

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



Influenza dei parametri di processo sullo stato superficiale di un
acciaio trattato con waterjet peening

Relatore: Ch.mo Prof. Mario Guagliano

Correlatore: Dott. Ing. Massimo Annoni

Tesi di Laurea di:

Laura Mascheroni
Matr. 708698

Alessandro Storti
Matr. 720448

Indice

Capitolo 1

1. Introduzione	1
1.1 Caratteri generali del processo di waterjet peening	1
1.1.1 Obiettivi della tesi	10

Capitolo 2

2.1 Teoria e sviluppo della tecnologia del water jet peening	11
2.1.1 Storia della tecnologia del waterjet	11
2.2 Caratteristiche tecniche del water jet	21
2.2.1 Sistema di pompaggio	22

Capitolo 3

3.1 Sperimentazione	29
3.1.1 Materiale	30
3.1.2 Realizzazione dei provini	30
3.2 Parametri di prova e piano sperimentale	35
3.2.1 Realizzazione dell'attrezzatura di staffaggio del provino	38

Capitolo 4

4.1 Parte operativa	44
4.1.1 Modalità di trattamento della superficie	45
4.1.2 Velocità impostata	46
4.2 Sequenza delle prove	47
4.2.1 Decapaggio	48
4.2.2 Pesatura dei provini	48
4.2.3 Analisi ottica dei provini	56
4.2.4 Analisi della qualità superficiale tramite rugosimetro	75
4.2.5 Prove di durezza Rockwell C	77
4.2.6 Valutazione dell'incrudimento attraverso il parametro FWHM	80

Capitolo 5

5.1 <i>Analisi statistica dei dati</i>	83
5.1.1 ANOVA a due vie	83
5.1.2 ANOVA a una via	90
5.1.3 Regressione	94

Capitolo 6

6.1 <i>Conclusioni</i>	99
6.2 <i>Prospettive future</i>	101

APPENDICE A

A.1 <i>Diffrazione</i>	I
-------------------------------------	----------

APPENDICE B

B.1 <i>Caratteri generali del rugosimetro</i>	V
--	----------

Bibliografia	VII
---------------------------	------------

Capitolo 1

1. Introduzione

1.1 Caratteri generali del processo di water jet Peening

Le conoscenze sulle rotture per fatica di particolari meccanici in materiale metallico sono relativamente recenti. Questi cedimenti avvengono normalmente per carichi modesti, inferiori allo snervamento del materiale, dopo un periodo d'uso di molti cicli. Le rotture per fatica generalmente si innescano sulla superficie nei punti di tensione massima di trazione. Trattamenti termici e lavorazioni meccaniche come l'asportazione di truciolo, la saldatura e la rettifica possono indurre tensioni residue di trazione che si sommano alle tensioni di servizio. Una volta innescata, la cricca si propaga fino alla rottura, in genere di tipo fragile.

Ogni componente, strutturale o meccanico che sia, deve essere progettato e soprattutto lavorato solo da strutture competenti e sottoposto a severi controlli di qualità. In questo caso ogni componente meccanico è altamente sollecitato agli effetti raggruppati nel termine "fatica".

Un componente meccanico, durante il suo funzionamento, è normalmente soggetto a molteplici sollecitazioni variabili con il tempo. L'insieme di queste sollecitazioni vengono riassunte con il termine "fatica". Per fatica si intendono tutte quelle sollecitazioni variabili con il tempo a cui un componente meccanico è soggetto durante il funzionamento. Con fatica quindi si raggruppano in un unico termine fenomeni come la fatica meccanica, quella termica, il pitting, il fretting, lo scoring ecc.

Il fenomeno che tende ad accomunare le rotture per fatica è l'entità del carico che normalmente risulta essere decisamente inferiore allo snervamento del materiale. Le rotture per fatica infatti avvengono per carichi modesti dopo un periodo di uso, generalmente, di molti cicli.

Come ormai noto, il meccanismo della rottura per fatica di un componente meccanico in materiale metallico prende vita dagli inevitabili difetti come vacanze, dislocazioni o fessurazioni del materiale di cui esso è costituito.

I materiali metallici sono generalmente policristallini e cioè sono costituiti da un elevato numero di cristalli o grani, ciascuno con proprie caratteristiche e proprietà meccaniche individuali.

I difetti del materiale alterano le originarie proprietà del cristallo e aumentano soprattutto la possibilità di scorrimento reciproco dei piani atomici. I primi scorrimenti avvengono in quei grani che hanno i piani reticolari orientati secondo la direzione della massima tensione tangenziale applicata.

In un secondo tempo si verificano gli scorrimenti più difficoltosi e così via.

Gli scorrimenti, che avvengono sia sotto carichi statici sia sotto carichi ciclici, producono una progressiva alterazione della superficie dando vita a delle vere e proprie bande di intrusione ed estrusione [Soy07].

Queste bande formano dei notevoli fenomeni di concentrazione delle tensioni. In questo modo si crea una micro-cricca che all'inizio è governata dalle tensioni tangenziali. Ad una profondità di qualche grano la cricca devia e si propaga per un piccolo tratto a 45° , poi il suo cammino prosegue in direzione ortogonale alla direzione esterna.

La micro-cricca procede, sotto il carico ciclico, dapprima lentamente poi sempre più velocemente. Se la zona si trova sempre in trazione si possono notare le "beach marks", comunemente dette "spiaggette", che sono le striature lasciate dalla cricca nell'avanzamento e le "river marks" che indicano la direzione lungo cui la cricca si propaga.

La cricca procede fino a che la sezione utile non diventa eccessivamente ridotta rispetto al carico esterno; a quel punto si produce una rottura di schianto di tipo fragile.

Esistono diverse tecniche per migliorare la resistenza dei pezzi meccanici nei confronti della sollecitazione a fatica con conseguente aumento della vita dei componenti.

Tra di esse troviamo quelle che in vari modi tendono a generare sulla superficie degli stessi uno sforzo residuo di compressione; infatti le rotture per fatica hanno origine proprio sulla superficie dei pezzi.

Quindi il principio fondamentale seguito da questi trattamenti, tra i quali spicca la pallinatura (shot peening), consiste nel fare in modo che negli strati superficiali la trazione generata dai carichi esterni venga ridotta, sovrapponendole uno strato di compressione “*artificiale*” generato non già da carichi esterni quanto piuttosto dal trattamento stesso. La somma di trazione e compressione fornisce come risultato uno stato di sforzo superficiale più favorevole.

Questo tipo di lavorazione crea una *superficie forte* ovvero quella che possiede caratteristiche meccaniche superiori rispetto al nucleo in quanto sede di sforzi di compressione che ostacolano la propagazione delle microcricche di fatica.

Recenti ricerche propongono l’uso della tecnologia del water jet per la pallinatura perché, paragonato alla pallinatura tradizionale, presenta il vantaggio principale di avere un’influenza minima sul cambiamento di rugosità e morfologia.

Uno dei vantaggi principali del WJ è inoltre la flessibilità, dal momento che la stessa attrezzatura può essere utilizzata anche allo scopo di tagliare.

Tra i trattamenti superficiali, la pallinatura controllata è spesso utilizzata (essenzialmente nell’industria automobilistica e in quella aeronautica) per incrementare la resistenza a fatica e la durezza superficiale delle macchine e degli elementi strutturali ed è a volte preferibile ai più tradizionali trattamenti termochimici per la maggiore versatilità, il migliore impatto ambientale e il costo relativamente limitato.

La varietà dei casi in cui è possibile applicare il trattamento è davvero straordinaria.

Come già accennato, la pallinatura controllata può essere impiegata con soddisfazione ogniqualvolta ci si trovi in presenza di sollecitazioni di fatica.

Solo a titolo di esempio e senza la pretesa di essere esaustivi proponiamo alcune applicazioni tipiche.

Le molle sono un ottimo esempio di applicazione del trattamento.

In questi particolari il carico esterno è quasi sempre dello stesso segno e i vantaggi conseguibili sono notevoli.

Le bielle sono particolari meccanici estremamente sollecitati e la loro geometria è inevitabile fonte di effetti di intaglio di notevole importanza. Studi scientifici hanno dimostrato che la pallinatura controllata è particolarmente efficace in presenza di effetto di intaglio [Par09].



Fig. 1.1 Bielle sottoposte a pallinatura classica

I componenti strutturali aeronautici in leghe leggere sono normalmente pezzi dalle geometrie estremamente complesse, molto sollecitati e spesso sede di effetti di notevole concentrazione delle tensioni. La pallinatura controllata migliora incredibilmente il loro comportamento a fatica. Come si può immaginare questo è un settore particolarmente strategico in cui la criticità strutturale deve essere particolarmente studiata e controllata.

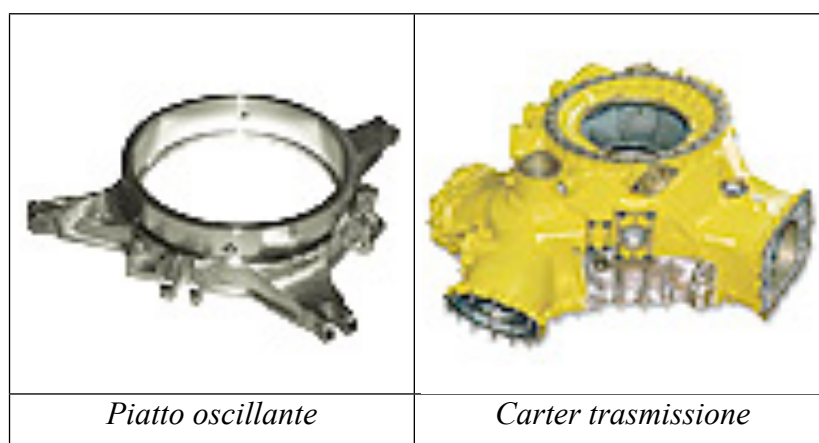


Fig. 1.2 Particolari meccanici trattati con pallinatura tradizionale



Fig. 1.3 Particolari meccanici trattati con pallinatura tradizionale

Nel settore dello sviluppo energetico i componenti principali sono le pale per turbina e le pale per compressore. Questi componenti sono normalmente soggetti a problemi di pitting (fenomeno caratterizzato dalla comparsa su una superficie di piccoli danneggiamenti superficiali, in cui le cause più frequenti sono dovute ad un attacco corrosivo localizzato oppure a carichi di tipo Herziano troppo alti) sulla radice della pala e a problemi di fatica alla radice della foglia. Inoltre occorre controllare con molta accuratezza la rugosità della foglia, per garantire la corretta adesione dei vari riporti metallici e ceramici [Mar93].

Non ultimo il problema della riduzione della rugosità finale della foglia della pala per l'ottimizzazione del rendimento della turbina stessa.

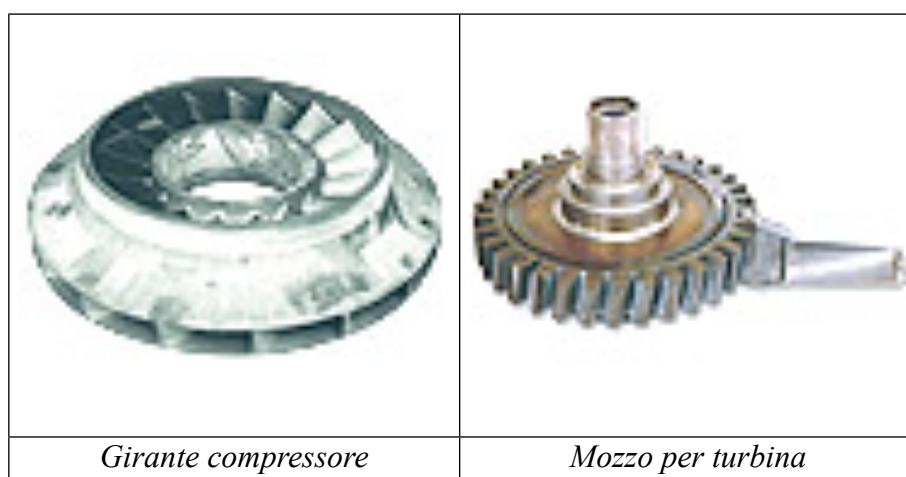


Fig. 1.4 Particolari meccanici trattati con pallinatura tradizionale

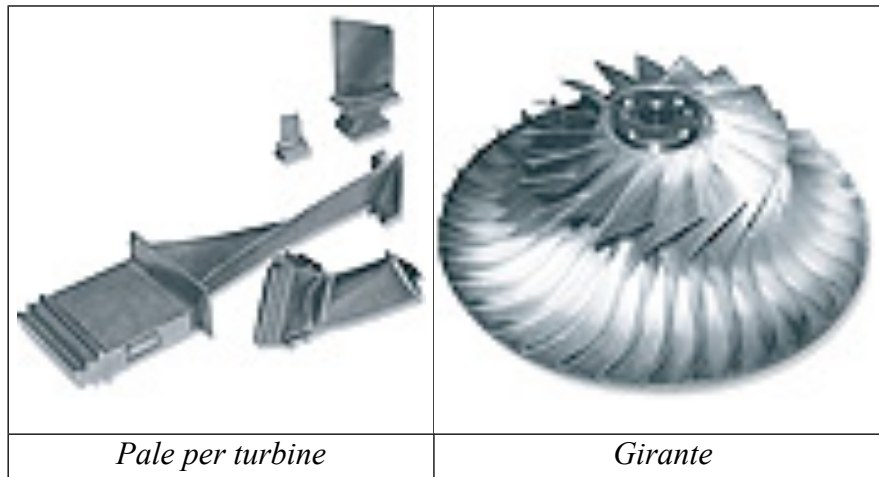


Fig. 1.5 Particolari meccanici trattati con pallinatura tradizionale

Un altro campo dove troviamo esempi di pezzi pallinati è quello dell'industria navale. In questo caso, a differenza dei precedenti settori, si trattano componenti di grandi dimensioni. Ad esempio vengono trattate delle bielle allo scopo di ridurre il fretting (fenomeno per cui due punti di contatto tra due superfici compresse prima si saldano, poi, sottoposti a spostamenti oscillanti microscopici, si rompono, producendo frammenti che, esposti all'elevata temperatura d'attrito, si trasformano in particelle abrasive) nelle zone di accoppiamento con i cuscinetti, e delle valvole di motori diesel per ridurre la fatica in presenza di agenti aggressivi come carburante e gas di scarico.

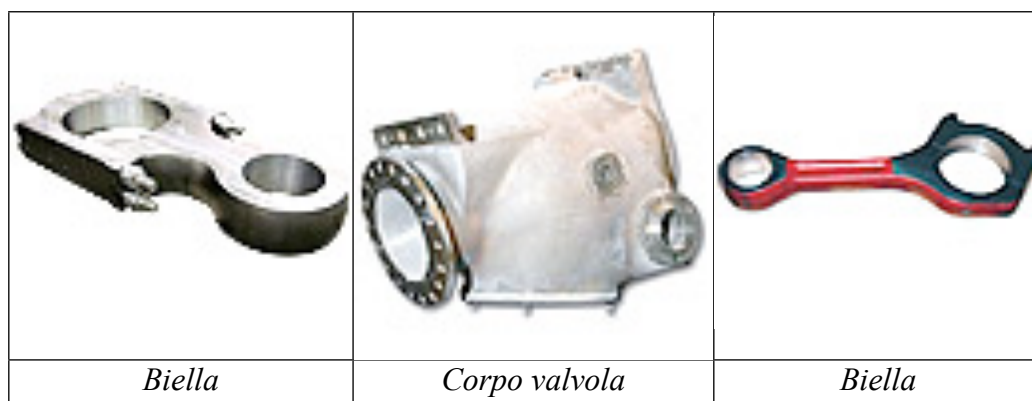


Fig. 1.6 Particolari meccanici trattati con pallinatura tradizionale

Anche in settori che in passato erano considerati settore di scarso impegno tecnologico, oggi si pretendono prestazioni sempre più spinte e rumorosità sempre minori per soddisfare le sempre più esigenti richieste del mercato.

Un esempio di quanto affermato è individuabile nel settore movimento terra. Applicare anche in questo compartimento tecnologie avanzate è determinante. Normalmente si eseguono trattamenti di pallinatura controllata sulle ruote dentate per incrementare la coppia trasmissibile [Mar93].

La pallinatura poi, migliora la distribuzione delle tensioni superficiali eventualmente turbate da lavorazioni meccaniche o da trattamenti termici e attenua notevolmente la concentrazione degli sforzi provocati da intagli, filettature e decarburazioni superficiali.

Altri benefici sono la maggior resistenza a stress-corrosion (fenomeno di degrado del materiale dovuto all'azione combinata di corrosione e applicazione di un carico costante), la diminuzione di porosità e infine la superficie in virtù delle fossette superficiali (dimple) riesce a trattenere in maniera efficace eventuali oli o grassi per lubrificazione.

Tutti i meccanismi di trattamento superficiale portano ad aumentare la rugosità del pezzo trattato, a incrementare la densità di dislocazioni vicino alla superficie (incrudimento) e alla creazione di uno sforzo residuo macroscopico (macrostress).

Come si può vedere in *tabella 1.1* un'alta rugosità accelera la nucleazione della cricca e non ha effetti sulla propagazione; l'incrudimento ritarda la nucleazione ma accelera la propagazione; infine lo sforzo residuo di compressione ha un piccolo effetto sulla nucleazione e una drastica influenza sulla propagazione [Mar93].

	Nucleazione cricca	Propagazione cricca
Rugosità superficiale	Accelera	Nessun effetto
Incrudimento	Ritarda	Accelera
Sforzo residuo di compressione	Piccolo effetto	Ritarda

Tab. 1.1 Effetti di alcuni parametri sulla nascita e propagazione della cricca [Mar93]

Gli incrementi di resistenza che si possono ottenere dalla pallinatura tradizionale sono molto spesso davvero rilevanti. Essi dipendono oltre che dalle caratteristiche del trattamento anche dallo stato superficiale del pezzo e dalle condizioni di carico.

La pallinatura in altre parole provoca una compressione superficiale, in quanto il suo getto induce una deformazione plastica che si propaga fino ad alcuni decimi di millimetro nel materiale considerato e tecnicamente essa serve a migliorare la distribuzione delle tensioni superficiali, aumentando la resistenza a fatica del pezzo trattato.

Più precisamente produce delle tensioni residue a compressione nella superficie del materiale e negli strati sottostanti che riescono a diminuire le tensioni interne allorché il pezzo è sottoposto a sollecitazioni e il materiale è reso in tal modo più resistente alle sollecitazioni a fatica.

Di seguito viene riportata una tabella che esplica l'aumento della resistenza tipico dei pezzi pallinati:

STATO SUPERFICIALE prima della pallinatura	AUMENTO DELLA RESISTENZA limite di fatica
superfici lisce	10 - 20 %
superfici grezze o con difetti	50 - 70 %
superfici con effetto d'intaglio	scompare l'effetto d'intaglio

Tab. 1.2 Aumento della resistenza a fatica per superfici pallinate

Qualora il carico applicato fosse sotto il limite di fatica si otterrebbe un considerevole aumento dell'affidabilità. Tutto questo viene ulteriormente accentuato quando ci si trova in presenza di effetto di intaglio, cosa che accade assai frequentemente in meccanica; si può anzi sottolineare che la pallinatura controllata ha la sua massima efficacia in tutti quei componenti resi critici da forme geometriche penalizzanti, fattori di forma, effetti d'intaglio, materiali fragili.

Nei pezzi meccanici più comuni si è verificato il seguente aumento della durata a fatica:

PARTICOLARE	Aumento della durata a fatica (incremento % del numero di cicli)
molle a balestra	600 %
alberi a gomito	900 %
bielle, barre di torsione	1000 %
molle ad elica	1400 %
ingranaggi	1500 %

Tab. 1.3 Aumento della durata a fatica per superfici pallinate

Se ne conclude quindi che, per quanto riguarda la fatica meccanica, i vantaggi derivanti dall'impiego del trattamento siano davvero notevoli.

Riassumendo, si può dire che la pallinatura controllata procuri i seguenti effetti sul pezzo:

- deformazione plastica degli strati superficiali del materiale;
- introduzione di tensioni residue di compressione;
- incrudimento dello strato plastico;
- alterazione di rugosità.

Allo scopo di ottenere la migliore efficacia del trattamento, il processo deve avvenire in condizioni rigorosamente controllate e ripetibili, diversamente non si potrebbe fare alcuna previsione circa lo stato dei pezzi dopo la pallinatura.

La pallinatura può provocare, però, se non correttamente controllata, danneggiamenti superficiali tali da favorire la formazione di cricche; per evitare questo problema sarebbe opportuno da un lato avere la possibilità di controllare perfettamente tutti i parametri in gioco durante il trattamento e dall'altro sapere con esattezza il legame tra questi parametri e la finitura superficiale al termine del trattamento stesso.

Tra gli svantaggi che sono stati riscontrati, particolare attenzione è stata data all'aumento della rugosità superficiale, che peggiora sensibilmente la resistenza a fatica del materiale.

I costi relativi alla pallinatura tradizionale sono abbastanza esegui se paragonati ai benefici ottenibili.

È comunque importante sottolineare come nella pallinatura tradizionale il risultato sia dipendente da diversi parametri di processo mentre il water jet peening dipende invece da parametri più facilmente controllabili [Has07].

1.1.1 Obiettivi della tesi

Questa tesi si prefigge l'obiettivo di determinare, tramite un'analisi comparativa, i vantaggi e gli svantaggi del Water Jet Peening (WJP) rispetto al tradizionale Shot Peening (pallinatura a sfere o microsferi) attraverso la definizione dei seguenti punti:

1. Verificare la dipendenza e significatività delle tensioni (a compressione), indotte dal trattamento, dai parametri di processo.
2. Creare un piano sperimentale robusto dal quale estrapolare dati attendibili e ripetibili.
3. Analizzare statisticamente tali dati, tramite metodologie statistiche appropriate, per ottenere un legame tra i parametri di processo e la tensione residua.
4. Valutare gli effetti secondari causati dal processo.

Capitolo 2

2.1 Teoria e sviluppo della tecnologia di water jet peening

Il WJP rappresenta una soluzione innovativa per applicazioni di pallinatura e gli studi di questa tecnologia sono volti alla definizione e conoscenza dei parametri di processo ottimali per ottenere uno stress residuo di compressione rilevante, senza inficiare le caratteristiche superficiali del pezzo e senza stravolgerne la struttura.

L'approccio sperimentale è la direzione per ottenere risultati utili nella definizione di tali parametri essendo il WJ una tecnica interessante perché flessibile (dal momento che la stessa struttura può tagliare, palliare, pulire).

La pallinatura a getto d'acqua si può dividere in una pallinatura a getto d'acqua in aria e una pallinatura a getto d'acqua sommerso.

La prima ha portato a risultati, fino ad oggi, più vantaggiosi poiché è le velocità di avanzamento, sul quale vale la pena soffermarsi in modo più approfondito.

2.1.1 Storia Della Tecnologia WJ

Lo studio della tecnica del WJP è oggetto di interesse di molti ricercatori dal momento che essa è nata per risolvere alcuni problemi riguardanti la pallinatura tradizionale ed è, come detto in precedenza, una tecnica molto flessibile.

Inducendo nel materiale una deformazione plastica il WJP previene cricche e rotture a fatica, aumentando la resistenza del materiale.

Per prima cosa bisogna capire il comportamento del getto e lo studio di **Yanaida** ha portato alla conclusione che il getto si può dividere in tre zone principali [Yan80]:

1. **zona primaria:** si trova appena dopo l'ugello primario, il getto si mantiene coerente, cioè conserva la sua compattezza e le caratteristiche di flusso continuo.
2. **regione principale:** è la zona in cui i fenomeni di turbolenza dovuti all'attrito rompono il getto e si ha la suddivisione in gocce; la sezione coerente diminuisce allontanandosi dall'ugello.
3. **zona di diffusione:** il getto diverge, non si ha più una sezione coerente, le gocce si disperdono in aria.

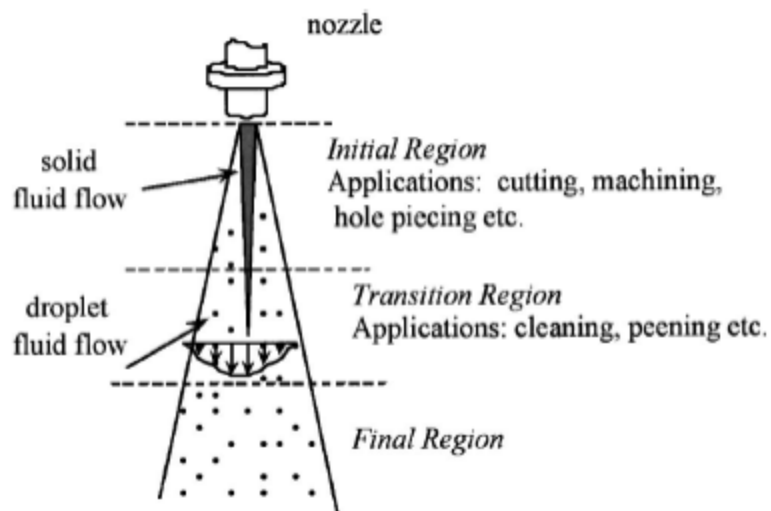


Fig. 2.1 Divisione in regioni del getto [Has05]

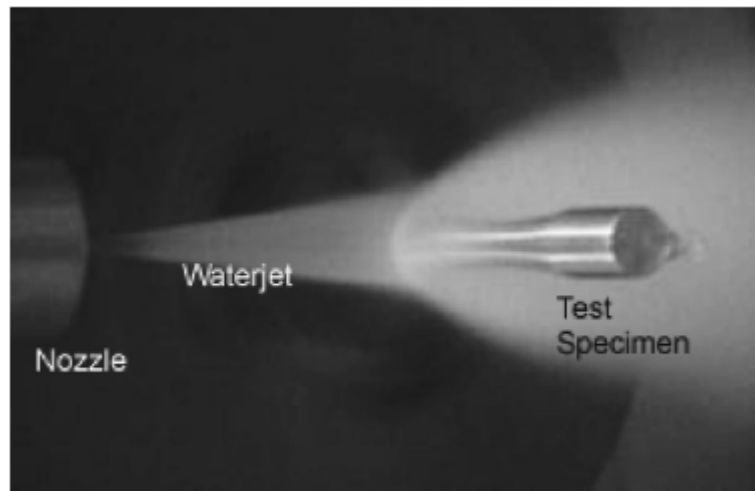


Fig. 2.2 Esempio di pallinatura con getto d'acqua in aria [Has01]

La deformazione non è svolta dal getto coerente, ma dall'azione delle gocce disperse, che localmente sviluppano pressioni molto maggiori di quelle del getto stesso, è importante inoltre che queste gocce impattino in modo casuale sul pezzo in modo da dare una deformazione omogenea in tutte le direzioni, per ottenere questo è importante aumentare la turbolenza del getto, il che si ottiene con accorgimenti come l'utilizzo del focalizzatore e la scelta di parametri adeguati.

Yanida ha condotto studi anche sulla velocità del getto, giungendo alla conclusione che si può dividere in due zone di velocità [Yan80]:

1. **prima zona:** dall'ugello a $l=48d$, dove d è il diametro dell'ugello stesso, in questa parte i valori di velocità ancora sono concordanti con il teorema di Bernoulli.
2. **seconda zona:** oltre $l=48d$, la velocità subisce un brusco calo.

C'è da considerare poi la lunghezza alla quale il getto si disintegra, sono stati svolti svariati studi e lo stesso Yanida ha osservato che questo comincia a disintegrarsi mantenendo una sezione coerente all'interno che svanisce dopo una lunghezza pari a varie volte il diametro dell'ugello primario.

Per quanto riguarda i metodi di rottura delle gocce **Ohnesorge** li studiò per primo tramite alcuni numeri adimensionali:

$$\text{Numero di Reynolds: } Re = \frac{\rho_L L V}{\mu_L} \quad (2.1)$$

Dove ρ_L è la densità del liquido, L la dimensione caratteristica della geometria considerata (nel nostro caso il diametro dell'ugello primario), V la velocità del getto all'uscita (stimabile con il teorema di Bernoulli) e μ_L la viscosità del liquido; esso esprime quindi la turbolenza del moto delle gocce.

$$\text{Numero di Weber: } We = \frac{\rho_L L V^2}{\sigma} \quad (2.2)$$

Dove ρ_L è la densità del fluido, L la dimensione caratteristica della geometria considerata (nel nostro caso il diametro dell'ugello primario), V la velocità di uscita del getto e σ la tensione superficiale tra il liquido e il mezzo in cui si muove (nel nostro caso aria).

Esso è quindi indicativo per caratterizzare il getto in base alle proprietà dell'aria in cui si propaga.

$$\text{Numero di Ohnesorge: } Oh = \frac{We^{0.5}}{Re} = \frac{\mu_L}{(\rho_L \sigma L)^{0.5}} \quad (2.3)$$

Questo numero, dipendente dagli altri due precedentemente descritti, è un indicatore della stabilità del getto.

