

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in
Ingegneria dell'Automazione



Configurazione automatica del riscaldamento in termoformatura

Relatore: Prof. Giovanni MORONI

Correlatore: Ing. Francesco FIORENTINI

Tesi di Laurea di:

Roberta SOLIGNO Matr. 761603

Anno Accademico 2011 - 2012

Ai miei genitori

RINGRAZIAMENTI

Durante questo lavoro di tesi mi sono sempre resa conto che non sarei mai riuscita a portarlo a termine da sola. Dall'inizio fino alla fine mi è stato necessario sia il sostegno tecnico che l'appoggio degli amici. Probabilmente non riuscirò mai a riassumere in questa pagina tutta la gratitudine che vorrei esprimere però vorrei citare coloro che mi hanno maggiormente aiutata in questo periodo.

Innanzitutto questo lavoro è derivato da un'idea dell'azienda Forma s.r.l. del gruppo CANNON che ha chiesto del supporto alla Whirlpool di Cassinetta di Biandronno. Senza le idee, i consigli e la disponibilità delle persone che ho incontrato nelle due aziende questo lavoro non sarebbe mai nato.

Ringrazio, in modo particolare, l'Ing. Francesco Fiorentini della Forma che ha proposto e coordinato questo lavoro nonostante tutti gli altri impegni che aveva. Ringrazio l'Ing. Fabrizio Sella della Whirlpool che ha gentilmente fornito i dati ed aggiunto alcune spiegazioni.

Ringrazio gli operatori della CANNON Maurizio Castiglioni, Graziano Fraccaro e Andrea Rolandi che mi hanno dato molti consigli pratici.

Ringrazio Giovanni Baretta e Luciano Schiavi della Forma per aver sostenuto questo lavoro ed avermi accolto nel loro ufficio di Lallio (BG).

Un particolare ringraziamento al professor Giovanni Moroni che mi ha fatto conoscere l'ambiente CANNON ed ha avuto la pazienza di seguirmi dall'interno del Politecnico di Milano. Ringrazio anche l'ing. Rocco Ascione per i suoi consigli.

Ringrazio gli amici che mi hanno accompagnato durante questo periodo, da quelli che ho conosciuto all'università, a quelli dell'atletica e a tutti gli altri.

Ringrazio la mia famiglia. Mia mamma che ha riletto ogni frase scritta in italiano, mio papà che mi ha aiutato nell'impaginazione dei dati in appendice e mio fratello che ha avuto la pazienza di rileggere le parti in inglese.

INDICE GENERALE

ABSTRACT.....	19
SOMMARIO.....	20
1. La termoformatura	21
1.1 La tecnologia.....	21
1.1.1 Le monostazioni.....	22
1.1.2 Le macchine in linea.....	24
1.2 I materiali.....	25
1.2.1 I materiali termoplastici amorfi.....	25
1.2.2 I materiali termoplastici semicristallini.....	26
1.3 Il riscaldamento del foglio di plastica	27
1.3.1 L'irraggiamento.....	27
1.3.2 Gli irradiatori ceramici	30
1.3.3 Gli irradiatori al quarzo.....	31
1.3.4 Gli irradiatori alogeni	31
1.3.5 I piani di riscaldamento.....	32
1.3.6 Riscaldamento uniforme del foglio di plastica	34
1.3.7 Metodo tradizionale per impostare la mappa dei riscaldi	36
1.4 I simulatori.....	37
1.4.1 T-SIM: Computer simulation of thermoforming.....	38
2. Il problema.....	41
2.1 L'approccio risolutivo	42
2.2 L'acquisizione delle informazioni.....	42
2.2.1 Le prove iniziali	42
2.2.2 Le interviste agli operatori.....	48
2.3 La metodologia	50
3. L'implementazione dei metodi	53

3.1	L'Iges Toolbox	53
3.2	Funzionamento generale del programma	54
3.2.1	L'elemento di riscaldamento elementare	55
3.2.2	La funzione "concentricita"	59
3.2.3	Programma matlab versione 1	62
3.2.4	Programma matlab versione 2	66
4.	Validazione dei risultati	69
4.1	Casi Whirlpool®	74
4.2	Doppia cella	82
4.3	Risultati versione 1 per le celle Whirlpool®	83
4.3.1	Confronto con i dati Whirlpool®	90
4.3.2	Versione 1 per le celle doppie	93
4.3	Risultati versione 2 per le celle Whirlpool®	97
4.3.1	Confronto con i dati Whirlpool®	104
4.4.2	Versione 2 per le celle doppie	106
4.5	Confronto risultati versione 1 e 2	111
5.	Conclusioni	113
	BIBLIOGRAFIA.....	115
	APPENDICE 1: Materiali utilizzati in termoformatura.....	117
	APPENDICE 2: Disegno dei piani di riscaldamento della macchina in linea Super Line New Generation della Comi s.r.l.....	121
	APPENDICE 3: Disegni celle Atlant®	123
	APPENDICE 4: Esempi di pezzi da termoformare.....	125
	APPENDICE 5: Input.....	133
	APPENDICE 6: Dati Whirlpool®	139
	APPENDICE 7: Versione 1 del programma.....	167
	APPENDICE 8: Risultati della versione 1 del programma.....	187

APPENDICE 9: Confronto tra i dati Whirlpool® e i risultati della versione 1 del programma.....	237
APPENDICE 10: Versione 2 del programma.....	251
APPENDICE 11: Risultati della versione 2 del programma.....	263
APPENDICE 12: Confronto tra i dati Whirlpool® e i risultati della versione 2 del programma.....	313

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: fasi del processo di termoformatura. Macchina monostazione	22
Figura 1.2: fasi del processo di termoformatura. Macchine in linea.	24
Figura 1.3: materiale amorfo [Fra05]	25
Figura 1.4: materiale semi-cristallino [Fra05]	26
Figura 1.5: potenza emessa dal corpo nero [ORB]	28
Figura 1.6: potenza irradiatori [ORB]	29
Figura 1.7: lampade ceramiche	30
Figura 1.8: lampade al quarzo	31
Figura 1.9: lampade alogene	31
Figura 1.10: irradiatore singolo	32
Figura 1.11: riscaldi macchina Super Line New Generation. A sinistra la vista dall'alto ed a destra quella frontale	33
Figura 1.12: riscaldi superiore e inferiore. A sinistra il foglio è mantenuto in piano mentre a destra è incurvato verso il basso	33
Figura 1.13: riscaldamento uniforme del foglio di materiale polimerico (valori indicativi). Da sinistra verso destra: foglio piccolo, medio e grande	35
Figura 1.14: quadrettatura	36
Figura 1.15: simulazione spessore finale delle pareti	38
Figura 3.1: terminale della termoformatrice. A sinistra il piano di riscaldamento superiore e a destra quello inferiore	41
Figura 3.2: cella frigorifero Atlant®	43
Figura 3.3: cella frigorifero Atlant® durante l'estrazione.....	43
Figura 3.4: cella freezer Atlant®	43
Figura 3.5: cella freezer Atlant® durante l'estrazione.....	43
Figura 3.6: pallone.....	44
Figura 3.7: cella frigorifero	44
Figura 3.8: riscaldamento superiore, frigorifero	45
Figura 3.9: riscaldamento inferiore, frigorifero	46
Figura 3.10: piega del materiale.....	46
Figura 3.11: riscaldamento superiore, freezer	47
Figura 3.12: riscaldamento inferiore, freezer.....	48
Figura 3.14: riscaldamento superiore per lo stampo 00076	49
Figura 3.13: vista dall'alto dell'oggetto 00076	49
Figura 4.1: griglia di punti.....	54
Figura 4.2: elemento di riscaldamento elementare	56

Figura 4.3: foto quadrettatura freezer Atlant®	57
Figura 4.4: identificazione del bordo per il programma matlab. Lampade reali ed elementari.....	57
Figura 4.5: foto quadrettatura frigo 244.....	58
Figura 4.6: identificazione del bordo per il programma matlab. Lampade reali ed elementari.....	58
Figura 4.7: bordo dell'oggetto identificato dal programma. Cella frigorifero 281.	59
Figura 4.8: vista globale dell'oggetto. Cella frigorifero 281.....	59
Figura 4.9: vista dall'alto dell'oggetto. Cella frigorifero 281.....	59
Figura 4.10: bordo dell'oggetto	60
Figura 4.11: vista globale dell'oggetto	60
Figura 4.12: vista dall'alto dell'oggetto.....	60
Figura 4.13: cornici concentriche di potenza.....	60
Figura 4.14: risultato funzione "concentricita". Pezzo dal profilo rettangolare	61
Figura 4.15: risultato funzione "concentricita". Pezzo dal profilo non rettangolare.....	61
Figura 4.16: : risultato funzione "concentricita". Pezzo simile ad una vasca da bagno angolare	62
Figura 4.17: informazioni riguardanti l'oggetto da termoformare. Versione 1 e 2	62
Figura 4.18: informazioni riguardanti la macchina. Versione 1	63
Figura 4.19: informazioni riguardanti la potenza delle lampade. Versione 1.....	64
Figura 4.20: struttura del file di output. Versione 1	66
Figura 4.21: informazioni riguardanti la macchina. Versione 2	66
Figura 4.22: mezzerie della lampada elementare.....	67
Figura 4.23: sezioni del pezzo corrispondenti con le mezzerie delle lampade elementari	67
Figura 4.24: struttura del file di output. Versione 2	68
Figura 5.1: Dati Whirlpool®, riscaldamento superiore. Frigorifero sbs 5006973	69
Figura 5.2: foto del pezzo termoformato. Frigorifero sbs 5006973	70
Figura 5.3: riscaldamento superiore. Frigorifero sbs 5006973	71
Figura 5.4: preriscaldamento superiore. Frigorifero sbs 5006973.....	71
Figura 5.5: foto del pezzo termoformato. Frigorifero 281	72
Figura 5.6: riscaldamento superiore. Frigorifero 281.....	73
Figura 5.7: preriscaldamento superiore. Frigorifero 281	73
Figura 5.8: cella 281. Frigorifero normale con gradino.....	74
Figura 5.9: cella 244. Frigorifero normale con gradino.....	74
Figura 5.10: cella Tall. Frigorifero normale senza gradino.....	75
Figura 5.11: frigorifero side by side	75
Figura 5.12: freezer side by side	75

Figura 5.13: celle freezer 304, modello nuovo. Freezer doppia cella	76
Figura 5.14: celle freezer 304, modello vecchio. Freezer 304	76
Figura 5.15: intersezione pre-riscaldamento e riscaldamento superiore e inferiore	79
Figura 5.16: struttura dei file excel contenenti i dati Whirlpool®	80
Figura 5.17: parte alta del foglio dedicato al riscaldamento superiore(Ris S). Vi è la percentuale di potenza di ciascuna lampada. I valori riportati si riferiscono al frigorifero 281	80
Figura 5.18: parte bassa del foglio dedicato al riscaldamento superiore (Ris S). Vi è l'energia (potenza*tempo di riscaldamento) associata a ciascuna lampada. I valori riportati si riferiscono al frigorifero 281	81
Figura 5.19: foglio "griglia" per il frigorifero 281. Le zone in azzurro sono in corrispondenza con lampade spente, mentre quelle in giallo sono interessate da più energia. Il colore arancione è associato a lampade accese a potenza intermedia.....	81
Figura 5.20: preriscaldamento. Foglio incurvato verso il basso	82
Figura 5.21: riscaldamento. Foglio incurvato verso il basso.....	82
Figura 5.22: doppio pallone	83
Figura 5.23: struttura del file excel contenete i risultati della prima versione del programma. Macchina di tipo 2.....	84
Figura 5.24:foglio "grid". Somma dell'energia proveniente da preriscaldi e riscaldi per il frigorifero 281.	85
Figura 5.25: foglio "1stU". Preriscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.....	85
Figura 5.26: foglio "1stL". Preriscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.....	85
Figura 5.27: foglio "2ndU". Riscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.....	86
Figura 5.28: foglio "2ndL". Riscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.....	86
Figura 5.29: foglio "sheet2". Riferimento per il foglio "2ndL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari. I numeri in nero sulla parte destra ed inferiore della figura sono le misure in mm a partire dalla mezzera.	87
Figura 5.30: foglio "sheet1". Riferimento per il foglio "2ndU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari. I numeri in nero sulla parte destra ed inferiore della figura sono le misure in mm a partire dalla mezzera.	87
Figura 5.31: foglio "conc". Risultato della funzione "concentricita"	88
Figura 5.32: foglio "height". Risultato della funzione che guarda la differenza di altezza tra i punti che corrispondono ad una lampada elementare. (Potenza_iniziale)*(massima_differenza_di_altezza)=(costante)	88

Figura 5.34: foglio "1stUpper". Riferimento per il foglio "1stU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	89
Figura 5.33: foglio "bol". Risultato dell'identificazione del bordo dell'oggetto. La funzione "concentricita" si basa su questa matrice.....	89
Figura 5.35: foglio "1stL". Riferimento per il foglio "1stL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	90
Figura 5.36: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Frigorifero 281	91
Figura 5.37: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Frigorifero 281	92
Figura 5.38: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Versione 1, freezer doppia cella	94
Figura 5.39: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 1, freezer doppia cella.....	95
Figura 5.40: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Versione 1, freezer 304.....	95
Figura 5.41: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 1, freezer 304.....	96
Figura 5.42: struttura del file excel contenete i risultati della seconda versione del programma.	97
Figura 5.43: foglio "grid". Somma dell'energia proveniente da preriscaldi e riscaldi per il frigorifero 281.	98
Figura 5.44: foglio "1stU". Preriscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.	98
Figura 5.45: foglio "1stL". Preriscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.	99
Figura 5.46: foglio "2ndU". Riscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.	99
Figura 5.47: foglio "2ndL". Riscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.	99
Figura 5.48: foglio "sheet1". Riferimento per il foglio "2ndU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	100
Figura 5.49: foglio "sheet2". Riferimento per il foglio "2ndL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	100
Figura 5.50: foglio "bol". Risultato dell'identificazione del bordo dell'oggetto. La funzione "concentricita" si basa su questa matrice.....	101
Figura 5.51: foglio "conc". Risultato della funzione "concentricita".	101

Figura 5.52: foglio "x". Risultato della funzione "concentricita" corretto in base alla lunghezza delle sezioni parallele al lato lungo.....	102
Figura 5.53: foglio "y". Risultato della funzione "concentricita" corretto in base alla lunghezza delle sezioni parallele al lato corto.	102
Figura 5.54: foglio "pow". Media aritmetica dei valori contenuti nei fogli "x" e "y". ...	103
Figura 5.55: foglio "1stUpper". Riferimento per il foglio "1stU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	103
Figura 5.56: foglio "1stLower". Riferimento per il foglio "1stL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.	103
Figura 5.57: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Versione 2, frigorifero 281	104
Figura 5.58: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 2, frigorifero 281	105
Figura 5.59: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Versione 2, freezer doppia cella.....	107
Figura 5.60: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 2, freezer doppia cella.....	108
Figura 5.61: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Versione 2, freezer 304	109
Figura 5.62: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 2, freezer 304	110

INDICE DELLE FIGURE IN APPENDICE

Figura A.3.1: cella frigorifero Atlant®	123
Figura A.3.2: cella freezer Atlant®	124
Figura A.4.1: vista dall'alto dell'oggetto 00070	125
Figura A.4.2: riscaldamento superiore per lo stampo 00070	125
Figura A.4.4: riscaldamento superiore per lo stampo 00076	126
Figura A.4.3: vista dall'alto dell'oggetto 00076.....	126
Figura A.4.6: riscaldamento superiore per lo stampo 2010097	126
Figura A.4.5: vista dall'alto dell'oggetto 2010097.....	127
Figura A.4.7: vista dall'alto dell'oggetto 10208386.....	128
Figura A.4.8: riscaldamento superiore per lo stampo 10208386	128
Figura A.5.1: sheet1. File excel in cui inserire gli input.....	133
Figura A.5.2: sheet 2. File excel in cui inserire gli input	133
Figura A.5.3: sheet 3. File excel in cui inserire gli input	134

Figura A.6.1: foto cella termoformata. Frigorifero 281.	139
Figura A.6.2: informazioni relative al foglio iniziale. Frigorifero 281.....	139
Figura A.6.3: foglio "griglia". Frigorifero 281.	140
Figura A.6.4: preriscaldamento superiore. Frigorifero 281.....	141
Figura A.6.5: preriscaldamento inferiore. Frigorifero 281.	141
Figura A.6.6: riscaldamento superiore. Frigorifero 281.	142
Figura A.6.7: riscaldamento inferiore. Frigorifero 281.....	142
Figura A.6.8: foto cella termoformata. Frigorifero 244.	143
Figura A.6.9: informazioni relative al foglio iniziale. Frigorifero 244.....	143
Figura A.6.10: foglio "griglia". Frigorifero 244.	144
Figura A.6.11: preriscaldamento superiore. Frigorifero 244.....	145
Figura A.6.12: preriscaldamento inferiore. Frigorifero 244.	145
Figura A.6.13: riscaldamento superiore. Frigorifero 244.	146
Figura A.6.14: riscaldamento inferiore. Frigorifero 244.....	146
Figura A.6.15: disegno cella Tall.....	147
Figura A.6.16: foto cella termoformata. Frigorifero Tall.....	147
Figura A.6.17: informazioni relative al foglio iniziale. Frigorifero Tall.	147
Figura A.6.18: foglio "griglia". Frigorifero Tall.	148
Figura A.6.19: preriscaldamento superiore. Frigorifero Tall.	149
Figura A.6.20: preriscaldamento inferiore. Frigorifero Tall.....	149
Figura A.6.21: riscaldamento superiore. Frigorifero Tall.....	150
Figura A.6.22: riscaldamento inferiore. Frigorifero Tall.	150
Figura A.6.23: foto cella termoformata. Frigorifero sbs.	151
Figura A.6.24: informazioni relative al foglio iniziale. Frigorifero sbs.....	151
Figura A.6.25: foglio "griglia". Frigorifero sbs.	152
Figura A.6.26: preriscaldamento superiore. Frigorifero sbs.....	153
Figura A.6.27: preriscaldamento inferiore. Frigorifero sbs.	153
Figura A.6.28: riscaldamento superiore. Frigorifero sbs.	154
Figura A.6.29: riscaldamento inferiore. Frigorifero sbs.....	154
Figura A.6.30: foto cella termoformata. Freezer sbs.	155
Figura A.6.31: informazioni relative al foglio iniziale. Freezer sbs.....	155
Figura A.6.32: foglio "griglia". Freezer sbs.	156
Figura A.6.33: preriscaldamento superiore. Freezer sbs.....	157
Figura A.6.34: preriscaldamento inferiore. Freezer sbs.	157
Figura A.6.35: riscaldamento superiore. Freezer sbs.	158
Figura A.6.36: riscaldamento inferiore. Freezer sbs.	158
Figura A.6.37: foto celle termoformate. Freezer doppia cella.....	159
Figura A.6.38: foglio "griglia". Freezer doppia cella.....	160

Figura A.6.39: preriscaldamento superiore. Freezer doppia cella.	161
Figura A.6.40: preriscaldamento inferiore. Freezer doppia cella.	161
Figura A.6.41: riscaldamento superiore. Freezer doppia cella.	162
Figura A.6.42: riscaldamento inferiore. Freezer doppia cella.	162
Figura A.6.43: foto celle termoformate. Freezer 304.	163
Figura A.6.44: informazioni relative al foglio iniziale. Freezer 304.	163
Figura A.6.45: foglio "griglia". Freezer 304.	164
Figura A.6.46: preriscaldamento superiore. Freezer 304.	165
Figura A.6.47: preriscaldamento inferiore. Freezer 304.	165
Figura A.6.48: riscaldamento superiore. Freezer 304.	166
Figura A.6.49: riscaldamento inferiore. Freezer 304.	166
Figura A.8.1: foglio "grid". Frigorifero 281.	187
Figura A.8.2: foglio "1stU". Frigorifero 281.	188
Figura A.8.3: foglio "1stL". Frigorifero 281.	188
Figura A.8.4: foglio "2ndU". Frigorifero 281.	188
Figura A.8.5: foglio "2ndL". Frigorifero 281.	188
Figura A.8.6: foglio "sheet1". Frigorifero 281.	189
Figura A.8.7: foglio "sheet2". Frigorifero 281.	190
Figura A.8.8: foglio "conc". Frigorifero 281.	191
Figura A.8.9: foglio "height". Frigorifero 281.	191
Figura A.8.10: foglio "bol". Frigorifero 281.	192
Figura A.8.11: foglio "1stUpper". Frigorifero 281.	192
Figura A.8.12: foglio "1stLower". Frigorifero 281.	193
Figura A.8.13: foglio "grid". Frigorifero 244.	194
Figura A.8.14: foglio "1stU". Frigorifero 244.	195
Figura A.8.15: foglio "1stL". Frigorifero 244.	195
Figura A.8.16: foglio "2ndU". Frigorifero 244.	195
Figura A.8.17: foglio "2ndL". Frigorifero 244.	195
Figura A.8.18: foglio "sheet1". Frigorifero 244.	196
Figura A.8.19: foglio "sheet2". Frigorifero 244.	197
Figura A.8.20: foglio "conc". Frigorifero 244.	198
Figura A.8.21: foglio "height". Frigorifero 244.	198
Figura A.8.22: foglio "bol". Frigorifero 244.	199
Figura A.8.23: foglio "1stUpper". Frigorifero 244.	199
Figura A.8.24: foglio "1stLower". Frigorifero 244.	200
Figura A.8.25: foglio "grid". Frigorifero Tall.	201
Figura A.8.26: foglio "1stU". Frigorifero Tall.	202
Figura A.8.27: foglio "1stL". Frigorifero Tall.	202

Figura A.8.28: foglio "2ndU". Frigorifero Tall.....	202
Figura A.8.29: foglio "2ndL". Frigorifero Tall.	202
Figura A.8.30: foglio "sheet1". Frigorifero Tall.	203
Figura A.8.31: foglio "sheet2". Frigorifero Tall.	204
Figura A.8.32: foglio "conc". Frigorifero Tall.....	205
Figura A.8.33: foglio "height". Frigorifero Tall.	205
Figura A.8.34: foglio "bol". Frigorifero Tall.	206
Figura A.8.35: foglio "1stUpper". Frigorifero Tall.	206
Figura A.8.36: foglio "1stLower". Frigorifero Tall.	207
Figura A.8.37: foglio "grid". Frigorifero sbs.	208
Figura A.8.38: foglio "1stU". Frigorifero sbs.	209
Figura A.8.39: foglio "1stL". Frigorifero sbs.	209
Figura A.8.40: foglio "2ndU". Frigorifero sbs.....	209
Figura A.8.41: foglio "2ndL". Frigorifero sbs.....	209
Figura A.8.42: foglio "sheet1". Frigorifero sbs.....	210
Figura A.8.43: foglio "sheet2". Frigorifero sbs.....	211
Figura A.8.44: foglio "conc". Frigorifero sbs.	212
Figura A.8.45: foglio "height". Frigorifero sbs.	212
Figura A.8.46: foglio "bol". Frigorifero sbs.....	213
Figura A.8.47: foglio "1stUpper". Frigorifero sbs.....	213
Figura A.8.48: foglio "1stLower". Frigorifero sbs.....	214
Figura A.8.49: foglio "grid". Freezer sbs.	215
Figura A.8.50: foglio "1stU". Freezer sbs.	216
Figura A.8.51: foglio "1stL". Freezer sbs.	216
Figura A.8.52: foglio "2ndU". Freezer sbs.....	216
Figura A.8.53: foglio "2ndL". Freezer sbs.....	216
Figura A.8.54: foglio "sheet1". Freezer sbs.....	217
Figura A.8.55: foglio "sheet2". Freezer sbs.....	218
Figura A.8.56: foglio "conc". Freezer sbs.	219
Figura A.8.57: foglio "height". Freezer sbs.	219
Figura A.8.58: foglio "bol". Freezer sbs.....	220
Figura A.8.59: foglio "1stUpper".Freezer sbs.....	220
Figura A.8.60: foglio "1stLower". Freezer sbs.....	221
Figura A.8.61: foglio "grid". Freezer doppia cella.	222
Figura A.8.62: foglio "1stU". Freezer doppia cella.	223
Figura A.8.63: foglio "1stL". Freezer doppia cella.....	223
Figura A.8.64: foglio "2ndU". Freezer doppia cella.....	223
Figura A.8.65: foglio "2ndL". Freezer doppia cella.....	223

Figura A.8.66: foglio "sheet1". Freezer doppia cella.....	224
Figura A.3.67: foglio "sheet2". Freezer doppia cella.....	225
Figura A.8.69: foglio "conc". Freezer doppia cella.	226
Figura A.8.68: foglio "conc1". Freezer doppia cella.	226
Figura A.8.70: foglio "bol". Freezer doppia cella.....	227
Figura A.8.71: foglio "1stUpper". Freezer doppia cella.....	227
Figura A.8.72: foglio "1stLower". Freezer doppia cella.....	228
Figura A.8.73: foglio "grid". Freezer 304.....	229
Figura A.8.74: foglio "1stU".Freezer 304.....	230
Figura A.8.75: foglio "1stL". Freezer 304.....	230
Figura A.8.76: foglio "2ndU". Freezer 304.	230
Figura A.3.77: foglio "2ndL". Freezer 304.	230
Figura A.8.78: foglio "sheet1". Freezer 304.	231
Figura A.8.79: foglio "sheet2". Freezer 304.	232
Figura A.8.80: foglio "conc1". Freezer 304.....	233
Figura A.8.81: foglio "conc". Freezer 304.....	233
Figura A.8.82: foglio "bol". Freezer 304.	234
Figura A.8.83: foglio "1stUpper". Freezer 304.	234
Figura A.8.84: foglio "1stLower". Freezer 304.	235
Figura A.9.1: confronto coi dati Whirlpool. Versione 1, frigorifero 281	237
Figura A.9.2: istogramma di confronto. Versione 1, frigorifero 281.....	238
Figura A.9.3: confronto coi dati Whirlpool. Versione 1, frigorifero 244	239
Figura A.9.4: istogramma di confronto. Versione 1, frigorifero 244.....	240
Figura A.9.5: confronto coi dati Whirlpool.Versione 1, frigorifero Tall	241
Figura A.9.6: istogramma di confronto. Versione 1, frigorifero Tall	242
Figura A.9.7: confronto coi dati Whirlpool.Versione 1, frigorifero sbs.....	243
Figura A.9.8: istogramma di confronto. Versione 1, frigorifero sbs	244
Figura A.9.9: confronto coi dati Whirlpool. Versione 1, freezer sbs.....	245
Figura A.9.10: istogramma di confronto. Versione 1, freezer sbs	246
Figura A.9.11: confronto coi dati Whirlpool. Versione 1, freezer doppia cella.....	247
Figura A.9.12: istogramma di confronto. Versione 1, freezer doppia cella	248
Figura A.9.13: confronto coi dati Whirlpool. Versione 1, freezer 304	249
Figura A.9.14: istogramma di confronto. Versione 1, freezer 304.....	250
Figura A.11.1: foglio "grid". Frigorifero 281.....	263
Figura A.11.2: foglio "1stU". Frigorifero 281.....	264
Figura A.11.3: foglio "1stL". Frigorifero 281.....	264
Figura A.11.4: foglio "2ndU". Frigorifero 281.	264
Figura A.11.5: foglio "2ndL". Frigorifero 281.	264

Figura A.11.6: foglio "sheet1". Frigorifero 281.....	265
Figura A.11.7: foglio "sheet2". Frigorifero 281.....	266
Figura A.11.8: foglio "conc". Frigorifero 281.	267
Figura A.11.9: foglio "bol". Frigorifero 281.....	267
Figura A.11.10: foglio "x". Frigorifero 281.	268
Figura A.11.11: foglio "y". Frigorifero 281.	268
Figura A.11.12: foglio "pow". Frigorifero 281.....	268
Figura A.11.13: foglio "1stUpper". Frigorifero 281.....	269
Figura A.11.14: foglio "1stLower". Frigorifero 281.....	269
Figura A.11.15: foglio "grid". Frigorifero 244.....	270
Figura A.11.16: foglio "1stU". Frigorifero 244.	271
Figura A.11.17: foglio "1stL". Frigorifero 244.	271
Figura A.11.18: foglio "2ndU". Frigorifero 244.	271
Figura A.11.19: foglio "2ndL". Frigorifero 244.....	271
Figura A.11.20: foglio "sheet1". Frigorifero 244.....	272
Figura A.11.21: foglio "sheet2". Frigorifero 244.....	273
Figura A.11.22: foglio "conc". Frigorifero 244.	274
Figura A.11.23: foglio "bol". Frigorifero 244.....	274
Figura A.11.24: foglio "x". Frigorifero 244.	275
Figura A.11.25: foglio "y". Frigorifero 244.....	275
Figura A.11.26: foglio "pow". Frigorifero 244.....	275
Figura A.11.27: foglio "1stUpper". Frigorifero 244.....	276
Figura A.11.28: foglio "1stLower". Frigorifero 244.....	276
Figura A.11.29: foglio "grid". Frigorifero Tall.	277
Figura A.11.30: foglio "1stU". Frigorifero Tall.....	278
Figura A.11.31: foglio "1stL". Frigorifero Tall.....	278
Figura A.11.32: foglio "2ndU". Frigorifero Tall.....	278
Figura A.11.33: foglio "2ndL". Frigorifero Tall.	278
Figura A.11.34: foglio "sheet1". Frigorifero Tall.	279
Figura A.11.35: foglio "sheet2". Frigorifero Tall.	280
Figura A.11.36: foglio "conc". Frigorifero Tall.....	281
Figura A.11.37: foglio "bol". Frigorifero Tall.	281
Figura A.11.38: foglio "x". Frigorifero Tall.....	282
Figura A.11.39: foglio "y". Frigorifero Tall.	282
Figura A.11.40: foglio "pow". Frigorifero Tall.	282
Figura A.11.41: foglio "1stUpper". Frigorifero Tall.	283
Figura A.11.42: foglio "1stLower". Frigorifero Tall.	283
Figura A.11.43: foglio "grid". Frigorifero sbs.	284

