Conference on Jetting Technology, 1998.
- [Him91] U. Himmelreich, W. Riess, “*Laser-Velocimetry investigation of the flow in Abrasive Water Jets with varying cutting head geometry*”, 6th American Water jet Conference, August 24-27, 1991, Houston, Texas, p. 355-369.
- [Hoo06] A.M. Hoogstrate, V. N. Pi, B. Karpuschewski, “*Cost optimization for multiple-head of cutting*”, BHR group 2006 Water Jetting, p. 251-263.
- [Jen93] J. Jeng, T. J. Kim, “*Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations*, 7th American Waterjet Conference, August 1993, p. 175-189.
- [Mom98] A. W. Momber, R. Kovacevic, “*Principle of Abrasive Water Jet Machining*”, SpringerVerlag, London 1998.
- [Mon01] D.C. Montgomery “*Design and Analysis of experiments 5th Edition*”, Wiley International Edition.
- [Mon06] M. Monno, M. Goletti, V. Mussi, “*Taglio di schiume metalliche con tecnologie non tradizionali*”, Progetto Tilas 2006.
- [Mon07] M. Monno, M. Annoni, C. Ravasio “*Water jet, a flexible technology*”, 2007, Ed. Polipress.
- [Nan00] M. Nanduri, D.G. Taggart, T.J. Kim, “*A study of nozzle wear in abrasive entrained water jetting environment*”, Journal of Tribology, April 2000, Vol. 122, p. 465-471.

- [Nan02] M. Nanduri, D. G. Taggart, Thomas J. Kim, "*The effect of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear*", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 42 (2002), p. 615-623.
- [Paw93] J. S. Pawan, J. Munoz "*Cost optimization of abrasive waterjet cutting systems*", 7th American Waterjet Conference, August, 1993, p. 191-204.
- [Pi05] V. N. Pi "*Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting*", Delft university of Technology, 2005.
- [Pi07] V. N. Pi, A. M. Hoogstrate, "*Cost calculation for recycled abrasives and for abrasive selecting in abrasive waterjet machining*", Int. J. Precision Technology, Vol.1, No. 1, 2007.
- [Res10] U. Reisgen, S. Olschok, S. Longerich "*Laser Beam Welding of Open-Porous Metallic Foams for Application in Cooling Structures of Combined Cycle Power Plants*", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010.
- [Rod01] G. Rodger "*Dimensional Measurement using Vision Systems*", Measurement Good Practice Guide No. 39, Luglio 2001.
- [See02] H.W. Seeliger, "*Manufacture of aluminium Foam Sandwich (AFS) Components*", Advanced engineering Materials, 2002, p.753-757.
- [Sum01] D. A. Summers, R. D. Fossey, J. W. Newkirk, G. Galecki, "*Result of comparative nozzle testing using abrasive waterjet cutting*" 2001 WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, MN, August 2001, p. 193-206.

- [Sus06] T. Susuzlu, A.M. Hoogstrate, “*Energy efficiency of abrasive waterjet cutting beyond 400 MPa*”, BHR’s conference 2006, 13-15 September, Gdansk, Poland.
- [Taz95] A.Tazibt, A. Schmitt, F. Parsy, N. Abriak, B. They, “*Interaction of abrasive water jet with cut material at high velocity of impact – development of an experimental correlation*”, 8th American Water Jet Conference, 1995.
- [Yu98] Chin-Jye Yu, Harald H. Eifert, John Banahart, Joachim Baumeister “*Metal foaming by power metallurgy method: production, properties and applications.*” Innovations in Materials Conference (IMc), Washington D.C., 1998, p.181-188.