Quindi a seconda del modo di operare, il getto può rompersi in diversi modi dando origine a gocce di tipo diverso:

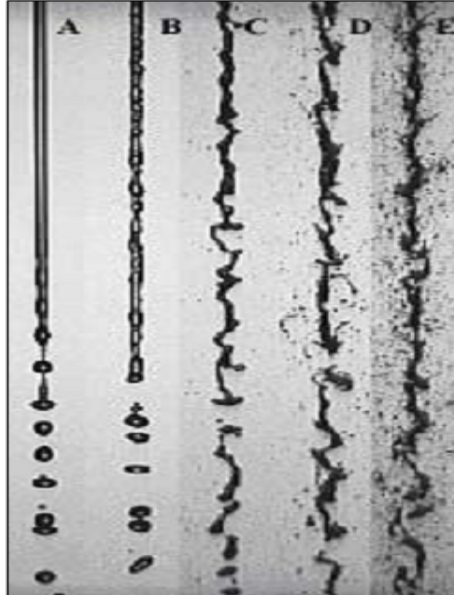


Fig. 2.3 Tipologie di getto [Ann06]

Con queste conoscenze si sono sviluppate così diverse sperimentazioni, tra le quali una delle voci più autorevoli è senza dubbio quella di **Hashish**, che ha introdotto per prima cosa la schematizzazione e denominazione del getto:

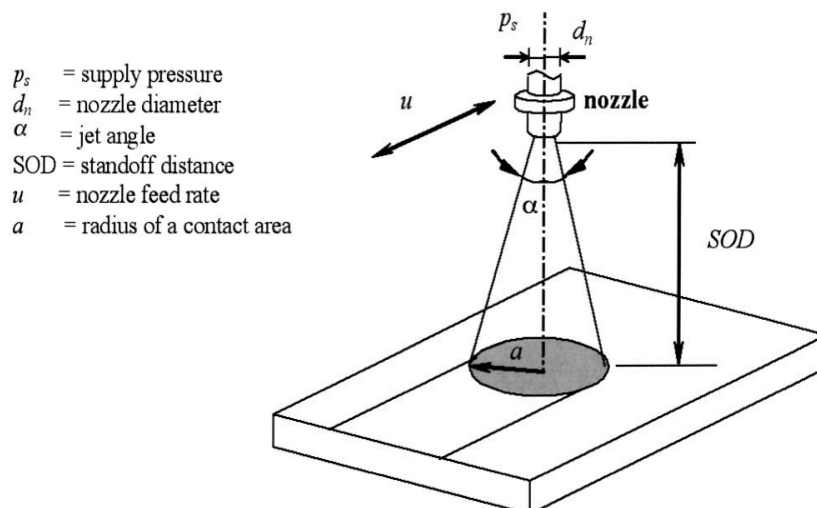


Fig. 2.4 Parametri Determinati da Hashish [Has04]

Hashish ha determinato un valore di standoff distance (SOD) sotto il quale si ha l'inizio della deformazione plastica; questo valore può essere utile quindi, dati valori quali velocità trasversale e pressione, per avere un ordine di grandezza delle altezze a cui operare:

$$SOD_f = \frac{d_u}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \left[\left(\frac{3C_0 p_s}{CS_y u} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (2.4)$$

Dove:

d_u è il diametro dell'ugello primario, α è l'angolo di apertura del getto, C_0 è la velocità del suono nell'acqua, S_y è modulo lo sforzo di snervamento del materiale, p_s la pressione dell'acqua, u la velocità trasversale e C un parametro adimensionale dipendente dalla geometria dell'impatto, il suo valore viene stimato con delle analisi agli elementi finiti.

Hashish si è inoltre interessato nel definire l'andamento della pressione in base agli altri parametri ottenendo la relazione:

$$p(r) = 3C_0 \frac{p_s}{u} \left(\frac{d_n}{d_n + 2SOD \tan \frac{\alpha}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 - 3 \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{1}{3}} + 2 \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (2.5)$$

Il profilo di pressione attraverso una sezione del getto utilizzando il modello di calcolo sopra citato può essere così schematizzato:

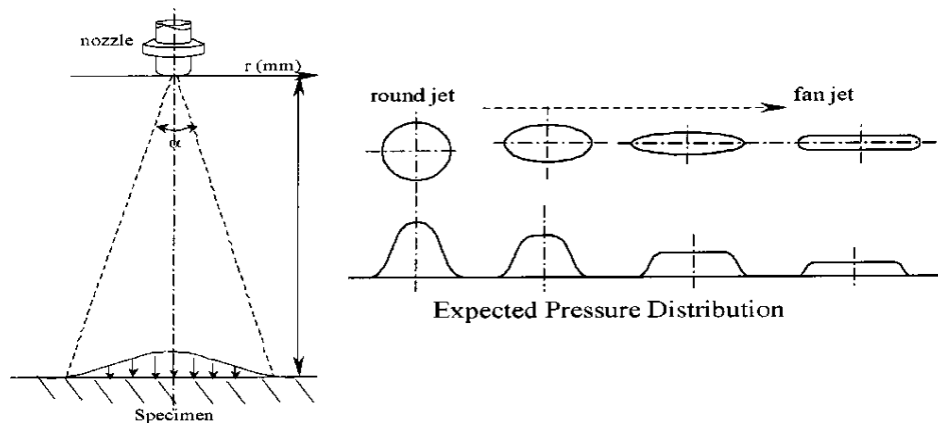


Fig. 2.5 Profilo e distribuzione della pressione [Has04]

La pallinatura fatta con getto d'acqua è stata già affrontata al Politecnico di Milano nello studio condotto da **Motter** che ha preso come parametro di processo l'energia specifica che il getto fornisce al provino, questo perché tale parametro rappresenterebbe la sintesi di pressione e velocità trasversale, fattori che altrimenti andrebbero analizzati separatamente [Mot97].

Maggiore è l'energia trasferita, maggiore dovrebbe essere l'effetto; questo risulta vero solo fino al punto in cui l'energia non sia tale da provocare abrasione nel pezzo, cosa che porta a un fallimento del processo stesso.

L'energia trasferita al pezzo è quindi stimabile come:

$$E=Wt \quad (2.6)$$

Dato che il getto ha un'impronta approssimativamente circolare, muovendosi trasversalmente il tempo di esposizione del materiale dipende dalla zona del getto che si sta considerando:

$$t(x) = \frac{D(x)}{u} \quad (2.7)$$

I parametri del getto che avanza possono essere così schematizzati:

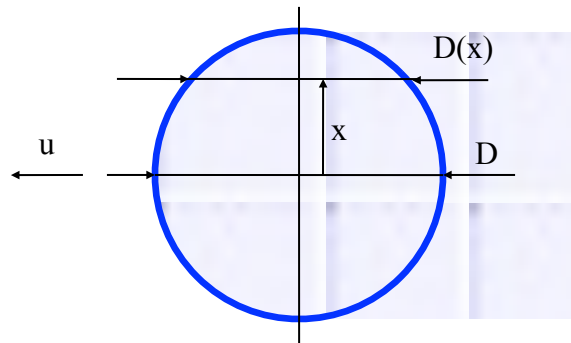


Fig. 2.6 Forma del getto

Se si va a considerare l'energia specifica per unità di area, la si può scrivere come:

$$e = \frac{E}{D^2} = \frac{\frac{1}{2} \times q \times V^2 \times \frac{D^2}{a \times u} \times n}{D^2} = \frac{q \times V^2 \times n}{2 \times u \times \delta} \quad (2.8)$$

dove \$n\$ è il numero delle passate eseguite sulla stessa area, \$q\$ è la portata massica, \$V\$ è la velocità dell'acqua.

Il materiale utilizzato per questi esperimenti è stato il C40 con limite di snervamento di 440 MPa e limite di rottura di 700 MPa trattato termicamente nel nostro stesso modo; il materiale utilizzato da noi ha come limite di snervamento 540 MPa e limite di rottura 680 MPa quindi non molto distante quindi dalle nostre caratteristiche e di conseguenza confrontabile.

Gli esperimenti eseguiti possono essere così riassunti per quanto riguarda il getto in aria:

	materiale	d0	ugello	P (MPa)	SOD [mm]	f [mm/min]	δ [mm]	alfa (°)	Max stress [MPa]	Depth [μ m]
Hashish	Al7075T6	0,3	fan	310	45	762	/	0	-150	250
Motter	C40	0,3	normal	100→300	40 → 70	1000→6000	0,5	0	-250	/

Tab 2.1 Esperimenti Hashish [Has04] e Motter [Mot97]

Per quanto riguarda il **getto d'acqua sommerso**, uno degli studi più autorevoli è stato condotto da Soyama [Soy03]. Possiamo così schematizzare la struttura del getto d'acqua sommerso:

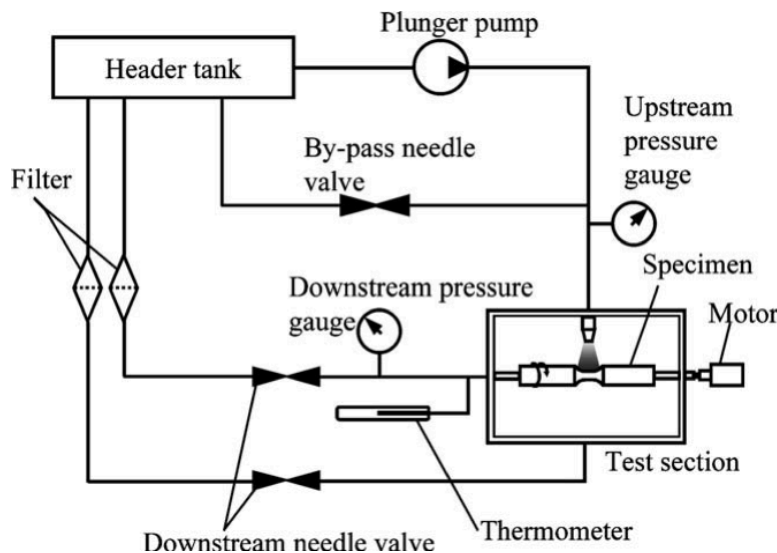


Fig. 2.7 Schema impianto peening sommerso [Soy06]

In questo caso le bolle d'aria che implodono creano un effetto di cavitazione nel momento dell'impatto.

Proprio Soyama ha introdotto uno dei parametri che caratterizza il getto d'acqua sommerso ed esso è chiamato **NUMERO DI CAVITAZIONE**:

$$\sigma = \frac{p_c - p_v}{p - p_c} \cong \frac{p_c}{p} \quad (2.9)$$

Dove p è la pressione dell'acqua prima dell'orifizio, p_c è la pressione dell'acqua nel getto e p_v è la pressione del vapore.

Nel suo studio la pressione elevata aveva lo scopo di produrre grande cavitazione e gran numero di bolle per aumentare la deformazione plastica del provino.

	materiale	d0	ugello	P [MPa]	SOD [mm]	teta mm	n	Equiv. time	Max stress MPa	Depth [μm]
Soyama	CrMoSteel	1,8	fan	30	55	/	/	0 - 100	-560	30

Tab. 2.2 esperimenti di Soyama [Soy03]

Gli studi riportati sono solo alcuni di quelli svolti negli ultimi anni, dal momento che questa tecnica è ancora in sperimentazione ed è oggetto di studio di continue ricerche.

Infatti il settaggio dei parametri è volto al fine di ottenere solo una zona a stress residui apprezzabili, senza incorrere nella modifica della morfologia del pezzo o nell'erosione dello stesso. Negli studi citati abbiamo omesso l'ultimo studio eseguito dal tesista Gemelli presso il Politecnico di Milano.

2.2 Caratteristiche tecniche del WJ

La tecnologia WJ è da tempo applicata nel taglio di svariati tipi di materiale, sia metallici (in particolare lastre), sia compositi, plastici che di altra natura (come legno, gomma, carta...).

Meno conosciuta e fonte di studi continui, è l'applicazione della stessa macchina per effettuare processi di pallinatura grazie all'effetto di "martellamento" dell'acqua.

La macchina da noi usata è quella in dotazione al dipartimento di meccanica del Politecnico di Milano.

Nonostante tale macchina sia stata progettata solo per applicazioni di taglio, variando i parametri di esercizio, è stato possibile eseguire delle prove di pallinatura descrivendo sui provini delle tracce di piccole dimensioni.

Di seguito andremo a illustrarne brevemente le caratteristiche, soffermandoci sui componenti che più sono stati determinanti nella sperimentazione.

Le parti principali di un impianto water jet sono:

- impianto di trattamento dell'acqua
- sistema di intensificazione della pressione
- accumulatore dell'acqua
- testa di taglio
- vasca di raccolta
- sistema di adduzione abrasivo

2.2.1 Sistema di pompaggio

Il sistema di pompaggio è di sicuro l'elemento di maggiore interesse sia per il taglio sia per la pallinatura.

- pompa oleodinamica, che porta l'olio alle due camere di intensificazione
- intensificatore a doppio effetto
- accumulatore che ha la funzione di smorzare le fluttuazioni di pressione
- testa di taglio

Pompa oleodinamica

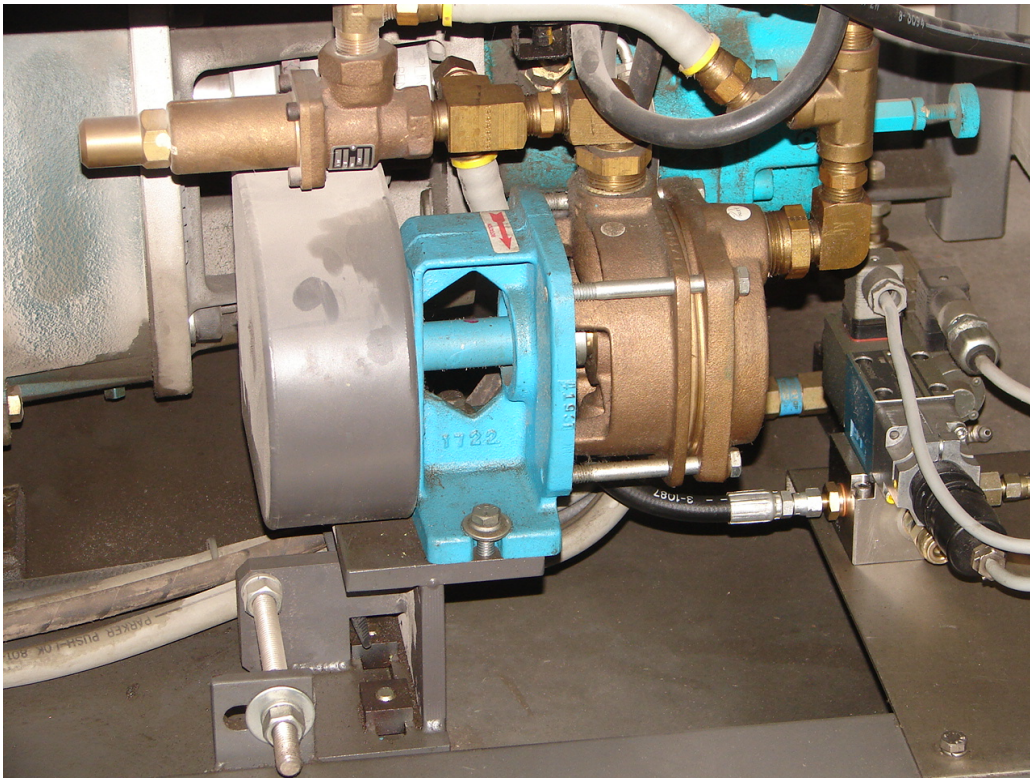


Fig. 2.8 Pompa oleodinamica

Per mettere in pressione l'olio si ha a disposizione una pompa oleodinamica movimentata da un motore elettrico.

Date le elevate pressioni di esercizio, le pompe impiegate sono di tipo volumetrico; nel nostro caso si ha a disposizione una pompa radiale a pistoni che permette una pressione massima dell'olio pari a 20 MPa.

Le normali pompe a pistone non permettono di superare una pressione massima di 70 MPa e per questo motivo sono necessari gli intensificatori.

Intensificatore

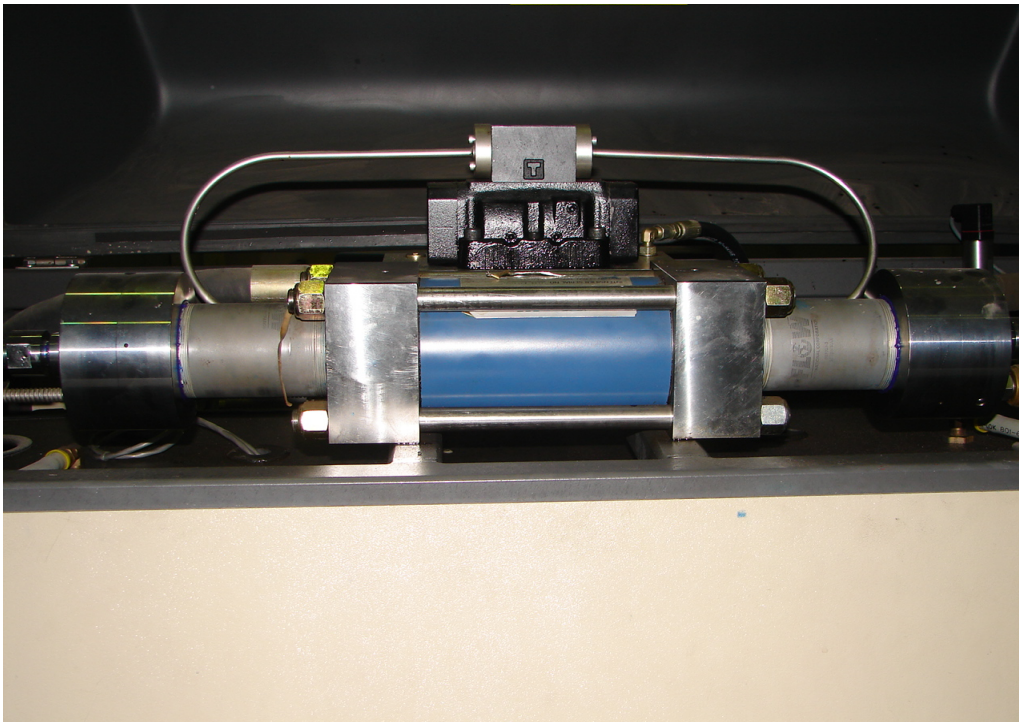


Fig. 2.9 Intensificatore

L'intensificatore ha lo scopo di far raggiungere all'acqua pressioni molto elevate, necessarie per i trattamenti di taglio o pallinatura, tramite un circuito ad olio in bassa pressione e uno in alta pressione ad acqua.

Infatti il pistone alternativo dell'intensificatore, mediante l'azione dell'olio, comprime l'acqua da una parte e l'aspira dall'altra.

Gli accumulatori d'acqua permettono poi di smorzare l'oscillazione della pressione e, trattandosi di pressioni elevate, sono uno dei componenti più critici della macchina.

Accumulatore

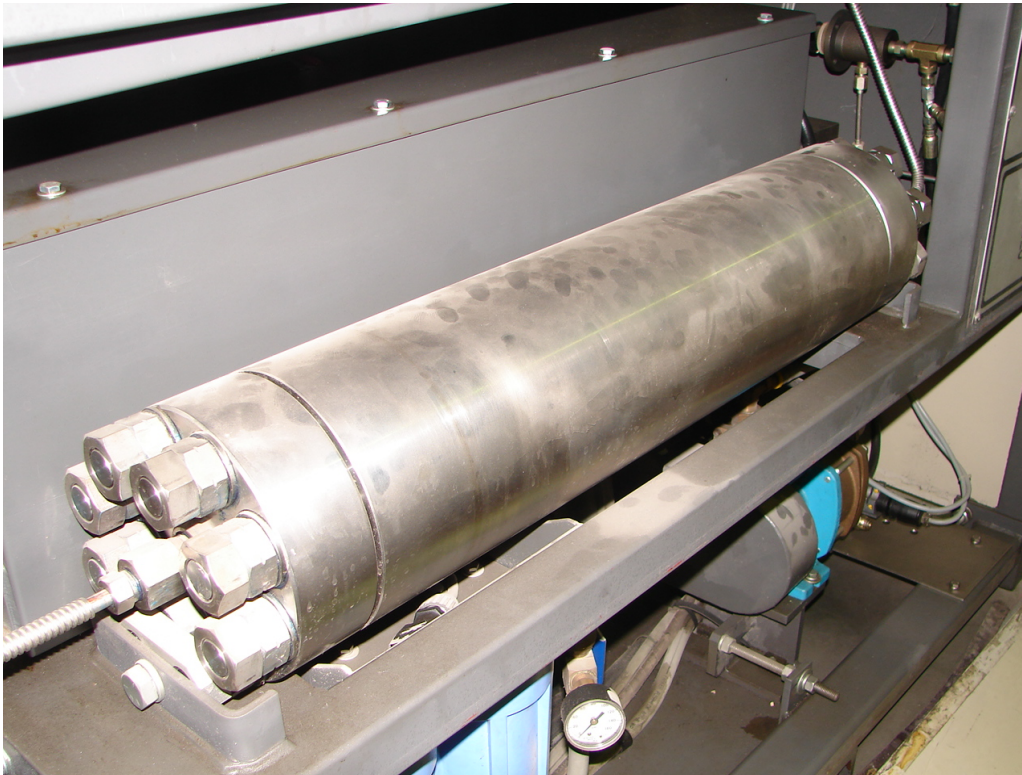


Fig. 2.10 Accumulatore

La fluttuazione della pressione e le perdite di carico all'interno del sistema di tubazioni che portano l'acqua dall'accumulatore alla testa di taglio possono essere fonte di problemi per il corretto esito delle prove.

Testa di taglio



Fig. 2.11 Testa di taglio

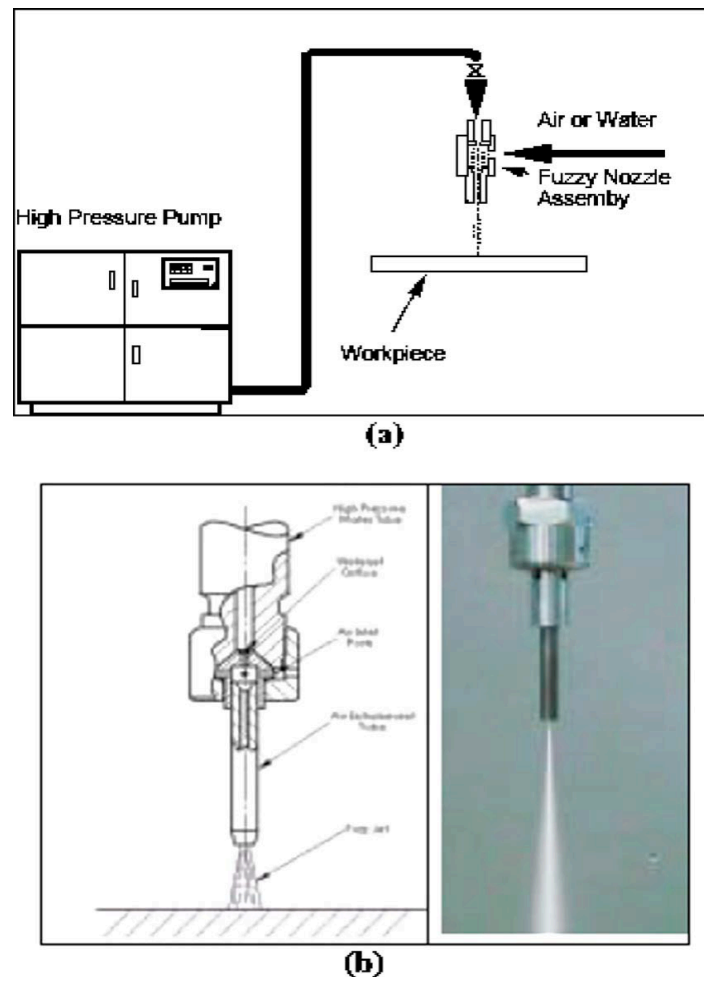


Fig. 2.12 Testa di taglio [Has07]

La testa di taglio da noi utilizzata è una testa a 3 assi con movimentazione manuale lungo l'asse Z. Nella testa di taglio si ha la conversione dell'energia di pressione in energia cinetica con getto ad alta velocità.

E' composta essenzialmente da tre componenti:

- ugello primario
- camera di miscelazione
- ugello focalizzatore

Dei tre componenti citati, in realtà solo il primo è veramente essenziale per ogni tecnologia water jet, gli altri due sono necessari solamente nel caso in cui si usi il getto abrasivo e nel nostro caso non essendo di interesse non verranno trattati.

Ugello primario



Fig. 2.13 Ugello primario

L'ugello primario è il componente che realizza la conversione tra energia di pressione e energia cinetica.

La trasformazione d'energia è regolata dall'equazione di Bernoulli:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} + z_0 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \quad (2.10)$$

Dove:

0 indica le condizioni a monte dell'ugello e 1 la sezione a valle

P rappresenta la pressione (MPa), z la quota geodetica rispetto a un riferimento (m) e V la velocità dell'acqua (m/s)

γ rappresenta il peso specifico del fluido (N/m³) e g l'accelerazione di gravità

Dipendente dalla geometria dell'ugello vi è poi un altro parametro, detto coefficiente di efflusso C_d che permette di calcolare la portata reale di efflusso a partire dal valore teorico che in genere varia tra 0,5 e 0,98 [Has05].

Capitolo 3

3.1 Sperimentazione

In questo capitolo descriveremo il materiale utilizzato, la realizzazione dei provini, il piano sperimentale seguito e come sono state portate a termine le prove di pallinatura, seguendo quest'ordine:

- materiale utilizzato
- realizzazione dei provini (ciclo tecnologico)
- scelta dei parametri di prova
- definizione del piano sperimentale
- realizzazione dell'attrezzatura di staffaggio del provino

Il materiale sottoposto al trattamento è stato scelto uguale a quello utilizzato nella sperimentazione precedente [Gem06] per avere dei dati confrontabili mentre il ciclo tecnologico, utilizzato per realizzare i provini, è stato diversificato per ragioni di risorse.

La scelta dei parametri di prova e del piano sperimentale si basa sull'assunzione della tesi precedente [Gem06] in cui SOD e f risultavano i parametri più significativi e per alcuni valori di questi è possibile ottenere un trattamento di pallinatura ottimale in riferimento al materiale scelto. Ogni passaggio sarà esposto accuratamente al fine di fornire tutti i dati necessari per verificare o ripetere le prove nel migliore dei modi.

3.1.1 Materiale

Il materiale utilizzato per la nostra trattazione è il 39NiCrMo3.

Questo materiale è un acciaio da bonifica che, assieme al C40, copre l'80% delle applicazioni degli acciai.

Contiene mediamente lo 0,39% di carbonio, lo 0,75% di nichel (elemento che migliora la tenacità, la temprabilità e le caratteristiche meccaniche) e infine meno dello 0,75% di cromo (aumenta la temprabilità) e molibdeno.

Può essere sottoposto alla tempra ad induzione, in quanto non troppo soggetto a cricature.

Di solito è sottoposto a tempra in acqua o in olio, seguita da rinvenimento a 620 °C.

La tabella 3.1 riporta le caratteristiche chimiche della barra da cui abbiamo ricavato i provini, ottenute mediante analisi al microscopio elettronico in tre zone.

	Weight % Si	Weight % Cr	Weight % Mn	Weight % Fe	Weight % Ni	Weight % Mo
Zona 1	0,48	0,95	0,87	96,19	1,01	0,50
Zona 2	0,46	0,98	0,72	96,41	0,93	0,49
Zona 3	0,36	0,98	0,79	96,33	1,27	0,27

Tab. 3.1 Composizione chimica

Nella tabella i materiali sono espressi in percentuale di peso.

3.1.2 Realizzazione dei provini

Per le prove sono stati utilizzati come provini dei tondi di 39NiCrMo3 dello spessore di 5 mm e del diametro di 40 mm.

Sono stati torniti e sfacciati dalla barra presso il laboratorio MUSP di Piacenza.

Si è riscontrato al centro del provino il fenomeno del tagliente di riporto: infatti durante il taglio dei metalli si accumulano sull'utensile strati di materiale, a causa delle elevate pressioni e temperature che si vengono a creare tra il truciolo e il petto dell'utensile stesso. Si forma così un caratteristico cappuccio chiamato tagliente di riporto. Si crea con condizioni di velocità di taglio sia basse che medie, quando il materiale tende ad incrudirsi.

Inoltre bisogna considerare che:

- il tagliente di riporto tende ad aumentare fino a rottura, e i frammenti che ne conseguono vanno a depositarsi sia sul truciolo che sulla parte lavorata creando delle zone dure
- il tagliente di riporto staccandosi produce delle vibrazioni dannose che peggiorano ulteriormente la finitura superficiale dei pezzi.

Perciò si è deciso di considerare zona lavorabile quella periferica del provino.