Figura A.11.44: foglio "1stU". Frigorifero sbs.....	285
Figura A.11.45: foglio "1stL". Frigorifero sbs.	285
Figura A.11.46: foglio "2ndU". Frigorifero sbs.	285
Figura A.11.47: foglio "2ndL". Frigorifero sbs.	285
Figura A.11.48: foglio "sheet1". Frigorifero sbs.	286
Figura A.11.49: foglio "sheet2". Frigorifero sbs.	287
Figura A.11.50: foglio "conc". Frigorifero sbs.	288
Figura A.11.51: foglio "bol". Frigorifero sbs.	288
Figura A.11.52: foglio "x". Frigorifero sbs.	289
Figura A.11.53: foglio "y". Frigorifero sbs.	289
Figura A.11.54: foglio "pow". Frigorifero sbs.	289
Figura A.11.55: foglio "1stUpper". Frigorifero sbs.	290
Figura A.11.56: foglio "1stLower". Frigorifero sbs.	290
Figura A.11.57: foglio "grid". Freezer sbs.	291
Figura A.11.58: foglio "1stU". Freezer sbs.	292
Figura A.11.59: foglio "1stL". Freezer sbs.	292
Figura A.11.60: foglio "2ndU". Freezer sbs.	292
Figura A.11.61: foglio "2ndL". Freezer sbs.	292
Figura A.11.62: foglio "sheet1". Freezer sbs.	293
Figura A.11.63: foglio "sheet2". Freezer sbs.	294
Figura A.11.64: foglio "conc". Freezer sbs.	295
Figura A.11.65: foglio "bol". Freezer sbs.	295
Figura A.11.66: foglio "x". Freezer sbs.	296
Figura A.11.67: foglio "y". Freezer sbs.	296
Figura A.11.68: foglio "pow". Freezer sbs.	296
Figura A.11.69: foglio "1stUpper". Freezer sbs.	297
Figura A.11.70: foglio "1stLower". Freezer sbs.	297
Figura A.11.71: foglio "grid". Freezer doppia cella.	298
Figura A.11.72: foglio "1stU". Freezer doppia cella	299
Figura A.11.73: foglio "1stL". Freezer doppia cella	299
Figura A.11.74: foglio "2ndU". Freezer doppia cella	299
Figura A.11.75: foglio "2ndL". Freezer doppia cella.	299
Figura A.11.76: foglio "sheet1". Freezer doppia cella.	300
Figura A.11.77: foglio "sheet2". Freezer doppia cella.	301
Figura A.11.78: foglio "conc". Freezer doppia cella.	302
Figura A.11.79: foglio "bol". Freezer doppia cella.	302
Figura A.11.80: foglio "x". Freezer doppia cella.	303
Figura A.11.81: foglio "y". Freezer doppia cella.	303

Figura A.11.82: foglio "pow". Freezer doppia cella.	303
Figura A.11.83: foglio "1stUpper". Freezer doppia cella.	304
Figura A.11.84: foglio "1stLower". Freezer doppia cella.....	304
Figura A.11.85: foglio "grid". Freezer 304.....	305
Figura A.11.86: foglio "1stU". Freezer 304.	306
Figura A.11.87: foglio "1stL". Freezer 304.	306
Figura A.11.88: foglio "2ndU". Freezer 304.	306
Figura A.11.89: foglio "2ndL". Freezer 304.	306
Figura A.11.90: foglio "sheet1". Freezer 304.....	307
Figura A.11.91: foglio "sheet2". Freezer 304.....	308
Figura A.11.92: foglio "conc". Freezer 304.	309
Figura A.11.93: foglio "bol". Freezer 304.....	309
Figura A.11.94: foglio "x". Freezer 304.	310
Figura A.11.95: foglio "y". Freezer 304.	310
Figura A.11.96: foglio "pow". Freezer 304.....	310
Figura A.11.97: foglio "1stUpper". Freezer 304.....	311
Figura A.11.98: foglio "1stLower". Freezer 304.....	311
Figura A.12.1: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, Figorifero 281.....	313
Figura A.12.2: istogramma di confronto. Versione 2, frigorifero 281.	314
Figura A.12.3: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, frigorifero 244.....	315
Figura A.12.4: istogramma di confronto. Versione 2, frigorifero 244	316
Figura A.12.5: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, frigorifero Tall.	317
Figura A.12.6: istogramma di confronto. Versione 2, frigorifero Tall.....	318
Figura A.12.7: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, frigorifero sbs.....	319
Figura A.12.8: istogramma di confronto. Versione 2, frigorifero sbs.	320
Figura A.12.9: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, freezer sbs.....	321
Figura A.12.10: istogramma di confronto. Versione 2, freezer sbs.	322
Figura A.12.11: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, freezer doppia cella.	323
Figura A.12.12: istogramma di confronto. Versione 2, freezer doppia cella.....	324
Figura A.12.13: confronto coi dati Whirlpool. Versione 2, freezer 304.....	325
Figura A.12.14: istogramma di confronto. Versione 2, freezer 304.	326

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1: confronto tra i diversi tipi di lampade	32
Tabella 1.2: valutazione software di simulazione. Scala di valutazione 0-100, con 100=caso ideale.....	39
Tabella 4.1: misure celle frigorifero/freezer termoformate singolarmente.....	77
Tabella 4.2: misure celle freezer termoformate contemporaneamente.....	78
Tabella 4.3: confronto coi dati Whirlpool. Celle termoformate singolarmente, versione 1.....	93
Tabella 4.4: input della versione 1 per il freezer doppia cella	94
Tabella 4.5: input della versione 1 per il freezer 304.....	95
Tabella 4.6: confronto coi dati Whirlpool. Celle termoformate singolarmente, versione 2.....	106
Tabella 4.7: input della versione 2 per il freezer doppia cella	107
Tabella 4.8: input della versione 2 per il freezer 304.....	109
Tabella 4.9: riassunto dei confronti coi dati Whirlpool.....	111

INDICE DELLE TABELLE IN APPENDICE

Tabella A.1.1: materiali amorfi usati in termoformatura.....	117
Tabella A.1.2: materiali semi-cristallini usati in termoformatura	119
Tabella A.9.1: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero 281	238
Tabella A.9.2: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero 244	240
Tabella A.9.3: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero Tall.....	242
Tabella A.9.4: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero sbs	244
Tabella A.9.5: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer sbs	246
Tabella A.9.6: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer doppia cella....	248
Tabella A.9.7: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer 304	250
Tabella A.12.1: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero 281.	314
Tabella A.12.2: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero 244.	316
Tabella A.12.3: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero Tall.....	318
Tabella A.12.4: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Frigorifero sbs.	320
Tabella A.12.5: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer sbs.	322
Tabella A.12.6: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer doppia cella..	324
Tabella A.12.7: percentuale di valori nei range ± 0.25 e ± 0.20 . Freezer 304.	326

ABSTRACT

Thermoforming is a technology that processes a thermoplastic sheet, which is two dimensional, to produce a three dimensional structure. The process consists on heating the thermoplastic sheet till is forming temperature, stretching it onto a male or into a female mould and then cooling and unloading the formed part. It's one of the oldest method of processing plastic material: ancient Egyptian produced food containers by heating and shaping keratin which is a component of tortoiseshell. Modern thermoforming was born between 1940s-1950s with the discovery and marketing of new thermoplastic materials. This technology seems to be easy whilst it is in fact quite sophisticated if excellent results are to be achieved. Thermoforming is still a process of craftsmanship and experience. The final result depends on operators' ability to find the better machine parameters: particular attention should be placed in the heating of the material. The heating system comprises from one to four heaters (upper and lower, first and second stage) formed by several heating elements (about one hundred per heater). The operator sets the percentage power of each heating elements in relation to the machine and the mould shape. This master thesis deals with the study and implementation of two original methods for automatically setting heating elements power. The two methods are based on operators' expertise and logical arguments. Their results have been validated with real data concerning refrigerator liners.

The content of this thesis has been divided into 5 chapters. In the first one there is an introduction about the process. Particular focus is placed upon the heating phase. The second chapter explains the problem of heating the sheet and proposes two possible solutions that have been translated into *matlab* programs (chapter 3). Chapter 4 introduces real data concerning refrigerator liners and there is a comparison between these data and the results of the two developed methods. In chapter 5 there are the conclusions of this work.

SOMMARIO

La termoformatura è uno dei processi più antichi per la deformazione del materiale plastico. Prima della nascita di Cristo, gli Egizi riscaldavano con olio bollente un componente del guscio delle tartarughe (la cheratina) per poi dargli la forma di un contenitore. Il processo di termoformatura consiste nel riscaldare opportunamente un foglio di materiale termoplastico per poi farlo aderire ad uno stampo. Apparentemente sembra un procedimento semplice ma in realtà è molto sofisticato se si vogliono raggiungere risultati eccellenti. La termoformatura moderna è nata circa 60 anni fa con la scoperta e conseguente diffusione dei materiali plastici. Da allora il processo è rimasto affidato ad operatori esperti che impostano i migliori parametri della macchina per ottenere dei risultati che rispettino le specifiche. Particolare attenzione è dedicata alla fase di riscaldamento del foglio iniziale. Questo avviene per irraggiamento attraverso dei piani di riscaldamento costituiti da più irradiatori, chiamati anche lampade (circa un centinaio su ogni piano). L'operatore definisce manualmente la percentuale di accensione di ciascun irradiatore in base alla forma dello stampo ed alla termoformatrice che sta utilizzando. Ad ogni pezzo si associa una mappa dei riscaldi in cui sono riassunte le percentuali di accensione di ciascuna lampada. Nel presente lavoro di tesi si è voluto cercare un metodo per produrre in modo automatico una prima mappa dei riscaldi con la quale l'operatore potesse iniziare ad effettuare le prove. Essa sarà un'indicazione iniziale e, molto probabilmente, dovrà essere opportunamente modificata in base al risultato finale. Si sono sviluppati due metodi, entrambi basati sull'esperienza degli operatori. I risultati ottenuti sono stati confrontati con mappe dei riscaldi effettivamente utilizzate in produzione relative a celle frigorifero/freezer.

Il contenuto di questo lavoro è stato suddiviso in 5 capitoli. Nel primo vi è un'introduzione al processo di termoformatura, particolare attenzione è dedicata alla fase di riscaldamento del materiale. Il secondo si concentra sul problema del riscaldamento del foglio iniziale e propone due metodi risolutivi. Il capitolo 3 riguarda la loro traduzione in programmi *matlab*. Nel quarto si introducono dati reali riguardanti celle frigorifero/freezer e si confrontano con i risultati dei metodi sviluppati. Il quinto capitolo è dedicato alle conclusioni.

Capitolo 1

La termoformatura

Il processo di termoformatura consiste nel deformare un foglio di materiale termoplastico, che può essere considerato a due dimensioni, per ottenere una struttura a tre dimensioni. Questo fu uno dei primi metodi per la lavorazione della plastica. Gli antichi Egizi riscaldavano con olio bollente un componente del guscio delle tartarughe (la cheratina) per poi dargli la forma di un contenitore.

Per formare il prodotto finale si riscalda opportunamente un foglio di plastica in modo da poterlo stirare e farlo aderire alla forma dello stampo. Successivamente si hanno il raffreddamento del pezzo e le operazioni di finitura che prevedono il taglio di parte del materiale. Rispetto ad altri processi di lavorazione del materiale polimerico, la termoformatura deve farsi carico dei costi aggiuntivi per ottenere il foglio iniziale e per recuperare il materiale tagliato. Nonostante questo in molte applicazioni come il mercato degli imballaggi o la produzione di prototipi, la termoformatura viene preferita rispetto agli altri possibili metodi soprattutto per i contenuti costi degli stampi. Essa ha anche altri ambiti di utilizzo come il mercato dell'automotive (sia per quanto riguarda le parti interne che per la carrozzeria esterna), quello di frigoriferi e freezer (sia per le celle che per le porte) e la produzione di giocattoli.

La nascita della termoformatura nell'accezione attuale, si può collocare attorno agli anni 1940-1950 quando le scoperte in campo chimico hanno portato alla commercializzazione di specifici materiali termoplastici. Nonostante si producano pezzi termoformati da più di 60 anni la maggior parte del processo rimane ancora affidata ad operatori esperti.

1.1 La tecnologia

In commercio esistono diversi modelli di termoformatrici che si distinguono principalmente per il numero e la posizione delle zone dedicate al riscaldamento del foglio rispetto alla zona dove avviene la deformazione del materiale. In particolare per lotti di produzione ridotti, 20-30 pz/h, tutte le operazioni vengono eseguite in un'unica zona (macchina monostazione), il carico del foglio e lo scarico del pezzo termoformato sono affidati ad un operatore. Per produzioni medio-alte, 50-60 pz/h, le operazioni necessarie alla termoformatura vengono

suddivise in più stazioni e il carico/scarico del materiale è automatizzato (macchine in linea). Il tempo di ciclo dipende principalmente dal tempo di riscaldamento nelle monostazioni e da quello di formatura e raffreddamento nelle macchine in linea. Il sistema di riscaldamento del foglio comprende da uno a quattro piani di riscaldo dotati di diversi irradiator, chiamati anche lampade, che possono essere gestiti in modo indipendente uno dall'altro.

1.1.1 Le monostazioni

Le operazioni necessarie a termoformare un pezzo vengono rappresentate in modo schematico in Figura 1.1.

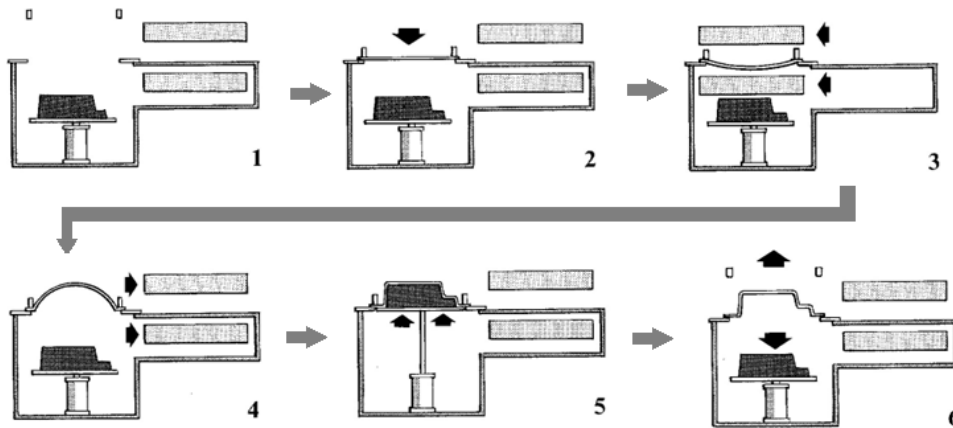


Figura 1.1: fasi del processo di termoformatura. Macchina monostazione

Di seguito si riporta la descrizione dettagliata delle fasi di carico del materiale, riscaldamento del foglio di plastica, formatura del pezzo, raffreddamento e scarico del prodotto finale in una macchina monostazione.

- 1. Posizionamento manuale del foglio di plastica da parte dell'operatore**
 Il piano su cui bisogna appoggiare il foglio è dotato di un foro con la stessa forma del profilo dello stampo e leggermente più grande di esso.
- 2. L'operatore avvia il processo automatico schiacciando il pulsante di start**
 Il foglio viene mantenuto in posizione attraverso una cornice avente lo stesso profilo dello stampo (il premilastra).
- 3. Avanzamento dei piani di riscaldamento e riscaldamento del foglio**
 Tutte le termoformatrici sono dotate di un terminale da dove si possono impostare i livelli di riscaldamento di ciascuna lampada. Nelle

monostazioni quando i piani di riscaldamento si trovano in posizione di riposo (durante il carico e scarico del materiale e la formatura del pezzo), le lampade rimangono accese ad una potenza inferiore a quella impostata. Mentre durante la fase di riscaldamento vera e propria che comprende l'avanzamento e l'arretramento dei piani, le lampade si trovano alla potenza impostata, via terminale, dall'operatore.

4. **Pre-stiramento del materiale (pallone)**

I piani di riscaldamento tornano nella posizione di riposo e soffiando dell'aria o attraverso una campana di vuoto, si pre-stira il materiale facendogli assumere una forma a cupola (il pallone). Se lo stampo è maschio il pallone raggiunge un'altezza pari a circa 2/3 dell'altezza massima del pezzo finale mentre per stampi femmina l'altezza del pallone è molto ridotta. In tutti i casi l'altezza del pallone può essere controllata sia attraverso l'uso di una fotocellula che impostando il tempo per gonfiare il foglio (circa 0.5-1 secondo).

5. **Formatura del pezzo**

Lo stampo viene portato verso l'alto e il foglio di plastica va ad assumere la forma finale del pezzo. All'interno dello stampo si va ad impostare una pressione minore rispetto a quella atmosferica. Il materiale si va ad adagiare sullo stampo per mezzo di piccoli forellini posti sulla sua superficie. In termoformatura è praticamente impossibile ottenere pezzi con spessore uniforme, per questo bisogna sempre considerare che solo la parte a diretto contatto con lo stampo va ad assumere la forma desiderata. A seconda dell'uso che si farà del pezzo si sceglie se utilizzare stampi maschi o femmina. In generale questi ultimi hanno meno problemi nella fase di distacco.

6. **Raffreddamento del materiale e distacco dello stampo**

Di solito si utilizzano dei ventilatori ed anche lo stampo è termoregolato. Questo, durante la fase di formatura, viene portato a circa 80-90°C per evitare il congelamento e la conseguente rottura del foglio quando entra in contatto con esso. In fase di distacco invece, lo stampo viene raffreddato attraverso circuiti d'aria o d'acqua.

Per creare zone in sottosquadro lo stampo viene dotato di inserzioni mobili che si ritirano nella fase di distacco del materiale. Negli stampi maschi si possono avere le parti più esterne mobili in modo da spingere il materiale verso l'alto permettendone il distacco.

Una volta che lo stampo torna nella sua posizione di riposo sotto al piano di riscaldamento inferiore si ha lo scarico manuale del pezzo.

1.1.2 Le macchine in linea

Sono quelle più diffuse sul mercato perché riescono a soddisfare maggiormente la domanda. Le fasi di riscaldamento e formatura del pezzo possono essere suddivise in due o tre stazioni differenti. Nelle prime vi è una zona dedicata al preriscaldamento del materiale ed una al riscaldamento finale ed alla formatura del pezzo. Nelle seconde vi è una zona di preriscaldamento, una di riscaldamento ed un'altra dedicata allo stampo. In quest'ultime, durante la produzione, i piani di riscaldamento rimangono fissi ed è il foglio ad avanzare. Il carico del materiale e lo scarico del pezzo termoformato avviene in modo automatico. Successivamente si hanno delle stazioni dedicate al taglio del materiale superfluo.

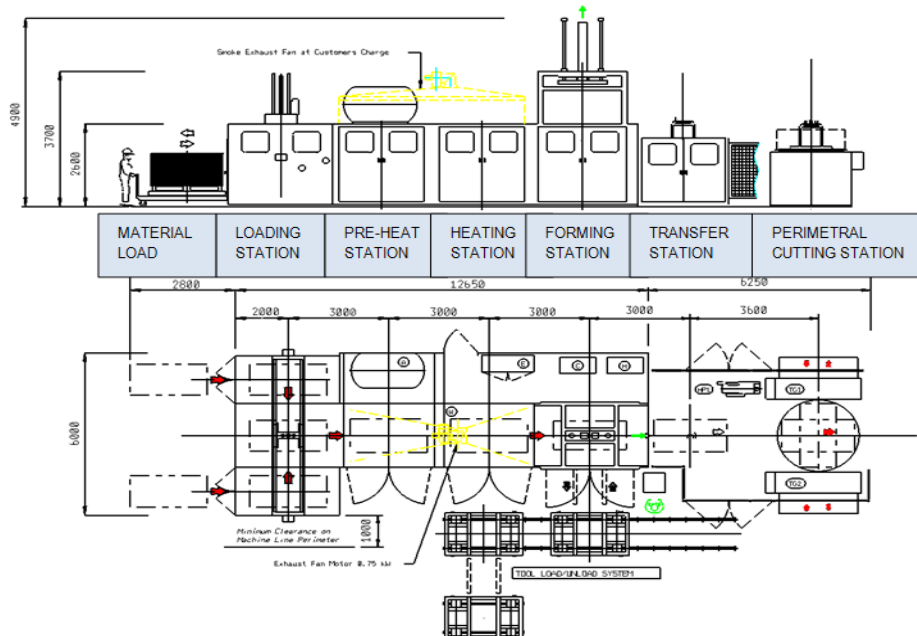


Figura 1.2: fasi del processo di termoformatura. Macchine in linea.

L'utilizzo di una macchina in linea rispetto ad una monostazione può ridurre il tempo di produzione fino al 50%. Per qualsiasi modello di macchina il numero di pezzi prodotti in un'ora dipende principalmente dal materiale utilizzato e dal suo spessore.

1.2 I materiali

I materiali termoplastici possono essere suddivisi in due grandi categorie:

- **Amorfi:** la catena molecolare ha una struttura caotica che non viene modificata durante la termoformatura.
- **Semi-cristallini:** esistono delle parti di catena molecolare allineate tra loro.

Le differenze nella struttura molecolare si notano soprattutto nelle fasi di riscaldamento e raffreddamento del materiale.

1.2.1 I materiali termoplastici amorfi

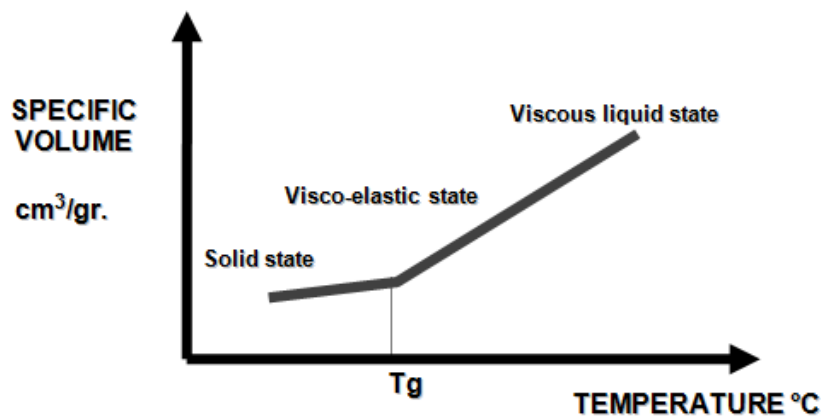


Figura 1.3: materiale amorfo [Fra05]

A basse temperature sono solidi e rigidi con tendenza alla fragilità. Dato che la struttura molecolare è caotica le forze di interazione tra le molecole sono molto intense. All'aumentare della temperatura queste forze si indeboliscono e il materiale diventa gommoso. Un ulteriore aumento della temperatura porta il materiale ad una condizione semi-fluida, stato visco-elastico, in cui può essere deformato. Le forze intra-molecolari tendono a riportare il materiale nella sua struttura originale, per cui dopo la deformazione si ha sempre del ritiro che per questo tipo di materiali è molto ridotto (attorno allo 0.5%). La temperatura che suddivide lo stato vetroso da quello gommoso viene chiamata "temperatura di transizione vetrosa" (Tg). Aumentando ancora la temperatura si raggiunge lo stato liquido (temperatura di fusione Tm). Un materiale viene termoformato quando si trova nel suo stato visco-elastico poco prima della sua temperatura di fusione. I materiali amorfi sono più facili da termoformare rispetto a quelli semi-cristallini perché hanno un maggior range di temperature adatte per la termoformatura.

1.2.2 I materiali termoplastici semicristallini

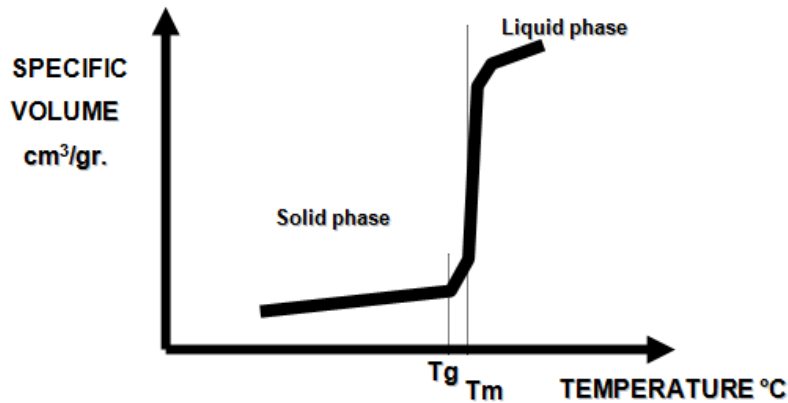


Figura 1.4: materiale semi-cristallino [Fra05]

A basse temperature sono solidi e rigidi con tendenza alla fragilità, come i materiali amorfi. Aumentando la temperatura si entra nello stato visco-elastico però il range di temperatura che interessa questo stadio è molto ridotto. Per questo motivo durante la termoformatura è necessario porre attenzione a non entrare nello stato liquido. Nell'utilizzare questo tipo di materiali bisogna considerare che il ritiro dopo la deformazione è di circa il 2%.

Nell'appendice 1 si trova un elenco con i principali materiali termoplastici utilizzati in termoformatura e le loro applicazioni tipiche. In questo lavoro di tesi si sono considerati fogli di polistirene, più comunemente chiamato polistirolo, che è un materiale termoplastico amorfo con un range di temperatura di formatura compreso tra i 130 e i 180°C. Al suo stato naturale è trasparente anche se può essere facilmente colorato. È resistente all'acqua, alle soluzioni alcaline agli acidi organici e in buona misura anche agli alcol. Può essere attaccato dai solventi organici come la gasolina, da solventi aromatici come il benzene e il toluene e anche dall'acetone e dal cloroformio. Viene utilizzato sia per imballaggi sia per la produzione di contenitori, giocattoli e frigoriferi.

1.3 Il riscaldamento del foglio di plastica

Il processo di termoformatura richiede di portare un foglio di materiale plastico alla sua temperatura di formatura per poi fargli assumere la forma dello stampo.

Un corpo può essere riscaldato per conduzione, convezione, irraggiamento. Il riscaldamento che porta il foglio di plastica alla temperatura di formatura avviene per irraggiamento. Gli altri due metodi vengono sfruttati solo nei casi in cui è necessario pre-riscaldare il materiale ed asciugarlo dall'umidità.

1.3.1 L'irraggiamento

Il calore di un corpo è direttamente legato all'agitazione delle molecole che lo costituiscono. Apportando energia si aumenta l'agitazione delle sue particelle e conseguentemente la sua temperatura.

La trasmissione di calore per irraggiamento viene descritta da tre leggi fisiche: legge di Stefan-Boltzman, legge di Plank, legge di Wien.

Legge di Stefan-Boltzman: fornisce la potenza totale emessa da un corpo.

$$\text{potenza emessa [W]: } \varphi = \varepsilon \sigma A T^4$$

φ : potenza emessa in W

ε : emissività

A : superficie dell'emettitore in m²

σ : costante di Stefan-Boltzman $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

T: temperatura dell'emettitore in Kelvin

L'emissività è sempre compresa tra 0 (corpo idealmente bianco) e 1 (corpo idealmente nero). Un corpo si definisce nero quando assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e bianco quando la riflette completamente. I corpi hanno un determinato colore perchè riflettono parte della radiazione incidente.

È da notare che la potenza emessa dipende dalla quarta potenza della temperatura.

Legge di Plank: fornisce la quantità di potenza emessa per una determinata lunghezza d'onda.

potenza emessa per una lunghezza d'onda λ determinata :

$$\lambda * \varphi = \varepsilon_{(\lambda, T_s)} * A * \frac{c_1}{\lambda^5 * (e^{c_2/\lambda T_s} - 1)} \quad [W \cdot m]$$

λ : lunghezza d'onda in μm

φ : potenza emessa in W

$\varepsilon_{(\lambda, T_s)}$: emissività

A: superficie dell'emettitore in m^2

T_s : temperatura della sorgente in Kelvin

C_1 : costante empirica $3.74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$

C_2 : costante empirica $14.4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

L'emissività dei corpi reali è dipendente dalla loro temperatura e dalla lunghezza d'onda considerata. Nella legge di Stefan-Boltzmann si utilizza un valor medio calcolato alla temperatura di riferimento di 300K. La distribuzione dell'energia emessa da un corpo nero per diverse lunghezze d'onda ed al variare della sua temperatura è presentata in Figura 1.5.

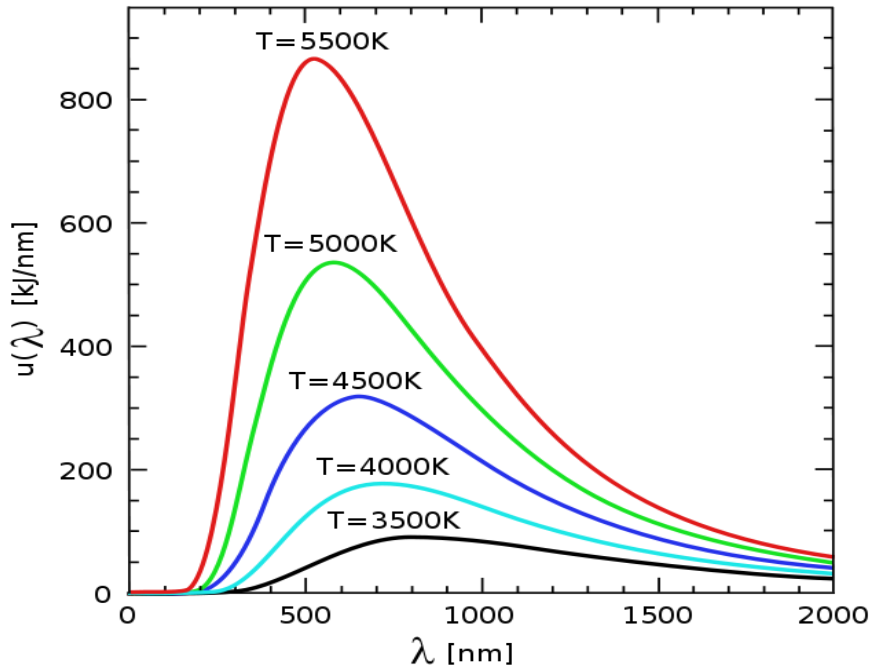


Figura 1.5: potenza emessa dal corpo nero

Legge di Wien: stabilisce la lunghezza d'onda per cui si ha il massimo di radiazione emessa.

$$\lambda_m = \frac{c}{T}$$

T : temperatura della sorgente in Kelvin

c : costante di Wien 2898 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$

λ_m : lunghezza d'onda per cui si ha il massimo di energia emessa (μm)

È da notare che all'aumentare della temperatura della sorgente diminuisce la lunghezza d'onda per cui si ha il massimo di energia emessa.

Si è notato che per riscaldare un corpo per irraggiamento è bene investirlo con raggi infrarossi. Questi hanno una lunghezza d'onda tra i 0.73 e i 250 μm e si degradano in calore quando vengono assorbiti da un corpo.

In commercio esistono diversi tipi di irradiatori infrarossi e vengono classificati in onda corta, media e lunga, a seconda del massimo di lunghezza d'onda della loro potenza radiante:

- irradiatori ad onda corta: < 1,5 μm
- irradiatori ad onda media: 1,5-3 μm
- irradiatori ad onda lunga: > 3 μm

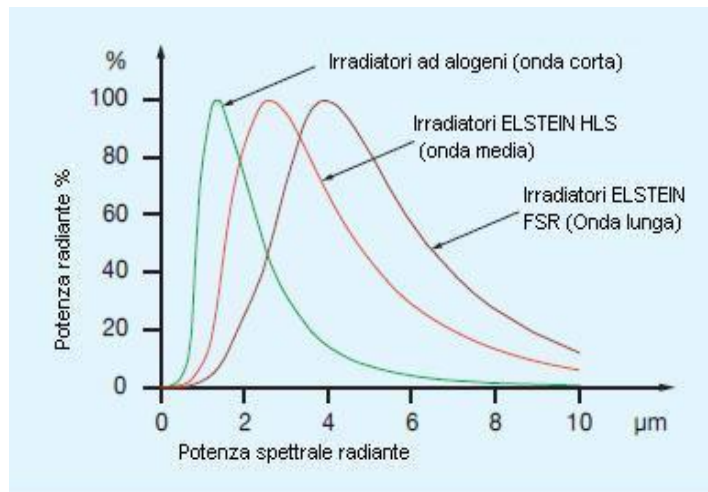


Figura 1.6: potenza irradiatori [ORB]

Secondo la legge di Wien più alta è la temperatura di emissione dell'irradiatore, più corta è la lunghezza d'onda della radiazione.

L'energia proveniente dagli irradiatorii viene assorbita solo in parte dal corpo che si vuole riscaldare, mentre parte viene riflessa o passa attraverso ad esso senza aumentarne l'agitazione molecolare. Ciascun materiale ha un suo spettro di assorbimento per cui la scelta del tipo di irradiatore dipende principalmente da ciò che si vuole riscaldare.

Nelle termoformatrici si utilizzano irradiatorii ad onda medio-lunga perché i materiali plastici hanno un massimo di assorbimento attorno ai $3\mu\text{m}$. In particolare vengono utilizzati irradiatorii ceramici, al quarzo o alogeni.

1.3.2 Gli irradiatorii ceramici



Figura 1.7: lampade ceramiche

Costruzione: un filamento resistivo viene annegato in una mescola ceramica che distribuisce la temperatura su tutta la superficie dell'irradiatore.

Caratteristiche principali:

- possibilità di distribuzione della irradiazione con grande uniformità
- lunghezza d'onda favorevole all'assorbimento da parte dei materiali plastici (2-10 μm)
- temperature di irradiazione relativamente basse
- inerzia termica relativamente alta
- robustezza e grande durata (il filamento resistivo non è a contatto con l'aria e quindi non subisce ossidazione nel tempo)

1.3.3 Gli irradiatorii al quarzo



Figura 1.8: lampade al quarzo

Costruzione: il filamento resistivo viene inserito in un tubo trasparente di quarzo (resistente alle alte temperature)

Caratteristiche principali:

- temperature di irradiazione relativamente alte
- inerzia termica bassa: la velocità di risposta permette l'applicazione o l'esclusione di un irradiatore in circa 15 secondi
- lunghezza d'onda corta (tuttavia è presente anche l'irradiazione secondaria del contenitore in quarzo che si scalda ed irradia con una lunghezza d'onda più lunga)
- svantaggi: fragilità, minore durata, impossibilità di montaggio in verticale

1.3.4 Gli irradiatorii alogeni



Figura 1.9: lampade alogene

Costruzione e caratteristiche principali

Per caratteristiche e costruzione sono simili a quelli al quarzo. Raggiungono temperature maggiori ed hanno una maggior velocità di accensione/spengimento (circa 5 secondi). Per questo motivo vengono preferiti per produzioni non a ciclo continuo.

La seguente tabella riporta dei parametri di confronto tra i diversi tipi di irradiator:

Tabella 1.1: confronto tra i diversi tipi di lampade [CAN]

	Ceramiche	Quarzo	Alogene
Costo	2	3	5
Velocità di risposta	3	4	5
Riscaldamento a zone	4	5	3
Vita	5	3	3
1=molto basso 2=basso 3=medio 4=alto 5=molto alto			

1.3.5 I piani di riscaldamento

Nelle termoformatrici il foglio di plastica viene riscaldato attraverso dei piani di riscaldamento costituiti da più irradiator (lampade) che possono essere gestiti in modo indipendente uno dall'altro. Attraverso il terminale della macchina l'operatore definisce la percentuale di accensione di ciascuna lampada a seconda del pezzo che si vuole termoformare.

Come evidenziato in Tabella 1.1 le lampade ceramiche sono più economiche e resistenti delle altre ma hanno un'alta inerzia termica per cui necessitano di più tempo per risentire dei cambiamenti di potenza selezionati via terminale dall'operatore. Le lampade al quarzo, al contrario, necessitano di soli 15 secondi per raggiungere la temperatura di esercizio desiderata mentre quelle alogene si accendono e si spengono in soli 5 secondi.

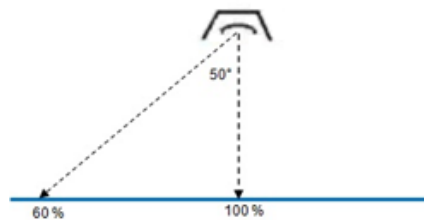


Figura 1.10: irradiatore singolo

Gli irradiator emettono onde in tutte le direzioni. Per concentrarle sul foglio che si vuole scaldare vengono aggiunti degli appositi riflettori. Nonostante la loro presenza ciascun irradiatore influenza anche zone del foglio molto lontane da esso. Tipicamente, la porzione di superficie ad un angolo di 50° rispetto all'asse verticale riceve il 60% dell'irradiazione emessa (si considera l'irradiazione sulla verticale pari al 100%).

I piani di riscaldamento sono costituiti da più irradiatorii leggermente distanziati uno dall'altro. Al fine di un riscaldamento uniforme del foglio di plastica, i costruttori di macchine, possono decidere di utilizzare disposizioni di lampade leggermente differenti per i piani di riscaldamento e preriscaldamento superiori e inferiori. Ad esempio sulla macchina in linea "Super Line New Generation" della COMI s.r.l. sia sul preriscaldamento che sul riscaldamento inferiore è stata eliminata la fila di lampade centrali rispetto al preriscaldamento e al riscaldamento superiore (vd. Appendice 2). In questo modo le lampade dei piani superiori e inferiori, nella direzione del lato corto, sono sfalsate tra loro.

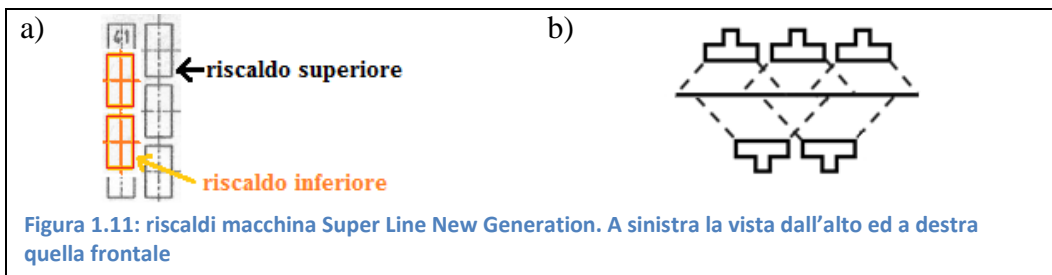


Figura 1.11: riscaldi macchina Super Line New Generation. A sinistra la vista dall'alto ed a destra quella frontale

Nel realizzare i piani di riscaldamento bisogna anche considerare la distanza tra il foglio di plastica e gli elementi riscaldanti e la naturale tendenza dell'aria calda ad andare verso l'alto. Di solito le lampade del riscaldamento superiore vengono mantenute ad una maggior potenza e più vicine al foglio rispetto a quelle del riscaldamento inferiore (tipicamente il piano superiore si trova a 200 mm dal piano del foglio mentre quello inferiore a 300 mm). Quando il materiale entra nel suo stato visco-elastico tende, per effetto della forza gravitazionale, ad incurvarsi verso il basso. Alcune macchine sono dotate di sistemi di "galleggiamento" del foglio che viene mantenuto in piano attraverso l'utilizzo di soffi d'aria. Gli operatori, dopo anni di esperienza in questo campo, riescono a impostare adeguatamente la potenza delle lampade in funzione del pezzo che si vuole ottenere, tenendo in considerazione tutto ciò che può essere influente ai fini del riscaldamento: temperatura dell'ambiente esterno, macchina e stampo utilizzati, presenza di elementi riscaldanti non funzionanti, etc. Quando ci si trova di fronte ad un nuovo materiale, bisogna porre particolare attenzione ad evitare che il foglio di plastica entri in contatto con le lampade del riscaldamento inferiore provocando il danneggiamento della macchina e l'emissione di fumi pericolosi per gli operatori.

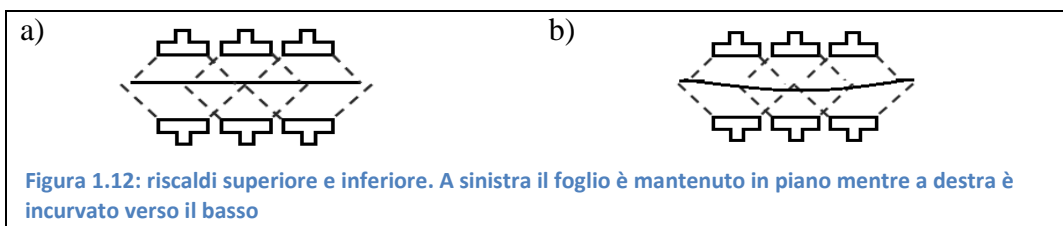


Figura 1.12: riscaldi superiore e inferiore. A sinistra il foglio è mantenuto in piano mentre a destra è incurvato verso il basso

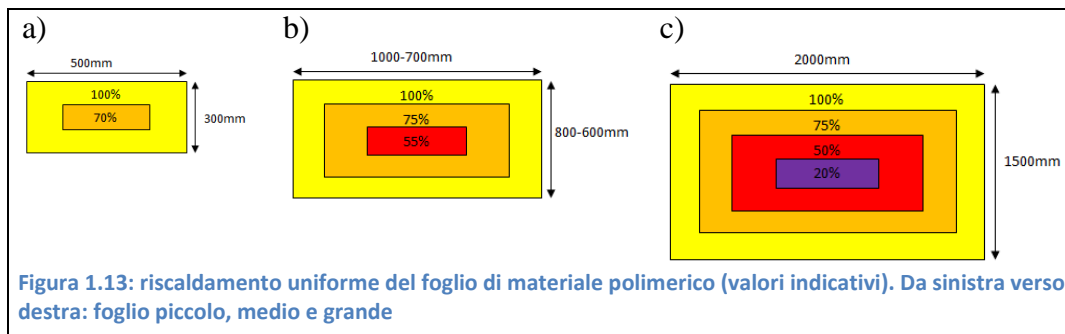
1.3.6 Riscaldamento uniforme del foglio di plastica

Prima di procedere alla produzione di pezzi termoformati è necessario conoscere la macchina per riuscire a riscaldare il foglio di plastica in modo uniforme. In generale le lampade più esterne vengono mantenute ad una maggior potenza rispetto a quelle centrali sia perché servono a creare una barriera di calore rispetto al mondo esterno sia perché ciascuna zona del foglio viene riscaldata dall'irradiatore posto direttamente sopra o sotto di essa e da tutti quelli attorno.

Oltre a questa considerazione generale è necessario distinguere le macchine monostazione da quelle in linea. Nelle prime il foglio viene riscaldato attraverso uno o due piani mobili. Questi avanzano dalla loro posizione di riposo, per mettersi in corrispondenza con il foglio, lo riscaldano fino ad un'opportuna temperatura e poi arretrano per ritornare alla loro posizione originale. Al fine di un riscaldamento uniforme è necessario tener conto di questo movimento. Le lampade dei riscaldi, durante l'avanzamento e l'arretramento dei piani, sono accese alla potenza impostata via terminale dall'operatore per cui la parte del foglio più vicina alla zona di riposo dei riscaldi viene interessata da essi per più tempo. Di solito l'operatore diminuisce la potenza delle lampade in corrispondenza con quest'ultima zona affinché il foglio sia investito da una quantità d'energia uniforme. Nelle macchine in linea, invece, è il foglio ad avanzare tra i piani di pre-riscaldamento e riscaldamento. Il suo movimento è molto rapido per cui può essere trascurato nell'impostare i livelli di accensione di ciascuna lampada.

In termoformatura si utilizzano sempre fogli rettangolari di materiale polimerico. Per portarli ad una temperatura uniforme bisogna tener presente le loro misure e la macchina con cui si sta lavorando. Se lo spessore dei fogli è inferiore ai 3 mm si può utilizzare solo il piano di riscaldamento superiore mentre per spessori maggiori è necessario anche il riscaldamento inferiore. È molto importante che sia la superficie che la parte centrale dei fogli raggiungano la temperatura di formatura per cui è necessario mantenerli tra i piani di riscaldamento per un tempo abbastanza lungo (decine di secondi-minuti).

Indicativamente, nelle macchine in linea, se si utilizzano fogli relativamente piccoli, approssimativamente di 500*300 mm, si accendono le lampade in corrispondenza con il bordo del pezzo al 100% mentre quelle più interne al 70%. Per fogli aventi una lunghezza compresa tra i 700 e i 1000 mm ed una larghezza tra i 600 e gli 800 mm si crea una cornice esterna al 100% una intermedia a circa il 70-80% mentre la zona centrale viene mantenuta al 50-55%. Per fogli molto grandi, con una lunghezza maggiore o uguale ai 2 m ed una larghezza maggiore o uguale a 1,5 m, si creano più cornici con quella esterna al 100% e la zona più interna al 15-20%.



Per la monostazione la percentuale di riduzione di potenza delle lampade più vicine alla zona di riposo dei riscaldi dipende dalla macchina utilizzata: tipo di lampade (ceramiche, al quarzo o alogene) e velocità di avanzamento ed arretramento dei piani.

Gli operatori, attraverso anni di esperienza, conoscono più o meno le percentuali di potenza da impostare per ottenere un foglio a temperatura uniforme. Le termoformatrici sono sempre dotate di un pirometro, di solito posizionato al centro del piano di riscaldamento superiore, che rileva la temperatura superficiale di un punto del foglio. Durante la produzione si può sia impostare il tempo di riscaldamento che fare riferimento al valore fornito dal pirometro. In quest'ultimo caso se dopo un certo tempo il pirometro non ha ancora raggiunto la temperatura richiesta, si ipotizza che sia rotto per cui si procede comunque con la fase di formatura. Durante le prove iniziali si potrebbe utilizzare una macchina termografica che rileva la temperatura superficiale del materiale e verificare che le cornici concentriche servano effettivamente ad ottenere un foglio a temperatura uniforme.

Quando bisogna termoformare pezzi dal profilo non rettangolare, ad esempio una vasca angolare, bisogna dotare la macchina di un premilastra e di un foro per lo stampo aventi lo stesso profilo del pezzo. Gli operatori impostano delle cornici concentriche di potenza che seguano, per quanto è possibile, la forma del contorno del pezzo.

Il foglio di partenza è sempre rettangolare per cui dopo la termoformatura viene tranciato il materiale non utilizzato.

1.3.7 Metodo tradizionale per impostare la mappa dei riscaldi

Attualmente l'impostazione delle percentuali di potenza di accensione delle lampade dei riscaldi è affidata completamente ad operatori esperti. Questi, nel momento in cui si trovano di fronte ad un nuovo materiale o ad un nuovo stampo impostano una mappa iniziale dei riscaldi e formano un primo pezzo. Guardando il risultato ottenuto agiscono sui vari parametri che entrano in gioco durante il processo di termoformatura, potenza delle lampade, tempo di riscaldamento, altezza del pallone, ritardo di salita dello stampo, ritardo vuoto lento e rapido, ritardo discesa controstampo, tempo di raffreddamento, etc. per migliorare il prodotto finale. Quest'ultimo dipende dall'intero processo per cui sono necessarie diverse prove per capire quali siano i parametri migliori. Durante le prime prove particolare attenzione è dedicata all'impostazione della potenza delle lampade dei riscaldi. La regola principale da seguire è quella di tenere più fredde le zone dove vi è poco materiale e più calde quelle dove ve ne è molto. Le prime risultano essere più sollecitate dal punto di vista meccanico mentre nelle seconde è richiesta una minor deformazione. Un riscaldamento non uniforme porta a far migrare il materiale dalle zone più calde a quelle più fredde. Una volta formato il pezzo si osserva lo spessore delle pareti, la presenza o meno di pieghe e quanto si è riusciti ad avvicinarsi alla forma dello stampo. Cambiando la potenza di alcune lampade si può cercare di ottenere risultati migliori. Con la termoformatura si hanno stiramenti molto elevati, in alcune zone anche superiori al 400%. La situazione ideale sarebbe quella di avere uno stiramento uniforme che porta ad avere pareti di ugual spessore.

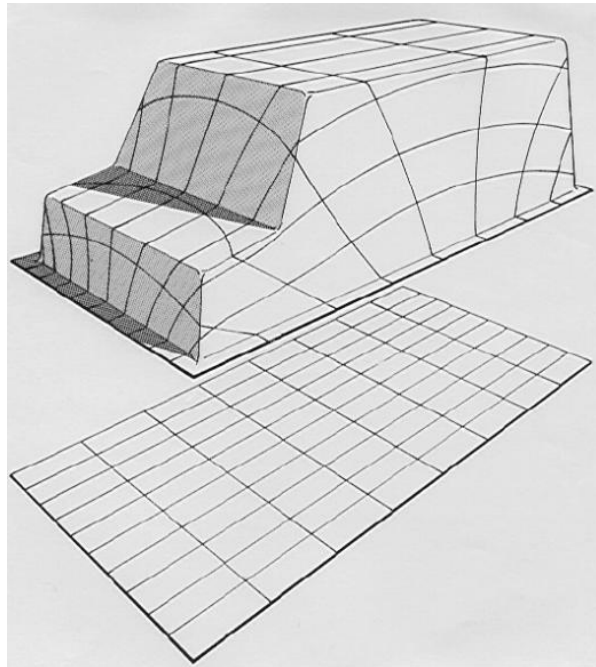


Figura 1.14: quadrettatura

In realtà non si giunge mai a questo risultato anche nel caso in cui si utilizzano simulatori del processo creati appositamente per stimare lo spessore finale del foglio deformato. Per capire l'entità degli stiramenti delle diverse zone e come questi siano collegati alla percentuale di accensione di ciascuna lampada, prima di procedere alla formatura del pezzo si disegna sul foglio iniziale la disposizione degli irradiatori del riscaldamento superiore. Se questi si rappresentano con dei rettangoli di uguale dimensione, la condizione ideale sarebbe quella di ottenere dei rettangoli deformati di uguale superficie. Ciò che avviene nella realtà è che le pareti verticali vengono più sollecitate dal punto di vista meccanico per cui la loro deformazione risulta essere molto maggiore rispetto a quella delle zone orizzontali. Sul foglio viene disegnato il riscaldamento superiore e non quello inferiore perché è quello su cui gli operatori agiscono maggiormente. Sul riscaldamento inferiore si cerca di seguire, per quanto è possibile, la percentuale di potenza del riscaldamento superiore. In alcune macchine le lampade del riscaldamento inferiore hanno un'area doppia rispetto a quelle del riscaldamento superiore e ciò non consente di lavorare in modo molto localizzato.

1.4 I simulatori

La termoformatura, pur essendo nata più di 60 anni fa, continua ad affidarsi principalmente all'esperienza degli operatori. Il motivo principale è che durante il processo di termoformatura entrano in gioco moltissimi fattori difficili da inserire in un modello. Attualmente esistono simulatori che riescono a modellizzare abbastanza bene l'intero processo e, in particolar modo, il comportamento dei più comuni materiali polimerici quando si trovano nel loro stato visco-elastico [Bha99, Xu99, SP12, Tho06, Dee09].

Lo sviluppo di questi simulatori è iniziato circa una ventina di anni fa. Il loro utilizzo, però, non è ancora molto diffuso tra coloro che producono pezzi termoformati. Dagli incontri con gli operatori del settore (Whirlpool®, Atlant®, CANNON) sono scaturite delle considerazioni piuttosto negative riguardo a questi software. Il problema principale risiede nella scarsa affidabilità dei risultati: spesso le previsioni date dai modelli sono discordanti dalla realtà. Alcune particolarità delle macchine, degli stampi e l'influenza di variabili esogene possono incidere molto sulla realizzazione dei pezzi ma non vengono tenute in conto dai simulatori. Per quanto riguarda l'influenza dell'ambiente circostante, le aziende Whirlpool® e Atlant® che utilizzano la termoformatura per produrre frigoriferi e freezer, riferiscono che bisogna porre particolare attenzione alla collocazione della termoformatrice all'interno dei capannoni industriali. La presenza di altre macchine o di correnti d'aria non continue può

portare a dover riconfigurare la linea di produzione. Nel caso in cui una termoformatrice venga investita solo in parte da una corrente continua di aria fredda si potrebbe risolvere il problema aumentando la potenza delle lampade da essa interessate. Riguardo gli stampi, il riscaldamento del foglio iniziale è legato ad essi e, conseguentemente, anche ai loro difetti. Tutte le imperfezioni presenti nelle macchine e negli stampi non sono considerate all'interno dei modelli dei simulatori. Le aziende che producono pezzi termoformati con forme simili ad altri già esistenti (caso dei frigoriferi), preferiscono affidarsi all'esperienza dei propri operatori per il settaggio dei parametri della macchina. Questo porta sicuramente alla produzione iniziale di pezzi di scarto, che comunque non verrebbero eliminati completamente dall'utilizzo dei simulatori.

In commercio esistono simulatori che riproducono il processo ed aiutano nell'impostazione dei vari parametri. Questi vengono sfruttati soprattutto dalle grandi aziende come BOEING, Mitsubishi, BMW, etc. per ottenere risultati di grande qualità quando devono realizzare pezzi dalle forme completamente nuove.

Tra i vari simulatori quello che ad oggi è considerato come il più completo ed affidabile è della Accuform e si chiama T-sim. La Accuform è specializzata sia nella modellizzazione del processo di termoformatura (T-sim) che di quello del soffiaggio (B-sim). Per la termoformatura si affida a 11 compagnie europee specializzate nel campo, mentre per il soffiaggio coopera con la fondazione tedesca del dottor Reinold Hagen [ACC].

1.4.1 T-SIM: Computer simulation of thermoforming

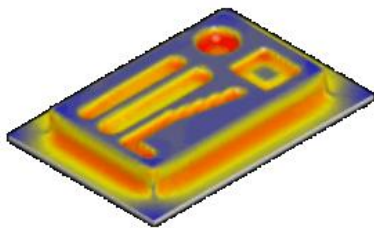


Figura 1.15: simulazione spessore finale delle pareti

T-SIM è un software che simula il processo di termoformatura predicendo lo spessore finale delle pareti del pezzo. Si basa su specifici parametri del processo come la distribuzione di temperatura del foglio, la pressione utilizzata, la velocità di salita e la temperatura dello stampo, etc. Il software contiene un database con i materiali più comuni utilizzati in termoformatura (PP, PE, PET, PC, etc.) e permette di importare, da altri programmi, i disegni degli stampi e di gestirne opportunamente le parti mobili. Questo viene utilizzato per progettare adeguatamente lo stampo in modo da ottenere il miglior risultato. È un software completo che considera sia stampi concavi che convessi e la presenza o meno di controstampi. Nella simulazione

del processo tiene anche conto dell'attrito tra il materiale termoplastico, lo stampo e il controstampo. La distribuzione finale di materiale viene evidenziata da immagini del pezzo con differente colorazione. Si hanno anche immagini a colori relative alla distribuzione di temperatura, di sforzo e di stiramento.

Anche gli altri software di simulazione cercano di riprodurre l'intero processo per avere una predizione dello spessore finale delle pareti [Don05]. Il loro principale vantaggio è che non richiedono l'utilizzo della termoformatrice e la realizzazione effettiva dello stampo.

Attraverso la simulazione si arriva ad avere il miglior progetto dello stampo con cui si può ottenere il pezzo desiderato. Per questo motivo vengono sfruttati per produrre forme completamente nuove. Quando non si utilizzano questi software si hanno spesso discussioni tra disegnatori/progettisti di stampi e realizzatori. Non avendo un riscontro con la realtà ognuno cerca di portare avanti la propria opinione e spesso si rende necessario apportare delle modifiche agli stampi dopo la loro realizzazione [Kni99].

La Tabella 1.2 è una valutazione dei più comuni software di simulazione presentata dalla società ThermoSIM al European Thermoforming Conference dell'SPE (Society of Plastic Engineers) del 2006 a Salisburgo.

Tabella 1.2: valutazione software di simulazione. Scala di valutazione 0-100, con 100=caso ideale

	T-SIM (Accuform)	Pam-Form	T-Form 3 (Transvalor)	PlyFlow	T-Form CAD (Polydynamic)
usability	32	30	18	33	26
service support and help	28	28	16	29	15
cost	30	22	6	22	8
sw	62	63	20	67	48
technical	15	15	15	14	15
quality of results	13	12	9	14	8

Questi software di simulazione stanno riscontrando successo in ambito didattico. In Francia, licei professionali specializzati nella lavorazione delle materie plastiche utilizzano T-sim per introdurre i propri allievi nel mondo della

termoformatura [NS11, NS12_2]. Tra le aziende, l'uso dei simulatori è diffuso soprattutto tra coloro che devono produrre alcuni componenti delle automobili. La Hercé Plasturgie che è una azienda a cui fanno riferimento molte case automobilistiche riferisce che l'uso dei simulatori ha portato a migliorare i rapporti con i clienti e a ridurre i tempi di produzione [NS12_1].