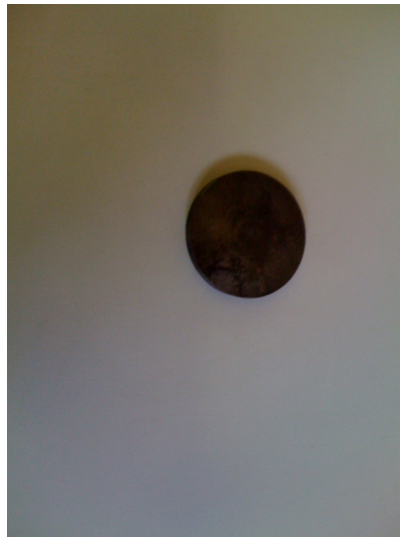


Fig. 3.1 Provino

Per eliminare poi la presenza di tensioni residue già esistenti è stato eseguito un trattamento termico a 600°C della durata di 2 ore, con raffreddamento in forno aperto.

Il trattamento è stato eseguito presso il Laboratorio di Metallurgia del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.



Fig. 3.2 Forno A



Fig. 3.3 Forno B

I provini sono stati numerati in base alla disposizione nei due forni in questo modo:

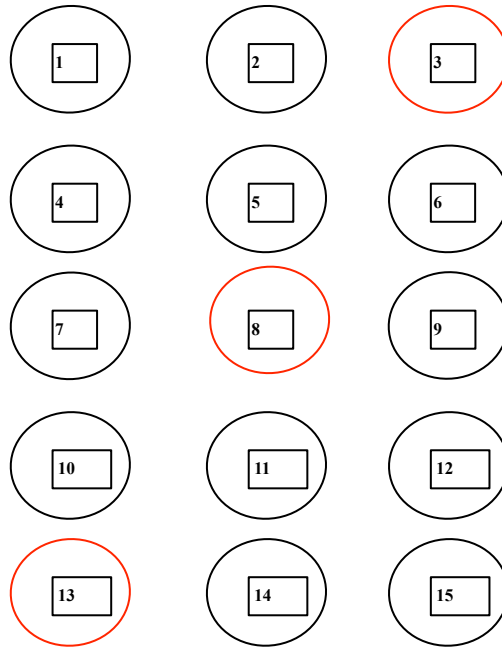


Fig. 3.4 Disposizione dei provini forno A

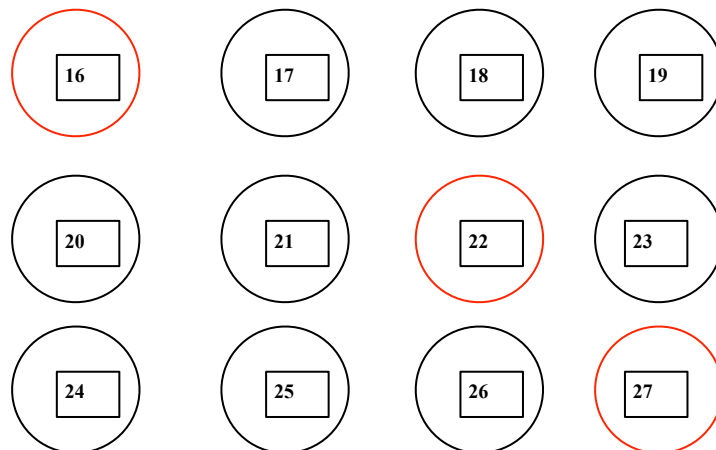


Fig. 3.5 Disposizione dei provini forno B

I provini sono stati trattati termicamente in due forni in modo da eseguirne contemporaneamente la distensione e mantenere quindi le stesse caratteristiche fisiche.

La disposizione dei provini è stata scelta per poter trattare il massimo numero di provini nelle stesse condizioni operative.

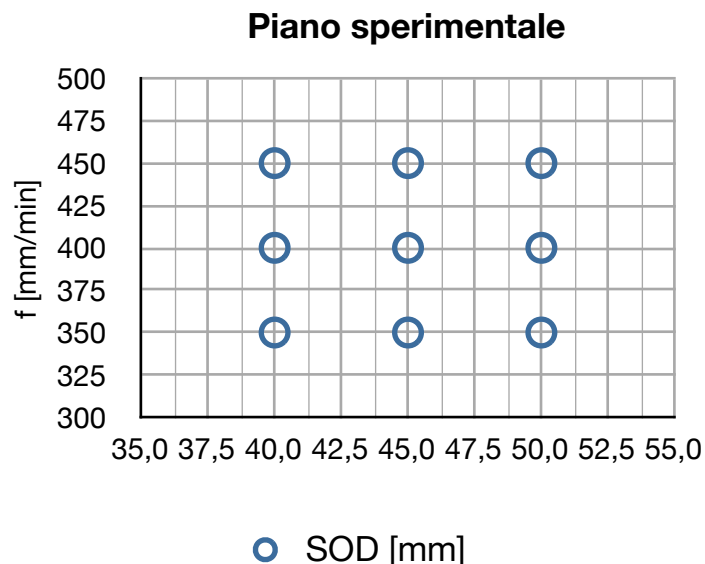
La lavorazione di rettifica non è stata effettuata poiché avrebbe portato ad una rugosità superficiale migliore ma all'aumento delle tensioni residue che avrebbero alterato gli effetti della pallinatura tramite WJ.

Infatti lo scopo principale è lo studio delle tensioni residue indotte dal trattamento che risultano più rilevabili partendo da provini scarichi.

3.2 Parametri di prova e piano sperimentale

I parametri di prova considerati sono la stand off distance SOD e la velocità di avanzamento f poiché reputati i più influenti nel processo di pallinatura dai lavori precedenti eseguiti presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano [Gem06] [Mot97].

Si è quindi costruito un piano sperimentale a 2 fattori, 3 livelli e 3 repliche per un totale di 27 prove:



Graf. 3.1 Piano sperimentale

Dal grafico 3.1 si può notare che per la SOD i livelli considerati sono a 40, 45 e 50 mm mentre per la velocità di avanzamento 350, 400 e 450 mm/min.

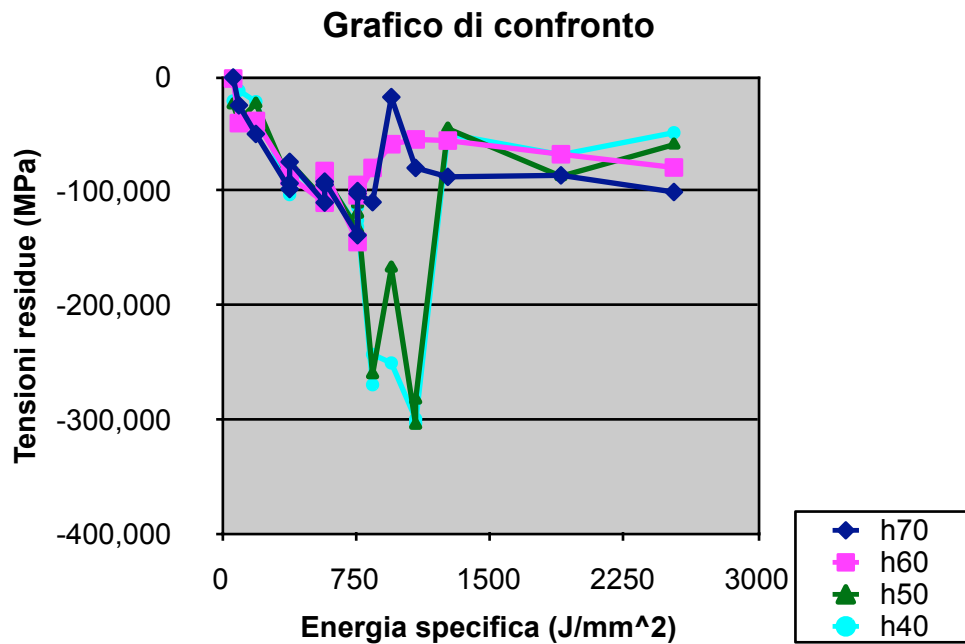
La scelta di tali livelli risiede nel fatto che, per quei valori di SOD e di velocità di avanzamento, è presente la massima sollecitazione a compressione ottenibile sul materiale in esame tramite la macchina WJ utilizzata [Gem06].

Dal lavoro precedentemente svolto è risultato chiaro che esiste un range ben definito di energia specifica (definita nel capitolo 2) in cui il processo in termini di stress residui risulta essere più significativo a pari pressione di pompa (100 MPa), diametro d'ugello (0,30 mm) e angolo d'inclinazione (0°).

Infatti come si può notare nel grafico 3.2 i valori più elevati di compressioni sono ottenuti con una SOD che varia tra 40 e 50 mm e una f che varia tra 350 e 450 mm/min.

Material	39NiCrMo3 (steel)
d_o [mm]	0,30
Nozzle/ Focuser	standard
p [MPa]	100
SOD [mm]	40 → 50
f [mm/min]	350 → 450
Specific energy e [J/ mm ²]	840 → 1090
δ [mm]	0.5
θ [°]	0
Residual stress [MPa]	-250 → -303
Treatment penetration [μ m]	20

Tab. 3.2 Caratteristiche della sperimentazione precedente [Gem06]



Graf. 3.2 Tensioni residue in funzione dell'energia specifica

Per verificare tale andamento di minimo, sono stati analizzati accuratamente 6 provini (i numeri: 3, 8, 13, 16, 22 e 27) che hanno subito la pallinatura con i seguenti parametri (tenendo costante la pressione di pompa 100 MPa, il diametro d'ugello 0,30 mm e l'angolo d'inclinazione 0°):

Provino	SOD [mm]	f [mm/min]
3	45	400
8	50	450
13	50	450
16	45	400
22	50	450
27	45	400

Tab. 3.3 SOD e f dei provini 3, 8, 13, 16, 22 e 27

I provini sono stati scelti in base alla loro disposizione in forno per garantire la ripetibilità dei test. Essendo il range ottimo di valori compreso fra 40-50 mm di SOD e tra 350-450 mm/min di f , sono stati presi tutti i provini trattati in tale range (3, 16 e 27) e nel limite superiore (8, 13 e 22). Tali 6 provini sono stati ulteriormente utilizzati per successive analisi qualitative.

3.2.1 Realizzazione dell'attrezzatura di staffaggio del provino

Per garantire il buon esito delle prove è stato progettato un sistema di staffaggio del provino. Lo staffaggio si prefigge 3 scopi principali:

- resistere alle forze che il getto d'acqua produce durante il trattamento
- attenuare le vibrazioni durante il trattamento (che potrebbero influenzare la prova)
- offrire un sistema di riferimento alla macchina

La struttura è profondamente diversa rispetto alla sperimentazione precedente [Gem06]: la struttura risulta più rigida e quindi meno vibrante garantendo stabilità e diminuendo la variabilità del processo.

Il supporto utilizzato in precedenza, infatti, era stato fissato su un riferimento con bassa rigidità.

Il supporto da noi creato è caratterizzato da una parte superiore ed una inferiore:

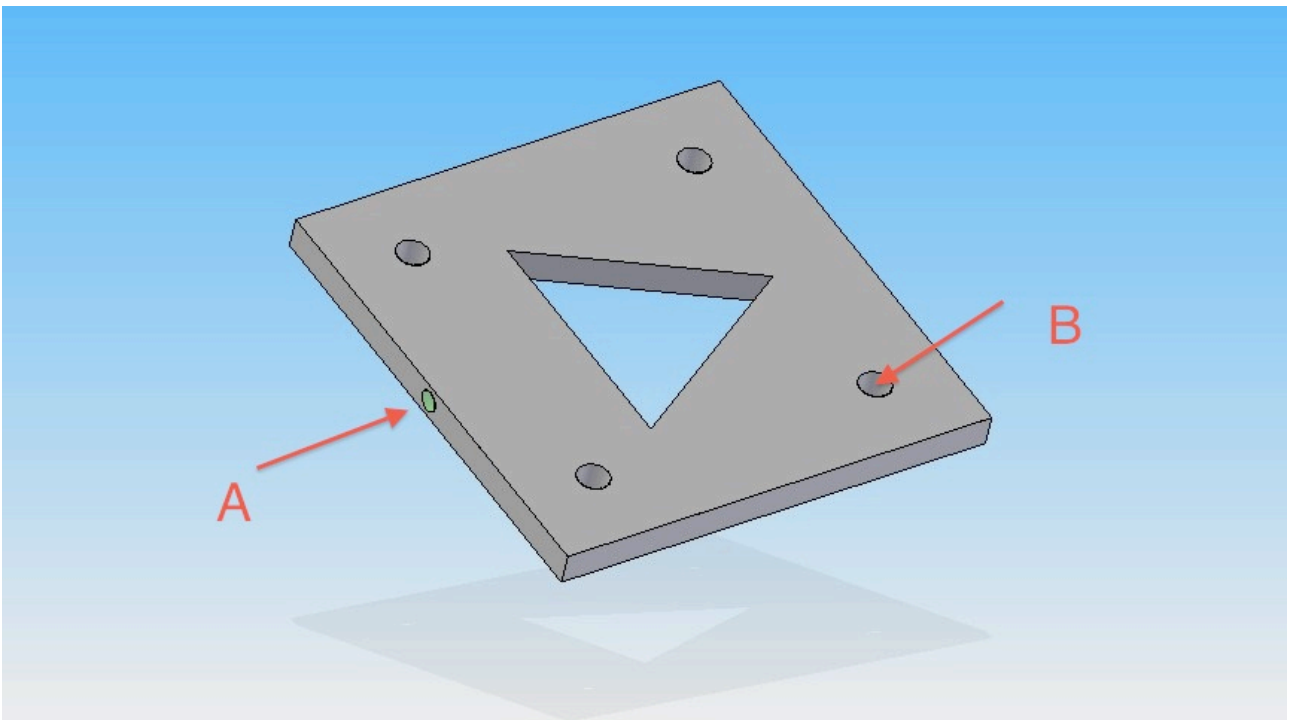


Fig. 3.6 parte superiore del supporto

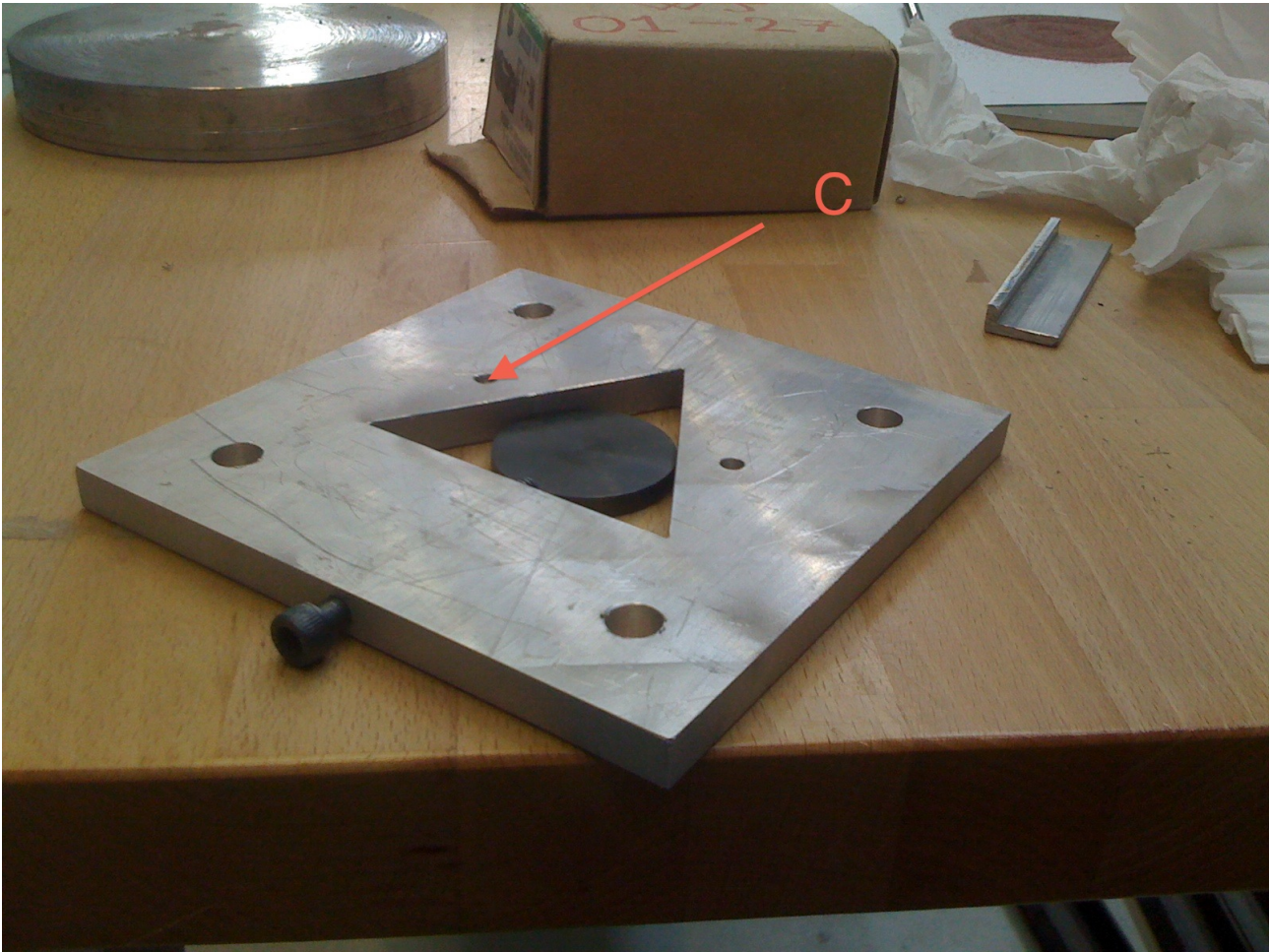


Fig. 3.7 Particolare del supporto

La parte superiore è caratterizzata da un foro passante e filettato (Fig. 3.6 A) sede della vite che spingerà il provino contro i due lati del triangolo equilatero al centro della piastra (impedendo in questo modo lo spostamento orizzontale).

Sono presenti anche 4 fori non filettati (Fig. 3.6 B) che garantiscono il serraggio della parte superiore alla parte inferiore del supporto.

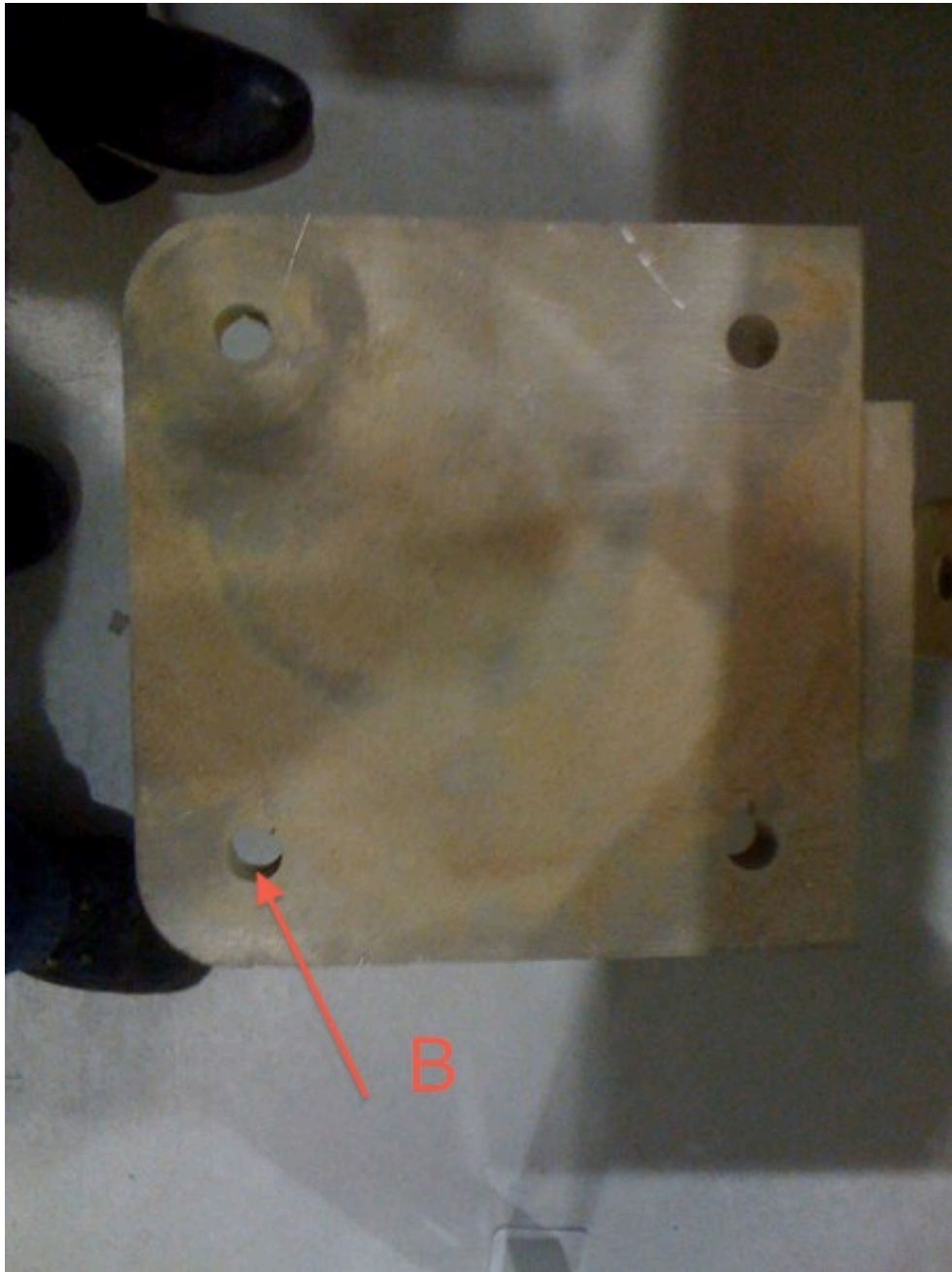


Fig. 3.8 Parte inferiore del supporto

Affinché non vi siano movimenti verticali del provino è stato inserito un tondino al di sotto di una placchetta avvitata (Fig. 3.9) alla parte superiore del supporto. Tale placchetta esercita una spinta sul tondino che a sua volta spinge il provino contro la parte inferiore del supporto.

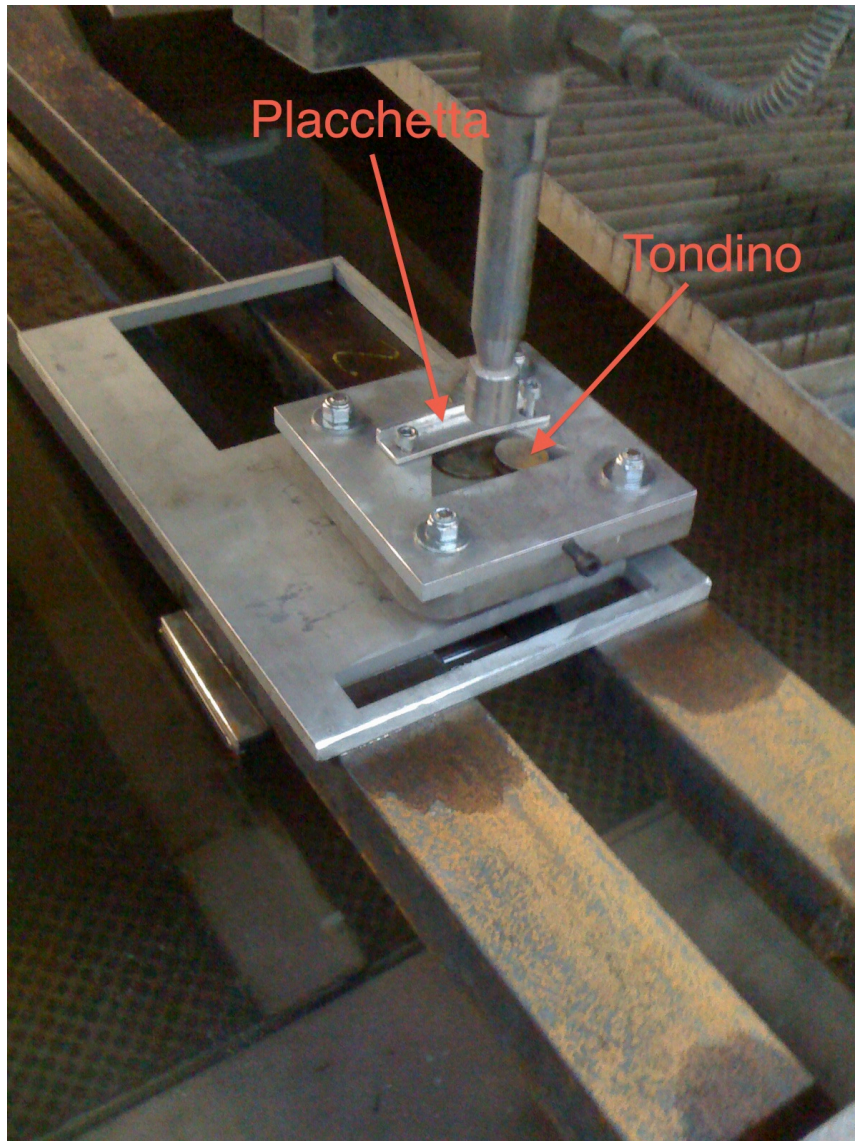


Fig. 3.9 Schema generale dello staffaggio

La struttura sopra descritta è stata, a sua volta, assicurata alla macchina del WJ mediante 2 morsetti.



Fig. 3.10 Travi a C

Nella Figura 3.10 è possibile anche notare le 2 travi a C a cui è serrato il supporto che conferiscono rigidità alla struttura. Le travi a C sono state incastrate a loro volta a delle fessure presenti sulle pareti interne del WJ.

Capitolo 4

4.1 Parte operativa

La parte operativa non può avere inizio senza prima menzionare i parametri fondamentali imposti alla macchina WJ che possono essere così riassunti:

- Modalità di trattamento della superficie (traiettoria del getto)
- Pressione
- Velocità impostate per raggiunge la velocità di regime

La traiettoria del getto è stata scelta coerentemente con i lavori precedenti [Gem06] [Mot97] in modo da creare una traccia confrontabile.

La pressione vale 100 MPa poiché tale valore è ottimale per il trattamento di pallinatura [Gem06]. Infine anche il range di velocità si riferisce a tensioni residue a compressione massime come suggerisce il grafico 3.2.

4.1.1 Modalità di trattamento della superficie

È stata impressa sui provini una traccia lunga 20 mm e larga 5 mm [Gem06].

Ovviamente per lasciare un'impronta larga 5 mm con passo laterale 0,5 mm saranno necessari 10 cicli; si è scelto inoltre di fare l'impronta lunga 20 mm in modo da lasciare alla macchina il tempo di accelerare fino alla velocità impostata.

Come si può notare dalla Figura 4.1 il verso di percorrenza da una passata a quella successiva è invertito per permettere alla macchina di trattare in continuo i provini ed il movimento è lineare.

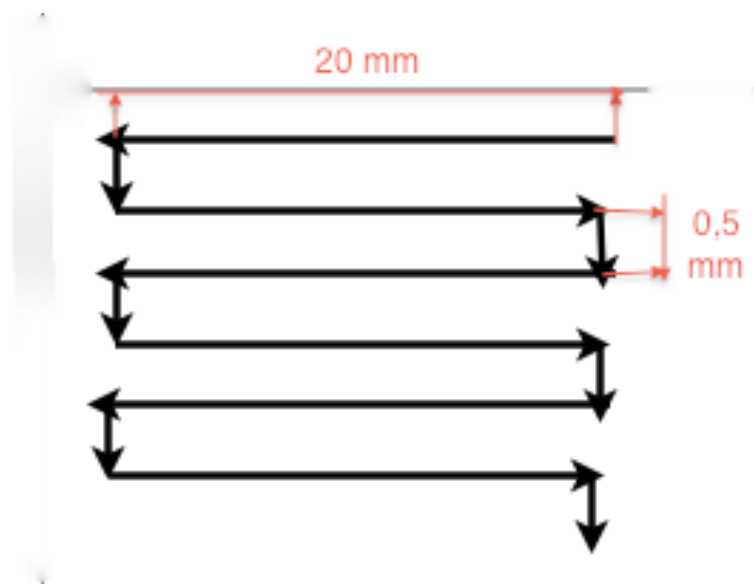


Fig. 4.1 Traccia del trattamento

4.1.2 Velocità impostata

Affinché le prove abbiano validità sperimentale, la velocità impostata non coincide con i valori scelti dal piano sperimentale.

La macchina infatti dovrà superare il transitorio iniziale (in accelerazione), assestarsi alla velocità di regime e infine decelerare.

Per questo motivo è necessario garantire a regime che la velocità della macchina sia effettivamente quella impostata.