Attualmente vi sono dei gruppi di ricerca focalizzati a caratterizzare meglio i materiali termoplastici. In particolare in Francia vi è il laboratorio PLASTBASE, in Germania l'institute of plastic processing (IKV) della technical University of Aachen (RWTH) e la compagnia SKZ di Würzburg ed in Nord America l'University of Massachusetts (UMASS Amherst). Nell'ambito della termoformatura la conoscenza del materiale è importante per poter prevedere il suo comportamento.

Capitolo 2

Il problema

Molte aziende che producono pezzi termoformati si affidano esclusivamente all'esperienza dei propri operatori perché i software di simulazione sono, ad oggi, costosi e poco affidabili. L'azienda Forma s.r.l. del gruppo CANNON che produce e vende macchine termoformatrici ha pensato di poter creare un metodo, basato sull'esperienza degli operatori, per ottenere in modo automatico le mappe dei riscaldi. Il presente lavoro di tesi scaturisce dall'idea di questa azienda che in questo modo potrebbe dare un valore aggiunto alle sue macchine. Le termoformatrici della Forma s.r.l. vengono vendute a clienti che producono oggetti con forme anche molto differenti. Per questo motivo non si è voluto specializzare il metodo su un'unica tipologia di prodotto ma si è posta attenzione all'individuazione di regole generali per la creazione di un'iniziale mappa dei riscaldi, che potrà essere anche molto differente da quella finale. La presenza dell'operatore è quindi fondamentale sia per l'individuazione del metodo che per il suo utilizzo. Non si è voluto né creare un nuovo simulatore né portare miglioramenti a quelli già esistenti ma, si è cercato un nuovo approccio basato sulla realtà lavorativa. La forza di questo metodo si basa principalmente sulla sua semplicità di comprensione da parte degli operatori che si trovano in difficoltà ad utilizzare i simulatori descritti nel capitolo precedente perché troppo astratti e lontani dal loro modo di pensare. Il prodotto finale del processo di termoformatura dipende da moltissimi parametri (mappa dei riscaldi, tempo di riscaldamento, altezza del pallone, ritardo salita dello stampo, ritardo vuoto lento e rapido, etc.) impostati dagli operatori in base alla loro esperienza. Si è posta particolare attenzione alla parte di riscaldamento del foglio perché corrisponde con la fase iniziale del processo. Sul terminale delle termoformatrici vi è una pagina dove si può impostare la percentuale di potenza con cui deve essere accesa ciascuna lampada. In particolare viene riprodotta la stessa disposizione di lampade presente sui piani di riscaldamento e preriscaldamento superiore e inferiore e segnalata la dimensione del foglio. L'operatore modifica manualmente i valori di potenza di ciascuna lampada in base al pezzo che vuole produrre ed alla macchina che sta utilizzando.

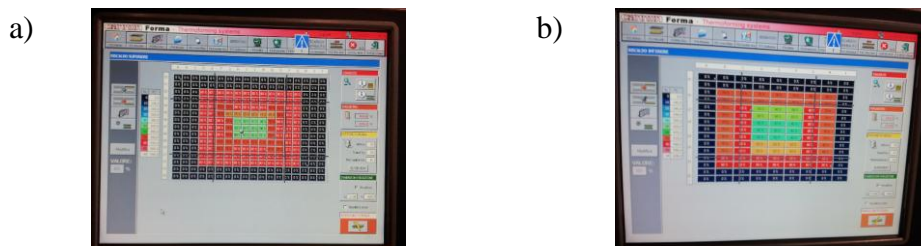


Figura 3.1: terminale della termoformatrice. A sinistra il piano di riscaldamento superiore e a destra quello inferiore

2.1 L'approccio risolutivo

L'obiettivo finale di interesse per l'azienda era quello di realizzare un prototipo che in base alla forma dell'oggetto finale potesse fornire in modo automatico un'iniziale mappa dei riscaldi. La risoluzione di questo problema ha previsto: la conoscenza del processo, la raccolta sul campo delle informazioni più importanti (in particolare quelle riguardanti la parte di riscaldamento del foglio di materiale polimerico) e l'analisi di alcune mappe dei riscaldi in relazione con il pezzo a cui erano associate. Dopo aver pensato ad un possibile metodo risolutivo si è affrontato il problema della sua traduzione in un programma che potesse essere installato nel controllo numerico delle termoformatrici. La raccolta delle informazioni sul campo, è stata subordinata alle esigenze aziendali. Si sono avute delle mappe dei riscaldi, utilizzate in produzione, riguardanti celle frigorifero o freezer. Queste sono state fornite dalla sede di Cassinetta di Biandronno (VA) della Whirlpool®. Al fine di ottenere un metodo che potesse andare bene per qualsiasi tipo di oggetto si è chiesto a diversi operatori quale fosse il loro approccio iniziale per l'impostazione delle mappe dei riscaldi. I dati forniti dalla Whirlpool® sono stati utilizzati per apportare piccole migliorie al metodo e per validare i risultati. Naturalmente alcuni parametri sono direttamente legati al materiale da formare, ma in fase di studio preliminare ci si è concentrati solo su una tipologia di polimero con spessore lastra maggiore di 1,5 mm per applicazioni industriali non riguardanti l'imballaggio.

In particolare le celle frigorifero/freezer della Whirlpool® sono realizzate con fogli di polistirolo di spessore tra 3.8 e 4.1 mm, per cui sono stati trovati dei valori indicativi per questi casi.

2.2 L'acquisizione delle informazioni

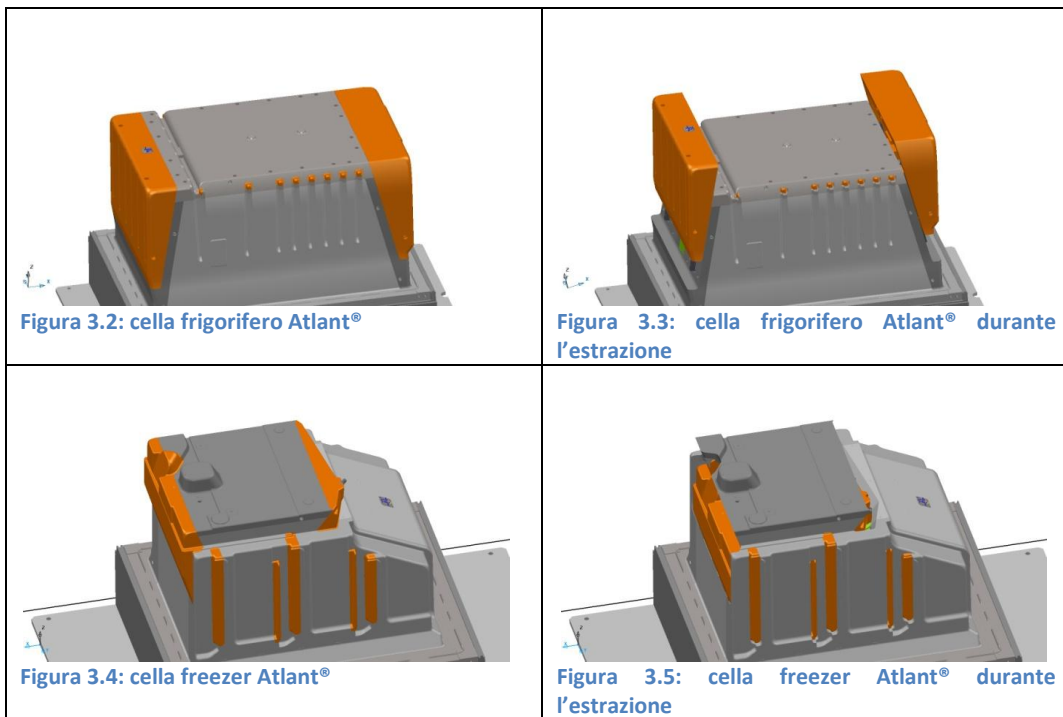
In questa fase sono stati intervistati degli operatori dell'azienda Forma s.r.l. del gruppo CANNON, specializzati nella parte di riscaldamento del foglio e si è assistito a delle prove iniziali eseguite su una termoformatrice.

2.2.1 Le prove iniziali

Queste fanno riferimento ad una cella frigorifero e una freezer termoformate su una macchina monostazione. Se la macchina è grande rispetto a ciò che si vuole produrre si possono termoformare più pezzi contemporaneamente e provvedere a separarli in un momento successivo. Nelle prove a cui si è assistito vi erano

due stampi distinti (uno per il frigorifero e l'altro per il freezer) per cui si è posta particolare attenzione alla produzione di un pezzo singolo.

I disegni degli stampi delle celle sono rappresentati nelle figure da 2.2 a 2.5. Nell'appendice 3 vi sono i disegni delle celle che si vogliono ottenere.



Le parti in arancione fanno riferimento a zone mobili dello stampo. Queste vengono utilizzate per creare dei particolari sulle pareti delle celle e per permettere il distacco del materiale plastico. Il loro movimento deve essere sincronizzato con quello di salita e discesa dello stampo.

L'operatore ha iniziato ad eseguire delle prove sulla cella frigorifero per poi passare a quella freezer. Queste servono per verificare la validità degli stampi successivamente venduti al cliente Atlant® che ha provveduto a settare la sua macchina per produrre effettivamente i pezzi desiderati. All'anno si producono nel mondo più di 100 milioni di frigoriferi (la sola Whirlpool® produce in Europa circa 3 milioni di apparecchi). Questo è un numero abbastanza elevato che richiede l'utilizzo di macchine in linea anziché di monostazioni. Sicuramente il settaggio di una macchina in linea sarà differente da quello di una monostazione però i ragionamenti iniziali fatti dall'operatore per impostare una prima mappa dei riscaldi sono molto simili.

Quando gli operatori si trovano di fronte a celle frigorifero iniziano ad impostare una mappa dei riscaldi a zone concentriche di potenza. La parte centrale del

foglio si tiene più fredda delle altre per cercare di ottenere un pallone abbastanza squadrato. Se la parte centrale è troppo calda il foglio di plastica si gonfia assumendo una forma piramidale. Per questo motivo nel momento in cui si ha la salita dello stampo e l'aderenza del materiale su di esso, la parte orizzontale chiamata *cielo* della cella va ad assumere uno spessore molto inferiore a quello desiderato. Si è verificata la validità di questa affermazione ponendo tutte le lampade in corrispondenza con il foglio al 70% di potenza ed osservando la forma del pallone ed il risultato finale.

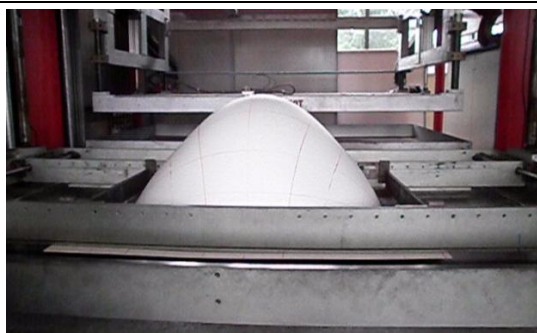


Figura 3.6: pallone

Il pallone è molto appuntito perché la parte centrale del foglio è molto calda.

L'operatore ha dovuto interrompere manualmente l'introduzione dell'aria, proveniente dal basso, che forma il pallone per evitare che questo diventasse eccessivamente alto.

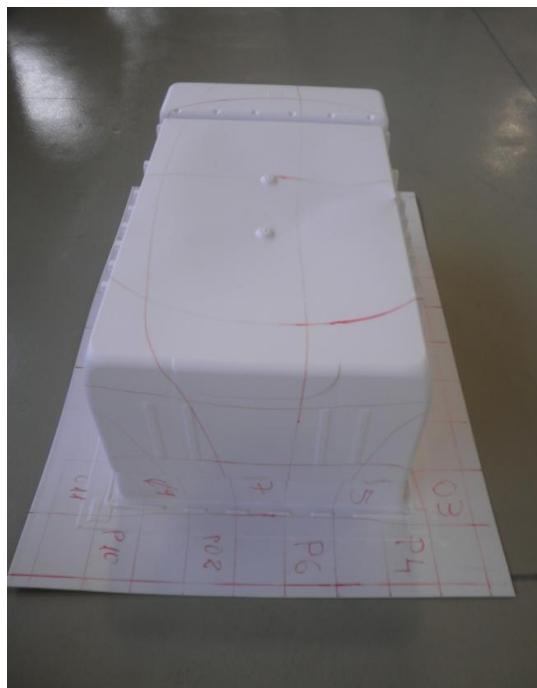


Figura 3.7: cella frigorifero

Sul foglio iniziale è stata disegnata la griglia del riscaldamento superiore che è costituito da lampade 100*125 mm. Dalla foto in Figura 3.7 si nota che la quadrettatura non è centrata rispetto al pezzo e che lo stiramento del materiale è molto maggiore sul cielo del frigorifero che sulle pareti verticali. Il primo problema è dovuto al fatto che la prova è stata fatta su una monostazione per cui la parte del foglio più vicina alla zona di riposo dei riscaldi viene interessata da essi per più tempo. Il secondo problema dipende dal fatto che impostando le lampade tutte alla stessa potenza, la zona centrale viene riscaldata maggiormente.

Idealmente i rettangoli corrispondenti alle lampade del riscaldamento dovrebbero avere la stessa area anche sul pezzo termoformato.

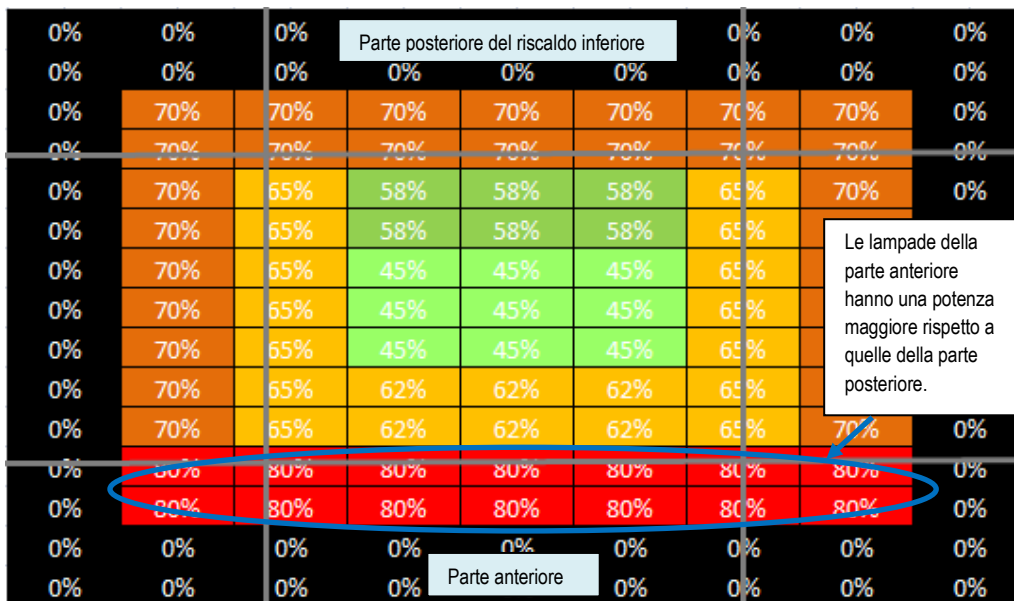


Figura 3.9: riscaldamento inferiore, frigorifero

Il frigorifero può essere considerato un parallelepipedo per cui i valori di potenza sono stati impostati simmetrici rispetto all’asse verticale passante per la lampada centrale. Se le prove fossero state fatte su una macchina in linea anziché su una monostazione probabilmente la mappa dei riscaldi sarebbe stata simmetrica anche rispetto all’asse orizzontale passante per la lampada centrale.

La mappa dei riscaldi presentata in Figura 3.8 e in Figura 3.9 ha prodotto un pezzo che si avvicina al risultato desiderato ma che presenta delle imperfezioni. In particolare il materiale in corrispondenza di alcuni spigoli si è ripiegato su se stesso.



Figura 3.10: piega del materiale

Le pieghe possono essere eliminate diminuendo la potenza delle lampade a cui sono sottoposte o utilizzando un controstampo. Data l’assenza del controstampo si è cercato di risolvere questo problema agendo sulla mappa dei riscaldi. Mantenendo più freddo il materiale in corrispondenza con la zona interessata non si è comunque riusciti a risolvere completamente il problema. Queste prove sono state fatte al fine di testare lo stampo per cui non si è continuato a modificare i

parametri per ottenere risultati migliori in tempi ridotti, ma ci si è accontentati di produrre un pezzo termoformato abbastanza simile a quello desiderato.

Si sono comunque eseguite una decina di prove dove la mappa dei riscaldi, a meno di un numero limitato di lampade, presentava la stessa struttura concentrica definita inizialmente. Un metodo generale basato sull'esperienza degli operatori deve tener in considerazione queste cornici concentriche di potenza. In particolare sarà necessario risolvere il problema di come generarle in modo automatico.

PROVE RELATIVE ALLA CELLA FREEZER

È stata fatta una prima prova con la stessa mappa dei riscaldi utilizzata per il frigorifero per poi procedere ad alcune modifiche. Queste hanno riguardato la zona dei quattro spigoli inferiori dove il materiale tendeva a piegarsi su se stesso. Come si nota Figura 3.11 è stata diminuita la potenza delle lampade interessate.

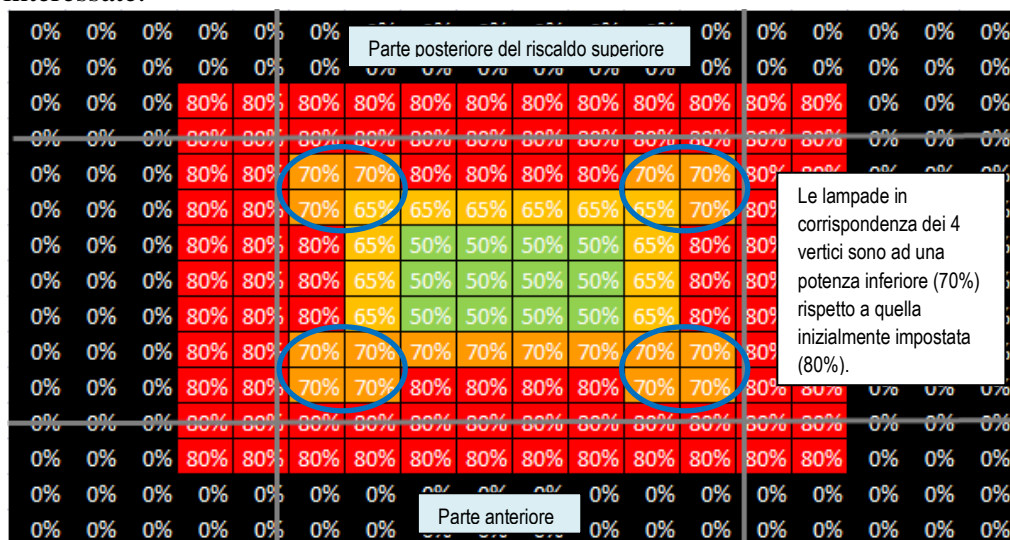


Figura 3.11: riscaldamento superiore, freezer

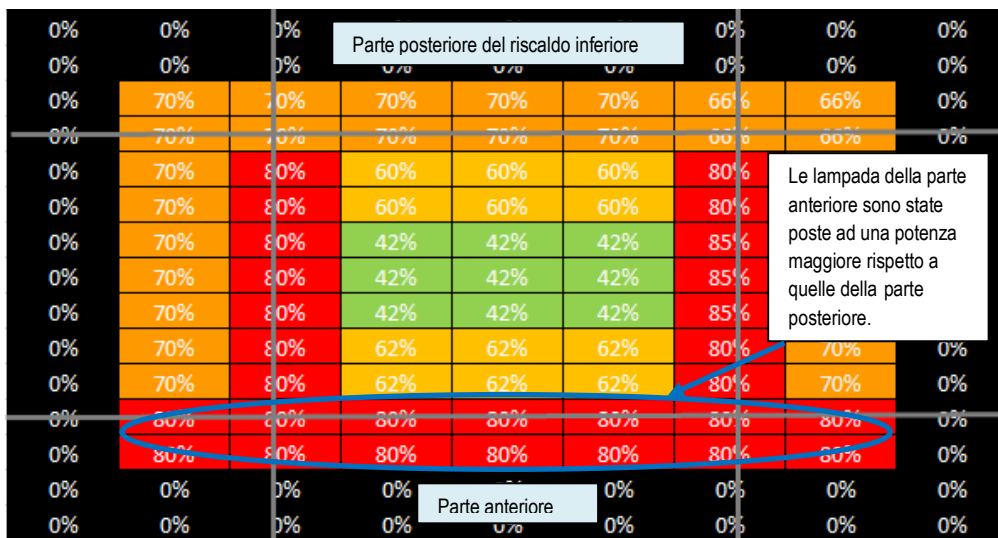


Figura 3.12: riscaldamento inferiore, freezer

Da queste prove si può concludere che, per quanto riguarda le celle frigorifero/freezer, l'operatore imposta una prima mappa dei riscaldi cercando di creare delle cornici concentriche di potenza. Eventuali difetti come la presenza di pieghe, vengono risolti cambiando la potenza delle lampade in corrispondenza con la zona del foglio interessata. Un aiuto su questo punto viene dato dal disegno della griglia del riscaldamento superiore sul foglio iniziale. Di solito per risolvere un difetto si varia la potenza della sola lampada che lo interessa e non anche di quelle attorno perché gli elementi di riscaldamento sono abbastanza grandi rispetto al foglio da essi interessato. Andare a variare anche la potenza delle lampade attorno potrebbe portare a problemi in altre zone.

2.2.2 Le interviste agli operatori

Dopo le prove descritte nel paragrafo precedente relative ad una cella frigorifero e una freezer si è chiesto ad un operatore come avrebbe impostato la mappa dei riscaldi relativa ad altri pezzi da termoformare. In particolare sono stati presentati i disegni di quattro differenti oggetti e si è chiesta la potenza a cui avrebbe impostato le lampade di un ipotetico riscaldamento. Si è pensato di poter lavorare su una macchina in linea per cui non è stato necessario considerare il movimento dei piani di riscaldamento, con lampade 100*125 mm. I disegni degli oggetti presentati all'operatore si trovano nell'appendice 4.

Per impostare una prima mappa dei riscaldi l'operatore ha disegnato sulle viste dall'alto degli oggetti delle griglie di lampade 100*125 mm ed ha poi cercato di creare delle cornici di potenza concentriche che seguissero il profilo dello

stampo. In Figura 3.13 è rappresentata la vista dall'alto dell'oggetto 00076 (una vasca da bagno) e in Figura 3.14 vi è l'iniziale mappa dei riscaldi ipotizzata dall'operatore. Nell'appendice 4 sono riportate queste stesse informazioni in riferimento agli altri oggetti.

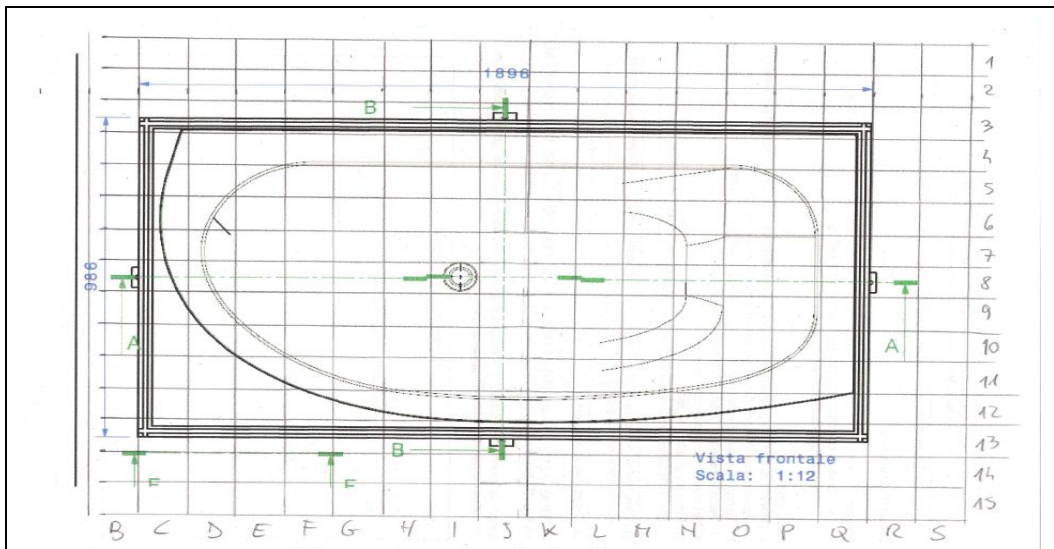


Figura 3.13: vista dall'alto dell'oggetto 00076

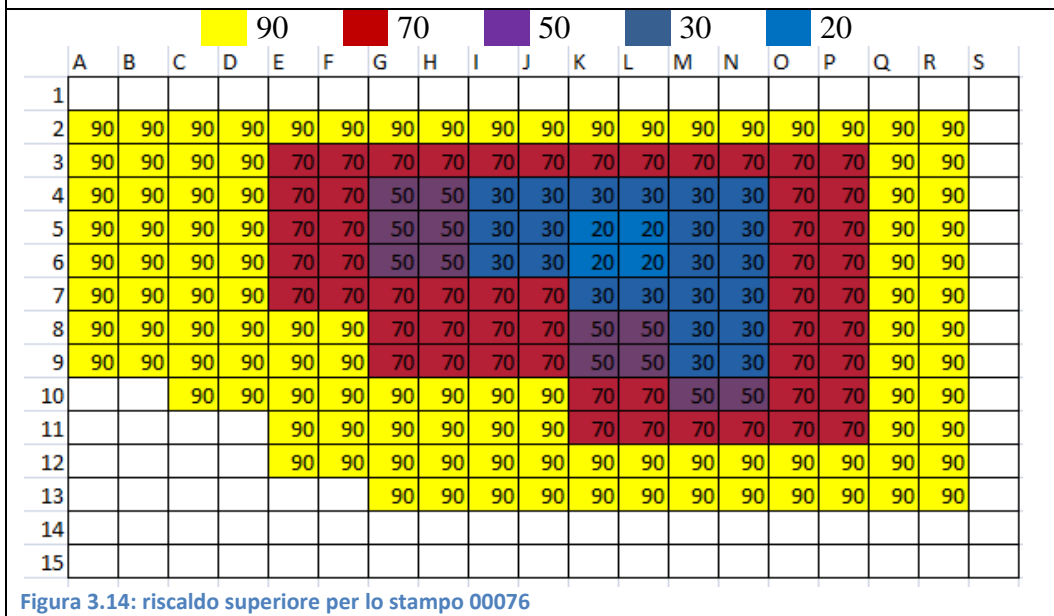


Figura 3.14: riscaldamento superiore per lo stampo 00076

Le mappe dei riscaldi dell'appendice 4 e quella presentata in Figura 3.14 non sono state effettivamente provate su una termoformatrice ma scaturiscono dal solo parere dell'operatore. Si nota che in tutti i casi si è cercato di seguire con le

lampade lo stesso profilo della base del pezzo. Da questo si deduce ancora una volta l'importanza delle cornici concentriche di potenza.

2.3 La metodologia

Durante la fase di acquisizione delle informazioni si è sottolineata l'importanza di impostare i livelli di riscaldamento di ciascuna lampada in modo da creare delle cornici concentriche di potenza che seguano il profilo della base dell'oggetto. Secondo il parere di operatori esperti si potrebbero usare mappe dei riscaldi simili a quelle presentate nell'appendice 4 per più del 90% degli oggetti termoformati perché la struttura concentrica tiene conto sia della forma del pezzo che della macchina stessa. Le lampade più esterne vengono mantenute ad alta potenza per creare una barriera di calore rispetto all'ambiente circostante, quelle più interne sono mantenute a minor potenza perché l'irradiazione di ciascuna lampada non è concentrata solamente sulla zona del foglio direttamente sopra o sotto di essa ma ha un raggio d'interesse maggiore. Per questo motivo si è ritenuto di dover basare sulle cornici concentriche di potenza, un possibile metodo per la creazione automatica di mappe dei riscaldi. Nel sottocapitolo 1.3.7 relativo all'impostazione tradizionale delle mappe dei riscaldi, si è evidenziato che le zone più sollecitate dal punto di vista meccanico devono essere mantenute più fredde di quelle meno sollecitate. Questa regola scritta su libri e documenti relativi alla termoformatura [Can01, Ill01], potrebbe essere difficile da applicare. Nella realtà, prima di procedere alla termoformatura di un pezzo, gli operatori non hanno piena conoscenza delle zone più sollecitate dal punto di vista meccanico. Dalle interviste effettuate, si è intuito che la regola precedentemente descritta fa parte di un miglioramento successivo da applicare alle cornici concentriche di potenza. Queste considerazioni si notano nei dati forniti dalla Whirlpool® presenti in appendice 6. In queste mappe vi è una potenza decrescente andando dall'esterno verso l'interno con un maggior raffreddamento delle pareti verticali che, come si può facilmente intuire, sono più sollecitate dal punto di vista meccanico rispetto alle zone che rimangono parallele al piano del foglio. Si è, quindi, cercato un modo per l'individuazione delle zone più critiche. Questo ha portato allo sviluppo di due differenti metodi.

Si è introdotto un elemento di riscaldamento fittizio sottomultiplo di quelli reali, per potersi adattare alle differenze dimensionali delle lampade dei piani di riscaldamento delle termoformatrici. Originariamente questo è nato per avere un confronto agevole tra le mappe dei riscaldi fornite dalla Whirlpool® dove ogni foglio viene riscaldato da quattro piani con differente layout (vd. appendice 2). La soluzione trovata per la specifica macchina utilizzata in Whirlpool® è stata, in

seguito, adattata per avere un metodo svincolato dalla configurazione dei piani di riscaldamento.

Nel primo metodo sviluppato, si è pensato di mettere in relazione ciascuna zona del pezzo termoformato con un differente elemento di riscaldamento elementare. Per poter raffreddare le zone più critiche si è imposta una relazione inversamente proporzionale tra la potenza associata alle lampade elementari e il loro grado di criticità che è stato relazionata con la differenza di altezza tra i punti che costituiscono il pezzo. Il primo metodo produce due differenti risultati: uno riguarda le cornici concentriche di potenza, l'altro è associato alla criticità delle diverse zone dell'oggetto. Successivamente è stata eseguita una media pesata tra i due risultati.

Il primo metodo è focalizzato su piccole zone del pezzo perché fa riferimento all'altezza di alcuni suoi punti. Dalle interviste agli operatori si è dedotto che è sempre meglio fare riferimento all'intero oggetto. La deformazione di una zona del foglio è vincolata a quelle adiacenti. Se si sottoponesse una stessa porzione di materiale ad uno spostamento contemporaneo verso destra e verso sinistra, si giungerebbe sicuramente ad una sua rottura.

Il secondo metodo sviluppato, si basa sulla lunghezza di alcune sezioni del pezzo (silhouette). In particolare sono state considerate le sezioni in corrispondenza con le mezzerie degli elementi di riscaldamento elementare. Maggiore è la misura della lunghezza di una silhouette maggiore è la sua criticità e minore deve essere la potenza delle lampade elementari ad essa associate. Questo metodo corregge in modo automatico le cornici concentriche di potenza basandosi sia sulle sezioni parallele al lato lungo sia su quelle parallele al lato corto. La potenza attribuita ad ogni elemento di riscaldamento elementare è data dalla media tra gli ipotetici valori associati alle sue due mezzerie.

Nei paragrafi precedenti è stato detto che nell'impostare la percentuale di accensione delle lampade delle monostazioni bisogna porre attenzione al movimento dei piani di riscaldamento. Questa caratteristica porta a diminuire la potenza delle lampade più vicine alla zona di riposo. Si è pensato che l'influenza di questo movimento potesse essere valutata facendo riferimento a mappe dei riscaldi già validate dagli operatori, per questo motivo non si è cercato un metodo generale che si possa adattare a differenti monostazioni. L'idea dell'azienda era di sviluppare un programma da installare direttamente sul calcolatore della termoformatrice. Gli adattamenti specifici riguardanti la macchina potrebbero essere aggiunti subito prima di procedere all'installazione.

Capitolo 3

L'implementazione dei metodi

Il fine di questo lavoro era focalizzato allo sviluppo di un metodo per la creazione automatica delle mappe dei riscaldi. Successivamente le considerazioni esposte nel capitolo precedente sono state tradotte in un programma eseguibile su un calcolatore. Questo ha richiesto un'adeguata gestione dei vincoli imposti dagli strumenti utilizzati.

Il primo problema affrontato è stato di riprodurre sulla vista dall'alto di qualsiasi oggetto, la disposizione delle lampade dei riscaldi. In seguito si è visto come creare in modo automatico le cornici concentriche di potenza e come apportare delle modifiche.

Tra tutti i possibili software a disposizione si è scelto di utilizzare il linguaggio di programmazione *matlab* per avere la possibilità di tradurre in specifici algoritmi i ragionamenti degli operatori. *Matlab* è dotato di un apposito toolbox per importare e lavorare su disegni a tre dimensioni (*Iges toolbox*).

3.1 L'Iges Toolbox

Ciascun software CAD (computer aided design) per disegni a tre dimensioni effettuati su un calcolatore, ha un suo formato particolare. Tipicamente i disegni creati con un programma non possono essere aperti e/o modificati da un software differente. Per questo motivo quando si invia un disegno è necessario assicurarsi che il destinatario abbia a disposizione il software con cui è stato creato. I software in commercio sono molti e dal costo elevato per cui è molto probabile che emittente e destinatario lavorino con programmi differenti. Per permettere la comunicazione tra essi sono stati definiti due formati universali, l'IGES (Initial Graphics Exchange Specification) e lo STEP (Standard for the Exchange of Product model data), che possono essere creati e letti da qualsiasi software per il disegno (CAD) e la simulazione (CAM). Il formato STEP è nato come un'evoluzione dell'IGES e, in genere, contiene un maggior numero di informazioni. L'*Iges toolbox* di *matlab* permette di importare disegni in formato IGES e di lavorare con essi. In particolare viene messa a disposizione una funzione che proietta sull'oggetto una griglia di punti equidistanti tra loro. Questa funzione richiede in input le coordinate dell'origine della griglia, la

direzione di proiezione (asse normale), due direzioni che formano con essa una terna ortonormale (direzione principale e secondaria), la distanza tra i punti e il loro numero sulla direzione principale e secondaria (Figura 4.1).

In output vengono fornite le coordinate dei punti proiettati sul pezzo. Se alcuni punti non incontrano l'oggetto le loro coordinate vengono poste a (0,0,0).

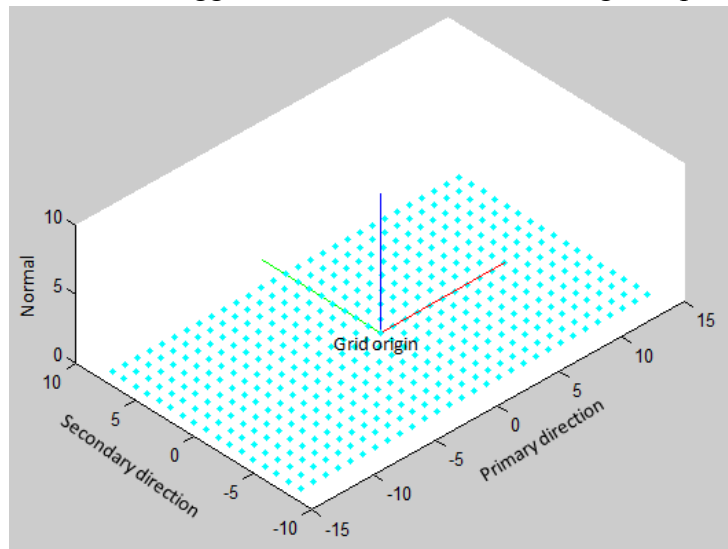


Figura 4.1: griglia di punti

Questa funzione è stata utilizzata per riprodurre il ragionamento iniziale fatto dall'operatore che è partito col disegnare sulla vista dall'alto degli oggetti la griglia di lampade del riscaldamento.

3.2 Funzionamento generale del programma

Si è voluto scrivere un programma *matlab* che potesse essere utilizzato su qualsiasi macchina e per qualsiasi oggetto. Per coloro che lavorano con le termoformatrici l'ambiente *matlab* è di difficile utilizzo per cui si è deciso di inserire gli input e di scrivere gli output in appositi file *excel*.

Sono state create due distinte versioni del programma, entrambe basate sulle cornici concentriche di potenze ma che agiscono in modo differente per apportare successive correzioni. Nella prima si è sviluppato il metodo basato sulla differenza di altezza dei punti dell'oggetto mentre nella seconda sono state considerate le lunghezze delle sezioni parallele al lato lungo e corto del foglio (le silhouette). Non si è mai considerato il movimento dei piani di riscaldamento delle monostazioni per cui i risultati delle due versioni possono essere utilizzati, senza ulteriori modifiche, solo su macchine in linea. La versione numero 1 del

programma è completamente basata sui ragionamenti degli operatori per cui può essere compresa ed utilizzata efficacemente solo da chi ha un po' di dimestichezza in questo campo. La versione numero 2, invece, è anche basata su considerazioni teoriche e l'utente deve inserire un numero minore di input. Per quest'ultimo motivo risulta essere di più facile utilizzo.

L'operatore che ha esperienza su una determinata monostazione, derivante dalla termoformatura di differenti oggetti, conosce a priori la differenza tra la percentuale di potenza delle lampade della zona anteriore e di quella posteriore. Questa percentuale dipende dal tipo di lampade utilizzate e dalla velocità di avanzamento/arretramento dei piani di riscaldamento. L'operatore può utilizzare i risultati del programma su una monostazione facendo attenzione a diminuire manualmente la potenza delle lampade più vicine alla zona di riposo dei riscaldati. Il programma potrebbe funzionare, grazie al compilatore *matlab*, sul calcolatore della stessa termoformatrice per cui tutte le informazioni ad essa relative sarebbero già conosciute a priori. Nel caso delle monostazioni si terrebbe conto del movimento dei piani di riscaldamento. Dal punto di vista dell'utente finale, il programma dopo aver richiesto alcune informazioni riguardanti la macchina e l'oggetto da termoformare, produce in output una mappa dei riscaldati con cui si potrebbe eseguire una prima prova. Il come si giunga al risultato finale è importante per inserire gli input più appropriati.

Entrambe le versioni del programma sono state testate confrontando i risultati con delle mappe dei riscaldati utilizzate in produzione relative a celle frigorifero e freezer (dati Whirlpool®). I risultati ottenuti con la seconda versione che considera le silhouette dell'oggetto, sembrano essere migliori di quelli ottenuti con la prima. La preferenza ricade, quindi, sulla seconda versione che è anche di più facile utilizzo perché richiede un minor numero di input.

Per far fronte al problema della differenza dimensionale delle lampade dei riscaldati si è utilizzato, come già detto, un elemento di riscaldamento fittizio più piccolo di quelli reali.

Per quanto riguarda la creazione di cornici concentriche in entrambe le versioni si è utilizzato lo stesso metodo.

3.2.1 L'elemento di riscaldamento elementare

L'elemento di riscaldamento elementare è una lampadina fittizia sottomultipla di quelle reali. Quando si lavora su macchine in linea è più importante concentrarsi sulla quantità di energia totale incidente su ciascuna zona del foglio che sulla sua provenienza (piani di preriscaldamento o riscaldamento, superiore o inferiore). Per questo motivo e per poter confrontare tra loro i dati forniti dalla Whirlpool® si è

proceduto ad intersecare i piani di preriscaldamento e riscaldamento della macchina in linea “Super Line New Generation” e a cercare un elemento comune con cui poter ricostruire queste intersezioni. In Figura 4.2 si ha la sovrapposizione tra i 4 piani.



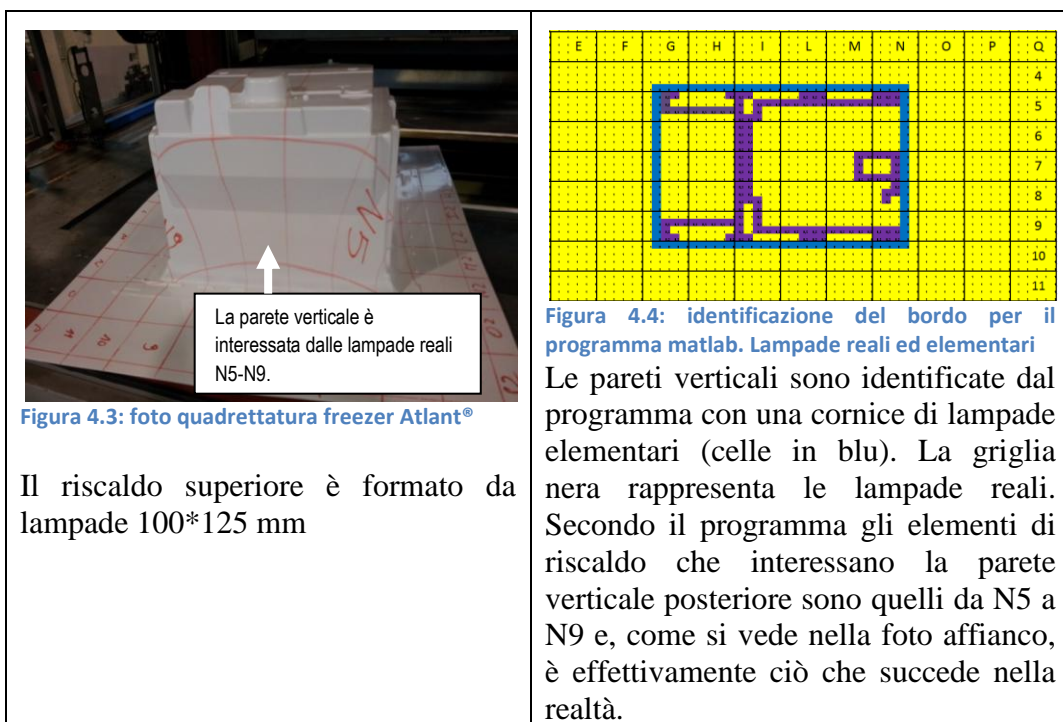
Figura 4.2: elemento di riscaldamento elementare

Si nota che con elementi di riscaldamento pari ad $1/36$ di quelli più grandi presenti sulla macchina si può riuscire a ricostruire tutte le lampade reali e le loro intersezioni.

Si è pensato di poter basare sull'elemento di riscaldamento elementare il programma di creazione automatica delle mappe dei riscaldi. In questo modo si è lavorato allo stesso modo sui 4 piani di riscaldamento. Successivamente si sono considerate le lampade reali. L'*Iges toolbox* permette di proiettare lungo la direzione normale griglie di punti equidistanti tra loro. Per poter avere un adeguato quantitativo di informazione su ciascuna zona del foglio si è pensato di poter ricostruire l'elemento di riscaldamento elementare attraverso una qualche decina di punti. La funzione di proiezione dell'*Iges toolbox* fornisce in output le coordinate dei punti proiettati. Si è fatto riferimento a queste coordinate per capire la posizione delle pareti verticali dell'oggetto. Si è poi proceduto alla creazione di cornici concentriche di potenza sempre basate sull'elemento di riscaldamento elementare. Anche le correzioni aggiuntive dovute alle differenze di altezza tra i punti proiettati (versione 1) o alla lunghezza delle sezioni parallele al lato corto e lungo del foglio (versione 2) sono state fatte in riferimento all'elemento di riscaldamento elementare. Il programma fornisce quindi un primo output contenente le percentuali di potenza da associare alle lampade elementari. Per riportarsi alle lampade reali si è eseguita una semplice media.

Durante la scrittura e la verifica dei risultati del programma si è visto che l'elemento di riscaldamento elementare oltre a permettere un lavoro comune su più piani di riscaldamento con differente layout, portava anche ad altri vantaggi. L'attribuire a ciascuna lampada reale un valore di potenza pari alla media dei valori attribuiti alle lampade elementari che le costituiscono, porta a filtrare gli errori dovuti al fatto che la proiezione lungo l'asse normale non corrisponde esattamente a ciò che succede nella realtà. Bisogna sempre ricordarsi che con la termoformatura si produce un oggetto a tre dimensioni a partire da un foglio a due dimensioni. Poiché il materiale si sposta dal piano di base in modo da assumere la forma desiderata, la proiezione dei punti lungo l'asse normale non riesce a tener pienamente conto di questo movimento.

Come si può vedere nelle foto in Figura 4.3 e Figura 4.5 le pareti verticali sono interessate da una o più cornici di lampade reali. Per il programma, invece, le pareti verticali sono in corrispondenza con un'unica cornice di lampade elementari. Molto probabilmente quest'ultime faranno parte di una delle file di lampade reali che interessano le pareti verticali.





Sul foglio iniziale è stato disegnato il layout del riscaldamento superiore presente nell'appendice 2.

Figura 4.5: foto quadrettatura frigo 244

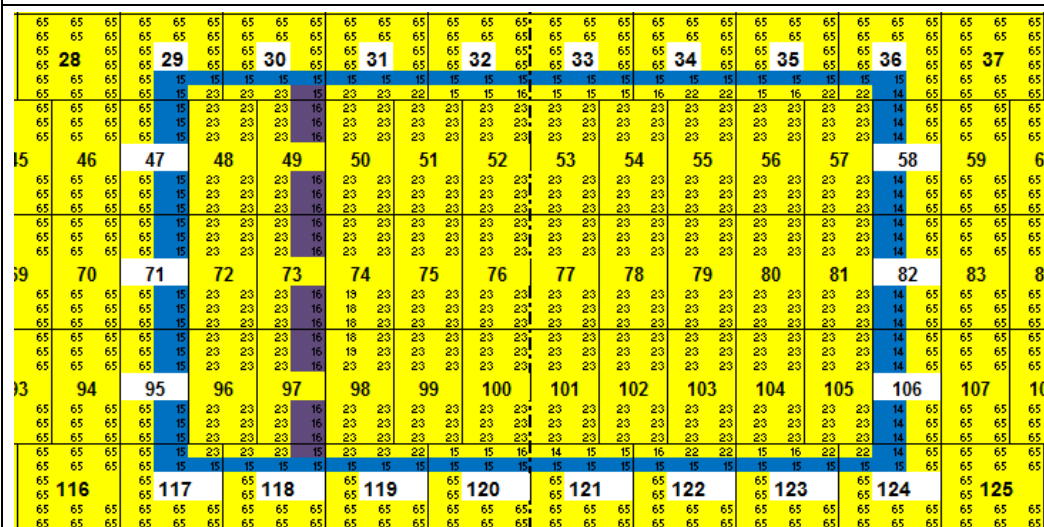


Figura 4.6: identificazione del bordo per il programma matlab. Lampade reali ed elementari

- Si è riportato con la griglia nera il layout delle lampade del riscaldamento superiore.
- La numerazione delle lampade è uguale a quella utilizzata in Figura 4.5.

Secondo il programma le lampade interessate dalla parete verticale sono quelle identificate dai numeri 29-36. Dalla foto del pezzo termoformato si nota che effettivamente queste lampade sono implicate nel riscaldamento della parete verticale.

3.2.2 La funzione “concentricita”

Si è voluto scrivere in *matlab* una funzione che tenesse in considerazione le dimensioni iniziali del foglio e il profilo dell'oggetto da termoformare per creare delle cornici di potenza decrescente andando dall'esterno verso l'interno. Per avere un programma che potesse essere utilizzato su fogli di qualsiasi dimensione e materiale, si è deciso di lasciare all'utente l'inserimento delle percentuali di potenza massima e minima ed il numero di cornici desiderate. La funzione “concentricita” si basa sull'output della funzione di proiezione di punti fornita dall'*Iges toolbox*. Come già detto ciascuna lampada elementare è costituita da qualche decina di punti che vengono proiettati sull'oggetto. Il bordo viene identificato guardando l'altezza di questi punti. Se almeno un punto della lampada ha la stessa altezza di quelli proiettati sulla base dell'oggetto ed un altro suo punto ha un'altezza differente significa che si è in corrispondenza con il bordo. Questa funzione è stata testata su differenti profili. Le figure da 3.7 a 3.12 testimoniano come il bordo, segnalato dal colore blu, venga identificato correttamente anche quando non è rettangolare.

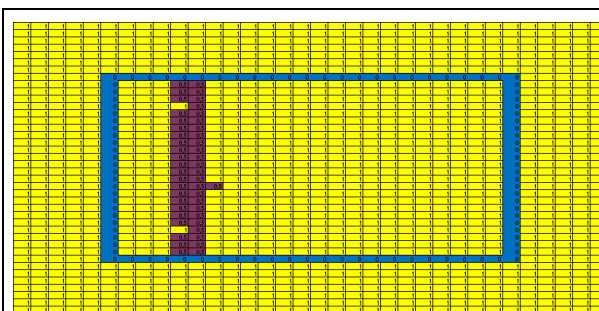


Figura 4.7: bordo dell'oggetto identificato dal programma. Cella frigorifero 281.

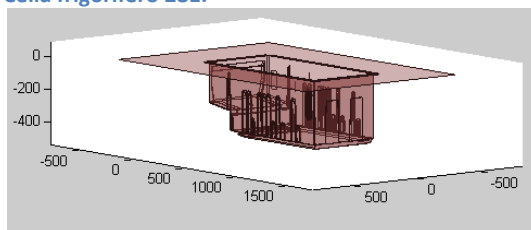


Figura 4.8: vista globale dell'oggetto. Cella frigorifero 281.

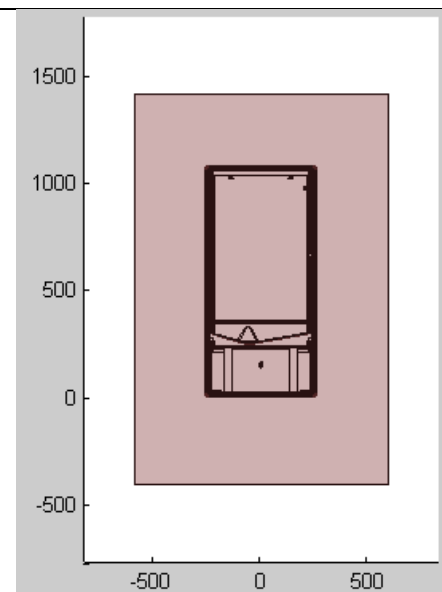
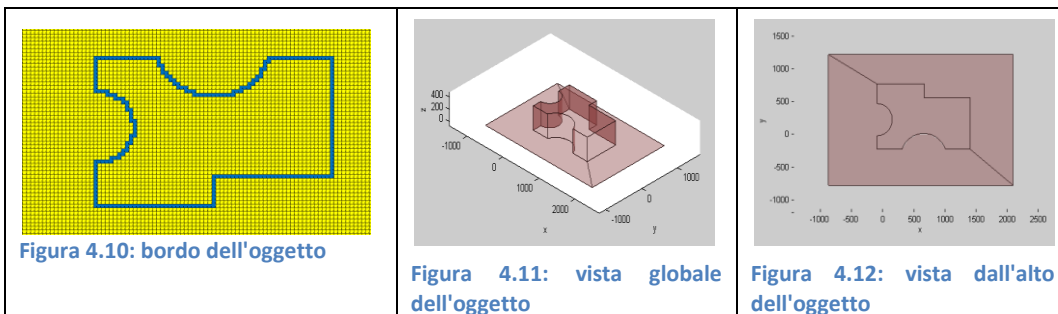


Figura 4.9: vista dall'alto dell'oggetto. Cella frigorifero 281.



Una volta identificato il bordo, la funzione “concentricita” pone a potenza massima (definita dall’utente) tutte le lampade ad esso esterne. Per risparmiare energia non si accendono gli elementi di riscaldamento molto lontani dal premlasta per cui le lampade esterne formano una cornice di potenza massima avente lo stesso profilo del pezzo (Figura 4.13).

Il valore minimo di potenza richiesto all’utente sarà quello attribuito alle lampade centrali.

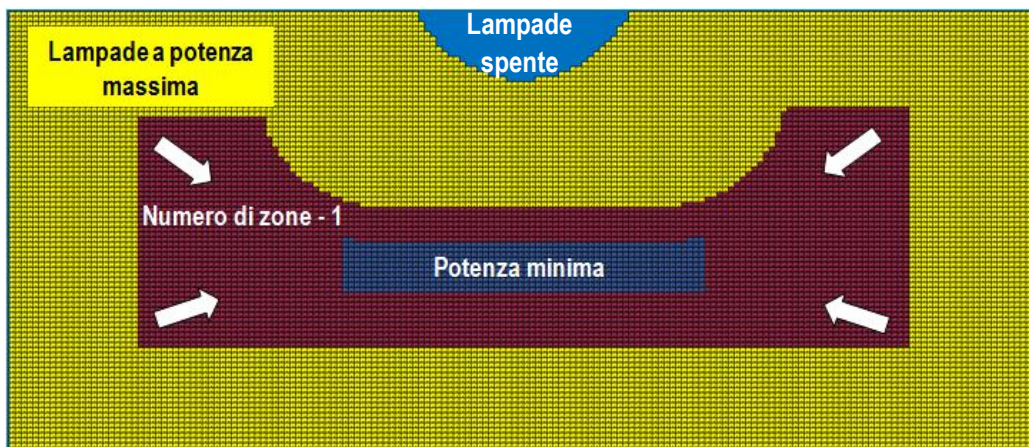


Figura 4.13: cornici concentriche di potenza

Gli input richiesti all’utente (potenza massima, minima e numero di cornici) dipendono principalmente dalle dimensioni del foglio iniziale. Maggiori sono le sue misure, maggiore deve essere il numero di cornici e minore il valore di potenza minimo richiesto. La funzione è stata scritta in modo da creare all’interno del bordo dell’oggetto un numero di cornici di potenza decrescente pari a quello richiesto dall’utente meno uno. I valori di potenza attribuiti si ottengono suddividendo in parti uguali il segmento avente come estremi i valori di potenza minima e massima definiti dall’operatore. La funzione “concentricita” è stata scritta per creare delle cornici aventi, per quanto è possibile, lo stesso spessore. Per avere le lampade al centro del foglio sempre a

potenza minima si è dovuto considerare sia il profilo del pezzo che il rettangolo che lo circoscrive. Di solito il numero di cornici è pari a due o tre comunque il programma è in grado di gestirne un numero maggiore. Queste avranno, ovviamente, uno spessore minore. Si è testata questa funzione su oggetti con profilo differente aumentando anche il numero di cornici desiderate.

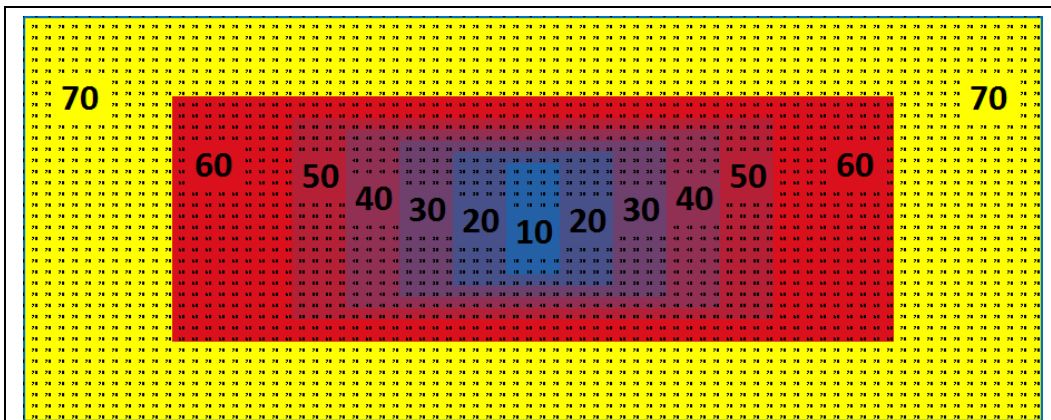


Figura 4.14: risultato funzione "concentricita". Pezzo dal profilo rettangolare

Potenza massima=70%	Potenza minima=10%	numero di cornici=7
---------------------	--------------------	---------------------

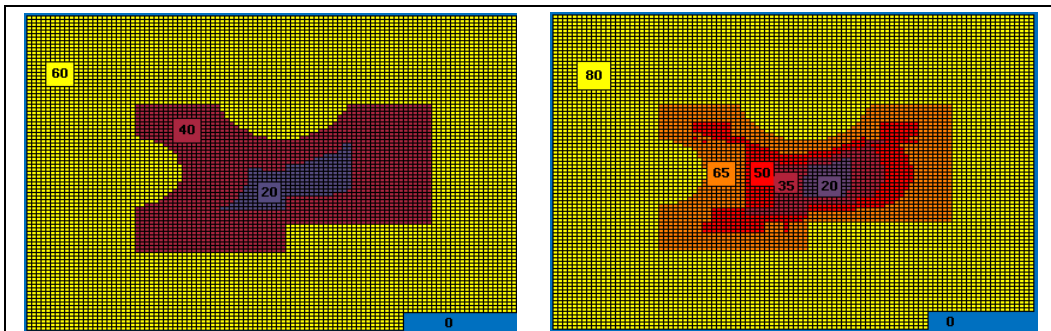
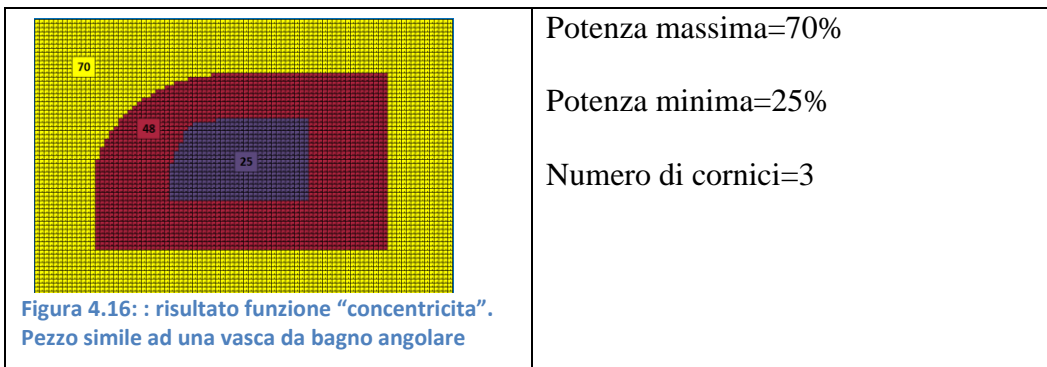


Figura 4.15: risultato funzione "concentricita". Pezzo dal profilo non rettangolare

Pmax=60% Pmin=20% numero zone=3	Pmax=80% Pmin=20% numero zone=5
---------------------------------	---------------------------------



3.2.3 Programma matlab versione 1

In questo sottocapitolo si riportano gli input della prima versione del programma, la spiegazione del suo funzionamento e gli output forniti. Nell'appendice 7 vi è il corpo del programma e la spiegazione dettagliata di ciascuna sua funzione.