Abbiamo operato quindi con le seguenti velocità corrispondenti:

350 (mm/min)	→	540 (mm/min)
400 (mm/min)	→	617 (mm/min)
450 (mm/min)	→	694 (mm/min)

4.2 Sequenza delle prove

Le prove sono state eseguite seguendo la sequenza sottostante:

1. Decapaggio
2. Pesatura provini prima del trattamento (pesatura dei 6 provini scelti)
3. Analisi ottica prima del trattamento (dei 6 provini scelti)
4. Analisi qualità superficiale tramite rugosimetro prima del trattamento (dei 6 provini scelti)
5. Analisi delle tensioni residue prima del trattamento (dei 6 provini scelti)
6. Pesatura provini dopo il trattamento (dei 6 provini scelti)
7. Analisi ottica dopo il trattamento (dei 6 provini scelti)
8. Analisi qualità superficiale tramite rugosimetro dopo il trattamento (dei 6 provini scelti)
9. Analisi delle tensioni residue dopo il trattamento (di tutti i 27 provini)
10. Prove di durezza Rockwell C

Le prove da noi condotte si sono concentrate sull'analisi delle tensioni residue di compressione al fine di avere un riscontro numerico e analizzabile statisticamente; sono stati perciò analizzati tutti e 27 i provini a nostra disposizione.

Le altre analisi (analisi ottica, superficiale e pesatura) avvenute solo su 6 provini hanno invece una validità solo qualitativa.

4.2.1 Decapaggio

Il decapaggio è un'operazione effettuata per eliminare, tramite soluzioni di acido cloridrico, i residui di ossidi e scorie dai prodotti siderurgici.

Il decapaggio dei pezzi di acciaio viene effettuato in immersione di acido cloridrico o acido solforico, ma anche acido fosforico, acido nitrico e acido fluoridrico, a temperatura elevata.

Nel nostro caso è stato eseguito attraverso l'immersione dei provini in esiltetrammina (composizione: 5% HCl e 95% di acqua distillata) garantendo così una superficie del provino esente da ossido e quindi trattabile.

Prima del trattamento di pallinatura la superficie del provino è stata pulita anche con alcool etilico: si riduce così la presenza di particelle estranee al materiale.

4.2.2 Pesatura provini

La procedura di pesatura è stata eseguita prima e dopo il trattamento per apprezzare e quantificare la differenza di massa e, quindi, l'eventuale erosione provocata dal processo.

La bilancia (Precisa 100A-300M) in dotazione alla sala metrologica del Dipartimento di Meccanica è stata allestita nel modo seguente Fig. 4.2:

I 6 provini sono stati inseriti nella struttura A (Fig. 4.2) creata appositamente per ridurre al minimo la differenza termica tra interno ed esterno della bilancia che potrebbe alterare la misura.

I provini sono stati appoggiati su un distanziale in materiale paramagnetico (Fig. 4.2 B) per evitare interferenze magnetiche con il sensore della bilancia.

Per spostare i provini all'interno della bilancia si utilizzeranno delle pinze (Fig. 4.2 C) al fine di non scaldare i provini stessi.

Infine, per facilitare e accelerare l'assestamento della bilancia, i provini verranno sollecitati tramite un pennello (Fig. 4.2 D).

L'ordine di pesatura è stato completamente casualizzato e sono state eseguite 10 misurazioni per ciascun provino.

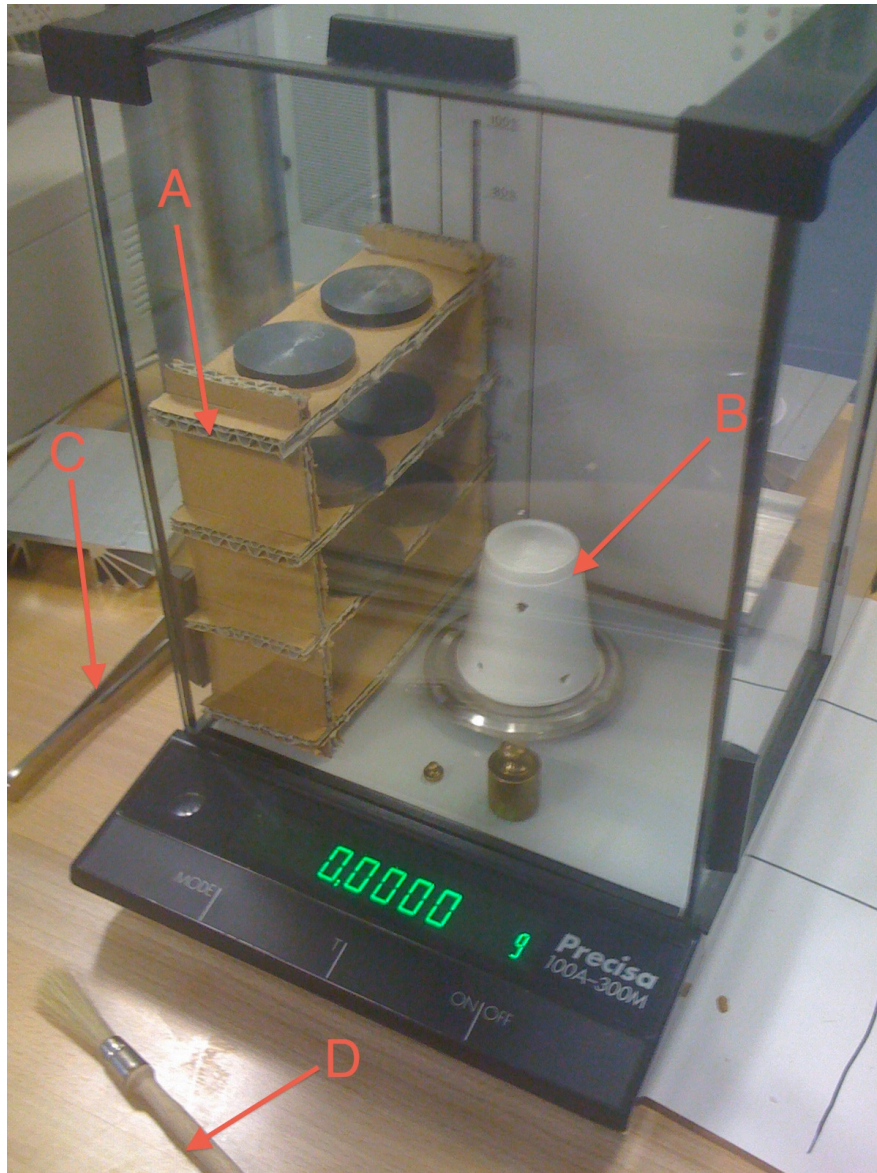


Fig. 4.2 Allestimento Bilancia

Di seguito vengono riportate le tabelle con le pesature a confronto (la bilancia fornisce 4 cifre decimali dopo la virgola):

Pesature prima della lavorazione:

campione	massa (g)
22	48,5916
3	48,8813
8	49,0776
22	48,5919
27	49,1082
27	49,1086
3	48,8812
27	49,1082
22	48,5917
8	49,0776
3	48,8813
27	49,1081
13	48,9987
13	48,9986
13	48,9986
16	48,8125
16	48,8124
8	49,0774
8	49,0774
27	49,1082
8	49,0774
22	48,5918
27	49,1082
16	48,8125
13	48,9987
27	49,1083
3	48,8815
8	49,0776
13	48,9987
22	48,5919
3	48,8814

campione	massa (g)
8	49,0773
16	48,8126
27	49,1085
3	48,8816
22	48,5921
16	48,8125
13	48,9988
22	48,5918
16	49,8125
3	48,8808
13	48,9987
3	48,8815
22	48,5914
8	49,0773
13	48,9985
27	49,1081
27	49,1082
22	48,5918
13	48,9987
3	48,8813
16	48,8125
16	48,8125
13	48,9987
3	48,8813
8	49,0774
16	48,8126
8	49,0774
16	48,8125
22	48,5918

Tab. 4.1 Pesature prima del trattamento

Pesature dopo la lavorazione:

Campione	Massa (g)
16	48,8114
27	49,1068
3	48,8808
22	48,5912
22	48,5913
13	48,9976
16	48,8114
27	49,1069
22	48,5913
16	48,8113
22	48,5912
8	49,0768
13	48,9978
3	48,8808
8	49,0767
16	48,8114
3	48,8807
16	48,8113
27	49,1068
8	49,0769
8	49,0771
8	49,0769
3	48,8807
13	48,9977
3	48,8807
22	48,5912
13	48,9977
27	49,1071
16	48,8114
22	48,5912
13	48,9977
13	48,9978
16	48,8116
13	48,9977
3	48,8808
22	48,5912

Campione	Massa (g)
8	49,0769
8	49,077
3	48,8808
27	49,1068
27	49,1068
16	48,8116
3	48,8809
8	49,0769
13	48,9979
27	49,1069
27	49,1071
13	48,9978
22	48,5912
22	48,5912
16	48,8115
16	48,8113
22	48,5915
3	48,8811
8	49,0769
13	48,9977
8	49,0771
27	49,1068
27	49,1069
3	48,8809

Tab. 4.2 Pesature dopo il trattamento

Ricaviamo quindi le medie e la variazione standard per ogni provino, in ambo i casi, e deduciamo la variazione di peso:

Provino	media peso prima del trattamento [g]	media peso dopo il trattamento [g]	variazione di peso [g]	Deviazione standard peso dopo il trattamento [g]	Deviazione standard peso dopo il trattamento [g]
3	48,8813	48,8808	0,0005	0,0002	0,0001
8	49,0774	49,0769	0,0005	0,0001	0,0001
13	48,9987	48,9977	0,0010	0,0001	0,0001
16	48,8125	48,8114	0,0011	0,0001	0,0001
22	48,5918	48,5913	0,0005	0,0002	0,0001
27	49,1083	49,1069	0,0014	0,0002	0,0001

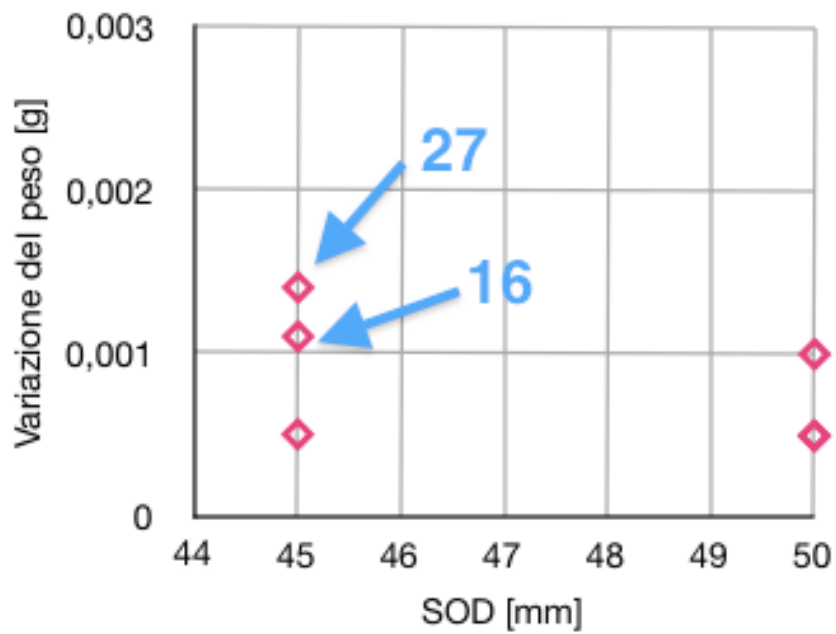
Tab. 4.3 Variazioni di peso

Come si può notare dalla tabella 4.3 la variazione di peso è maggiore dell'incertezza di misura quindi si può trarre la conclusione qualitativa che vi è la presenza di erosione superficiale.

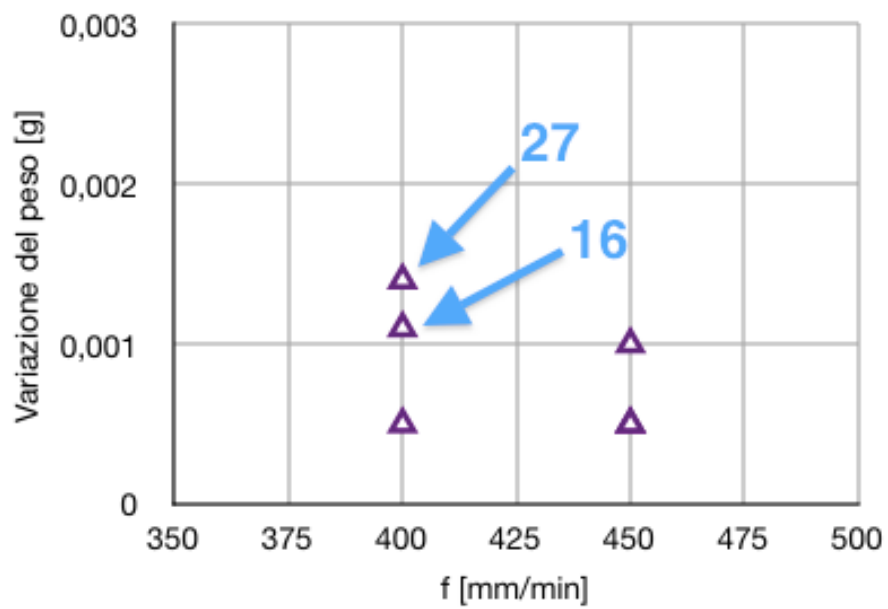
Nei lavori precedenti per SOD e f basse si ottenevano fenomeni di erosione maggiori [Mot97]

[Gem06]: le nostre misurazioni sono state effettuate invece per SOD e f alte (SOD 45 mm e 50 mm e f 400 mm/min e 450 mm/min) quindi meno problematiche.

Si suppone quindi che vi sia erosione anche per i restanti provini.



Graf. 4.1 Variazione di peso - SOD



Graf. 4.2 Variazione di peso - f

Si può notare che i provini che hanno perso più massa sono il numero 16 e 27, ossia quelli che hanno subito trattamento a SOD pari a 45 mm e velocità pari a 400 (mm/min).

4.2.3 Analisi ottica dei provini

Per apprezzare una possibile variazione della qualità superficiale è stata effettuata una analisi al microscopio elettronico che fornisce una più chiara immagine rispetto a quella effettuata tramite microscopio ottico.

Grazie alla procedura di decapaggio si è cercato inoltre di osservare i provini cercando di non andare ad analizzare una superficie compromessa dallo strato di ossido.

Sono stati utilizzati ingrandimenti x100 e x500 eseguendo una sola osservazione per ciascun provino. Vengono riportate di seguito le osservazioni prima del trattamento di pallinatura WJ.

Provino 3:

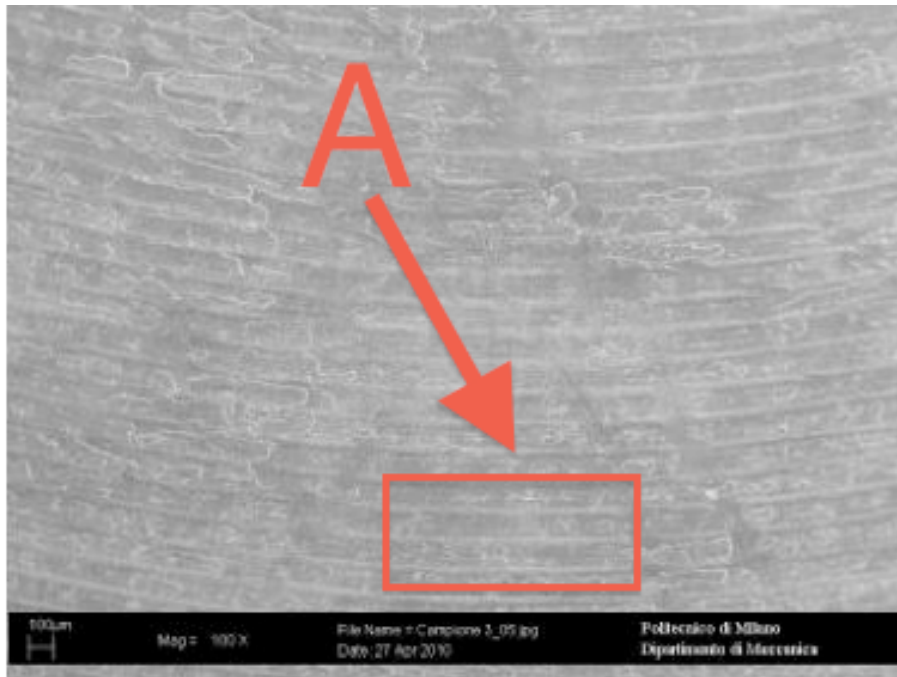


Fig. 4.2 Immagine X100 provino 3

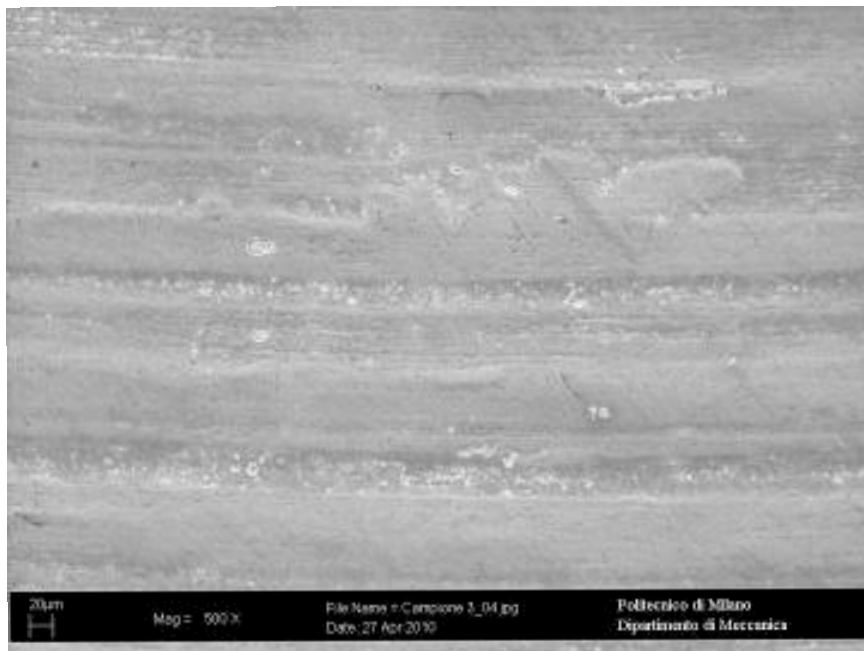


Fig. 4.3 Immagine X500 provino 3

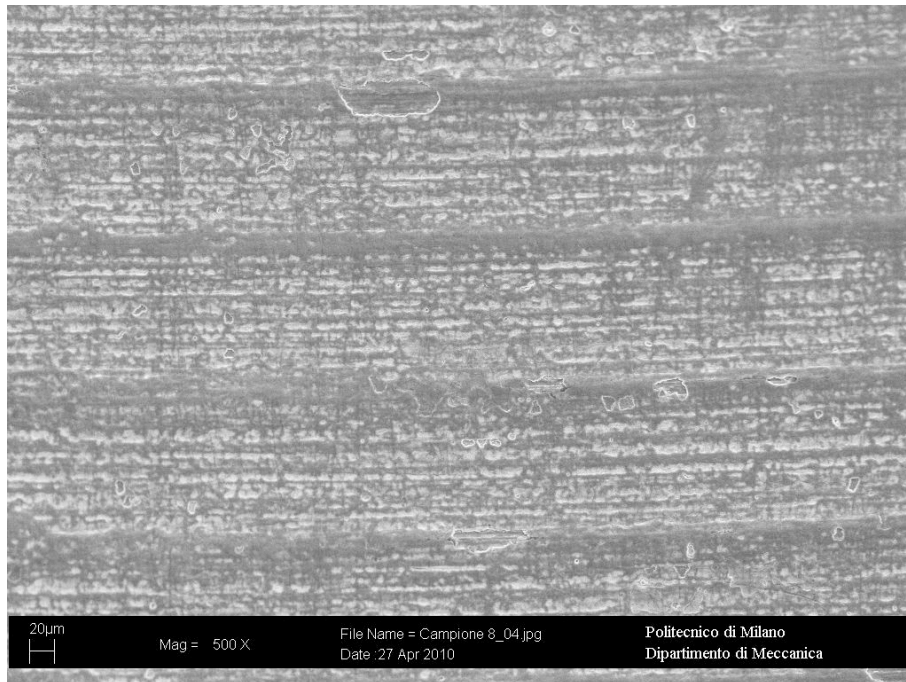
Provino 8:

Fig. 4.4 Immagine X500 provino 8

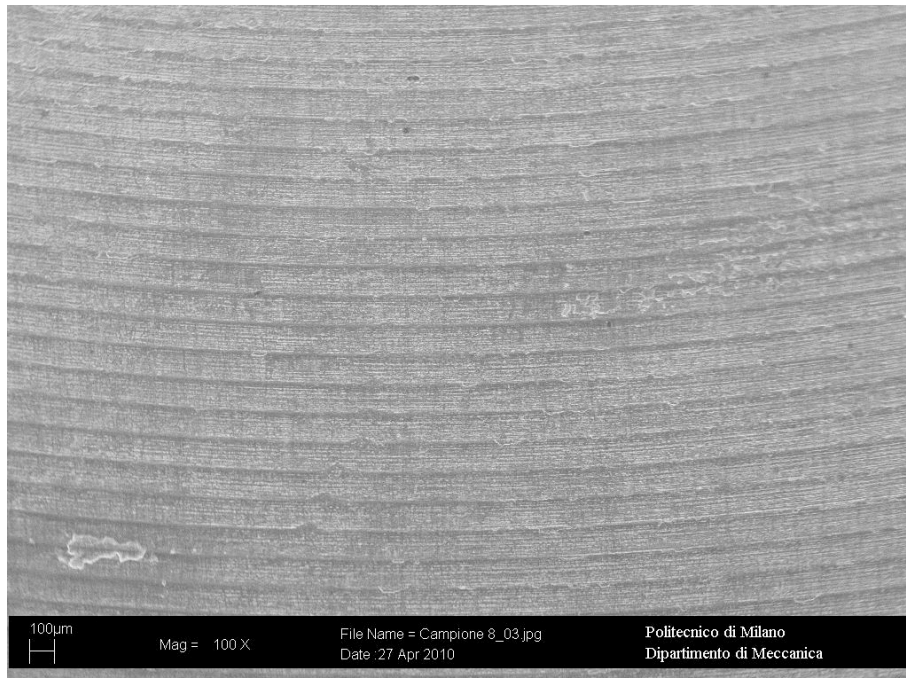


Fig. 4.5 Immagine X100 provino 8

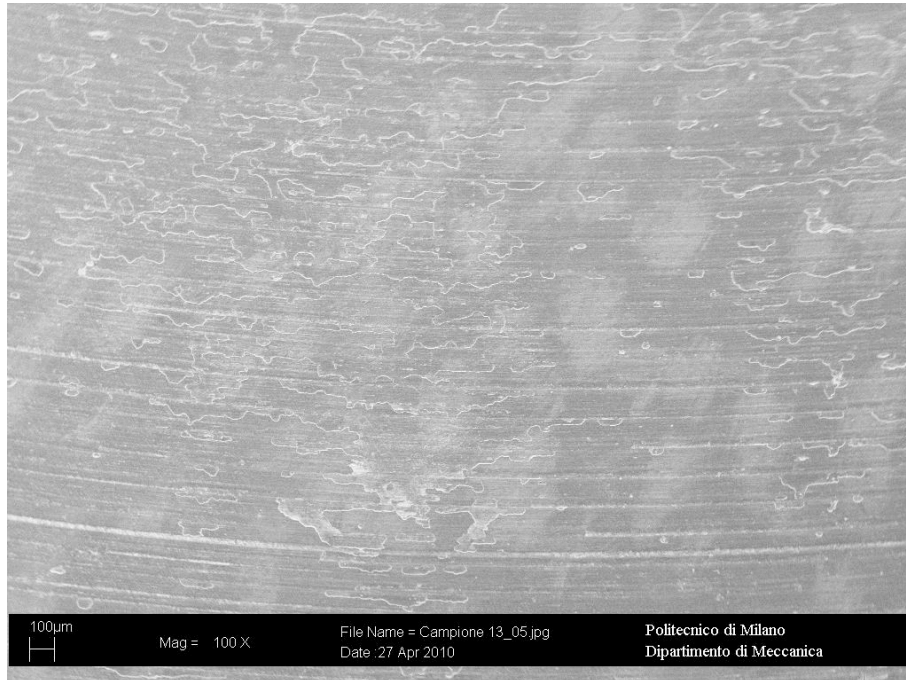
Provino 13:

Fig. 4.6 Immagine X100 provino 13

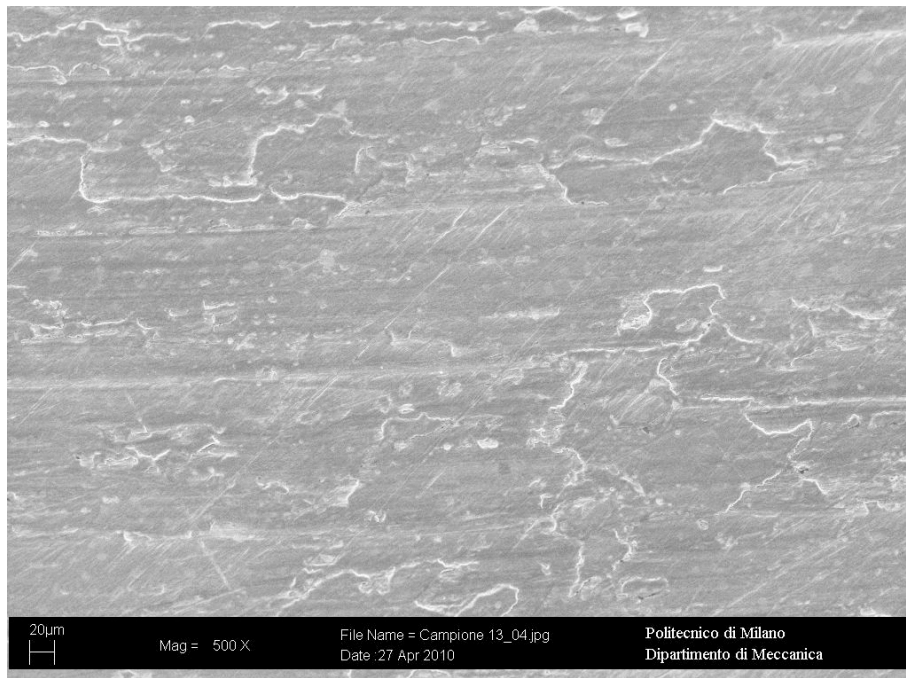


Fig. 4.7 Immagine X500 provino 13

Provino 16:

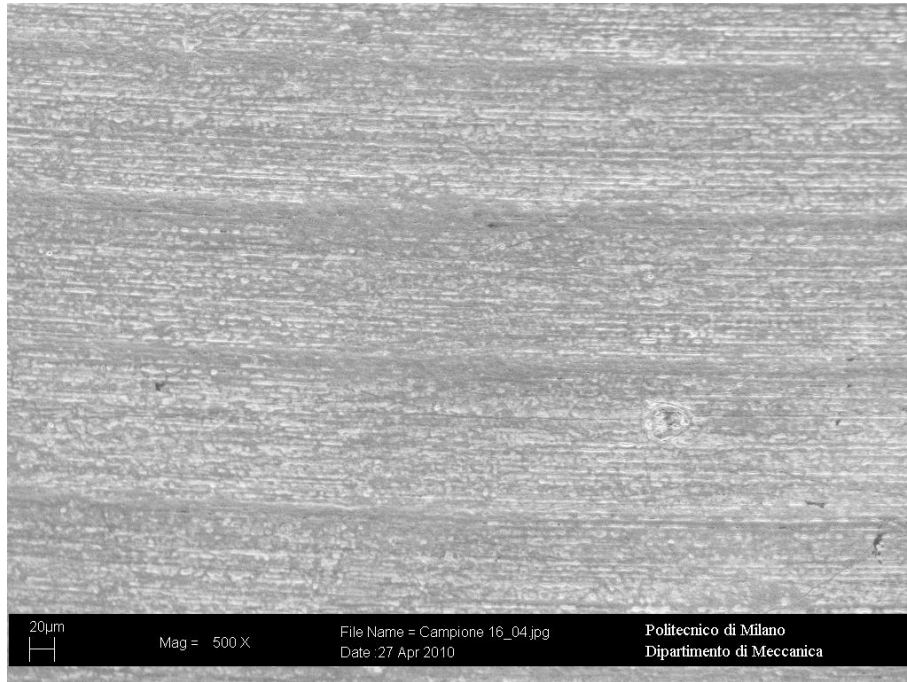


Fig. 4.8 Immagine X500 provino 16

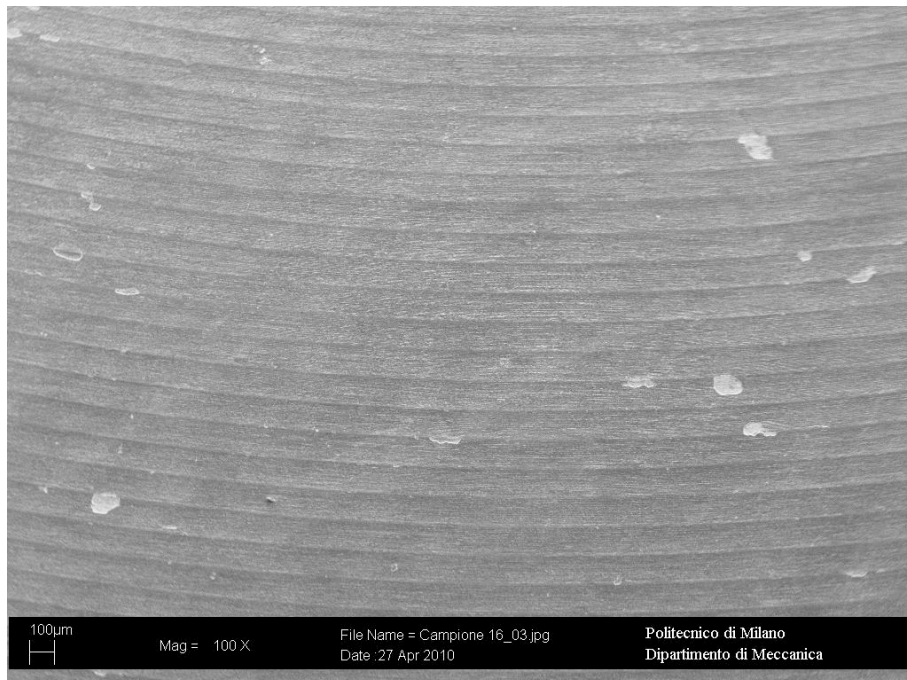


Fig. 4.9 Immagine X100 provino 16

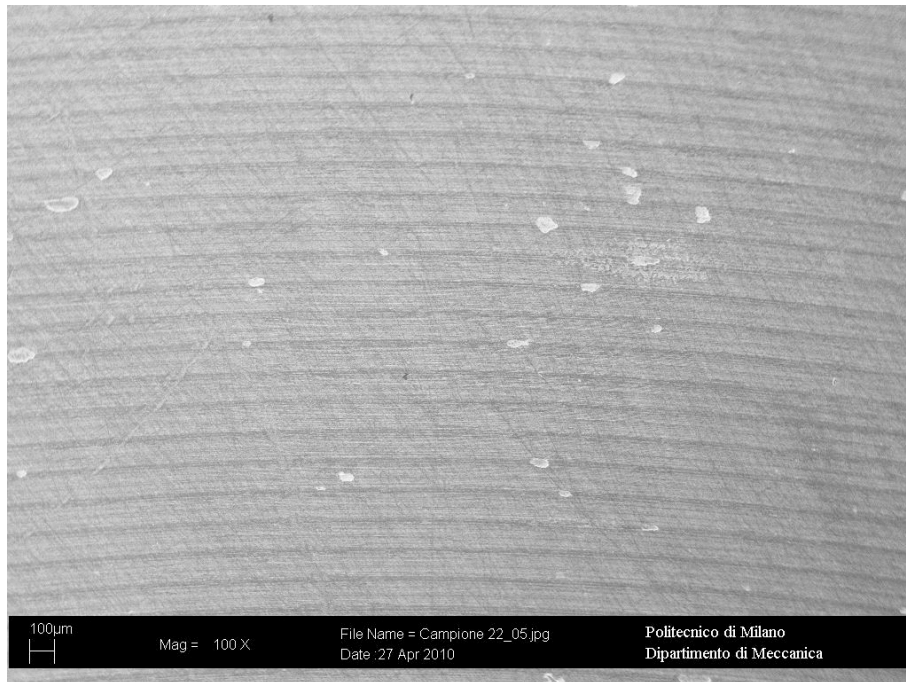
Provino 22:

Fig. 4.10 Immagine X100 provino 22

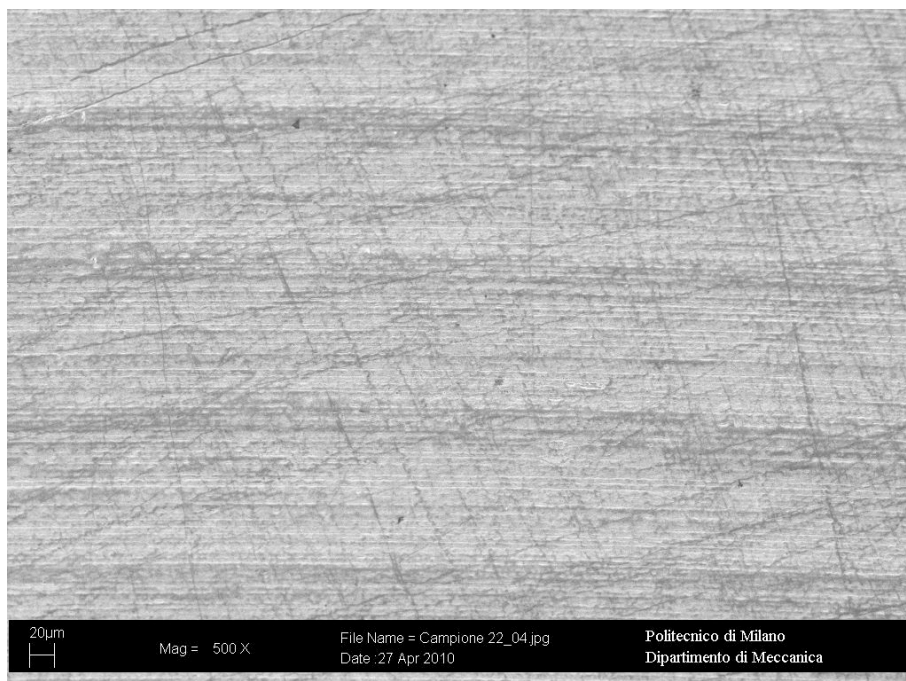


Fig. 4.11 Immagine X500 provino 22

Provino 27:

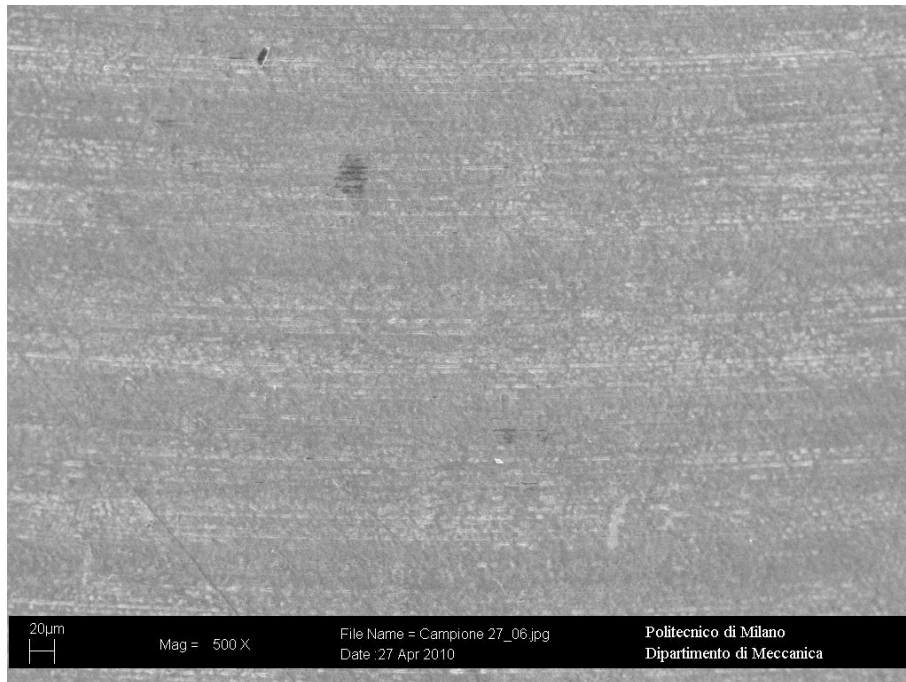


Fig. 4.12 Immagine X500 provino 27

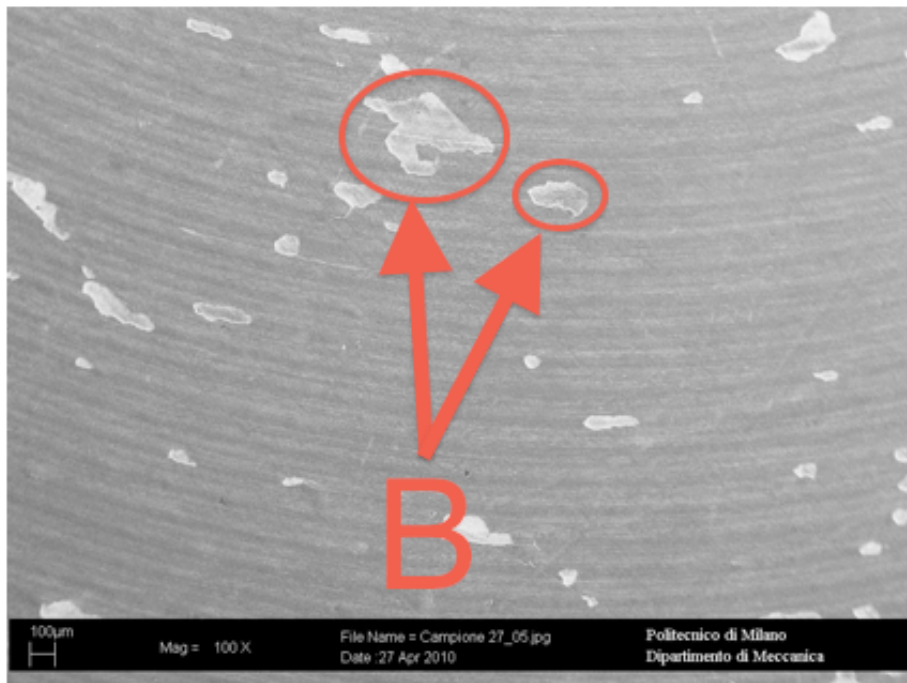


Fig. 4.13 Immagine X100 provino 27

Osservando la superficie, nelle immagini a X100 (Fig. 4.2 A), si possono notare delle striature ad una distanza regolare, pari all'avanzamento durante la lavorazione di sfacciatura al tornio, e dei crateri sia nelle immagini a X100 (Fig. 4.13 B) che nelle immagini a X500 dovute al distaccarsi dell'ossido durante il decapaggio.

Nonostante queste imperfezioni la finitura superficiale è da ritenersi buona.

L'analisi al microscopio elettronico dopo la pallinatura è stata eseguita con particolare cura, effettuando ingrandimenti a X100, X500 ed un'ultima vista mediante l'uso di retrodiffusi.

Questa ultima tecnica ci permette, infatti, di andare ad analizzare il provino nella sua struttura morfologica, andando a rilevare gli elementi con più basso peso atomico e, quindi, con più ossido.

Il risultato sarà un'immagine in cui le zone ossidate risultano più scure di quelle prive di ossido.

Per ciascun provino sono stati ripetuti gli ingrandimenti con le risoluzioni citate su due zone della traccia, in modo da investigare la superficie più correttamente possibile:

Provino 3:

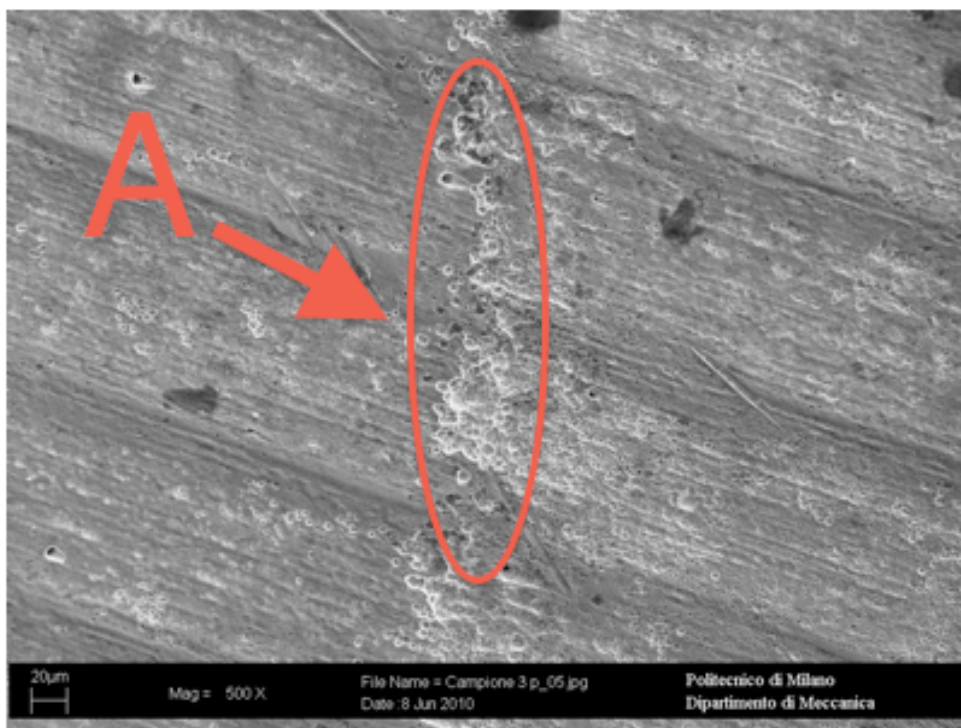


Fig. 4.14 Immagine X500 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

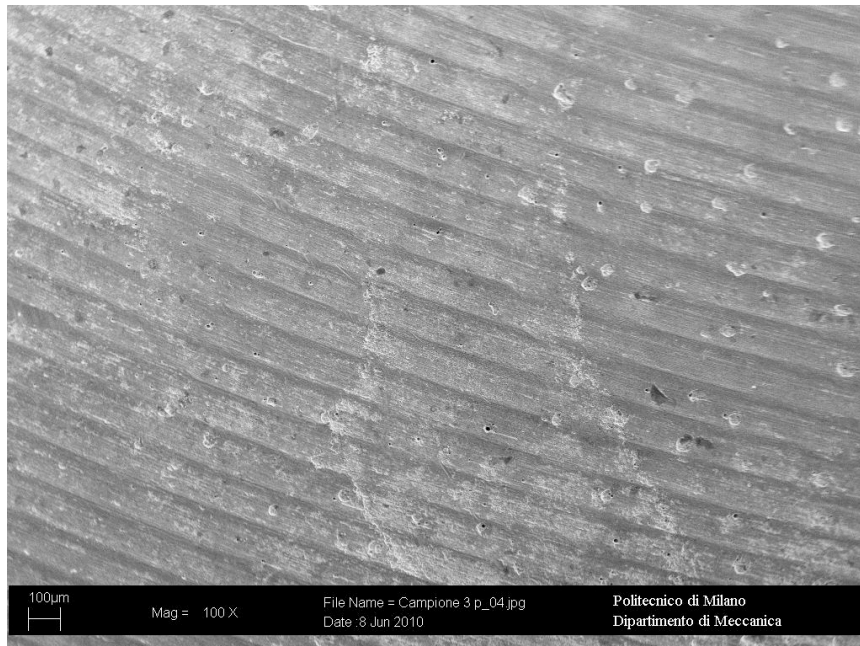


Fig. 4.15 Immagine X100 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

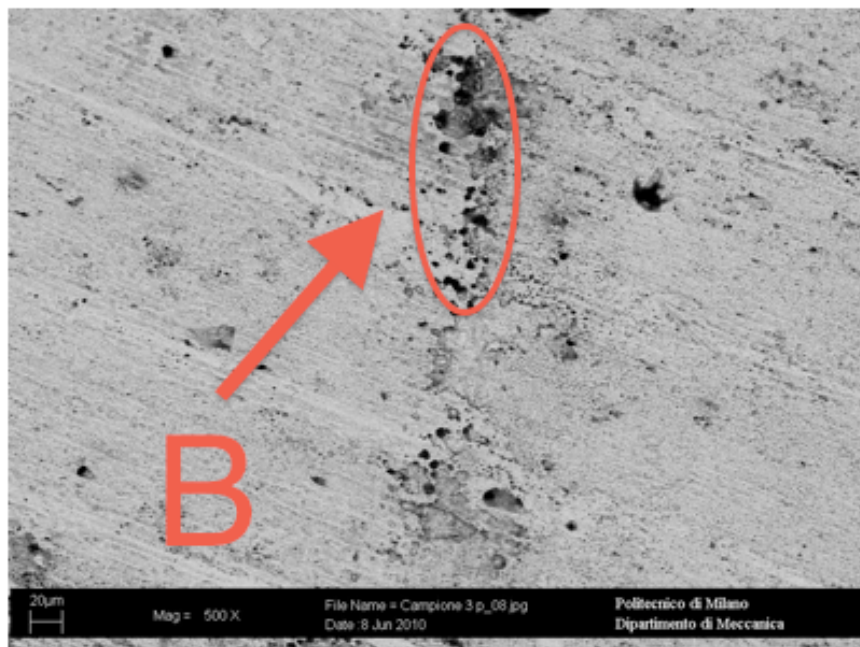


Fig. 4.16 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

La superficie risultante dopo il trattamento risulta abbastanza compromessa (Fig. 4.14 A).
Provino 8:

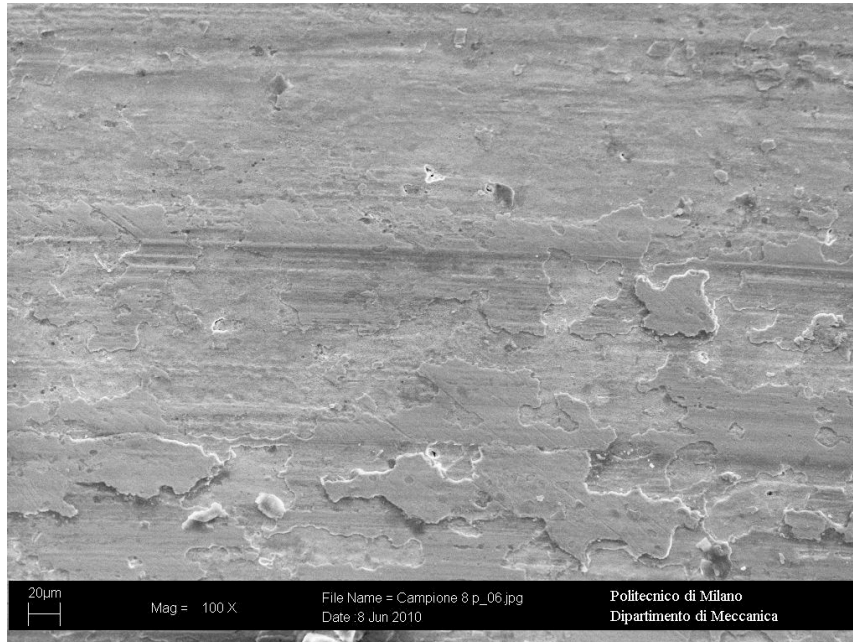


Fig. 4.17 Immagine X100 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

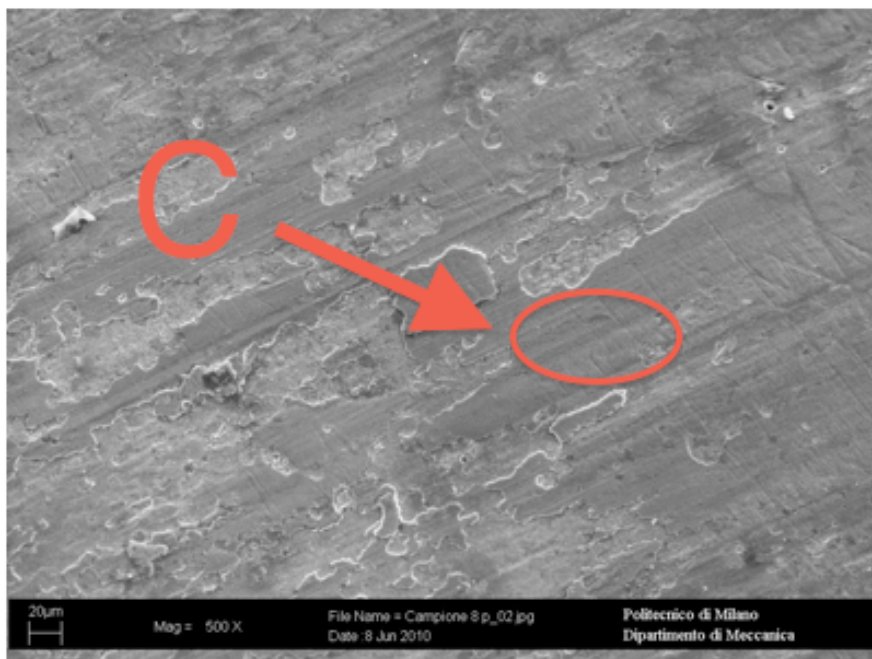


Fig. 4.18 Immagine X500 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

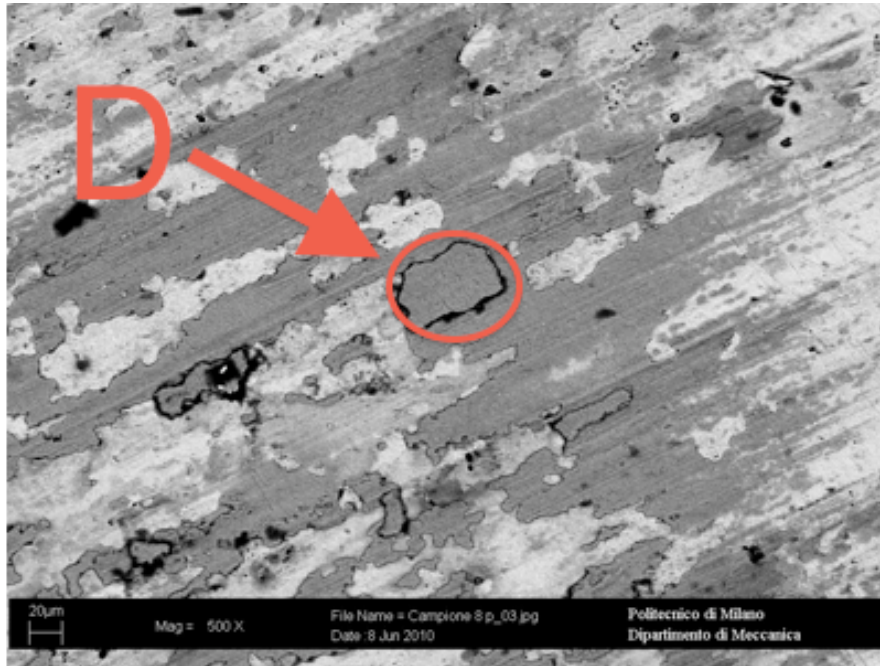


Fig. 4.19 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

La pallinatura sul provino 8 è stata eseguita su una zona non pulita dall'ossido.

Il provino sembra meno rovinato del precedente (Fig. 4.18 C), probabilmente perché l'ossido ha protetto la superficie.

L'analisi con i retrodiffusi evidenzia che il getto ha rimosso gran parte dell'ossido nella zona tratta (Fig. 4.19 D).

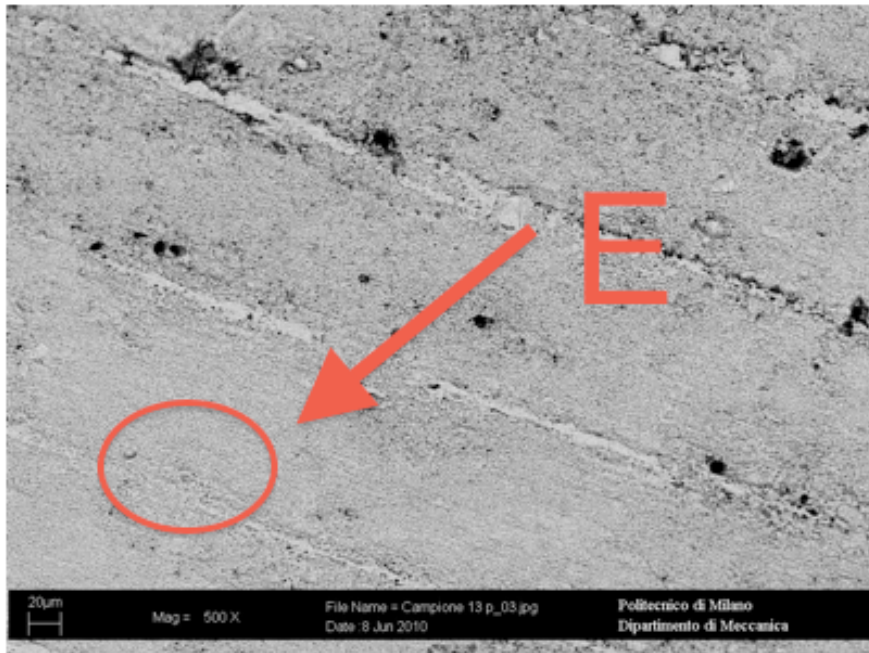
Provino 13:

Fig. 4.20 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

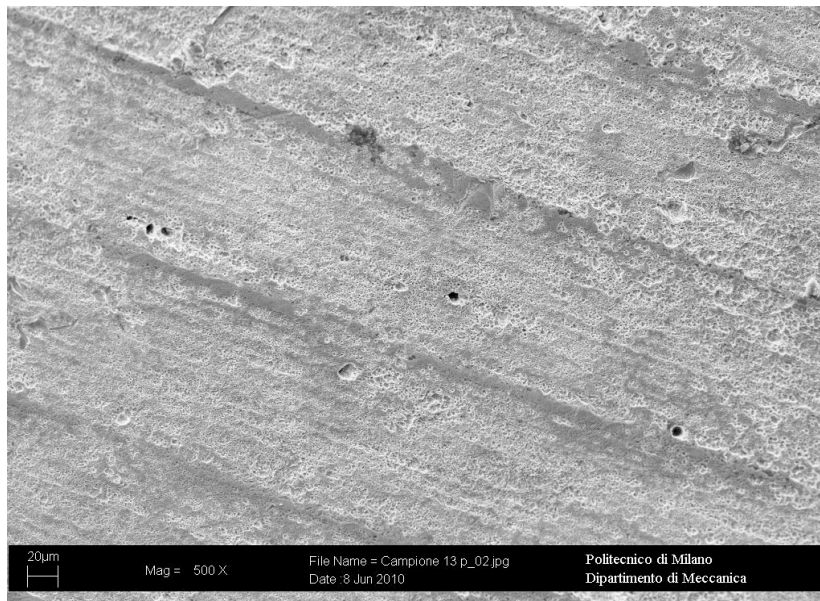


Fig. 4.21 Immagine X500 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

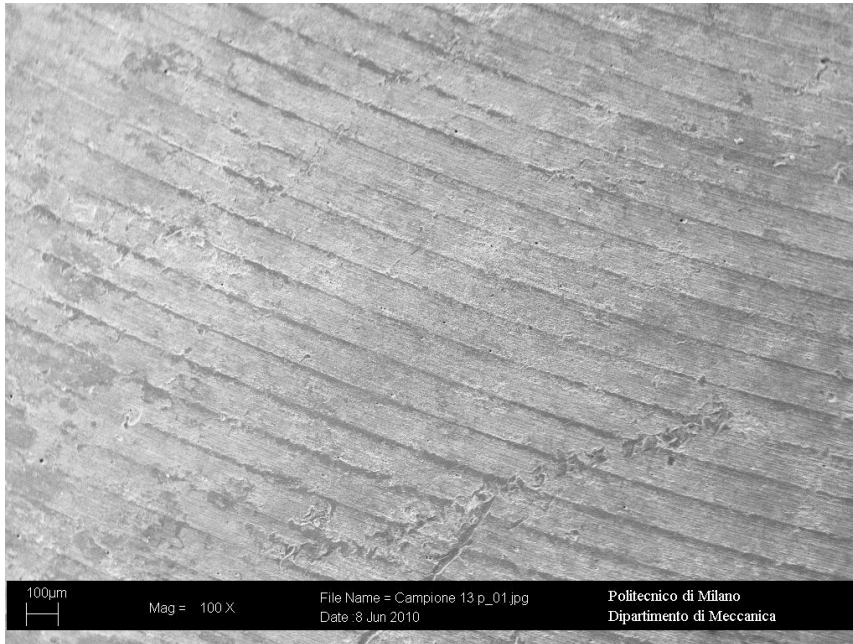


Fig. 4.22 Immagine X100 (SOD=50 mm; $f=450$ mm/min)

La superficie che abbiamo pallinato era pulita (Fig. 4.20 E), infatti la superficie risulta rovinata dopo la lavorazione.