Nelle figure da 3.17 a 3.19 sono riportati gli input richiesti all'utente. Sono modificabili solo i valori nelle celle con il bordo nero spesso.

INPUT			
Termoformed part (name of the IGES FILE)			cella244_1.igs
Orientation of the termoformed part			
Choose 1-12 (see sheet3 for detatils)			8
Sheet size:			
Long side:	1180	long side+0,1*long side:	1357
Short side:	670	short side+0,1*short side:	737

Figura 4.17: informazioni riguardanti l'oggetto da termoformare. Versione 1 e 2

- Il file in formato IGES dell'oggetto deve contenere la forma del pezzo termoformato e la base su cui esso è poggiato, essa deve essere rettangolare con dimensioni superiori a quelle dal foglio da termoformare e centrata rispetto all'oggetto. Il programma va a ricercare in un'apposita cartella il file avente il nome segnalato.
- Durante l'importazione del file IGES, *matlab* mantiene lo stesso sistema di riferimento utilizzato nel software CAD. Ognuno ha la facoltà di scegliere l'orientamento del proprio disegno: altezza del pezzo e lato lungo del foglio parallelo agli assi x, y o z. Supponendo che la base dell'oggetto sia parallela al piano xy o yz o zx esistono dodici differenti possibilità di orientamento. Queste sono specificate con appositi disegni

nel foglio 3 del file di excel in cui bisogna inserire gli input (vedere appendice 5).

- L'utente deve fornire le dimensioni del foglio da termoformare. Affinché il programma accenda tutte le lampade in corrispondenza con il foglio e anche quelle un po' più esterne, *matlab* legge i valori di queste misure moltiplicate per 1,1. Si suppone che il foglio sia dimensionato correttamente per il pezzo che si vuole produrre. Dopo la termoformatura tutta la parte di materiale esterna al premilastra verrà tranciata.

choose the type of machine (1,2,3)	<input type="text" value="1"/>				
1->single station machine (see heaters1.xlsx)					
2->in line machine (see heaters2.xlsx). The heaters layout is fixed.					
If you choose this type of machine the data of the elementary heating elements are fixed and the object shape should be similar to a parallelepiped					
3->only the upper heater (see heaters3.xlsx)					
Elementary heating elements:					
Each heating elements is formed by n*m equidistant points (see "sheet2" for details and example)					
Distance between two points:	<input type="text" value="5"/>				
Number of points in the long side:	<input type="text" value="6"/>				
Number of points in the short side:	<input type="text" value="6"/>				
Number of elementary heating elements necessary to make a heating element	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>			
	lines	columns			

Figura 4.18: informazioni riguardanti la macchina. Versione 1

Attualmente il programma si può adattare alle diverse termoformatrici cambiando i valori nelle celle riquadrate in nero. Questi fanno riferimento alla dimensione dell'elemento di riscaldamento fittizio (lampada elementare) che si ricorda essere un sottomultiplo degli elementi di riscaldamento reali. Il programma *matlab* utilizza queste lampadine e gli attribuisce una determinata percentuale di potenza. Successivamente si riporta alle lampade reali facendo la media dei valori delle lampadine elementari da cui sono costituite.

L'elemento di riscaldamento fittizio da specificare deve essere costituito da qualche decina di punti. *L'iges toolbox* permette di proiettare griglie di punti equidistanti tra loro per cui è necessario specificare una distanza ed un numero di punti tali per cui si riesca ad approssimare bene la dimensione della lampada reale. Il tempo di computazione aumenta con l'aumentare del numero di punti da proiettare per cui è preferibile che il programma operi su una lampada con dimensioni differenti da quelle reali piuttosto che aumentare eccessivamente il numero di punti costituenti l'elemento di riscaldamento elementare.

Se il programma venisse installato direttamente sul calcolatore della termoformatrice le informazioni contenute in Figura 4.18 non sarebbero da inserire.

Come esempio di macchine sono state fornite tre distinte possibilità:

- Macchina tipo 1:**
 Il riscaldamento inferiore è costituito da lampade con area doppia rispetto a quelle del riscaldamento superiore. Le dimensioni da inserire sono relative al riscaldamento superiore e i numeri nella Figura 4.18 fanno riferimento a lampade 100*125 mm.
- Macchina tipo 2:**
 Il layout e la dimensione delle lampade è fissata ed è quella presente nell'appendice 2. Questa macchina è stata utilizzata per confrontare i risultati del programma con delle mappe dei riscaldi effettivamente utilizzate in produzione.
- Macchina tipo 3:**
 Si considera solo il riscaldamento superiore. Questo, come nella macchina di tipo 1, deve essere costituito da lampade di ugual dimensione.

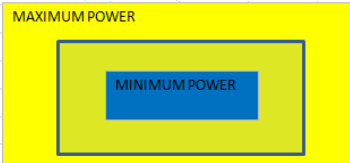
Function "concentricita":	
It sets the external heating element at the maximum power and the internal ones at the minimum power.	
Its aim is to give a uniform temperature at the plastic sheet	
Maximum power of the external heating elements:	80
Minimum power of the internal heating elements:	20
Number of zones:	2
	
example with 3 zones temperature of the intermediate zone: (MAX+MIN)/2	
functions "matrice_cielo"+"calcolo_potenze"	
It reduces the power of the heating elements that correspond with vertical wall	
$P=Pi*tol/dh$	Pi: initial power tol: tolerance parameter >one/one and a half magnitude order smaller than the maximum height of the object dh: maximum difference of height between two points belonging from the same heating element
Initial power	40
ok	
function "somma_effetti"	
The functions "concentricita" and "matrice_cielo" produce two different power setting	
Function "somma_effetti" gives the weighted arithmetic mean of their results	
$Ptot1=c11*Pcon+c12*Ph$	Pcon: result of function "concentricita"
$Ptot2=c21*Pcon+c22*Ph$	Ph: result of function "matrice_cielo"
	c11, c12 different weights in the first stage heating
	c21, c22 different weights in the second stage heating
first stage heating	second stage heating
c11	1
c12	0
c21:	0,5
c22:	0,5

Figura 4.19: informazioni riguardanti la potenza delle lampade. Versione 1

Questa versione del programma è completamente basata sui ragionamenti degli operatori. La funzione “concentricita” serve a generare delle cornici concentriche di potenza che hanno il fine di riscaldare uniformemente il foglio, mentre le funzioni “matrice_cielo”+“calcolo_potenza” guardano l'altezza dei punti proiettati sul pezzo lungo la direzione normale. In particolare ciascuna lampada elementare è costituita da qualche decina di punti che vengono proiettati sul pezzo. Il programma calcola l'altezza di ciascun punto e definisce una relazione inversamente proporzionale tra il valore di potenza della lampada elementare considerata e la massima differenza di altezza tra i punti che la costituiscono:

$$(potenza_{lampada} * massima_{differenza\ di\ altezza} = costante)$$

Il valore di potenza iniziale richiesto fa riferimento a quello attribuito agli elementi di riscaldamento in corrispondenza con la base o con parti parallele al piano da essa definito. Attraverso le funzioni “matrice_cielo”+“calcolo_potenza” si mantengono ad una minor potenza le zone del foglio in corrispondenza con le pareti verticali.

Nella funzione “somma_effetti” l'utente deve specificare l'importanza che vuole dare ai risultati della funzione “concentricita” rispetto a quelli delle funzioni che guardano la differenza di altezza. Nel caso di macchine in linea i preriscaldi servono principalmente per ottenere un foglio a temperatura uniforme per cui l'importanza della funzione “concentricita” è, quasi sempre, pari al 100%. Sui riscaldi il peso della funzione “concentricita” diminuisce con l'aumentare dell'altezza delle pareti dell'oggetto da termoformare.

Come già detto si è deciso di scrivere un programma in *matlab* che si interfacciasse con *excel* per la parte relativa agli input e agli output. In particolare si riportano, su appositi file *excel*, solo i risultati più rilevanti delle varie funzioni.

Il file di output della versione 1 è costituito da diversi fogli contenenti:

- La matrice di identificazione del bordo dell'oggetto
- La matrice risultante dalla funzione “concentricita” (cornici di potenza concentriche basate sulla forma della base del pezzo)
- La matrice che considera la differenza di altezza tra i punti che corrispondono ad una lampada
- La media pesata di queste ultime due matrici
- La potenza da attribuire alle lampade reali di preriscaldi e riscaldi

Quest'ultima informazione è quella di maggior interesse per l'utente finale. Tutte le altre sono utili per avere una maggior consapevolezza del funzionamento del programma.

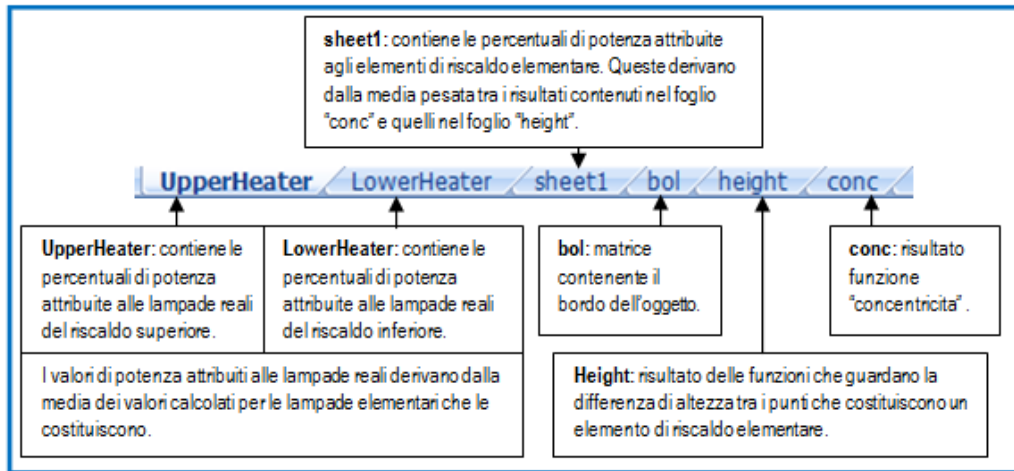


Figura 4.20: struttura del file di output. Versione 1

3.2.4 Programma matlab versione 2

Rispetto alla versione 1 cambiano leggermente le informazioni da inserire relative alla macchina e si richiedono solo i valori di potenza della funzione che crea le cornici concentriche. Di seguito si riporta la spiegazione dei ragionamenti inseriti in questa versione e gli output forniti. In appendice 10 è riportato il corpo del programma e il dettaglio delle funzioni che lo caratterizzano

In Figura 4.21 sono riportati gli input riguardanti la macchina.

choose the type of machine (1,2,3)	<input type="text" value="1"/>				
1->single station machine (see heaters1.xlsx)					
2->in line machine (see heaters2.xlsx). The heaters layout is fixed.					
If you choose this type of machine the data of the elementary heating elements are fixed and the object shape should be similar to a parallelepiped					
3->only the upper heater (see heaters3.xlsx)					
Elementary heating elements:					
Each heating elements is formed by n*m equidistant points (n and m must be odd numbers, see "sheet2" for details and example)					
Distance between two points:	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="10"/>			
Number of points in the long side:	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5"/>			
Number of points in the short side:	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="3"/>			
Number of elementary heating elements necessary to make a heating element	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>			
	lines	columns			

Figura 4.21: informazioni riguardanti la macchina. Versione 2

A differenza della prima versione si richiede che il numero di punti costituenti l'elemento di riscaldamento elementare sia dispari per poter far riferimento alle sue mezzerie. In questa seconda versione le modifiche ai risultati della funzione "concentricita" si basano sulla lunghezza delle sezioni in corrispondenza con le mezzerie degli elementi di riscaldamento elementari (Figura 4.22).

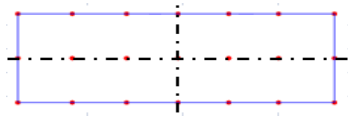


Figura 4.22: mezzerie della lampada elementare

In particolare le lunghezze di queste sezioni sono calcolate da due funzioni, “lunghezza_sezioniDS” e “lunghezza_sezioniDP”, che approssimano le misure delle loro lunghezze con la somma delle misure dei segmenti che uniscono i punti della mezzeria delle lampade proiettati sul pezzo.

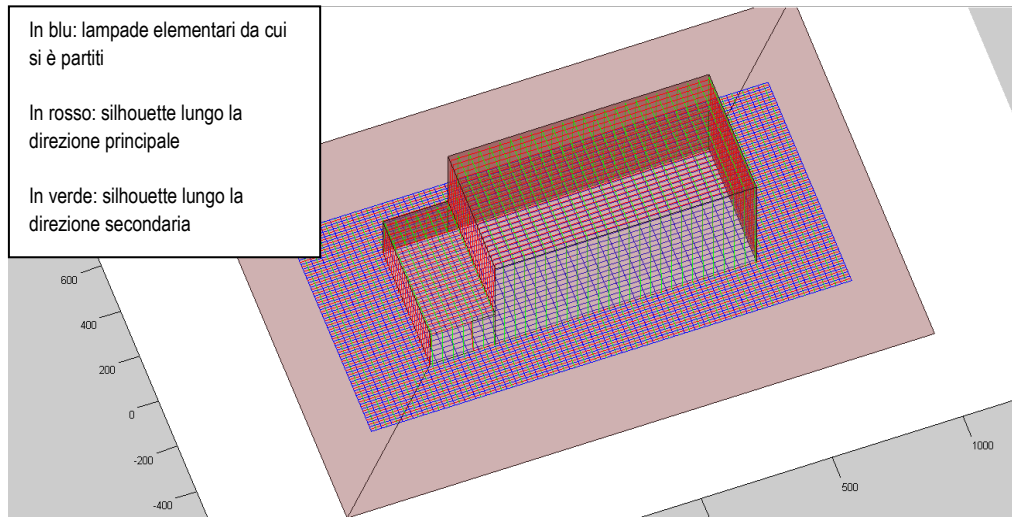


Figura 4.23: sezioni del pezzo corrispondenti con le mezzerie delle lampade elementari

Vengono utilizzate due funzioni perché una guarda le sezioni parallele al lato lungo del foglio mentre l'altra quelle parallele al lato corto.

Dopo aver calcolato la lunghezza delle sezioni si definisce un coefficiente pari a:

$$r_i = \frac{l_{si} - l_{min}}{l_{max}} \quad \text{dove } l_{si} \text{ è la lunghezza della sezione considerata}$$

l_{min} è la misura della sezione di lunghezza minima (sezioni lungo la base dell'oggetto)

l_{max} è la misura della sezione di lunghezza massima

per cui $r_i=0$ in corrispondenza della base del pezzo ed è sempre maggiore di zero e minore di uno per le sezioni che incontrano l'oggetto.

La funzione “concentricita” fornisce in output una matrice con i valori di potenza da attribuire alle lampade elementari per riscaldare il foglio uniformemente. Tali valori vengono modificati in modo da far migrare il materiale dalle zone dove tende a rimanere verso quelle più critiche. Le zone più

sollecitate dal punto di vista meccanico (le pareti verticali) subiscono un minor riscaldamento perché, altrimenti, si otterrebbe su di esse uno spessore inferiore a quello desiderato.

In particolare sono state scritte due funzioni “correzioneDS” e “correzioneDP” che modificano in modo indipendente il risultato della funzione “concentricita” nel seguente modo:

$$P_{ip}' = P_{ip} - P_{ip} * r_{ip} * beta$$

$$P_{is}' = P_{is} - P_{is} * r_{is} * beta$$

$beta=1$ vicino al bordo (con “vicino” si intende che la distanza dal bordo deve essere al massimo pari a due lampade elementari), $beta=0.5$ negli altri casi.

con $P_{ip} = P_{is} = P_i = risultato\ "concentricita"$

L'indice “i” corrisponde alla lampada considerata, mentre “p” e “s” si riferiscono alla direzione principale e secondaria. Il valore finale di potenza attribuito a ciascuna lampada elementare scaturisce dalla media dei risultati di queste due funzioni. Nel caso di macchine in linea questa correzione viene applicata solo sui riscaldi.

Per questa seconda versione vengono scritti, su un apposito file *excel*, i seguenti risultati:

- La matrice di identificazione del bordo dell'oggetto
- La matrice risultante dalla funzione “concentricita” (cornici di potenza concentriche basate sulla forma della base del pezzo)
- Le matrici che derivano dalla correzione dei risultati della funzione “concentricita” in base alla lunghezza delle sezioni parallele al lato lungo e corto del foglio.
- La media di quest'ultime due matrici
- La potenza da attribuire alle lampade reali di preriscaldi e riscaldi

Ovviamente quest'ultima informazione è quella di reale interesse per l'utente finale.

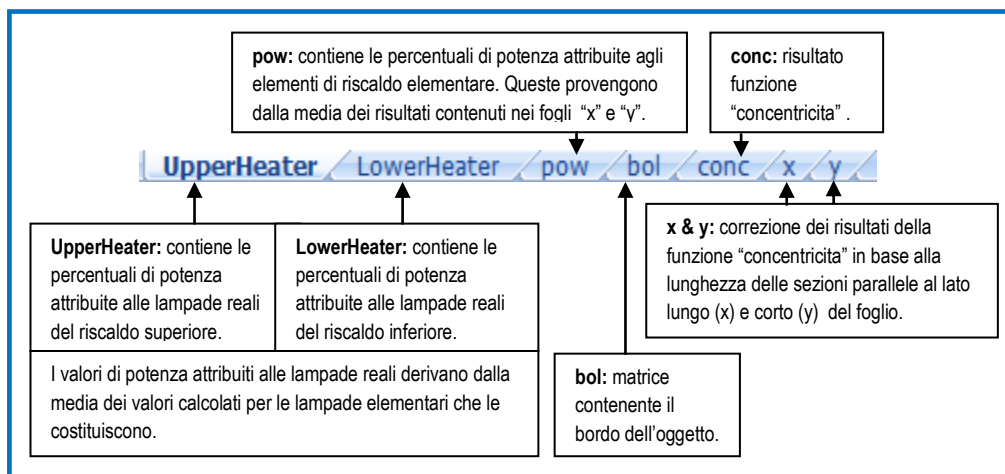


Figura 4.24: struttura del file di output. Versione 2

Capitolo 4

Validazione dei risultati

Entrambe le versioni del programma sono state testate confrontando i loro risultati con delle mappe dei riscaldi effettivamente utilizzate in produzione. Queste sono state fornite dalla Whirlpool® e fanno riferimento a celle frigorifero o freezer prodotte sulla macchina in linea “Super Line New Generation” della Comi s.r.l. (appendice 2). Le mappe dei riscaldi fornite sono state trovate per tentativi dagli operatori Whirlpool® e rappresentano il risultato ottimale a cui si vorrebbe arrivare. La fase delle prove finalizzate a trovare la mappa dei riscaldi, di solito, richiede una giornata di lavoro. Gli operatori per avere una maggior consapevolezza della deformazione del materiale, disegnano sul foglio iniziale la griglia del riscaldo superiore. Se sul pezzo termoformato si riscontrano dei rettangoli eccessivamente più grandi di altri, si diminuisce la potenza delle lampade in loro corrispondenza per ridurre la deformazione di quelle zone. Per comprendere meglio le mappe dei riscaldi fornite dalla Whirlpool® si è riprodotta su *excel* la disposizione delle lampade dei riscaldi con le percentuali di potenza impostate dagli operatori e la sagoma della relativa cella frigorifero/freezer. Dalle foto dei pezzi termoformati si è potuto vedere quali lampade interessano il *cielo* del frigorifero e quali le pareti verticali. In Figura 5.1 il rettangolo nero più grande rappresenta il foglio iniziale mentre le altre linee riproducono sul piano la sagoma del frigorifero.

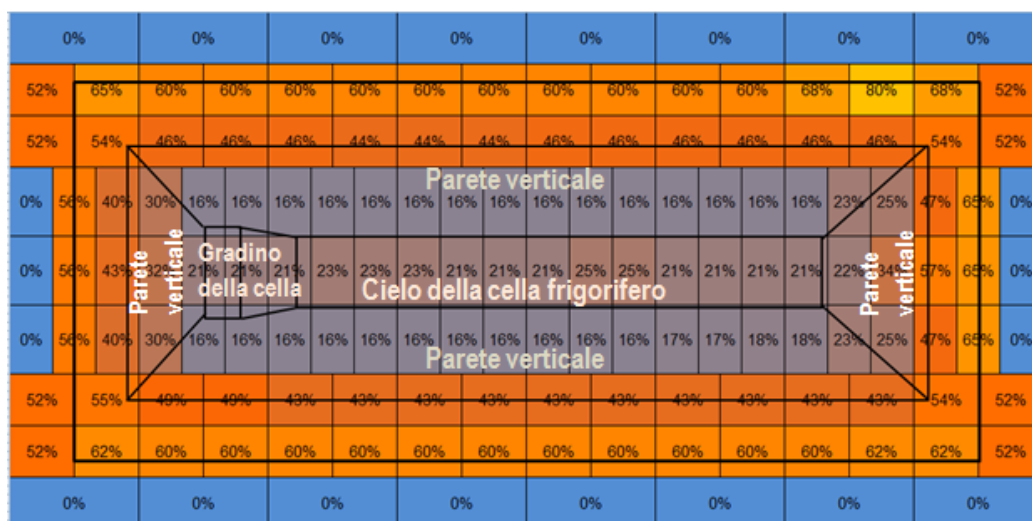


Figura 5.1: Dati Whirlpool®, riscaldo superiore. Frigorifero sbs 5006973

Attraverso questa riproduzione a due dimensioni della sagoma della cella, si è avuta la conferma che le lampade interessate al riscaldamento delle pareti verticali devono essere mantenute ad una potenza minore delle altre perché corrispondono a zone più sollecitate dal punto di vista meccanico.

Nell'impostare la percentuale di accensione di ciascuna lampada gli operatori devono considerare sia la forma del pezzo da termoformare che alcune caratteristiche della macchina. In particolare all'interno dei piani di riscaldamento vi sono alcune resistenze dotate di sonde e possono essere presenti irradiator non funzionanti.

Elementi di riscaldamento dotati di sonde

Guardando l'appendice 2 si nota che alcune lampade sono dotate di sonde. Queste rilevano la temperatura dell'elemento su cui sono installate e servono per verificare che si mantenga costante. Per ogni riscaldamento vi è una lampada dotata di sonda scelta come riferimento. Se si rileva una diminuzione (o aumento) di temperatura, il sistema aumenta (o diminuisce) di uno stesso fattore la percentuale di potenza di tutte le lampade del riscaldamento interessato. Si usa mettere le lampade dotate di sonde alla massima potenza perché risentano meno dei fattori esterni, come i colpi d'aria o i picchi di tensione, che ne variano la temperatura. Le seguenti immagini fanno riferimento alla mappa dei riscaldi del frigorifero side by side 5006973.



Figura 5.2: foto del pezzo termoformato. Frigorifero sbs 5006973

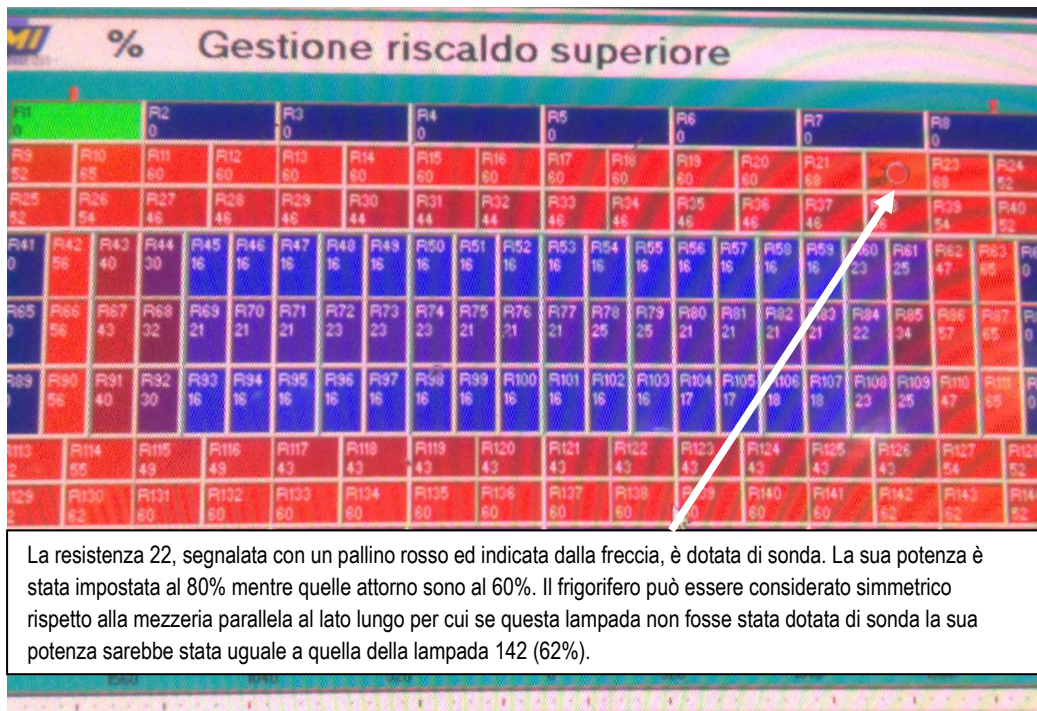


Figura 5.3: riscaldamento superiore. Frigorifero sbs 5006973

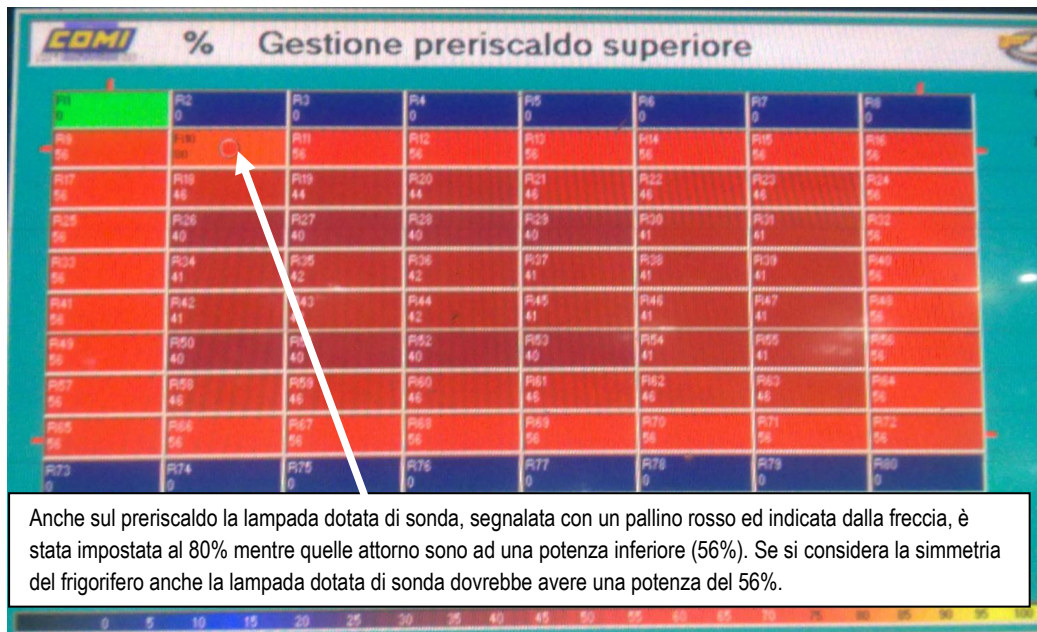


Figura 5.4: preriscaldamento superiore. Frigorifero sbs 5006973

Di solito le lampade dotate di sonda sono quelle in corrispondenza del premilastra. La parte più esterna del foglio deve essere riscaldata molto, per cui nella maggior parte dei casi non è un problema porre le resistenze dotate di sonda alla massima potenza o quasi.

Durante l'implementazione delle due versioni del programma non si è tenuto conto della presenza di eventuali sonde. Per questo motivo, nel confronto tra i risultati delle due versioni e le mappe reali dei riscaldi, si è dato alle lampade dotate di sonda il valore di potenza che avrebbero avuto nel caso in cui non fossero state utilizzate come riferimento per gli altri elementi di riscaldamento.

Elementi di riscaldamento non funzionanti

Una termoformatrice può essere utilizzata anche se alcuni suoi elementi di riscaldamento non sono funzionanti. Per ovviare a questo problema si cerca di compensare con altre lampade situate attorno a quelle rotte o in corrispondenza con esse sugli altri piani di riscaldamento. In generale è importante considerare la quantità di energia con cui si investe ciascun punto del foglio ed ha poca importanza se questa provenga maggiormente dal preriscaldamento o dal riscaldamento, inferiore o superiore. Nel caso in cui si ha una lampada del riscaldamento superiore non funzionante, si può aumentare la potenza della lampada del riscaldamento inferiore che interessa la stessa zona. Se le resistenze rotte risultano in corrispondenza con zone del foglio poco critiche, nel caso di celle frigorifero le parti orizzontali, non è necessario variare la potenza delle altre lampade.

Le immagini seguenti sono relative alla mappa dei riscaldi del frigorifero 281. Gli elementi segnalati in rosso in Figura 5.6 e Figura 5.7 corrispondono a lampade non funzionanti per cui la loro potenza è pari a zero.



Figura 5.5: foto del pezzo termoformato. Frigorifero 281



Figura 5.6: riscaldo superiore. Frigorifero 281



Figura 5.7: preriscaldamento superiore. Frigorifero 281

Si è voluto cercare un metodo generale per la creazione automatica di una prima mappa dei riscaldi. Non si è, quindi, considerata la presenza di irradiatori non funzionanti ma si è ipotizzato di poter lavorare con termoformatrici prive di difetti.

Per poter confrontare i risultati delle due versioni del programma con le mappe dei riscaldi fornite dalla Whirlpool®, si è chiesto agli operatori di impostare, in via ipotetica, le percentuali di accensione delle lampade considerandole tutte integre.

4.1 Casi Whirlpool®

A seconda delle dimensioni del pezzo da termoformare la Whirlpool® produce, con le sue termoformatrici, uno o due celle frigorifero/freezer contemporaneamente. Si è posta particolare attenzione alla produzione del pezzo singolo perché durante le interviste agli operatori si è discusso maggiormente di questo caso. Come esempio di pezzo singolo sono state fornite le mappe dei riscaldi di tre frigoriferi normali, due dotati di gradino ed uno no (frigoriferi 281, 244 e frigorifero Tall), e di un frigorifero e un freezer side by side.

Inizialmente si è verificata la validità dei due metodi descritti precedentemente, solo per la termoformatura di pezzi singoli. Successivamente si è valutato il caso di due celle termoformate contemporaneamente. Questo ha portato all'introduzione di leggere modifiche che tenessero conto del fatto che per formare i due pezzi si devono creare due palloni distinti. Come esempio di due celle termoformate contemporaneamente, la Whirlpool® ha fornito due mappe dei riscaldi relative alla cella freezer 304 modello nuovo e vecchio.

Nelle immagini da Figura 5.8 a Figura 5.13 sono riportati i disegni a tre dimensioni delle diverse celle.

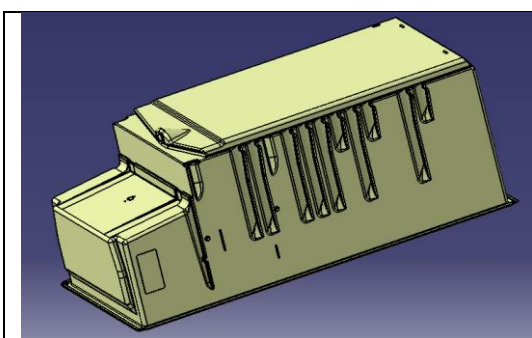


Figura 5.8: cella 281. Frigorifero normale con gradino

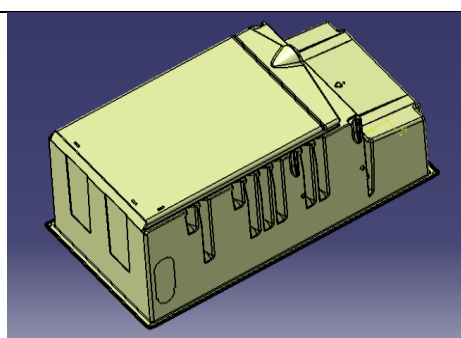


Figura 5.9: cella 244. Frigorifero normale con gradino

Le due celle si differenziano solo per la loro lunghezza. La 244 è 82 mm più corta della 281. Per questo motivo sulle pareti verticali relative al lato lungo la cella 244 ha tre scanalature in meno della 281.

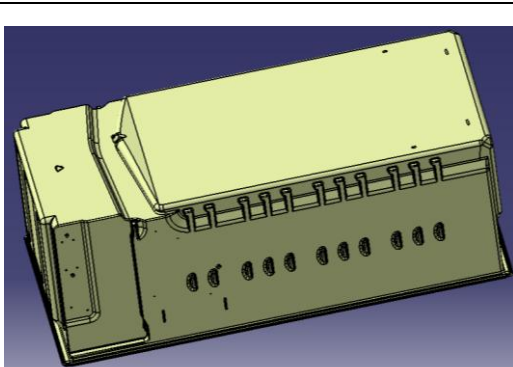


Figura 5.10: cella Tall. Frigorifero normale senza gradino

La cella Tall rispetto alle celle 281 e 244 è più difficile da termoformare perché è priva del gradino. Quando si pre-stira il foglio riscaldato formando il cosiddetto “pallone”, si vorrebbe far assumere alla plastica la forma dell’oggetto che si vuole ottenere. Il parallelepipedo con cui si può approssimare la cella Tall è più lontano dalla forma a cupola del pallone rispetto al parallelepipedo dotato di gradino delle celle 281 e 244.

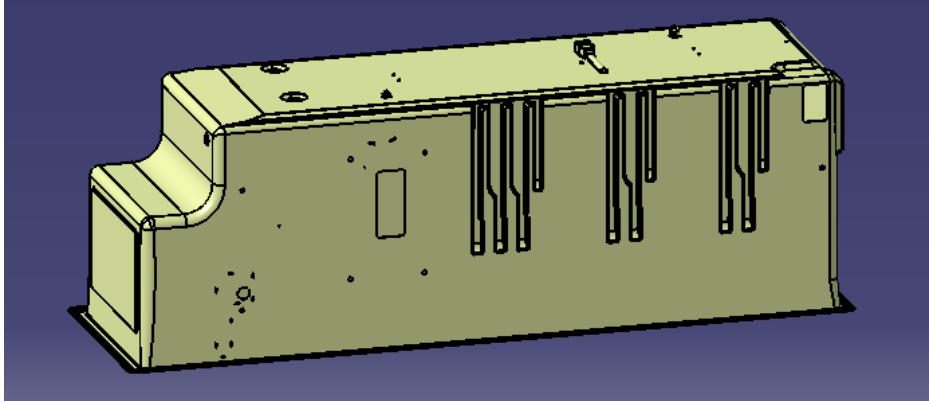


Figura 5.11: frigorifero side by side

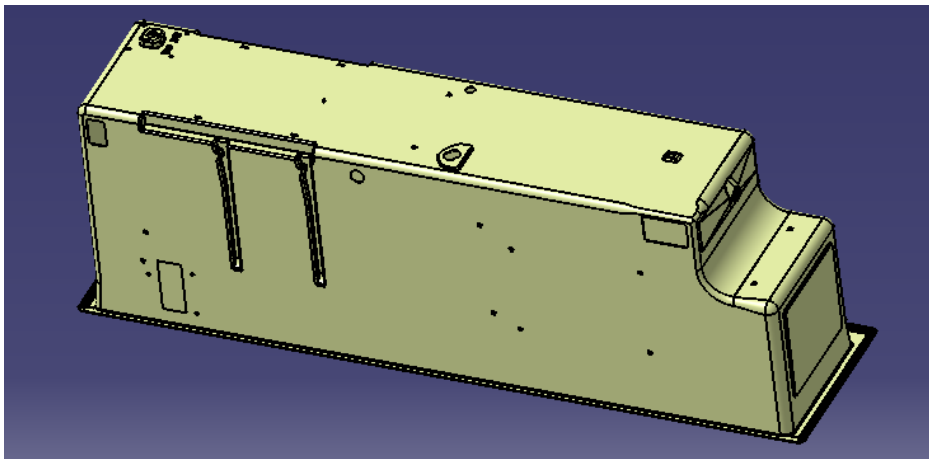


Figura 5.12: freezer side by side

Per termoformare le celle side by side si parte da un foglio di plastica molto più grande dell’apertura del frigorifero, chiamata anche *bocca*, perché si devono maggiormente sviluppare in profondità rispetto alle altre.

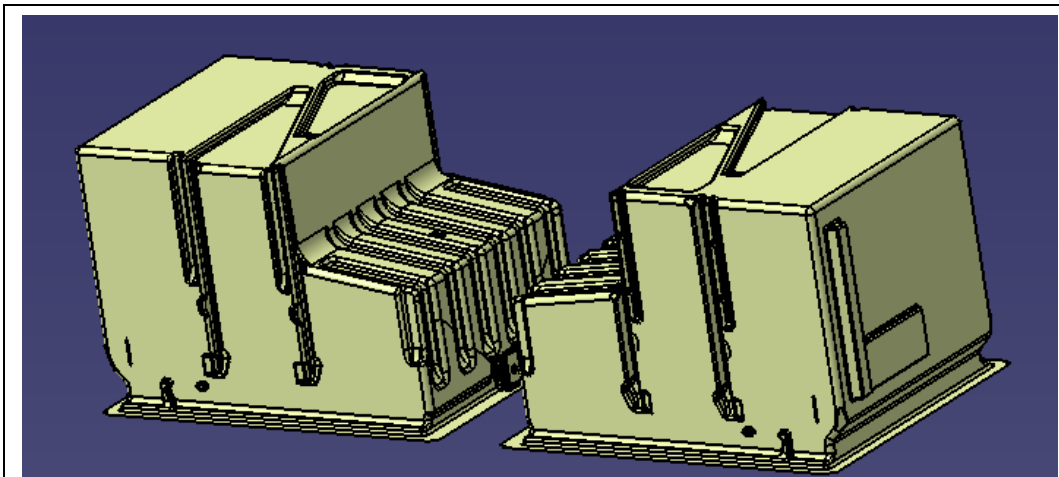


Figura 5.13: celle freezer 304, modello nuovo. Freezer doppia cella

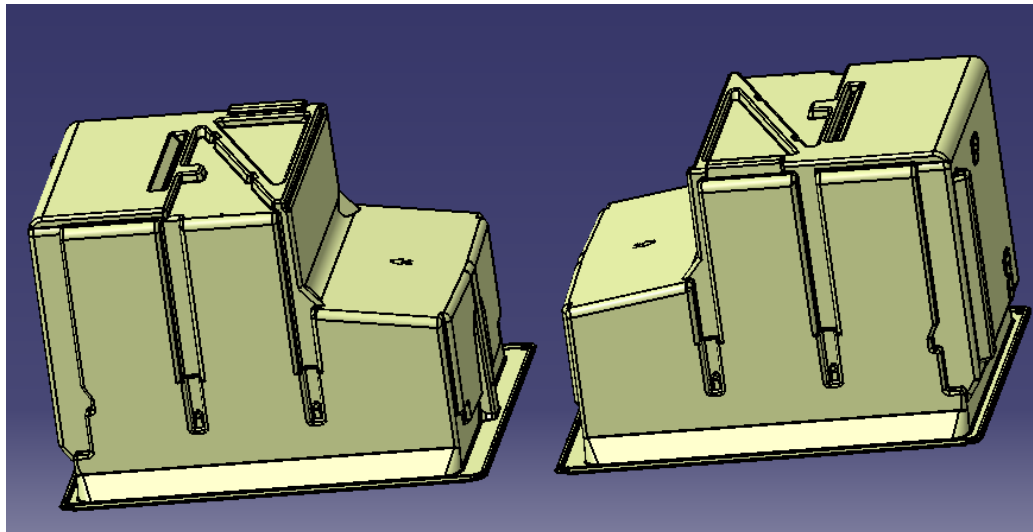


Figura 5.14: celle freezer 304, modello vecchio. Freezer 304

Il nuovo modello del Freezer 304, presente in Figura 5.13, sarà in seguito chiamato Freezer doppia cella. Questo presenta sulla parte anteriore delle scanature ed è circa 20 mm più lungo del vecchio modello

In Tabella 5.1 sono riportate le misure relative alle celle frigorifero/freezer termoformate singolarmente.

Tabella 5.1: misure celle frigorifero/freezer termoformate singolarmente

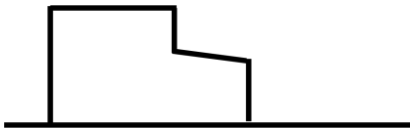
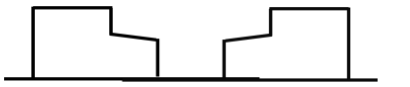
	cella 281	cella 244	cella Tall	frigo sbs	freezer sbs
Profondità cella (mm)	428	428	435	530	523
Larghezza bocca (mm)	482	482	482	426	320
Lunghezza bocca (mm)	1.032	950	1.122	1.555	1.540
Area bocca (mm ²)	497.424	457.900	540.804	662.430	492.800
Spessore foglio	3,90	4,10	3,90	3,80	3,80
Larghezza foglio (mm)	660	670	670	740	740
Lunghezza foglio (mm)	1.250	1.180	1.350	1.835	1.835
Area foglio (mm ²)	825.000	790.600	904.500	1.357.900	1.357.900
Rapporto area foglio/area bocca	1,66	1,73	1,67	2,05	2,76
Rapporto larghezza bocca/profondità	1,13	1,13	1,11	0,80	0,61
Rapporto lunghezza bocca/profondità	2,41	2,22	2,58	2,93	2,94
Rapporto larghezza foglio/profondità	1,54	1,57	1,54	1,40	1,41
Rapporto lunghezza foglio/profondità	2,92	2,76	3,10	3,46	3,51

Si noti che le larghezze della bocca del frigorifero e del freezer side by side sono inferiori alla loro profondità. Per questo motivo la superficie del foglio di partenza è più del doppio dell'area della loro apertura. In generale avere a disposizioni fogli di grandi dimensioni semplifica il processo di termoformatura

perché si ha a disposizione più materiale e la discretizzazione data dalle lampade dei riscaldi è più fine. Nel riscaldare fogli con dimensioni ridotte vengono coinvolte meno lampade per cui è più difficile impostare un riscaldamento differenziato.

Si riportano anche le misure relative ai due modelli di celle freezer termoformate contemporaneamente.

Tabella 5.2: misure celle freezer termoformate contemporaneamente

	Freezer doppia cella	freezer 304	note
Profondità cella (mm)	417	417	Misure singola cella 
Larghezza bocca (mm)	482	482	
Lunghezza bocca (mm)	600	576	
Area bocca (mm ²)	289.200	277.632	
Spessore foglio	3,80	3,80	Misure intero foglio. Si termoformano due celle contemporaneamente 
Larghezza foglio (mm)	680	680	
Lunghezza foglio (mm)	1.680	1.570	
Area foglio (mm ²)	1.142.400	1.067.600	
Rapporto area foglio/area bocca	1,98	1,92	Si considera l'area di metà foglio
Rapporto larghezza bocca/profondità	1,16	1,16	
Rapporto lunghezza bocca/profondità	1,44	1,38	
Rapporto larghezza foglio/profondità	1,63	1,63	Il lato lungo del foglio viene diviso in due parti uguali
Rapporto lunghezza foglio/profondità	2,01	1,88	

Le celle frigorifero/freezer fornite dalla Whirlpool® sono state prodotte sulla macchina in linea “Super Line New Generation” della COMI s.r.l. Nell’appendice 2 vi è la disposizione e la grandezza delle lampade sui due piani di preriscaldamento e riscaldamento. I preriscaldati sono costituiti da lampade con potenza nominale 650W e dimensioni 105*260 mm. I due piani sono sfalsati tra loro rispetto al lato corto: quello inferiore ha una riga di lampade in meno rispetto a quello superiore.

Le lampade dei riscaldati sono da 500W e 1000W ed hanno differenti dimensioni: 105*260mm, 105*130mm e 140*87mm. Anche i due piani di riscaldamento sono sfalsati tra loro e quello inferiore rispetto al superiore non ha la riga di lampade centrali.

Per poter gestire i quattro piani di riscaldamento si è considerata la quantità di energia totale incidente su zone del foglio molto piccole. I quattro piani di riscaldamento sono stati intersecati tra loro ottenendo il risultato presentato in Figura 5.15.



Figura 5.15: intersezione pre-riscaldamento e riscaldamento superiore e inferiore

Se si considera un elemento fittizio dalle dimensioni $\left(\frac{105}{6} * \frac{260}{6}\right)$ mm si riescono a ricostruire tutte le zone che scaturiscono dall’intersezione dei vari piani. Sono stati creati degli appositi file *excel* con la disposizione delle lampade dei preriscaldati e dei riscaldati e si è considerata una griglia di lampadine elementari dalle dimensioni $\left(\frac{105}{6} * \frac{260}{6}\right)$ mm in cui è stata riportata la somma dell’energia

proveniente dai piani di riscaldamento e pre-riscaldamento. Per semplicità non si è considerata la forma conica dei raggi dell'irradiatore, per cui si è ritenuto che ciascuna zona del foglio fosse riscaldata solamente dalle lampade direttamente sopra o sotto di essa.

I file *excel* contenenti i dati forniti dalla Whirlpool® sono costituiti da 5 fogli.

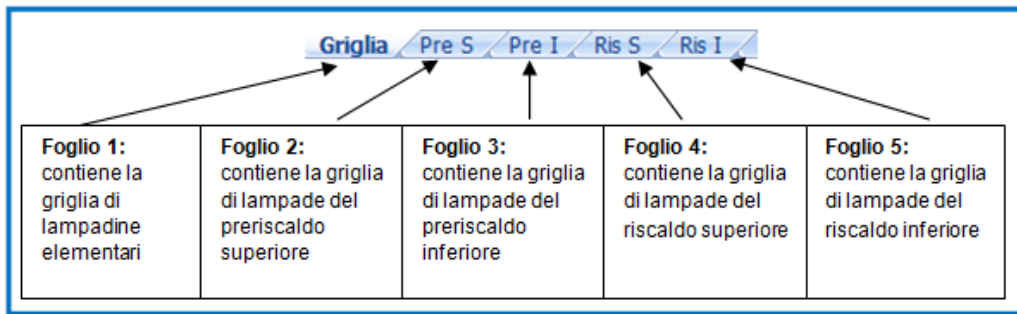


Figura 5.16: struttura dei file excel contenenti i dati Whirlpool®

Nel primo foglio vi è la griglia di lampadine elementari $\left(\frac{105}{6} * \frac{260}{6}\right)$ mm, nel secondo la griglia di lampade del pre-riscaldamento superiore, nel terzo quella del preriscaldamento inferiore, nel quarto il riscaldamento superiore e nel quinto il riscaldamento inferiore.

I fogli relativi a preriscaldi e riscaldi contengono due matrici riportate in Figura 5.17 e Figura 5.18. Nella prima vi è la percentuale di potenza data alle lampade e nella seconda l'energia associata a ciascuna lampada (i riscaldi sono costituiti da resistenze con potenza nominale differente).

0%																						
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%							
0%	0%	99%	99%	99%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	99%	99%	99%	0%	0%							
0%	0%	0%	99%	55%	40%	15%	15%	35%	35%	35%	35%	35%	25%	20%	20%	40%	55%	99%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	99%	55%	20%	20%	30%	30%	25%	25%	20%	20%	20%	22%	22%	45%	55%	99%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	99%	55%	40%	15%	15%	35%	35%	35%	35%	35%	25%	20%	20%	40%	55%	99%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	99%	99%	99%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	99%	99%	99%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%																						

Figura 5.17: parte alta del foglio dedicato al riscaldamento superiore(Ris S). Vi è la percentuale di potenza di ciascuna lampada. I valori riportati si riferiscono al frigorifero 281

Nell'appendice 6 sono riportati i dati relativi alle 7 celle frigorifero/freezer fornite dalla Whirlpool®.

Nel sottocapitolo 3.2.1 si è parlato dell'elemento di riscaldamento elementare. Si ricorda che è un sottomultiplo delle lampade reali e che tutti i ragionamenti implementati nelle due versioni del programma sono basati su di esso. La percentuale di potenza attribuita a ciascuna lampada reale proviene dalla media dei valori assegnati agli elementi di riscaldamento elementari che la costituiscono.

Per considerare la disposizione delle lampade riportata nell'appendice 2 sono state definite lampadine elementari:

- $\left(\frac{105}{6} * \frac{260}{6}\right) = (17.5 * 43.3)$ mm, nella versione 1
- (20*40) mm, nella versione 2

Matlab utilizza questi dati e scrive i suoi risultati su un apposito file *excel* dove si esegue una media per riportarsi alle lampade reali.

4.2 Doppia cella

La termoformatura contemporanea di due celle freezer avviene attraverso uno stampo avente i due pezzi uno di fronte all'altro. Il foglio di partenza è unico e le due celle vengono divise una dall'altra in un momento successivo allo scarico del pezzo termoformato. Per termoformare due celle contemporaneamente vengono creati due palloni. Il foglio unico iniziale nel momento della pallonatura, viene vincolato da una barra passante per la mezzera relativa al suo lato lungo. Nella macchina in linea "Super Line New Generation" utilizzata per produrre le celle analizzate, vi è una stazione dedicata al preriscaldamento, una al riscaldamento ed una terza per la formatura del pezzo.

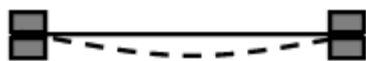


Figura 5.20: preriscaldamento. Foglio incurvato verso il basso

La fase di preriscaldamento serve principalmente per portare il foglio a temperatura uniforme. Esso è vincolato dal premilastra solo sul perimetro per cui tende ad incurvarsi tutto verso il basso.



Figura 5.21: riscaldamento. Foglio incurvato verso il basso

Nella fase di riscaldamento vi è una barra centrale che sostiene il foglio.

La zona del foglio sostenuta dalla barra centrale deve essere riscaldata di meno perché nel momento in cui si formano i due palloni il materiale deve rimanere in centro e non spostarsi a destra o a sinistra. Il perimetro del foglio è pinzato dal premilastra che lo vincola a rimanere fermo mentre la barra centrale è solo appoggiata. Più si riscalda il materiale al centro più questo ha tendenza a spostarsi dalla sua posizione.

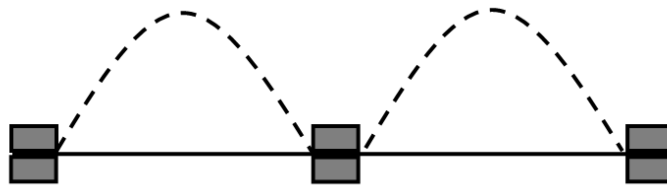


Figura 5.22: doppio pallone

Per poter tenere in considerazione la presenza della barra centrale si sono dovute apportare delle modifiche ai due metodi per la creazione automatica di mappe dei riscaldi, descritti precedentemente. In particolare si sono dovute mantenere a minor potenza le lampade dei riscaldi direttamente sopra o sotto alla barra centrale.

4.3 Risultati versione 1 per le celle Whirlpool®

Nel sottocapitolo 3.2.3 relativo alla spiegazione del funzionamento della prima versione del programma, si è detto che la scelta della macchina di tipo 2 tra gli input da dare al programma, equivale a considerare la disposizione delle lampade della termoformatrice “Super Line New Generation” utilizzata dalla Whirlpool®.

In questa macchina vi sono 4 piani adibiti al riscaldamento del materiale per cui il file *excel* contenente gli output del programma, comprende 4 fogli con le percentuali di potenza attribuite alle lampade reali dei vari piani.

In Figura 5.23 si riporta la struttura del file di output per la macchina di tipo 2.

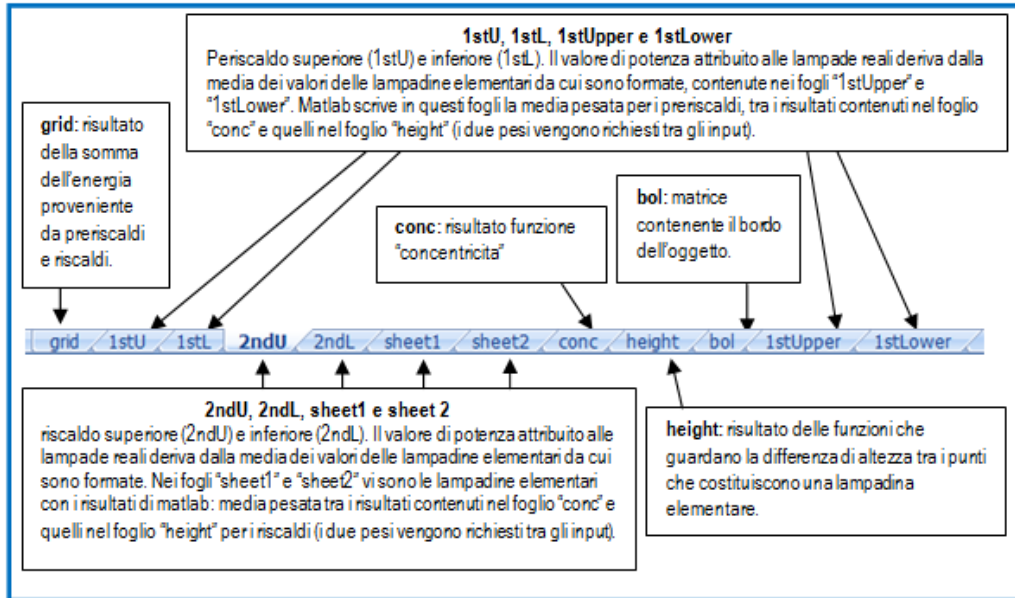


Figura 5.23: struttura del file excel contenete i risultati della prima versione del programma. Macchina di tipo 2

Nelle figure da 4.25 a 4.36 sono riportati i risultati contenuti nei fogli descritti nell’immagine precedente per il frigorifero 281. Nell’appendice 8 vi sono i risultati ottenuti per tutte le celle frigorifero/freezer fornite dalla Whirlpool®. Nel sottocapitolo successivo vengono confrontati questi risultati con i dati forniti e discussa la validità del metodo.

FRIGORIFERO 281 - INPUT

$P_{max}=80$	$P_{min}=20$	$N_z=2$
Potenza massima esterna per la funzione “concentricita”	Potenza minima interna per la funzione “concentricita”	Numero di cornici di potenza (funzione “concentricita”)
$P_i=30$	$c_{11}=1$	$c_{21}=0.7$
Potenza iniziale per la funzione che guarda la differenza di altezza	Importanza della funzione “concentricita” sui preriscaldi.	Importanza della funzione “concentricita” sui riscaldi

OUTPUT

Figura 5.24: foglio "grid". Somma dell'energia proveniente da preriscaldi e riscaldi per il frigorifero 281.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	70,0	70,0	70,0	70,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	70,0	70,0	70,0	70,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 5.25: foglio "1stU". Preriscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	20,0	20,0	20,0	20,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 5.26: foglio "1stL". Preriscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0				
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
0,0	0,0	65,0	65,0	57,1	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	64,5	65,0	0,0	0,0	0,0						
0,0	0,0	0,0	65,0	65,0	65,0	18,9	23,0	21,7	19,5	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	60,7	65,0	65,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	65,0	65,0	65,0	18,9	23,0	21,6	19,3	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	60,7	65,0	65,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	65,0	65,0	65,0	18,9	23,0	21,7	19,3	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	60,7	65,0	65,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	65,0	65,0	57,1	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	64,5	65,0	0,0	0,0	0,0						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0							

Figura 5.27: foglio "2ndU". Riscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0				
0,0	0,0	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	0,0	0,0	0,0						
0,0	0,0	65,0	65,0	27,3	28,1	27,0	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	62,6	65,0	0,0	0,0	0,0						
0,0	0,0	0,0	65,0	65,0	65,0	18,9	23,0	21,6	19,4	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	60,7	65,0	65,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	65,0	65,0	65,0	18,9	23,0	21,6	19,3	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	60,7	65,0	65,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	65,0	65,0	27,3	28,1	27,0	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	62,6	65,0	0,0	0,0	0,0						
0,0	0,0	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	0,0	0,0	0,0						
0,0			0,0			0,0			0,0			0,0			0,0							

Figura 5.28: foglio "2ndL". Riscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

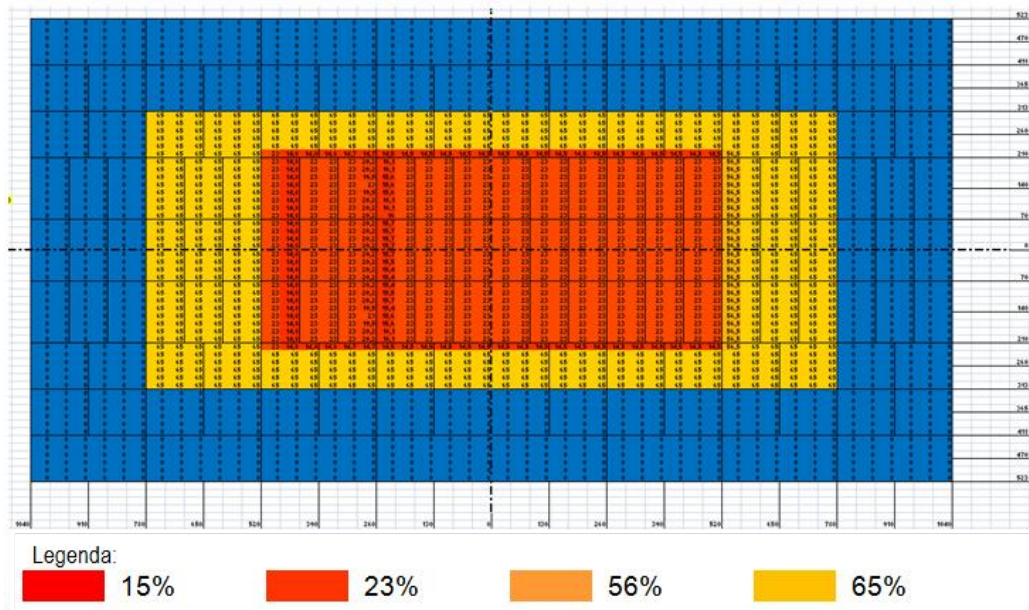


Figura 5.30: foglio "sheet1". Riferimento per il foglio "2ndU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari. I numeri in nero sulla parte destra ed inferiore della figura sono le misure in mm a partire dalla mezzzeria.