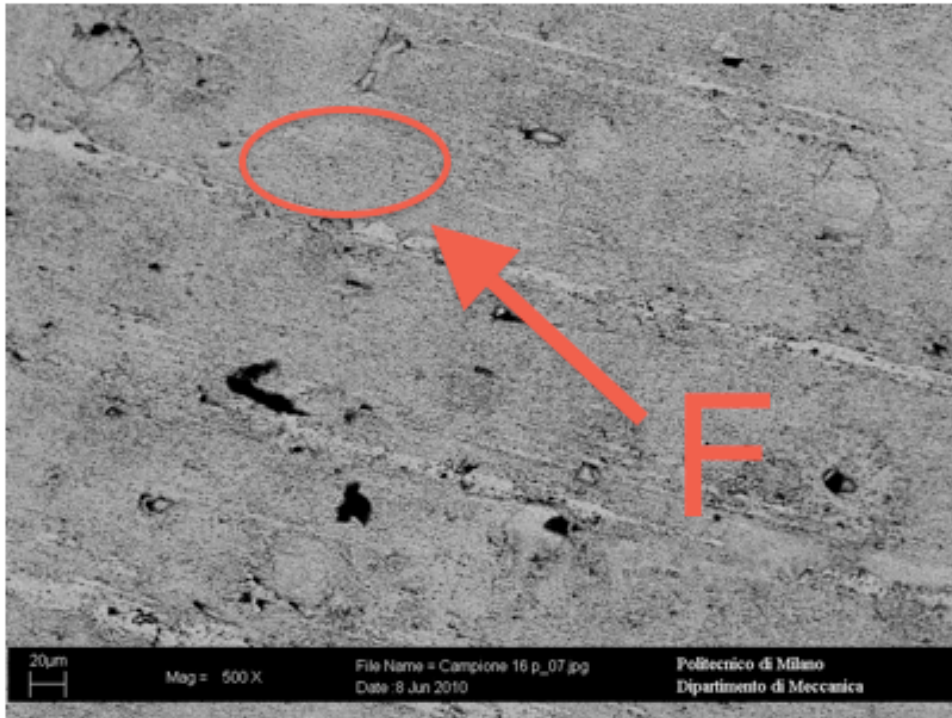
Provino 16:

Fig. 4.23 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=45 mm; $f=400$ mm/min)

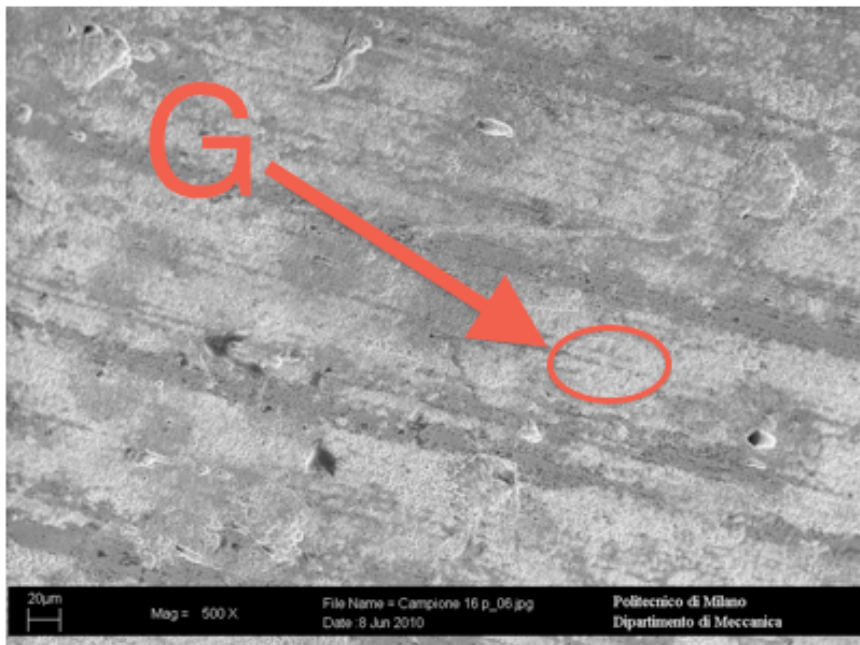


Fig. 4.24 Immagine X500 (SOD=45 mm; $f=400$ mm/min)



Fig. 4.25 Immagine X100 (SOD=45 mm; $f=400$ mm/min)

Osservando l'immagine ottenuta coi retrodiffusi la superficie trattata sembra del tutto priva di ossido (Fig. 4.23 F), infatti, nell'ingrandimento X500 si possono notare tracce di asportazione di ossido (Fig. 4.24 G).

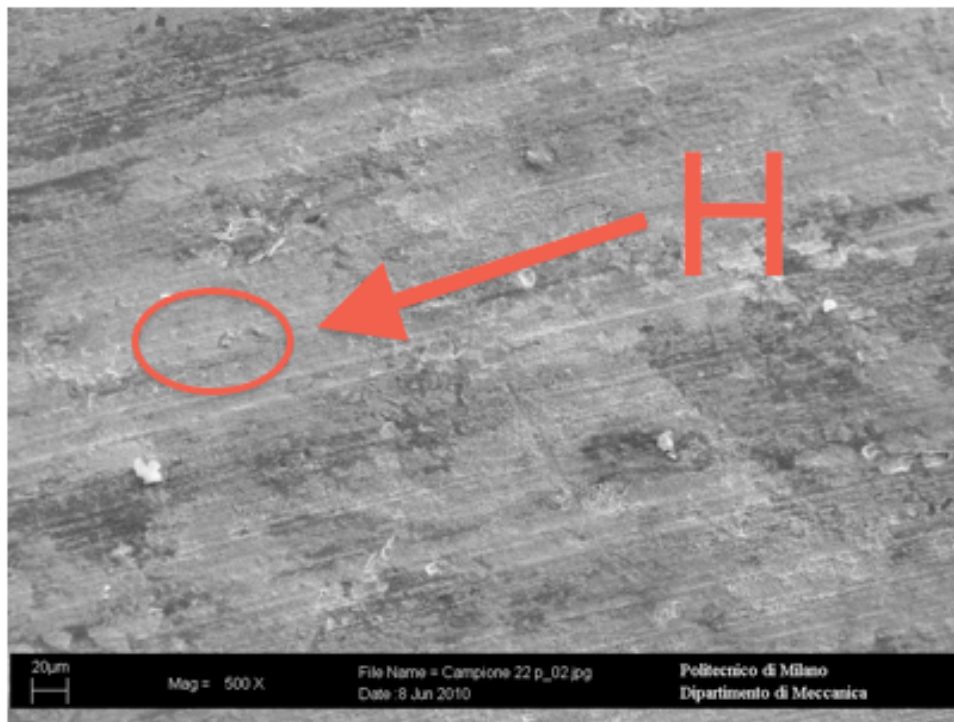
Provino 22:

Fig. 4.26 Immagine X500 (SOD=50 mm; f=450 mm/min)

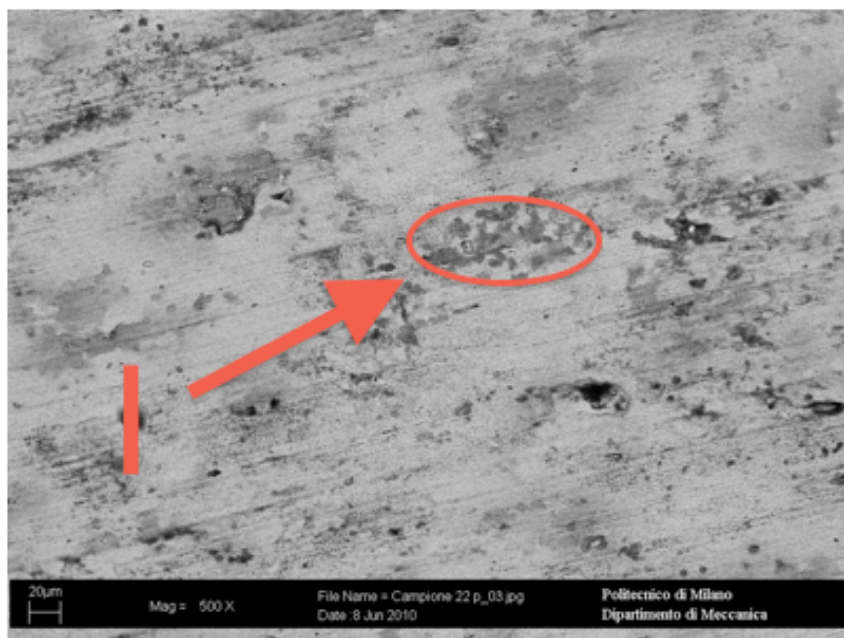


Fig. 4.27 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

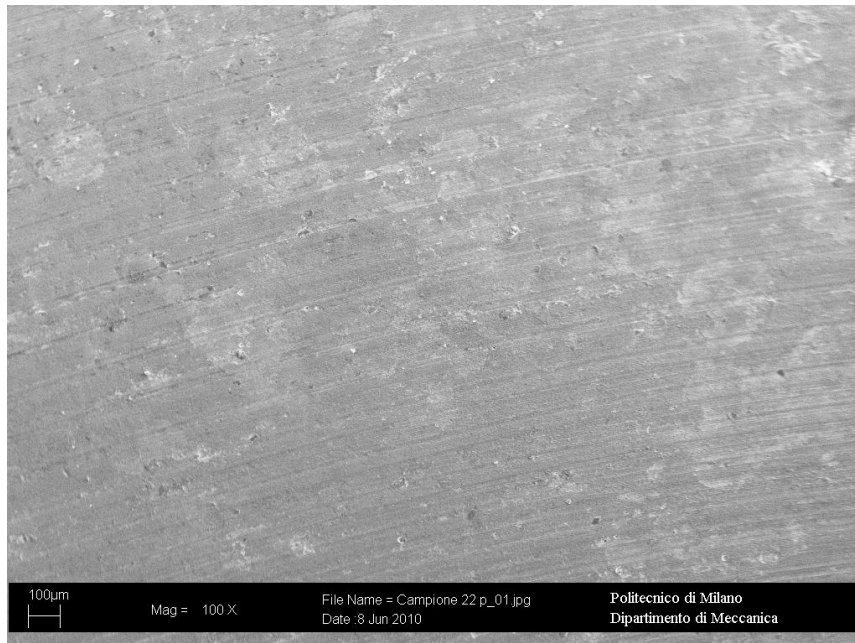


Fig. 4.28 Immagine X100 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

Il provino 22 è risultato essere il migliore a livello di qualità superficiale (Fig. 4.26 H). Esso è stato pallinato in una zona non pulita dall'ossido e ciò avvalorava l'ipotesi che lo strato di ossido ha fornito una barriera all'attacco dell'acqua ed è stato poi asportato dalla lavorazione (Fig. 4.27 I).

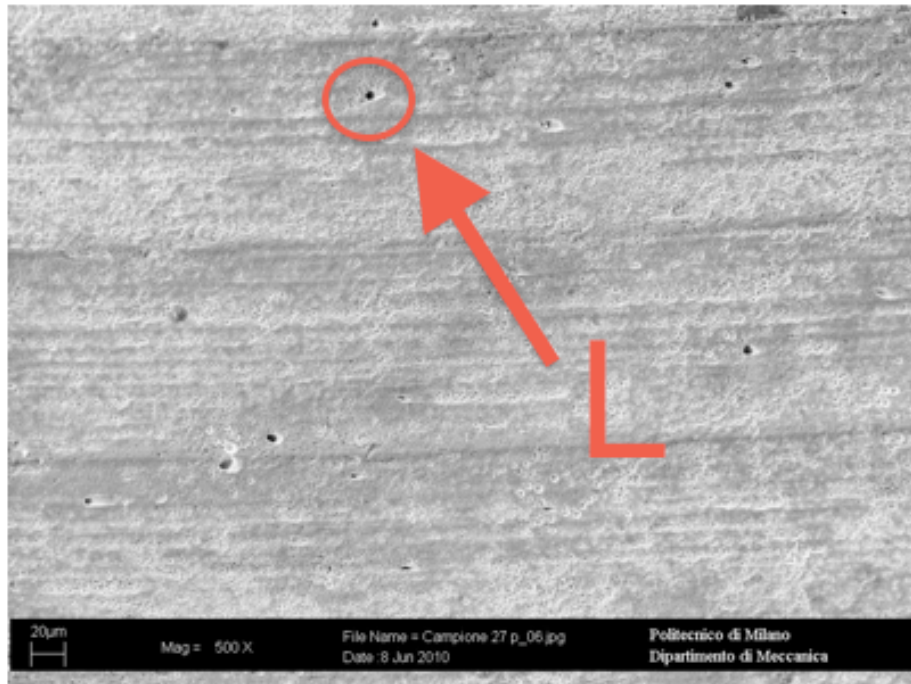
Provino 27:

Fig. 4.29 Immagine X500 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

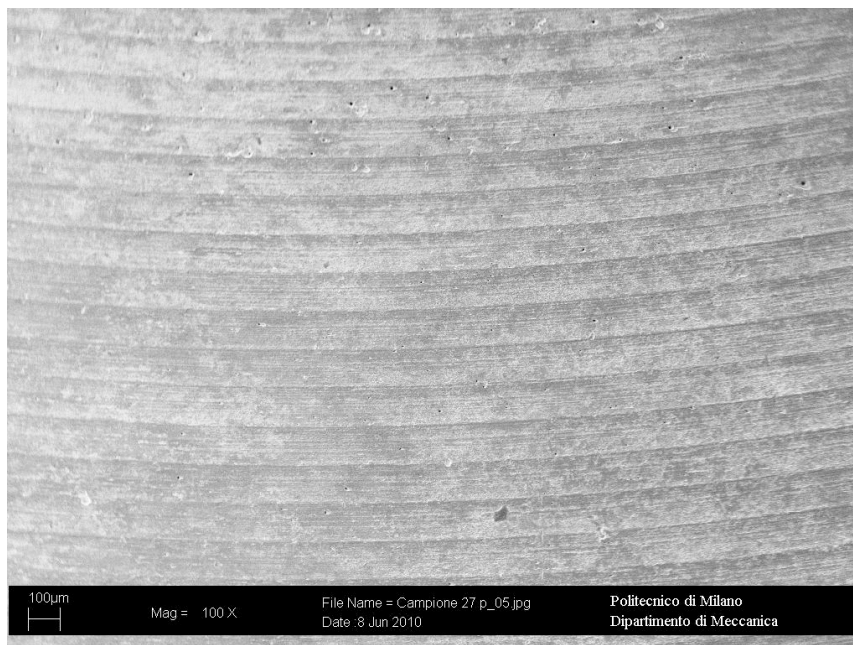


Fig. 4.30 Immagine X100 (SOD=45 mm; f=400 mm/min)

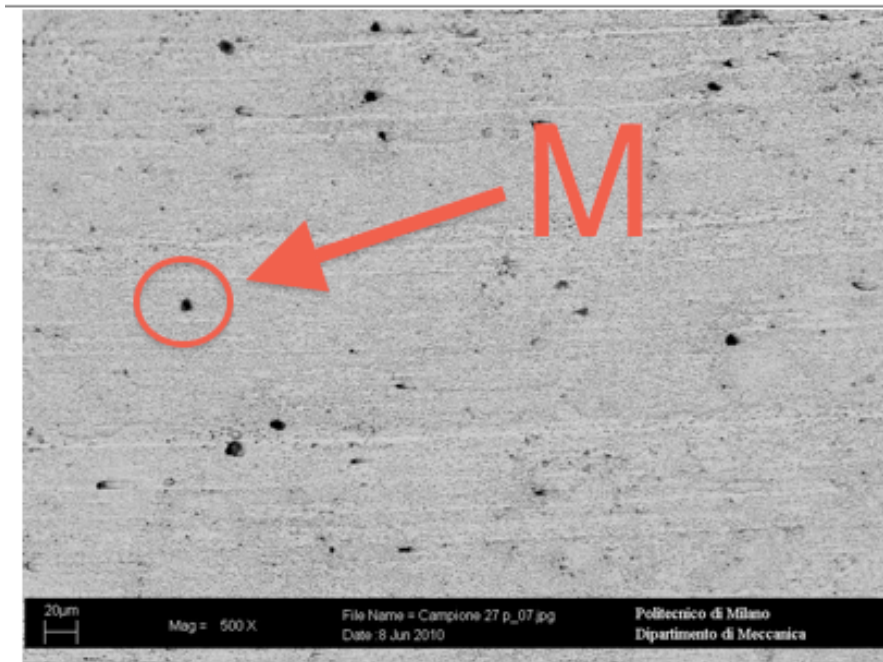


Fig. 4.31 Immagine con retrodiffusi X500 (SOD=45 mm; $f=400$ mm/min)

Dall'analisi del provino 27 vediamo che la superficie è poco compromessa e non in profondità (Fig. 4.29 L) e le zone d'ossido sono poche e di dimensioni esigue (Fig. 4. 31 M).

Dall'analisi ottica si può dedurre, quindi, che il processo di WJ su una superficie ossidata può essere una valida alternativa al decapaggio chimico, dal momento che toglie lo strato di ossido senza danneggiare in modo grave la superficie stessa [Mot97].

4.2.4 Analisi qualità superficiale tramite rugosimetro

La rugosità è un parametro molto importante per quella che poi dovrà essere il comportamento a fatica del pezzo; a rugosità inferiori infatti come si sa, corrispondono vite a fatica più lunghe dato il minor numero di siti di nucleazione delle cricche.

Ci siamo proposti quindi di investigare la rugosità prima e dopo il trattamento.

Dagli studi svolti da Soyama [Soy05] ci è noto, infatti, che la rugosità finale dopo il trattamento risulta essere inferiore a quella iniziale nel caso di getto sommerso.

Nel nostro studio, condotto in condizioni di getto d'acqua in aria, abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

Provino	SOD [mm]	f [mm/min]	Ra1 [μm]	Rq1 [μm]	Rmax1 [μm]	Rz1 [μm]
Provino 3	45	400	1,02	1,22	6,16	5,44
Provino 8	50	450	1,09	1,28	6,18	5,27
Provino 13	50	450	0,57	0,76	5,96	4,40
Provino 16	45	400	1,40	1,70	8,92	7,31
Provino 22	50	450	1,17	1,64	15,72	7,45
Provino 27	45	400	0,74	0,95	6,43	5,40

Tab. 4.4 rugosità prima del trattamento

Provino	SOD [mm]	f [mm/min]	Ra2 [μm]	Rq2 [μm]	Rmax2 [μm]	Rz2 [μm]
Provino 3	45	400	1,16	1,35	5,57	5,25
Provino 8	50	450	1,25	1,56	9,87	7,60
Provino 13	50	450	0,66	0,84	5,49	4,04
Provino 16	45	400	1,06	1,33	8,27	6,62
Provino 22	50	450	0,52	0,64	3,29	3,02
Provino 27	45	400	0,78	1,02	5,88	4,87

Tab. 4.5 rugosità dopo il trattamento

Possiamo quindi trovare una differenza di rugosità prima e dopo il trattamento, di seguito specificata per ciascun provino:

Provino	SOD [mm]	f [mm/min]	Variazione Ra [μm]	Variazione Rq [μm]	Variazione Rmax [μm]	Variazione Rz [μm]
Provino 3	45	400	0,14	0,13	-0,59	-0,19
Provino 8	50	450	0,16	0,28	3,69	2,33
Provino 13	50	450	0,09	0,08	-0,47	-0,36
Provino 16	45	400	-0,34	-0,37	-0,65	-0,69
Provino 22	50	450	-0,65	-1,00	-12,43	-4,43
Provino 27	45	400	0,04	0,07	-0,55	-0,53

Tab. 4.6 variazione di rugosità dopo il trattamento

Anche in questo caso abbiamo variazioni di rugosità non indicative rispetto al parametro velocità. Possiamo dire che la variazione di rugosità non è apprezzabile al variare dei parametri scelti, essa si può considerare per lo più invariata (i risultati concordano con quelli ottenuti dal tesista Motter [Mot97]).

Conducendo un'analisi prettamente qualitativa è evidente che la rugosità superficiale risulta un fattore difficilmente controllabile tramite questi parametri di lavoro.

4.2.5 Prove di durezza Rockwell C

La prova di durezza Rockwell dei materiali si realizza con penetratori di forma conica o sferica e avviene secondo più stadi successivi di carico sullo strumento.

La durezza è determinata in base alla profondità raggiunta dal penetratore nel pezzo.

La prova di durezza Rockwell avviene collocando il penetratore sulla superficie del pezzo di cui misurare la durezza, applicando un precarico iniziale e successivamente un carico superiore per alcuni secondi (solitamente 15 secondi).

Quando il penetratore raggiunge la penetrazione massima si toglie il carico aggiuntivo lasciando il precarico che agisce ancora sul pezzo. La misura della profondità raggiunta è correlata con la misura di durezza.

La misurazione può essere fatta con due diversi metodi, contrassegnati da due sigle:

HRC Il penetratore è un cono di diamante con un angolo di apertura pari a 120° e raggio di raccordo 0.2 mm. Questo metodo è usato di preferenza per materiali molto duri con valore di durezza Brinell $HB > 200$.

HRB Il penetratore è una sfera di acciaio temprato del diametro di $1/16''$ (1,59 mm), è utilizzata per materiali non eccessivamente duri, con valore di durezza Brinell $HB < 200$.

L'apparecchio per la prova Rockwell è costituito principalmente da un piatto porta provetta sollevabile con un volantino, sistema di leve e relativo peso per l'applicazione del carico sul penetratore, un monitor per la lettura della durezza Rockwell il cui quadrante è diviso in 100 parti e porta due scale, C e B.

Le prove da noi effettuate si basano sulla macrodurezza HRC.

Non è stato possibile effettuare la prova di microdurezza Vickers: il penetratore, costituito da una punta di diamante di forma piramidale a base quadrata, ha una dimensione tale per cui andrebbe a misurare puntualmente la superficie, mentre nel nostro caso è necessario apprezzare una porzione di area lavorata sufficientemente grande poiché le tracce lasciate dalla lavorazione sono più piccole del penetratore.

Da alcune misure di prova di tipo Vickers è emerso infatti che l'impronta lasciata dal penetratore risultava molto irregolare: il penetratore andava a rompere solo lo strato di ossido superficiale e si trovava a cavallo della traccia.

Si è concluso, quindi, che i risultati dati dalla Vickers non sono attendibili.

Le prove HRC sono state effettuate nella zona soggetta a pallinatura e in una zona non trattata.



Fig. 4.32 Macchina utilizzata per la Rockwell C

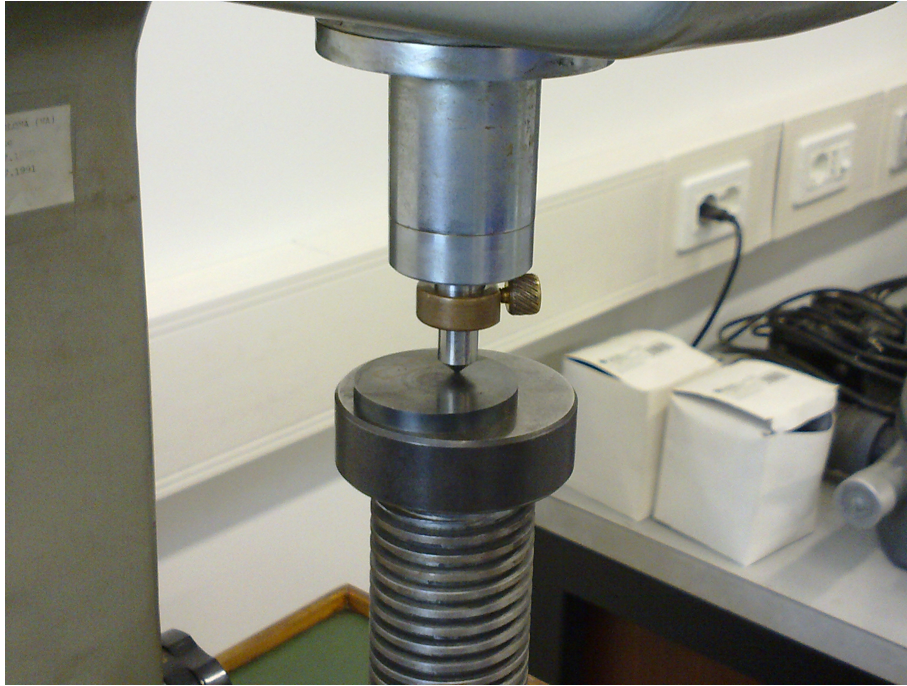


Fig. 4.33 Esecuzione prova di durezza

Dalla prova di durezza Rockwell si sono ottenuti i seguenti risultati:

Provino	SOD [mm]	f [mm/min]	Prima [HRC]	Dopo [HRC]
3	45	400	32	33
13	50	450	33	34
22	50	450	32	34,5
16	45	400	33	33
27	45	400	33	30
8	50	450	33	32

Tab. 4.7 Prove di durezza Rockwell C

Si può notare qualitativamente che la durezza è aumentata al massimo di due punti nella zona trattata, ma non è dipendente dalla variazione dei parametri scelti (SOD, velocità di avanzamento). Inoltre in alcuni casi questa è rimasta invariata o addirittura diminuita, questo è dovuto all'alta varianza che ha caratterizzato le prove (circa 2 HRC) e allo scarso incrudimento che il trattamento ha causato al materiale.

Possiamo quindi dedurre che il trattamento di peening ad acqua non migliora significativamente la durezza superficiale del materiale trattato ovvero non è presente un incremento significativo di questa caratteristica meccanica.

4.2.6 Valutazione dell'incrudimento attraverso il parametro FWHM

Come abbiamo notato i valori di durezza Rockwell C non risultano essere significativi nella nostra trattazione.

Tramite la diffrazione a raggi X è possibile però determinare un altro parametro significativo, ossia l'FWHM: Full Width at Half Maximum [Mar93].

Questa informazione è ottenuta dall'ampiezza dei picchi di diffrazione ,calcolata a metà del picco stesso ed è un indice della distorsione del grano cristallino e della grandezza della dislocazione ossia della modifica della superficie indotta dal trattamento di peening.

Può essere così trattato come un parametro che indica la durezza indotta dal trattamento.

L' FWHM è risultato essere un indice accurato dell'incrudimento del materiale: più aumenta questo indice, più il materiale risulta essere incrudito [Mar93].

Il parametro è comunemente utilizzato per descrivere l'andamento di una curva o di una funzione (Fig. 4.34).

Esso è dato dalla distanza tra punti sulla curva nei quali la funzione raggiunge metà del massimo valore.

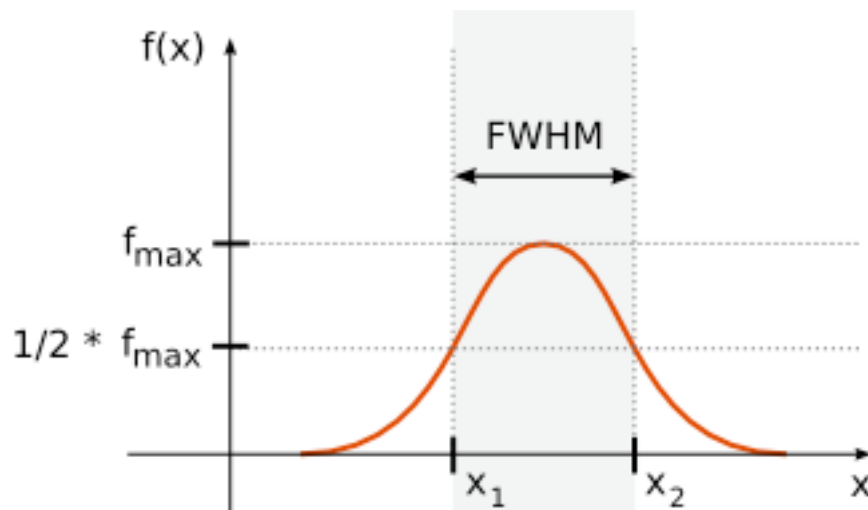


Fig. 4.34 Rappresentazione grafica FWHM

Prima del trattamento abbiamo ottenuto i valori seguenti:

Provino	FWHM 0°	FWHM -45°	FWHM -90°
3	2,338	2,087	2,091
8	2,059	2,057	2,061
13	2,159	2,159	2,159
16	1,961	1,957	1,962
22	1,936	1,927	1,931
27	1,947	1,953	1,947

Tab. 4.8 FWHM prima del trattamento

Dopo il trattamento il parametro assume i seguenti valori:

Provino	FWHM 0°	FWHM -45°	FWHM -90°
3	2,226	2,257	2,246
8	2,193	2,197	2,182
13	2,251	2,232	2,221
16	2,116	2,119	2,112
22	2,071	2,038	2,061
27	2,014	2,014	2,012

Tab. 4.9 FWHM dopo il trattamento

Come si può notare qualitativamente i valori del parametro FWHM risultano essere superiori dopo la lavorazione.

Si può quindi affermare che la lavorazione ha portato a un incrudimento del materiale, quindi ad un aumento della durezza.

Ciò è un risultato significativo dal momento che essa porta a benefici nella resistenza a fatica del componente.

Capitolo 5

5.1 Analisi statistica dei dati

In questo capitolo verranno analizzate tutte le tensioni residue medie (fornite dal diffrattometro) ottenute sui provini tramite la pallinatura ad acqua.

Lo strumento di indagine statistica utilizzato sarà il software Minitab.

Il primo passo sarà quello di individuare se esiste una dipendenza delle tensioni dai due parametri di processo (SOD e f) tramite una ANOVA a due vie e successivamente individuare la relazione esistente.

A tal fine utilizzeremo lo strumento matematico della regressione.

5.1.1 ANOVA a due vie

L'output dell'operazione è il seguente:

Two-way ANOVA: sigma media (MPa) versus SOD(mm); f(mm/min)

Source	DF	SS	MS	F	P
SOD(mm)	2	1047,35	523,673	6,60	0,007
f(mm/min)	2	401,35	200,677	2,53	0,108
Interaction	4	387,28	96,820	1,22	0,337
Error	18	1427,58	79,310		
Total	26	3263,56			

S = 8,906 R-Sq = 56,26% R-Sq(adj) = 36,82%

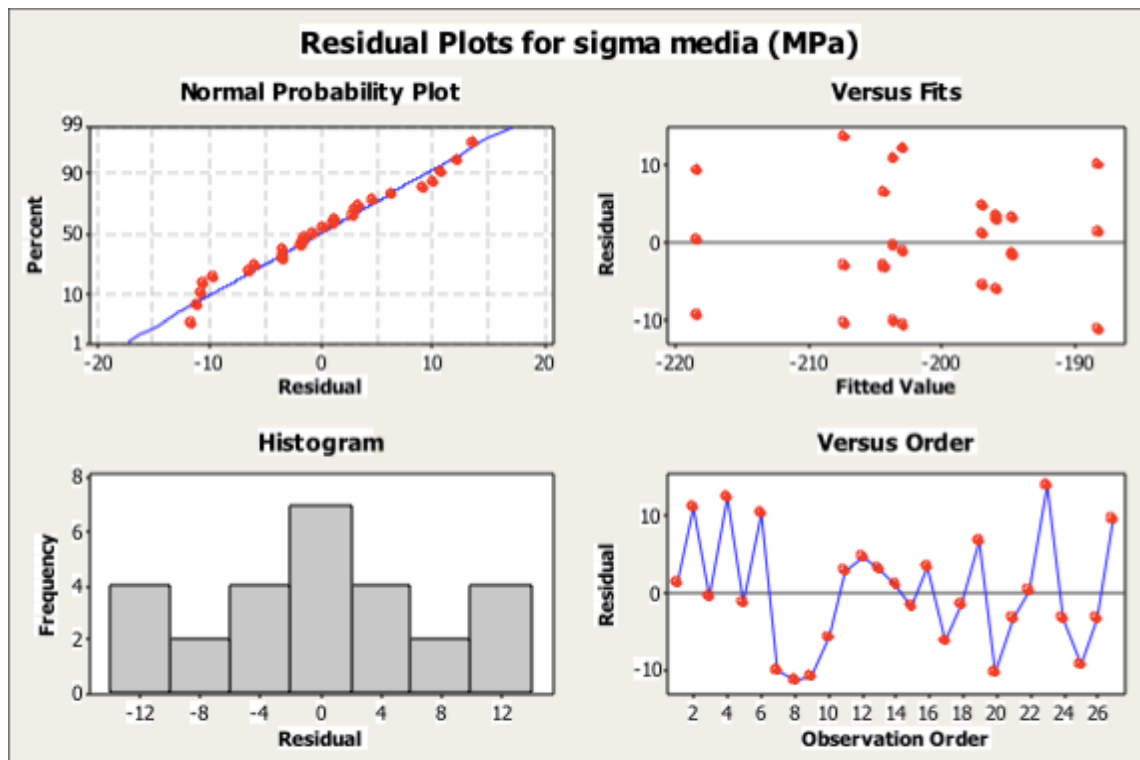


Fig. 5.1 ANOVA a due vie

Dall'output si può notare che il fattore f non sia significativo per le tensioni residue medie impresse sulla superficie dei provini (il p-value di f è pari a 0,108 che è un valore maggiore del p-value di confronto ottenuto mediante il teorema di Bonferroni pari a 0,01667).

Per avvalorare il risultato abbiamo effettuato i test di controllo della ANOVA ovvero:

1. Test di normalità sui residui (Anderson-Darling test)
2. Omogeneità della varianza (test for equal variances)
3. Indipendenza dei residui (plot residui - run order)

Test di normalità sui residui:

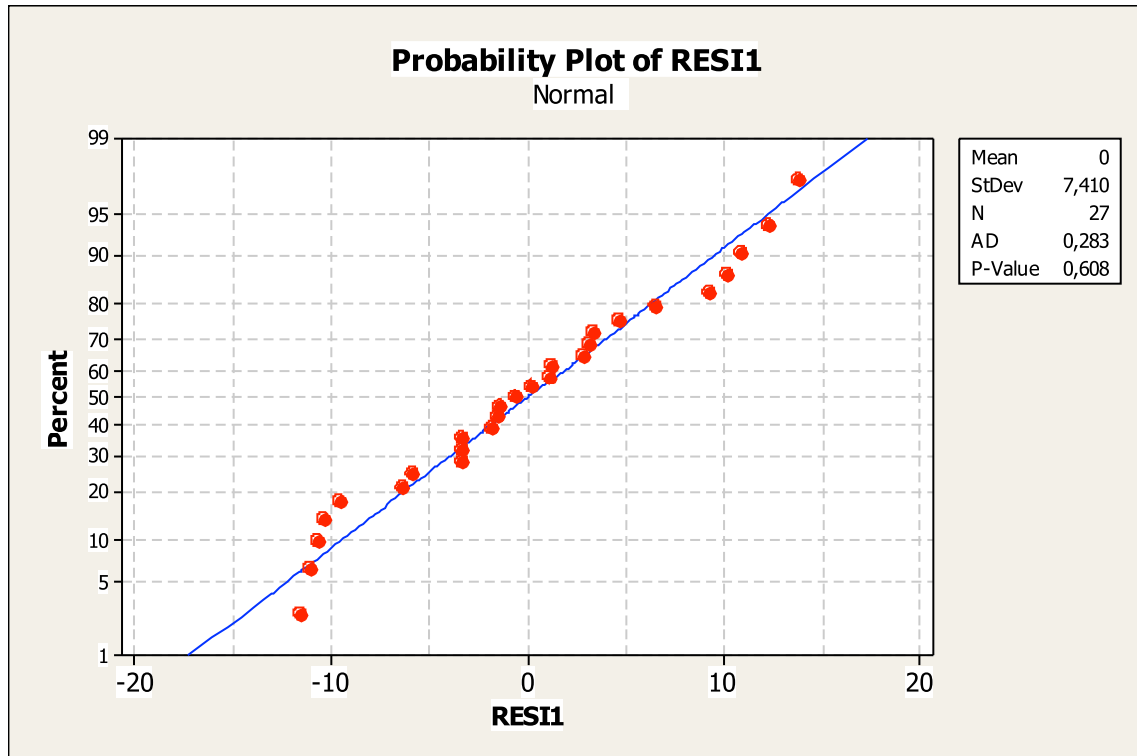


Fig. 5.2 Test di normalità

Il test è soddisfatto: il p-value 0,608 è maggiore di quello di confronto 0,05.

Omogeneità della varianza:

Test for Equal Variances: RESI1 versus SOD(mm); f(mm/min)

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

SOD (mm)	f (mm/min)	N	Lower	StDev	Upper
40	350	3	4,82337	11,7021	221,878
40	400	3	4,49954	10,9165	206,981
40	450	3	4,38858	10,6473	201,877
45	350	3	1,14264	2,7722	52,562
45	400	3	2,25074	5,4606	103,535
45	450	3	2,18611	5,3038	100,562
50	350	3	3,89785	9,4567	179,303
50	400	3	2,33869	5,6740	107,581
50	450	3	5,16563	12,5325	237,622

Bartlett's Test (Normal Distribution)
 Test statistic = 5,29; p-value = 0,726

Levene's Test (Any Continuous Distribution)
 Test statistic = 0,51; p-value = 0,833

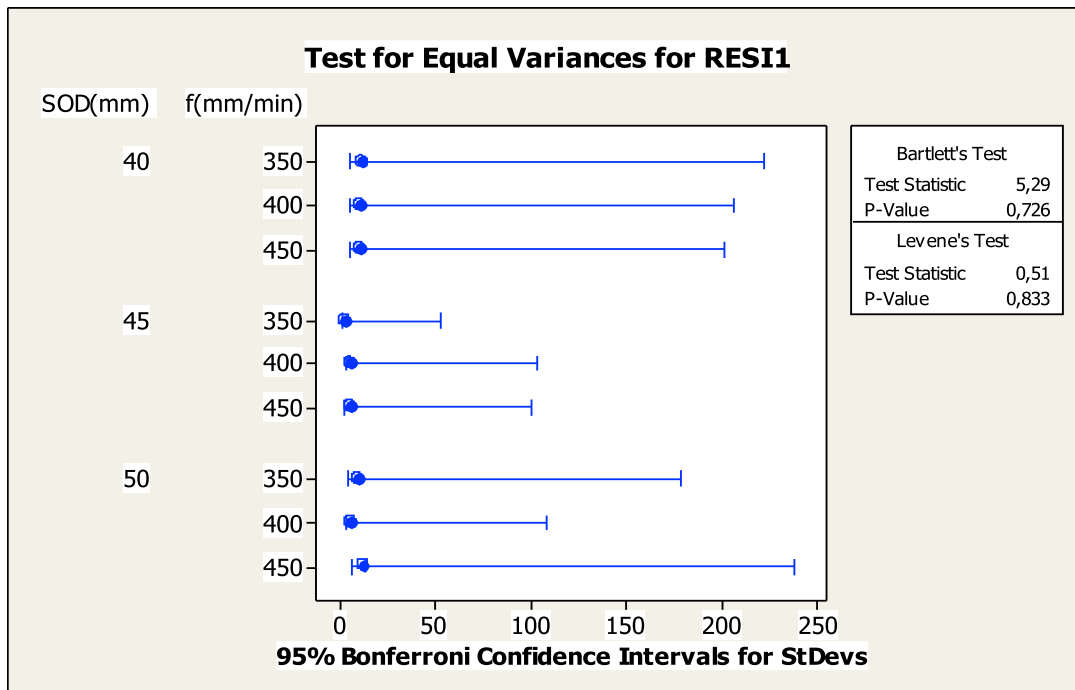
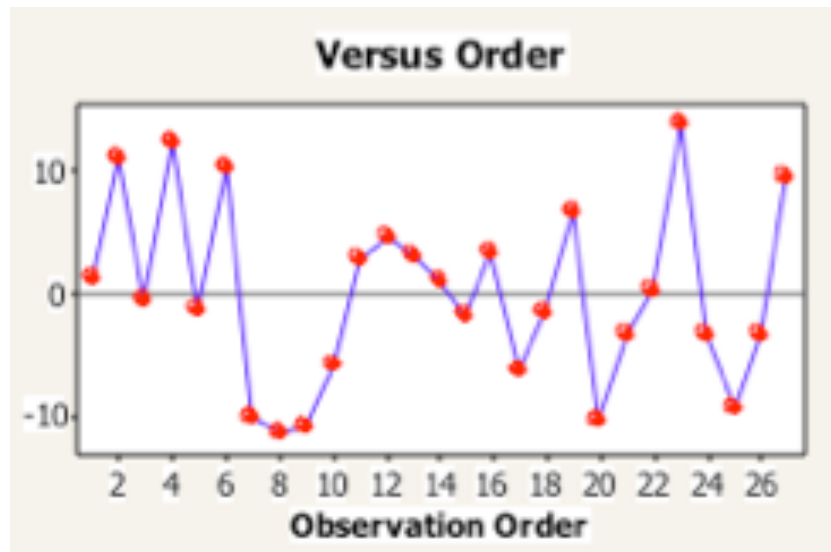


Fig. 5.3 omogeneità della varianza

Anche in questo caso il test è da considerarsi verificato infatti entrambi i p-value dei due test (Levene 0,833 e Bartlett 0,726) sono largamente superiori al p-value di confronto 0,05.

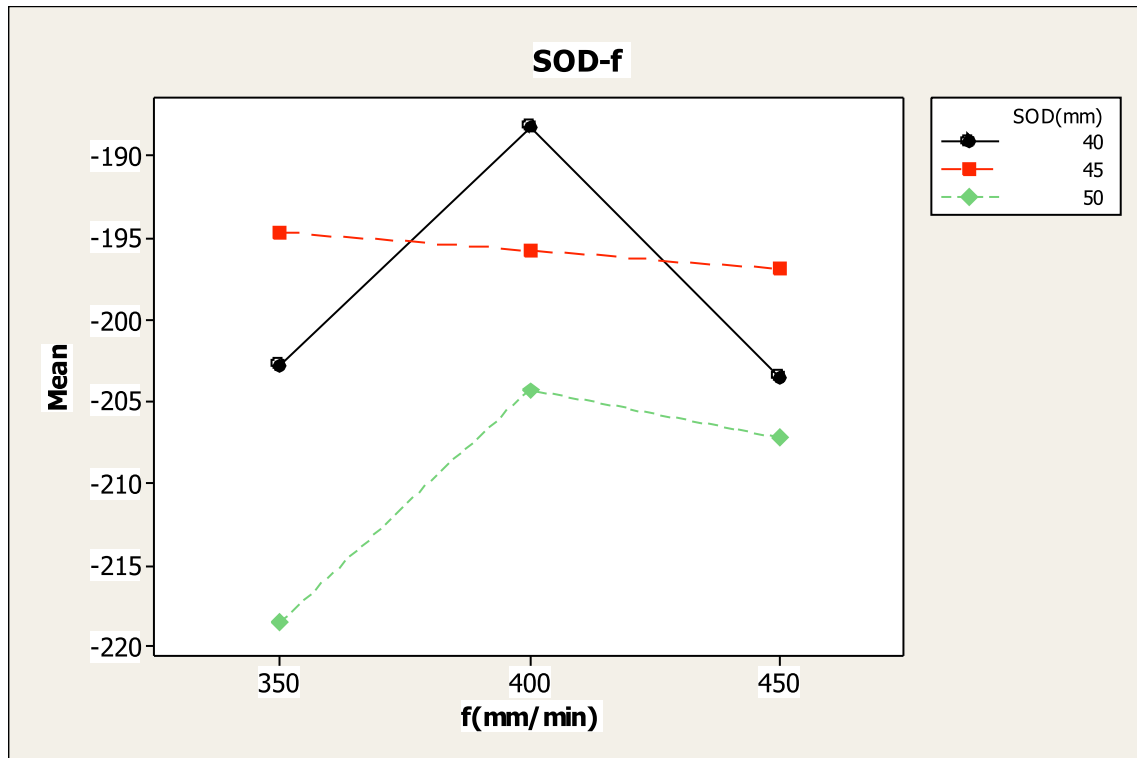
Indipendenza dei residui:



Graf. 5.1 Indipendenza dei residui

Dal grafico 5.1 non si intravedono trend dei residui (dipendenti da fattori esterni non considerati) e quindi l'ANOVA è da considerarsi valida.

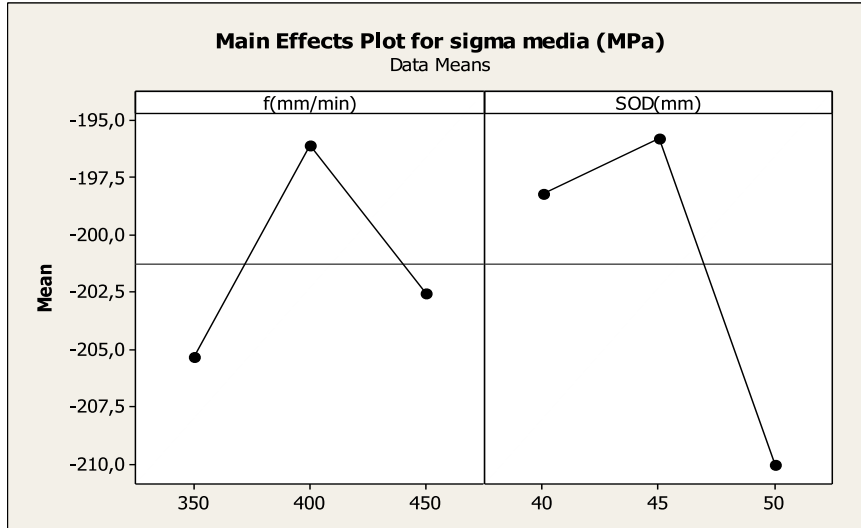
Nonostante dai risultati ottenuti il parametro f non risulti significativo, si è deciso comunque di tracciare un grafico che fornisca l'effetto delle interazioni di entrambi i parametri sulla risposta:



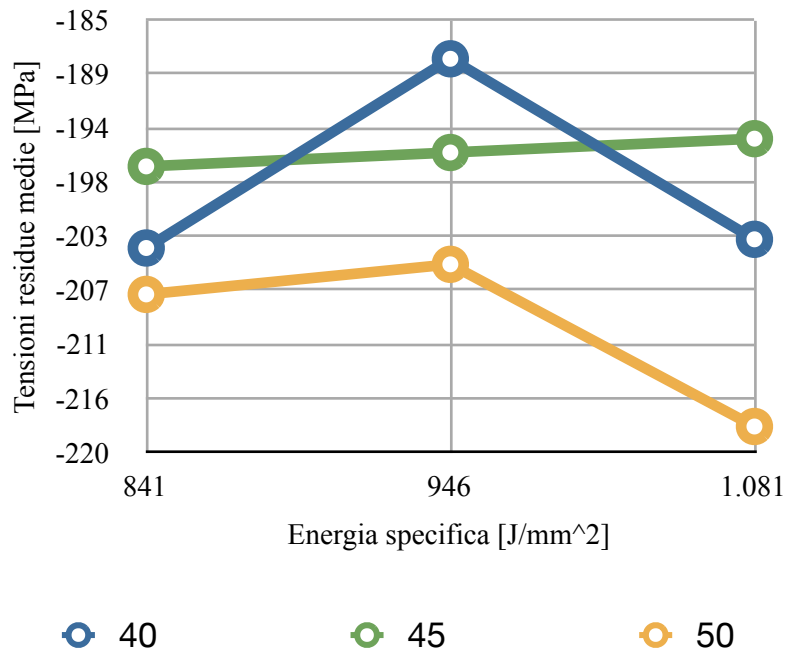
Graf. 5.2 Interazione dei parametri

I risultati migliori appaiono essere quelli per SOD 50 mm e f 350 mm/min con un valore medio di tensione residua media di -220 MPa.

Riportiamo comunque due grafici qualitativi che ci mostrano l'andamento delle tensioni residue rispetto alla SOD e la f e rispetto all'energia specifica (definita nel capitolo 2):



Graf. 5.3 Main effect plot



Graf. 5.4 Tensioni residue medie - Energia specifica

5.1.2 ANOVA a una via

L'output dell'ANOVA a una via che ha come unico parametro la SOD è il seguente:

One-way ANOVA: sigma media (MPa) versus SOD(mm)

Source	DF	SS	MS	F	P
SOD (mm)	2	1047,3	523,7	5,67	0,010
Error	24	2216,2	92,3		
Total	26	3263,6			

S = 9,609 R-Sq = 32,09% R-Sq(adj) = 26,43%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
40	9	-198,15	12,19	-210,0	-189,0
45	9	-195,76	4,17	-203,0	-189,0
50	9	-210,00	10,54	-210,0	-196,0

Pooled StDev = 9,61

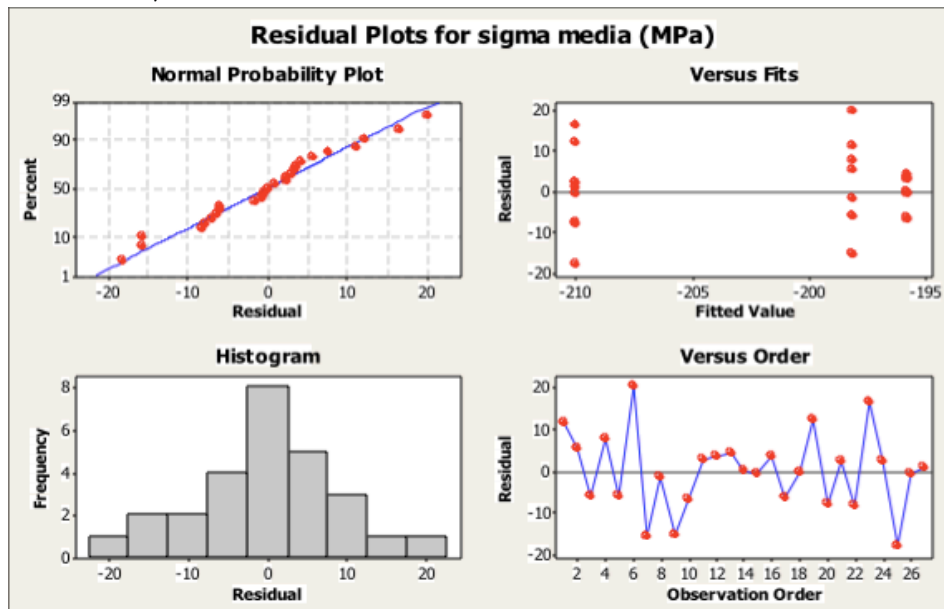


Fig. 5.4 ANOVA a una via

L'ANOVA conferma la dipendenza delle tensioni residue medie dalla SOD (p-value 0,010 minore di quello di confronto 0,05) passiamo perciò alla verifica delle ipotesi dell'ANOVA.

Test di normalità sui residui:

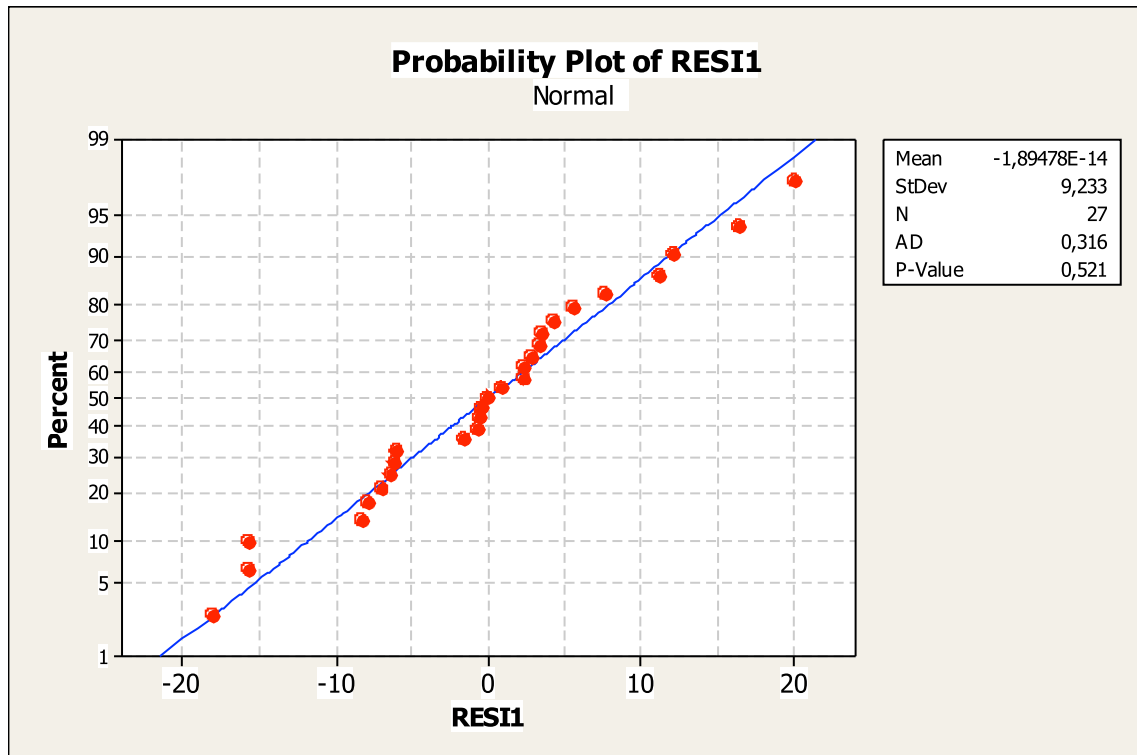


Fig. 5.5 Test di normalità

Anche in questo caso il test è soddisfatto, il p-value del test (0,521) è maggiore di quello di confronto (0,05).

Omogeneità della varianza:

Test for Equal Variances: RESI1 versus SOD(mm)

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

SOD (mm)	N	Lower	StDev	Upper
40	9	7,59635	12,1855	27,5950
45	9	2,59689	4,1657	9,4336
50	9	6,57341	10,5446	23,8790

Bartlett's Test (Normal Distribution)
 Test statistic = 7,66; p-value = 0,022

Levene's Test (Any Continuous Distribution)
 Test statistic = 3,15; p-value = 0,061

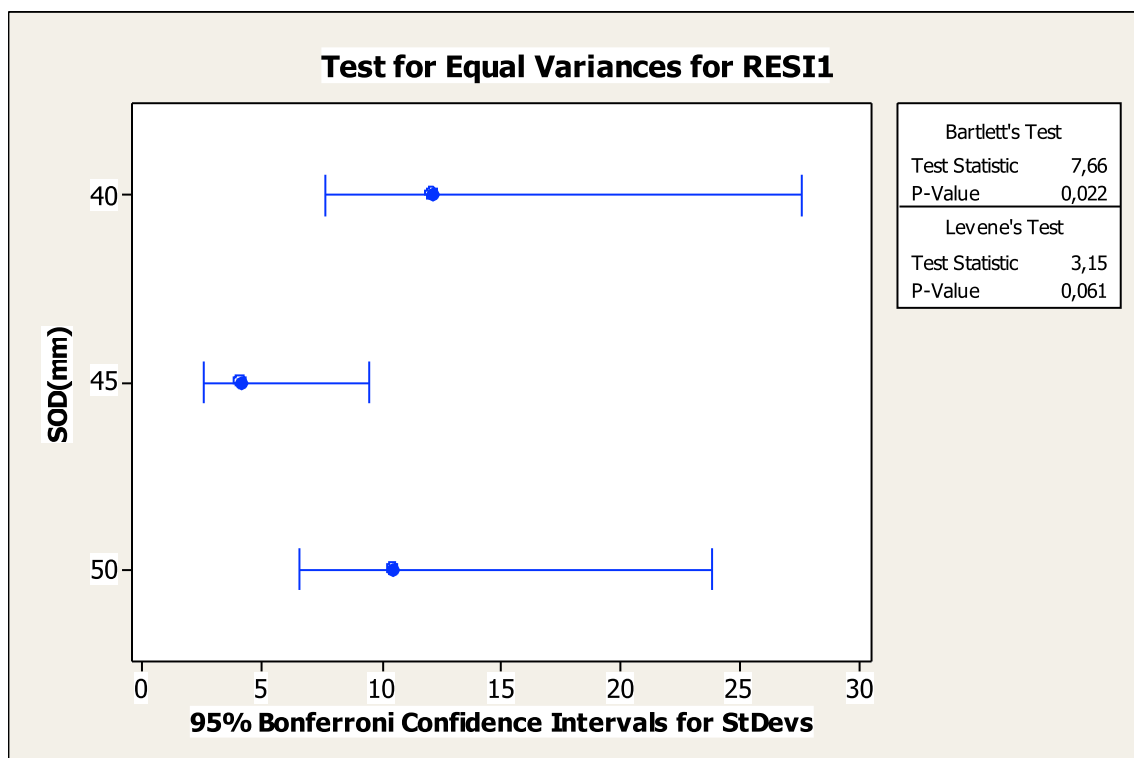
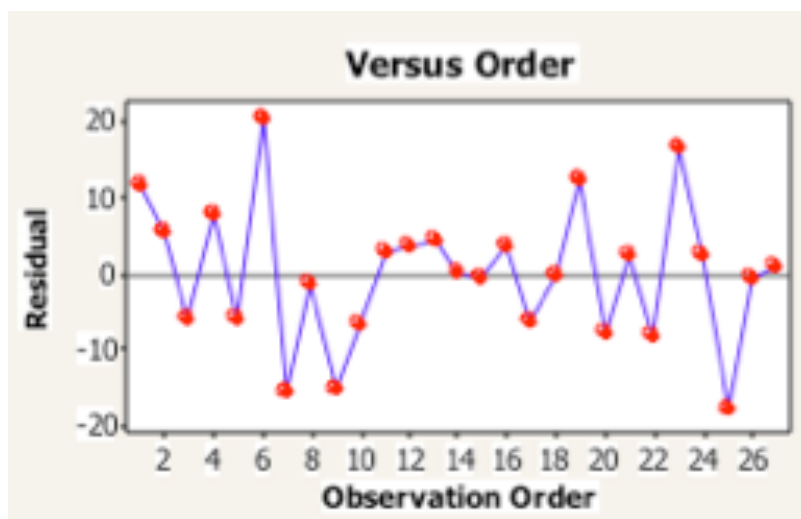


Fig. 5.6 omogeneità della varianza

In questo caso il test di Bartlett, sensibile alla normalità, non è verificato nonostante i residui siano normali ($p\text{-value test } 0,022 < p\text{-value di confronto } 0,05$) mentre il test di Levene, robusto alla normalità, è verificato ($p\text{-value test } 0,061 > p\text{-value di confronto } 0,05$).

Si può quindi considerare il test verificato.

Indipendenza dei residui:



Graf. 5.5 *Indipendenza dei residui*

Il grafico 5.3 non mostra dipendenza dei residui dall'ordine in cui sono state svolte le prove quindi i residui si possono considerare indipendenti.

5.1.3 Regressione

In questo paragrafo verra svolta la regressione rispetto al parametro di SOD.

Regression Analysis: sigma media (MPa) versus SOD(mm)

The regression equation is
 $\text{sigma media (MPa)} = -148 - 1,19 \text{ SOD (mm)}$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-147,96	21,85	-6,77	0,000
SOD(mm)	-1,1854	0,4836	-2,45	0,022

S = 10,2591 R-Sq = 19,4% R-Sq(adj) = 16,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	632,3	632,3	6,01	0,022
Residual Error	25	2631,2	105,2		
Total	26	3263,6			

Unusual Observations

Obs	SOD(mm)	sigma media (MPa)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
25	50,0	-227,99	-207,23	3,12	-20,76	-2,12R

R denotes an observation with a large standardized residual.

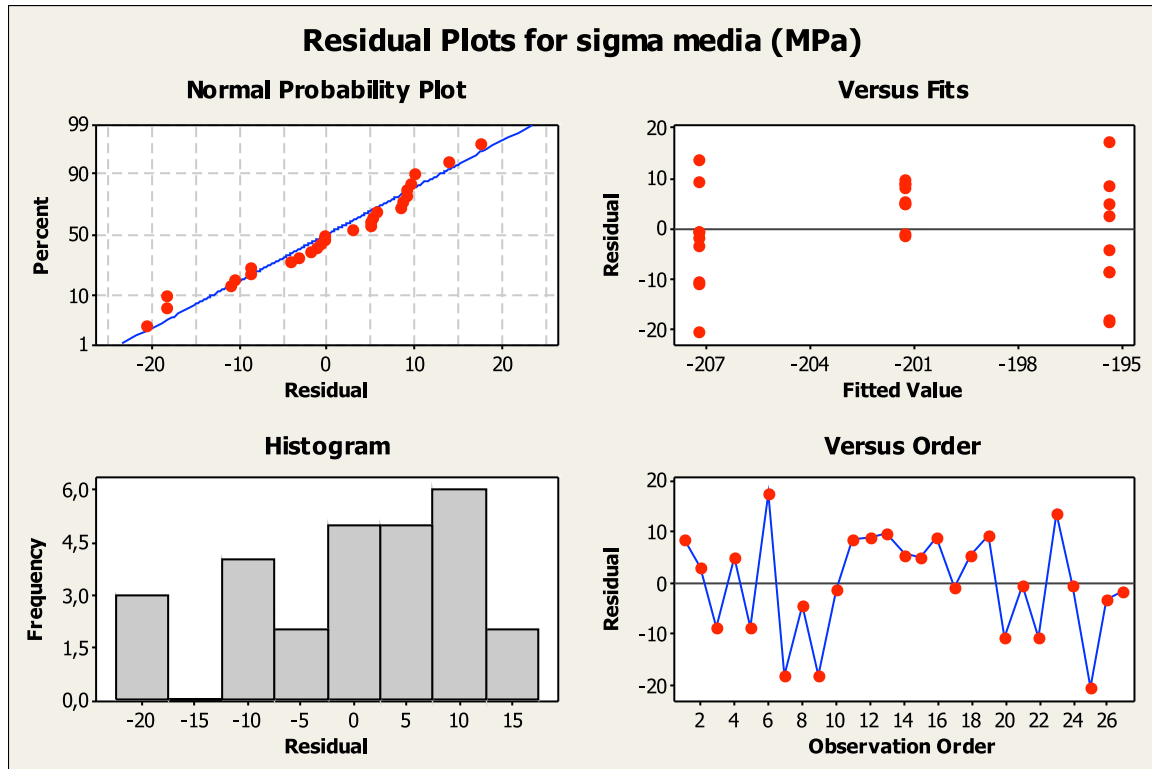


Fig. 5.7 Regressione

Test di normalità sui residui:

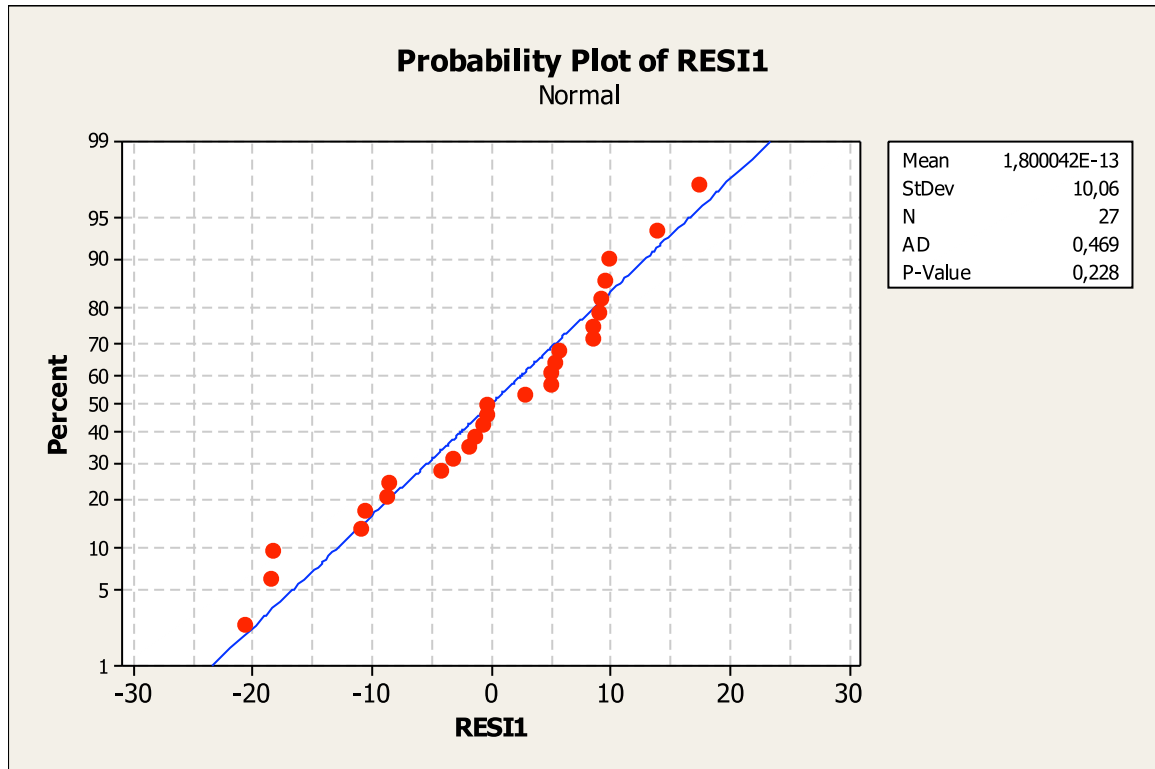


Fig. 5.8 Test di normalità

Il test risulta verificato: p-value del test 0,228 > p-value di confronto 0,05.

Omogeneità della varianza:**Test for Equal Variances: RESI1 versus SOD(mm)**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

SOD (mm)	N	Lower	StDev	Upper
40	9	7,59635	12,1855	27,5950
45	9	2,59689	4,1657	9,4336
50	9	6,57341	10,5446	23,8790

Bartlett's Test (Normal Distribution)
 Test statistic = 7,66; p-value = 0,022

Levene's Test (Any Continuous Distribution)
 Test statistic = 3,15; p-value = 0,061

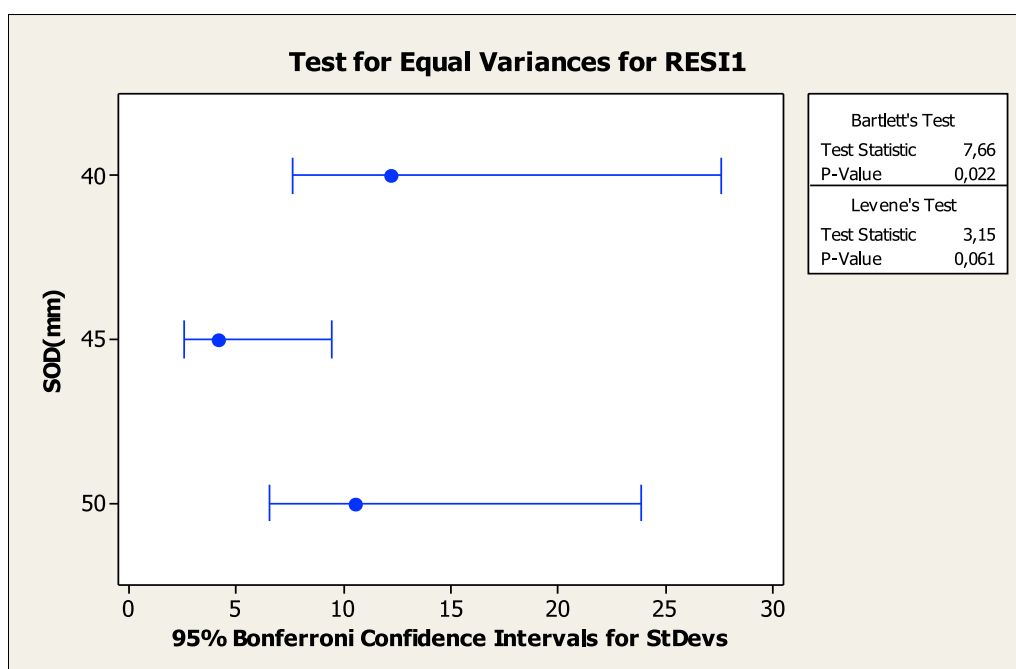
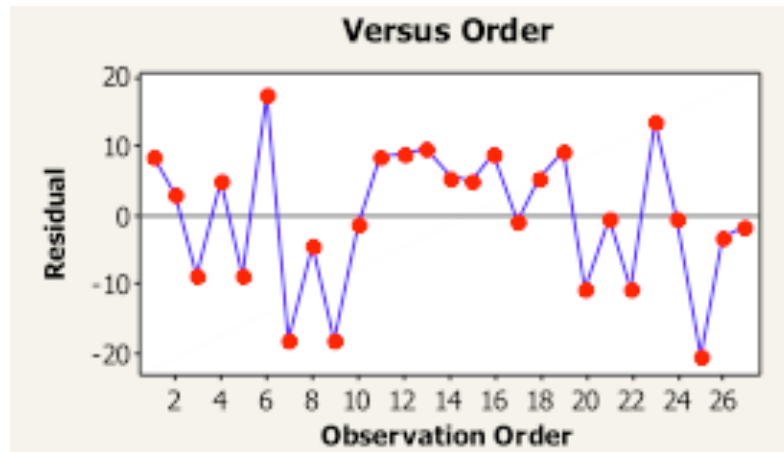


Fig. 5.9 Omogeneità della varianza

Il risultato è analogo a quello dell'ANOVA a una via ed è quindi verificato.

Indipendenza dei residui:



Graf. 5.6 Indipendenza dei residui

I residui non mostrano una dipendenza dall'ordine delle prove: si possono quindi considerare indipendenti.

L'equazione ottenuta tramite la regressione mostra come, nel range in cui abbiamo effettuato le prove, l'aumento della SOD determini un aumento delle tensioni medie residue:

$$\text{sigma media (MPa)} = -148 - 1,19 \text{ SOD(mm)}$$

Considerando la costante (-148) dell'equazione appare evidente che le tensioni residue in questo range sono piuttosto rilevanti

Capitolo 6

6.1 Conclusioni

Nel presente lavoro si sono analizzati i due parametri di processo (SOD e Velocità di avanzamento) riguardanti il water jet peening in aria (più conveniente di quello sommerso [Gem06]), che sono risultati essere più significativi nella determinazioni del livello di compressioni residue lasciate sul materiale trattato.

Si è partiti, quindi, da dati pregressi in cui era stato dimostrato che agendo in un range di SOD compreso tra 40 e 50 mm e una velocità di avanzamento compresa tra 350 e 450 mm/min, il trattamento aveva procurato compressioni di entità più rilevante.

Scopo della trattazione è stato, quindi, analizzare in prima istanza se i parametri scelti fossero determinanti nell'ottenimento dello sforzo medio residuo.

Il risultato ci ha portati ad affermare che la SOD risulta essere influente.

Mentre le velocità scelte (350 - 400 - 450 mm/min) sono molto vicine tanto da risultare ininfluenti.

Le analisi svolte a monte e a valle del trattamento di waterjet peening sono state volte a confermare l'ipotesi che il processo sia vantaggioso dal momento che non modifica la morfologia della superficie.

L'analisi al microscopio mostra nella maggior parte dei casi una disossidazione superficiale, vantaggio significativo se si considera che oltre ad indurre compressione il processo possa essere utilizzato anche come una sorta di decapaggio.

Le pesature ci hanno mostrato, anche se solo qualitativamente, che il processo ha eroso la superficie coerentemente con gli altri lavori [Mot97] [Gem06].

La variazione minima di rugosità superficiale ci indica, inoltre, che, rispetto alla pallinatura tradizionale che peggiora questo parametro, la pallinatura waterjet è un processo efficiente anche sotto questo punto di vista.

Su tutti i provini trattati sono stati inoltre riscontrati valori di compressione rilevanti ai fini del miglioramento della loro vita a fatica infatti dalle prove eseguite sullo stesso materiale tramite pallinatura tradizionale si sono riscontrati valori pari a 600 MPa [Par09].

Le prove effettuate sono state svolte cercando di essere il più precisi possibile in modo da renderle ripetibili e veritiere.

Abbiamo notato infatti alcune lacune nella tesi precedente che ci siamo curati di colmare.

Le prove effettuate in precedenza non sono state convalidate da un piano sperimentale che ne potesse verificare l'attendibilità statistica.

Esse inoltre sono state eseguite mediante uno staffaggio dei provini molto soggetto a vibrazioni.

Per questo motivo la struttura da noi creata è stata volta alla minimizzazione delle vibrazioni possibili indotte dalla lavorazione, e collocata poi irrigidendo il più possibile la struttura portante.

Durante le prove condotte in precedenza non viene accennato al transitorio della macchina per raggiungere la velocità impostata e ciò potrebbe avere portato a una analisi dei risultati inficiata da un errore di impostazione della suddetta velocità (paragrafo 4.1.2).

Ci siamo quindi curati di analizzare con occhio critico i risultati ottenuti in precedenza, per percorrere la via di un miglioramento delle impostazioni ed avere così dati più attendibili.

6.2 Prospettive future

La pallinatura waterjet presenta ancora ad oggi il problema di prevedere le caratteristiche, dimensionali e in termini di velocità, delle gocce d'acqua al momento dell'impatto data la caratteristica turbolenta del moto di efflusso del fluido dall'ugello primario.

A rendere interessante il processo di waterjet peening è inoltre il fatto che esso lascia compressioni residue esattamente in superficie, a differenza del processo di pallinatura tradizionale [Par09] [Mar93].

Sarebbe interessante in futuro eseguire delle prove a fatica sui provini trattati con il WJ peening, per vedere se la lavorazione ha effettivamente portato a un miglioramento della vita utile del componente, attrezzandosi con provini di dimensioni congrue a questo tipo di analisi.

Inoltre sarebbe interessante scegliere un ugello di dimensioni significativamente superiori (2- 2,2 mm) per poter trattare così un'area maggiore e procedere poi ad accurate prove di microdurezza Vickers.

Un'altra considerazione va fatta sulla potenza della pompa che, a causa delle perdite di carico e delle oscillazioni di pressione risulta difficilmente controllabile.

Infine considerando il materiale utilizzato per i trattamenti: bisognerebbe sottoporre al WJ materiali (sottoposti a alti cicli di fatica) che già subiscono la pallinatura classica (acciaio cementato, acciaio nitruato, leghe leggere, leghe di magnesio, boro o nichel).

Come applicazione secondaria, infine, il WJ potrebbe essere utilizzato per decapeggi in sostituzione del tradizionale decapeggio chimico, ottenendo così il vantaggio di avere due processi tecnologici in un'unica applicazione.

APPENDICE A

A 1 Difrattometria

La diffrazione è uno strumento di analisi molto utilizzato in vari campi, come ad esempio la rilevazione appunto delle tensioni residue.

È un metodo veloce e semplice che caratterizza appunto lo stato tensionale della superficie attraverso un fascio di fotoni X che colpiscono il materiale.

Quando i fotoni colpiscono la superficie avvengono tre fenomeni:

1. Diffusione incoerente
2. Assorbimento
3. Diffusione coerente

La diffrazione è definita come interferenza positiva di due onde e si verifica quando queste sono in fase.

Il fenomeno è così descritto dalla legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{A.1})$$

dove λ è la lunghezza d'onda del raggio, n è il numero d'ordine della diffrazione, d è la distanza interplanare dei cristalli e θ l'angolo di Bragg.

$$\Delta d = -\frac{\lambda}{2 \sin\theta} \cot\theta \times \Delta\theta \quad (\text{A.2})$$

E ricordando la definizione della deformazione:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot\theta \times \Delta\theta \quad (\text{A.3})$$

Il legame costitutivo ci permette di avere così un legame tra sforzi e deformazioni di questo tipo:

$$\varepsilon_{\psi\phi} = \left(\frac{1+\nu}{E}\sigma_{\phi} \sin^2\psi\right) - \left(\frac{\nu}{E}(\sigma_I + \sigma_{II})\right) \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_{\phi} = \sigma_I \cos^2\phi + \sigma_{II} \sin^2\phi \quad (\text{A.5})$$

In questo modo si lega la deformazione σ_{ϕ} alla deformazione nella direzione definita dagli angoli ψ e ϕ e alle sollecitazioni principali.

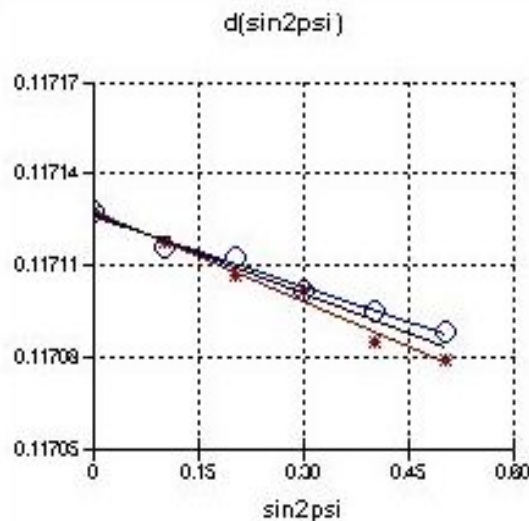


Fig. A.1 Retta risultante dall'analisi di tensioni non nulle

Il diffrattometro non ci fornisce direttamente l'angolo di diffrazione quindi dovremo, mantenendo costante l'angolo incidente, far variare la posizione del rilevatore fino a quando verrà rilevata l'intensità massima corrispondente a un certo angolo detto angolo di picco.

Il calcolo dell'angolo di picco può essere effettuato attraverso vari metodi, ossia:

- Metodo della gaussiana
- Metodo della parabola
- Metodo della corda
- Metodo del centroide

Con il metodo della gaussiana una volta ottenuto il grafico della diffrazione lo si approssima con una curva gaussiana che ne segua nel modo migliore e prendendo come valore di angolo il valore centrale della curva.

Il metodo della parabola si utilizza quando si è in grado di distinguere bene i picchi delle radiazioni.

Nel metodo della corda si traccia la tangente inferiore al profilo del picco, quindi si traccia la corda, parallela alla tangente, a metà altezza tra la tangente stessa e il punto massimo del profilo.

Si utilizza come angolo di picco il punto medio della corda così calcolata.

Perché le misure siano significative è necessario la taratura corretta dello strumento che viene eseguita tramite provini in cui lo stato tensionale è noto.

Le prove più comuni sono quelle effettuate con la polvere di ferro e, affinché lo strumento sia tarato correttamente la media delle misure deve essere compresa tra ± 14 MPa.

La lunghezza d'onda λ varia con il materiale con cui è fatto l'anticatodo, e questo ultimo va scelto in funzione del materiale da analizzare e dei piani reticolari che si vuole indagare.

È meglio scegliere picchi di diffrazione causati da piani cristallografici con molteplicità maggiore, in questo modo è più facile trovare piani disposti in modo favorevole per le misure.

Come anticatodo quindi si usa di solito il Cr per i materiali ferrosi o le leghe di alluminio, mentre un anticatodo di Cu è spesso utilizzato per le misure su Ti e alcune leghe di Al.

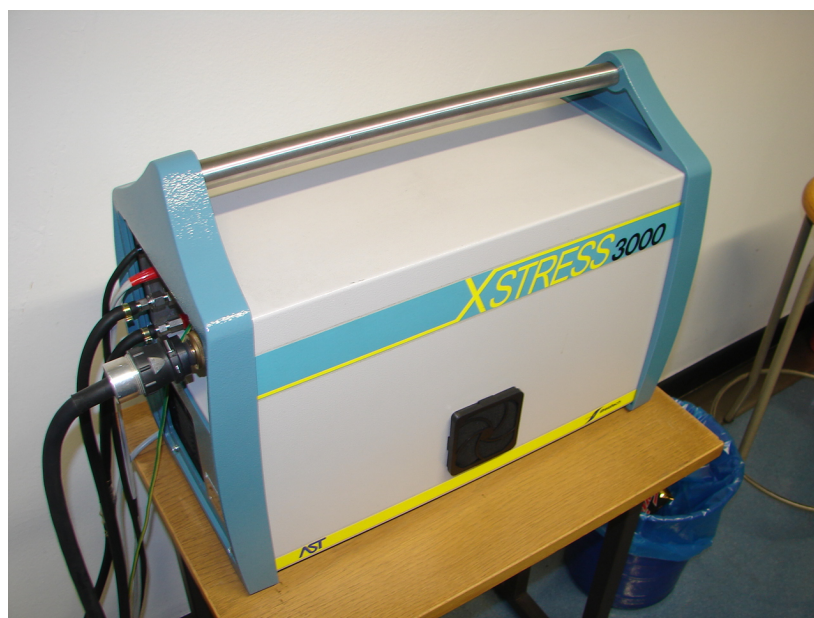


Fig. A.2 unità di generazione di raggi X



Fig. A.3 Goniometro Mobile

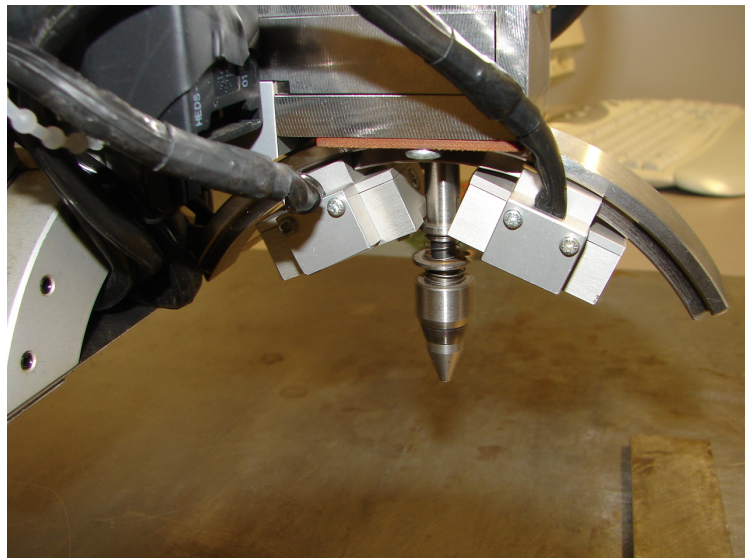


Fig. A.4 Collimatore

APPENDICE B

B 1 Caratteri generali del rugosimetro

Il rugosimetro è un trasduttore di posizione elettronico che consente di rilevare in modo continuo le variazioni di altezza (lungo l'asse Z) della superficie di un pezzo lungo una determinata superficie di scansione.

I parametri con cui viene misurata la rugosità sono diversi e ciascuno mette in evidenza alcune caratteristiche peculiari del profilo esaminato.

Effettuando le misurazioni abbiamo riportato quelli di maggiore interesse, ossia:

- R_z : distanza fra la linea di picco del profilo e la linea di valle del profilo all'interno della lunghezza di base
- R_a : media aritmetica dei valori assoluti degli scostamenti del profilo all'interno della lunghezza di base
- R_q : valore medio quadratico degli scostamenti del profilo, all'interno della lunghezza di base
- R_{\max} : altezza del picco del profilo più alto all'interno della lunghezza di base

Il rugosimetro consente di misurare gli spostamenti verticali di una punta tastatrice a contatto con la superficie in esame; la punta tastatrice è movimentata da una unità di traslazione orizzontale.

Nella maggior parte dei modelli esistenti gli spostamenti della punta tastatrice sono rilevati da un trasduttore di posizione di tipo induttivo e l'informazione della microgeometria superficiale è ottenuta in modo semplice e di facile lettura.

Lo spostamento lungo l'asse X viene normalmente eseguita tramite una riga ottica.

Il rugosimetro è tipicamente composto dalle seguenti parti:

- la punta tastatrice solidale al trasduttore di spostamento
- l'unità di avanzamento in grado di eseguire una traslazione orizzontale della punta tastatrice a velocità costante
- il registratore grafico in grado di rappresentare il profilo rilevato
- l'indicatore numerico del parametro calcolato
- l'unità di elaborazione che permette di calcolare i parametri di rugosità

Bibliografia

- [Has05] M. Hashis, M. Ramulo, S. Kunaporn, *Mathematica modeling of ultra-high-pressure waterjet peening*, transaction of the ASME, vol. 127, 2005
- [Has01] M. Hashish, J. Hopkins, S. Kunaporn, M Ramulo, *Ultra-high pressure waterjet peening, part I: surface textur, Part II: high cycle fatigue performance*, American waterjet conference WJTA. 2001
- [Has02] M. Hashish, S. Kunaporn, M. Ramulo, J Hopkins, *Fatigue performance of high-pressure waterjet-peened aluminium alloy*, Transactions of the ASME vol. 124-2002
- [Has07] M. Hashish, M. Ramulo, A. Chillman, *Waterjet peening and surface preparation at 600 Mpa: A preliminary experimental study*, Journal of fluids engineering vol. 129 , 2007
- [Kro95] F. Kroos, M. Hartmann, H.K. Tonshoff, *Water peening, an advanced application of waterjet technology* 8th american waterjet conference, Texas, 1995
- [Moc06] Masahito Mochizuki, Kunio Enomoto, Shinji Sakata, *A study on residual stress improvement by waterjet peening, The shot peener vol. 20, 2006*
- [Dan99] S. R. Daniewicz, S. D. Cummings, *Characterization of a water peening process*, transaction of the ASME, vol. 121, 1999
- [Soy03] H, Soyama, D. Odhiambo, *Cavitation shotless peening fon improvement of fatigue strenght of carbonized steel*, international journal of fatigue, 2003
- [Soy05] H. Soyama, D. O. Macodiyo, *Fatigue strenght improvement of gears using cavitation shotless peening* Tribology letters, vol 18, 2005
- [Soy04] H. Soyama, D. O. Macodiyo, S. Mall, *Compressive residual stress into titanium alloy using cavitation shotless peening method*, Tribology letters vol 17, 2004
- [Soy00] H. Soyama, J. D. Park, M. Saka, *Use of cavitating jet for introducing compressive residual stress* Journal of manufacturing science and engineering, 2000

- [Soy06] H. Soyama, D. O. Macodiyo, *Optimization of cavitation peening parameters for fatigue performance of carburized steel using Taguchi method*, Journal of materials processing technology, 2006
- [Soy07] H. Soyama, *Improvement of fatigue strength using cavitating jets in air and water* Journal of material science, 2007
- [Mik04] M. Mikami, H. Soyama, K. Homma, *Improvement of fatigue strength by using a cavitating jet in air* Proceedings of the international waterjet conference, 17th international waterjet conference on water jetting, 2004
- [Par09] I. Fernandez Pariente, M. Guagliano, *Influence of shot peening process on contact fatigue Behavior of Gears*, 2009
- [Mar93] K.J. Marsh, *Shot peening: techniques and applications*. Ed. EMAS 1993
- [Mot97] G. Motter, *Pallinatura waterjet, un'applicazione innovativa al trattamento delle superfici* tesi di laurea presso il politecnico di Milano, anno accademico 1997-1998
- [Yan80] K. Yanaida, A. Ohashi, *Flow characteristics of waterjets in air* 5th international symposium on jet cutting technology, 1980
- [Gem06] Luca Gemelli *Pallinatura a getto d'acqua in aria e sommerso: analisi delle tensioni residue* Tesi di laurea, Politecnico di Milano, anno accademico 2006-2007