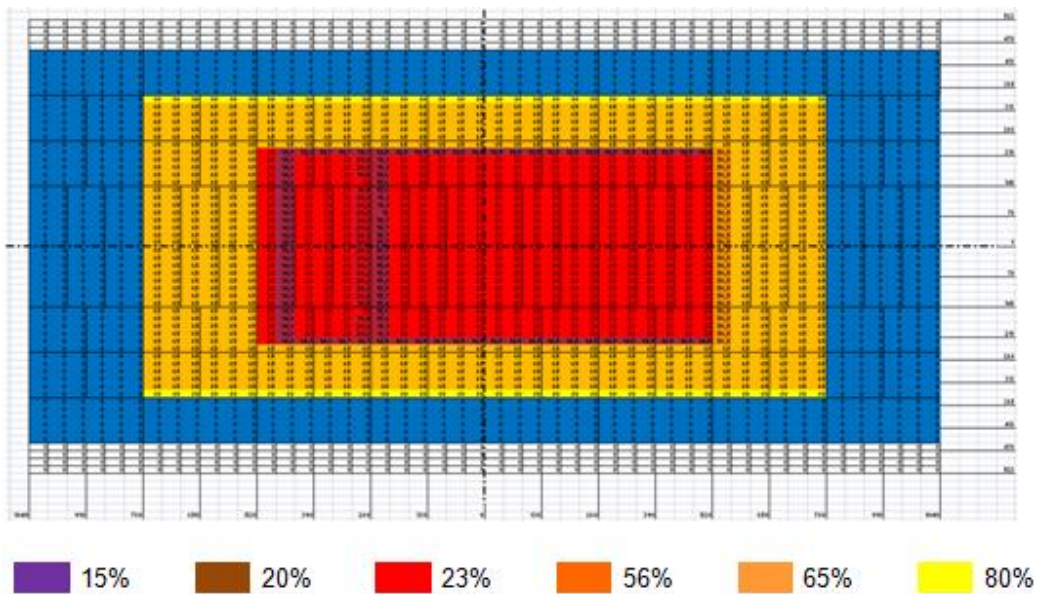


Figura 5.29: foglio "sheet2". Riferimento per il foglio "2ndL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari. I numeri in nero sulla parte destra ed inferiore della figura sono le misure in mm a partire dalla mezzzeria.



Figura 5.33: foglio "bol". Risultato dell'identificazione del bordo dell'oggetto. La funzione "concentricita" si basa su questa matrice.

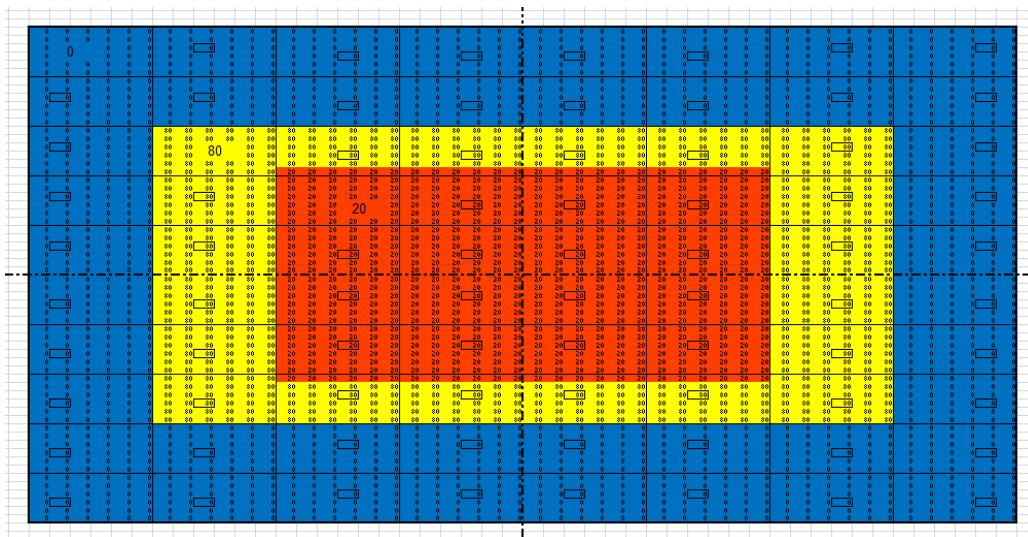


Figura 5.34: foglio "1stUpper". Riferimento per il foglio "1stU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

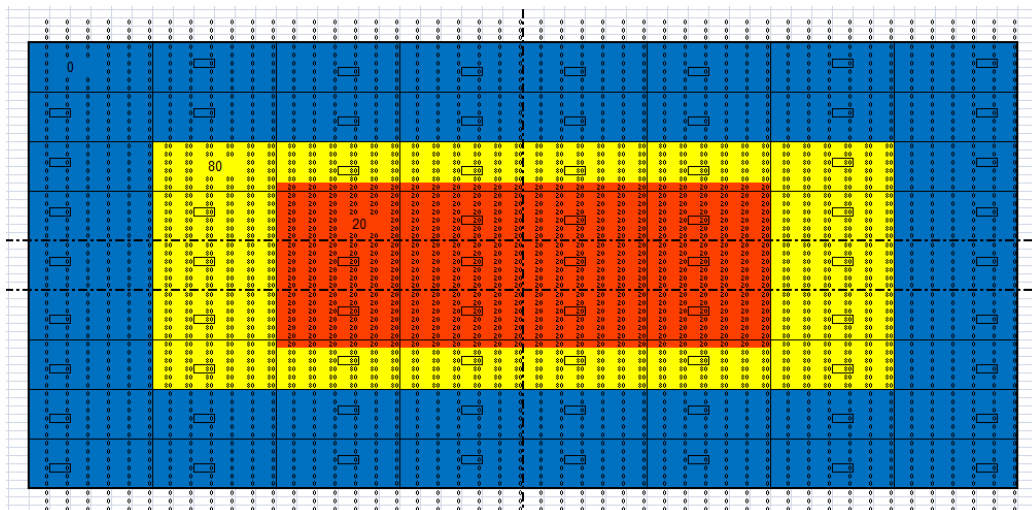


Figura 5.35: foglio "1stL". Riferimento per il foglio "1stL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

Per le macchine in linea con la disposizione delle lampade presente nell'appendice 2 (tipo 2 nella pagina relativa agli INPUT) sui preriscaldi, al posto di fare la media aritmetica per ritornare alle lampade reali, si considera il valore di potenza dato alle lampadine elementari in corrispondenza con il centro di quelle reali (celle piccole bordate in nero in Figura 5.34 e Figura 5.35)

4.3.1 Confronto con i dati Whirlpool®

Al fine di avere un confronto con i dati forniti dalla Whirlpool® si è guardata la quantità di energia proveniente da preriscaldi e riscaldi incidente su zone del foglio con la dimensione delle lampadine elementari. Per poter considerare l'energia, i valori di potenza sono stati moltiplicati per il tempo di riscaldamento che è stato mantenuto uguale a quello utilizzato in Whirlpool® (poco meno di 1 minuto). In particolare si è vista la differenza relativa tra i valori del foglio "grid" del file contenente i risultati del programma e del file con i dati reali.

Di seguito si riportano dettagliatamente i risultati ottenuti per il frigorifero 281. Nell'appendice 9 si trovano queste stesse informazioni per le altre celle considerate. Alla fine di questo sottocapitolo vi è una tabella che riassume il contenuto dell'appendice 9 (Tabella 5.3).

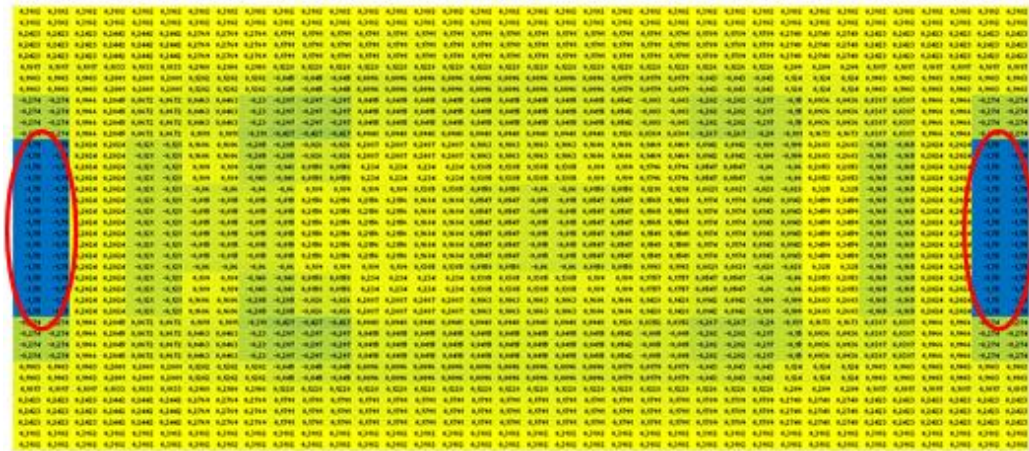


Figura 5.36: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Frigorifero 281

In ciascuna cella vi è il risultato di $\frac{dati_{whirlpool} - risultati_{matlab}}{dati_{whirlpool}}$.

Sono stati colorati in blu i valori minori di zero ed in giallo quelli maggiori. Le zone in blu sono quelle per cui seguendo i risultati del programma *matlab*, bisognerebbe fornire più energia rispetto ai dati forniti dalla Whirlpool® mentre nelle zone gialle bisognerebbe fornire meno energia.

Nelle due aree evidenziata dagli ovali rossi vi è un valore pari a -1.75. Questo significa che i risultati forniti da *matlab* sono molto discordanti dai dati Whirlpool®. Riguardando quest'ultimi si nota che le lampade del riscaldamento superiore e inferiore che interessano queste zone sono spente, mentre secondo i risultati del programma, bisognerebbe tenerle accese alla massima potenza. Dalle interviste agli operatori si è dedotto che tenere alcune lampade esterne al premiladra accese anziché spente, non ha molta rilevanza sulla riuscita del pezzo. L'operatore, nel momento in cui si rende conto che la loro accensione non è necessaria, provvede a spegnerle per un risparmio energetico. La cornice di lampade più esterna serve a creare una barriera di calore rispetto all'ambiente in cui si trova la macchina per cui potrebbe essere necessaria solo nella stagione invernale.

I valori in Figura 5.36 sono stati inseriti in un istogramma per poter evidenziare la loro distribuzione. In particolare si sono definite delle categorie con larghezza pari a 0.05 ed è stato rappresentato il numero di valori appartenenti a ciascuna categoria.

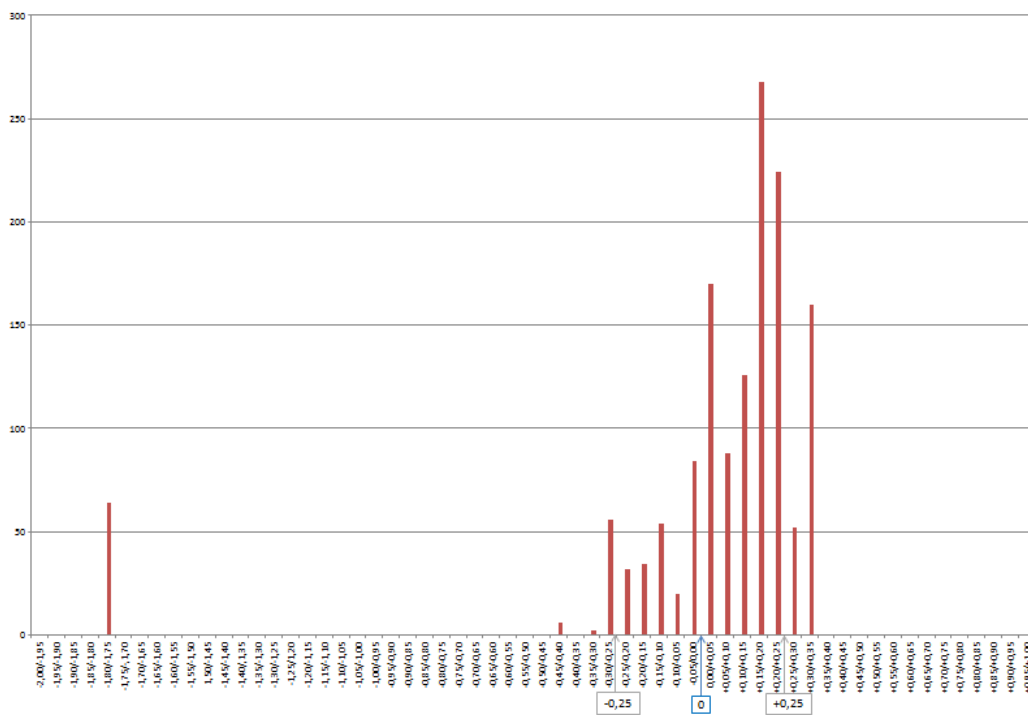


Figura 5.37: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Frigorifero 281

A ciascun modello di frigorifero si possono associare differenti mappe dei riscaldi. È praticamente certo che due operatori distinti, in base alla loro personale esperienza, di fronte allo stesso oggetto da termoformare sulla stessa macchina impostino parametri differenti.

Dato che per ogni pezzo è stata fornita una sola mappa dei riscaldi si è pensato di poter ritenere accettabili tutti i valori compresi in un range da -0.25 a +0.25.

È anche stato considerato un range da -0.20 a +0.20 per vedere di quanto diminuisse la percentuale di valori accettabili restringendo il campo di tollerabilità.

Per il frigorifero 281 si è visto che considerando anche le lampade esterne al premilastra il 76,4% dei valori sono compresi nel range ± 0.25 e il 58,6% nel range ± 0.20 . Se non si considerano le lampade più esterne le percentuali aumentano al 82,2% e al 64,1%.

In Tabella 5.3 sono riportate le percentuali di valori compresi nei range ± 0.25 e ± 0.20 ottenute sulle altre celle termoformate singolarmente. In queste non sono state considerate le lampade esterne al premilastra.

Tabella 5.3: confronto coi dati Whirlpool®. Celle termoformate singolarmente, versione 1

	cella 281	cella 244	cella tall	frigo sbs	freezer sbs
Percentuale nel range $\pm 0,25$	82,2	89,9	76,4	90,6	92,3
Percentuale nel range $\pm 0,20$	64,1	80,7	55,8	80,6	88,2

Si osserva che le percentuali ottenute sono molto alte per le celle side by side ed un po' meno per quelle normali. Nel caso peggiore si ha comunque più del 55% di valori compresi nel range ± 0.20 . Da questi risultati si può, quindi, ritenere valido il metodo sviluppato.

4.3.2 Versione 1 per le celle doppie

Nel programma scritto in *matlab* per produrre in modo automatico una prima mappa dei riscaldi si è tenuto conto della presenza della barra centrale nella fase di riscaldamento, raffreddando tutte le lampadine elementari in sua corrispondenza. In particolare gli è stato dato il valore di potenza minima inserito come input dall'utente.

Se si guardano le mappe dei riscaldi relative al freezer doppia cella e al freezer 304 riportate nell'appendice 6 si notano subito delle notevoli differenze. In particolare nel freezer doppia cella si hanno delle lampade spente nel riscaldamento superiore e inferiore mentre nel freezer 304 hanno quasi tutte una potenza superiore allo 0%. In realtà poiché tutte le lampade ad una potenza inferiore al 15% risultano essere spente, le due mappe sono abbastanza simili. Si deduce, quindi, che le pareti verticali di questi freezer hanno una importanza tale per cui le lampade in loro corrispondenza sono state spente.

Il programma originale fornisce i valori di potenza da assegnare alle lampadine elementari ed effettuando una media aritmetica, si riporta a quelle reali. Per poter spegnere le lampade reali in corrispondenza con le pareti verticali si è modificato il programma dando a tutte le lampade dei riscaldi il minimo tra i valori delle lampadine elementari da cui sono costituite anziché il valor medio. Inoltre, al posto di costruire una matrice tale per cui

$$(potenza_{lampada} * massima_{differenza\ di\ altezza} = costante)$$

si è direttamente dato un valore pari a zero alle lampadine elementari i cui punti proiettati ricadessero un po' sulla base ed un po' sul cielo del frigorifero (pareti verticali). In realtà sono state spente sia queste lampade sia quelle ad esse adiacenti perché l'identificazione della parete verticale attraverso la proiezione dei punti lungo l'asse normale, può non essere esatta. Tra le pareti verticali a cui è stato dato un valore pari a zero non si sono considerate le due direttamente affacciate alla barra centrale per non raffreddare ulteriormente questa zona. I risultati forniti in output dal programma si trovano nell'appendice 8. Di seguito si riporta il confronto con le mappe dei riscaldi fornite dalla Whirlpool®.

FREEZER DOPPIA CELLA

Tabella 5.4: input della versione 1 per il freezer doppia cella

$P_{max}=73$	$P_{min}=35$	$N_z=2$
Potenza massima esterna per la funzione "concentricità"	Potenza minima interna per la funzione "concentricità"	Numero di cornici di potenza (funzione "concentricità")

Figura 5.38: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Versione 1, freezer doppia cella

In questo caso non si riscontra il problema relativo alle lampade esterne al premlastra. I valori delle colonne più esterne sono pari a -0.16.

La percentuale di valori compresi nel range ± 0.25 è pari a 67,36% mentre quella nel range ± 0.20 è pari a 57,03%.

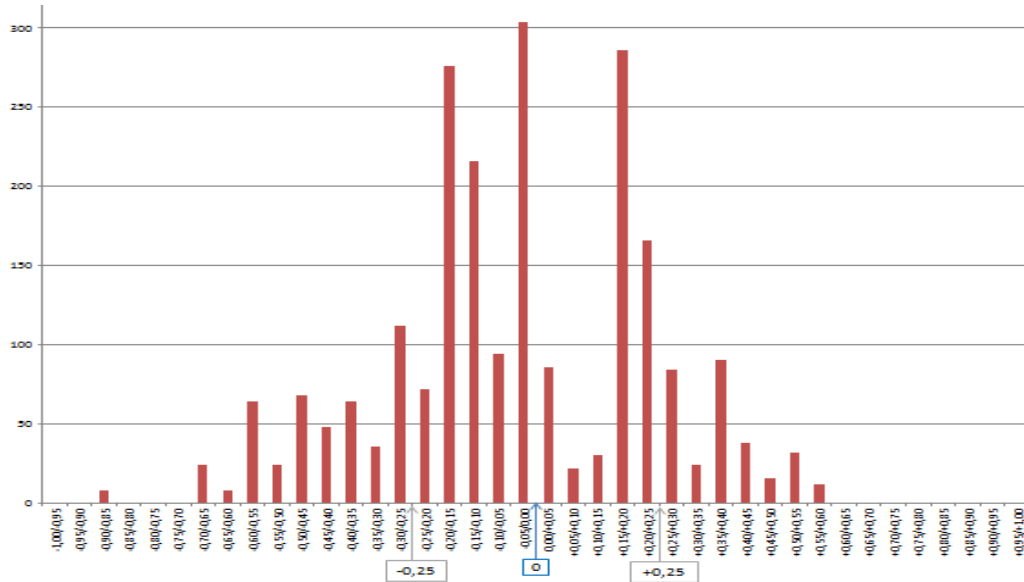


Figura 5.39: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 1, freezer doppia cella

FREEZER 304

Tabella 5.5: input della versione 1 per il freezer 304

$P_{max}=80$	$P_{min}=25$	$N_z=2$
Potenza massima esterna per la funzione "concentricita"	Potenza minima interna per la funzione "concentricita"	Numero di cornici di potenza (funzione "concentricita")

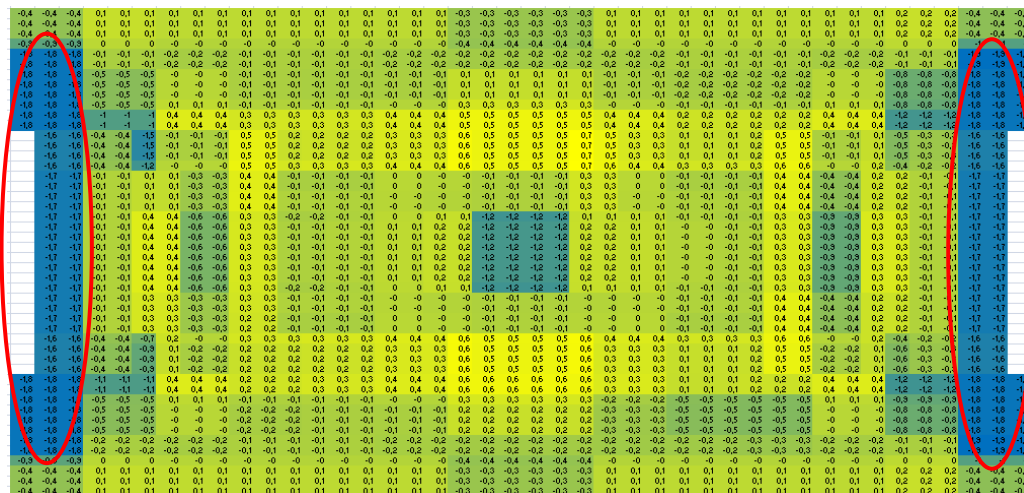


Figura 5.40: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Versione 1, freezer 304

Come per il frigorifero 281, secondo il programma *matlab*, bisognerebbe accendere delle lampade esterne al premilastra che sui dati Whirlpool® risultano spente. Nelle celle evidenziate dagli ovali rossi vi è un valore pari a -1,6.

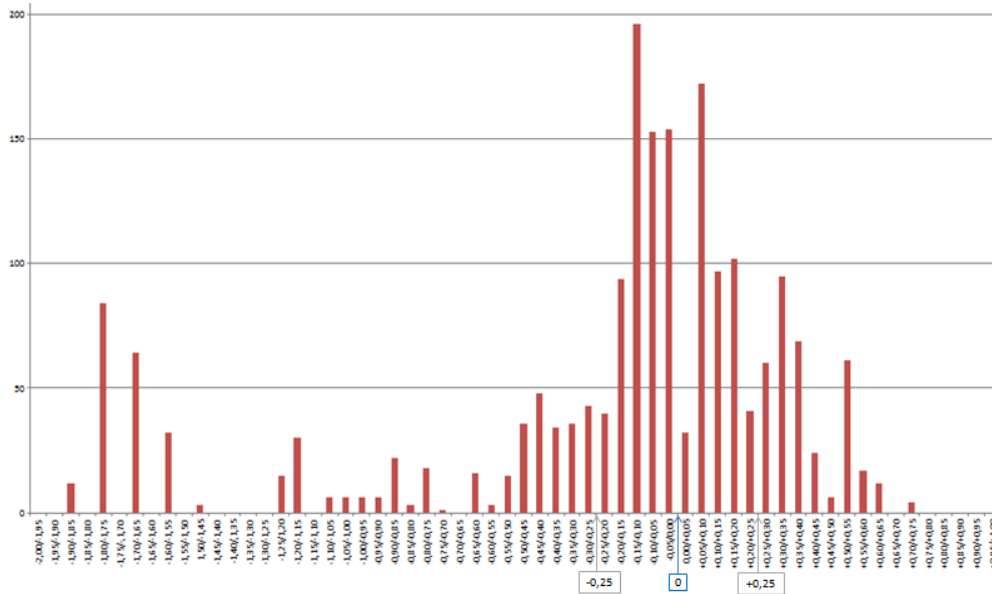


Figura 5.41: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 1, freezer 304

Se si considerano i risultati forniti da *matlab* senza apportare ulteriori modifiche si hanno il 54,93% dei valori nel range $\pm 0,25$ ed il 50,81% nel range $\pm 0,20$.

Se si spengono manualmente le lampade esterne al premilastra così come risulta dai dati Whirlpool® la percentuale di valori nei range considerati aumenta al 69,6% e al 66,7%.

Si ricorda che l'obiettivo del lavoro di tesi era quello di scrivere un programma che fornisse automaticamente una prima mappa dei riscaldi con cui eseguire le prove finalizzate a trovare i parametri ottimali della macchina. I risultati del programma sono stati confrontati con delle mappe di riscaldamento effettivamente utilizzate in produzione che, in genere, sono differenti da quelle delle prove iniziali. I dati forniti dalla Whirlpool® tengono conto delle particolarità della macchina, degli stampi e anche dello stesso operatore. Ognuno, in base alla propria esperienza, può variare parametri differenti per far fronte allo stesso problema.

4.3 Risultati versione 2 per le celle Whirlpool®

Come per la versione 1 la scelta della macchina di tipo 2 tra gli input da dare al programma, equivale a considerare la disposizione delle lampade della termoformatrice “Super Line New Generation” utilizzata dalla Whirlpool®. Anche per questo tipo di macchina vengono riportate tutte le informazioni descritte nel sottocapitolo 3.2.4 relativo alla spiegazione del funzionamento della seconda versione del programma.

In Figura 5.42 è riportata la struttura del file *excel* di output per la macchina di tipo 2.

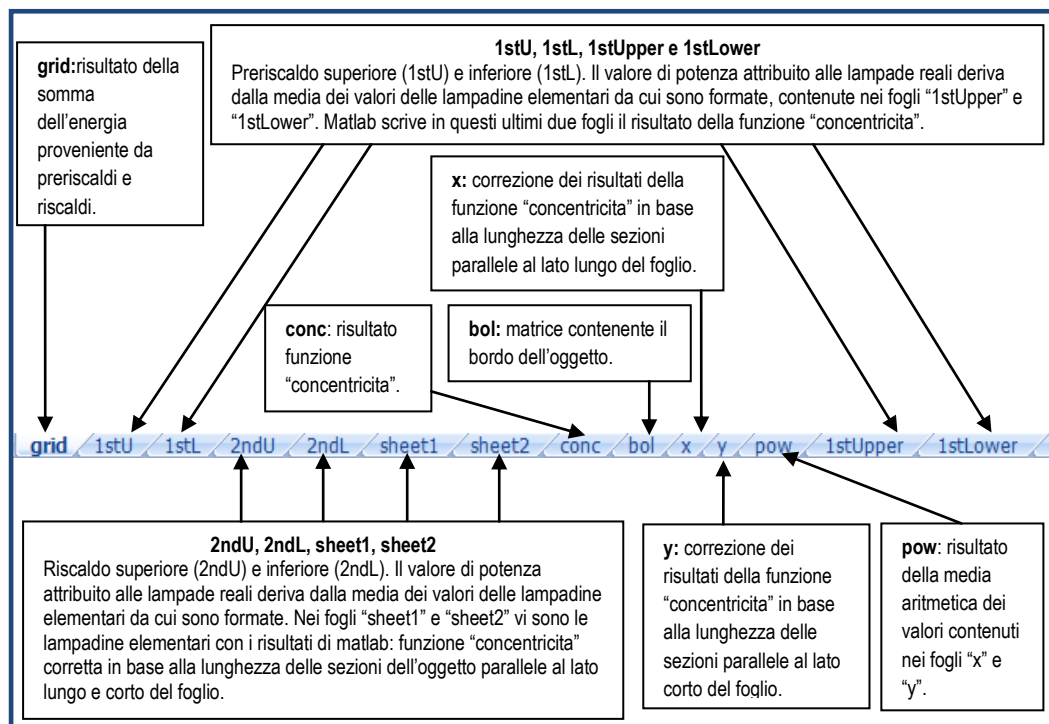


Figura 5.42: struttura del file excel contenete i risultati della seconda versione del programma.

Da Figura 5.43 a Figura 5.56 sono riportati i risultati contenuti nei fogli descritti nell'immagine precedente per il frigorifero 281. Nell'appendice 11 vi sono i valori ottenuti sulle altre celle frigorifero/freezer analizzate, con la seconda versione del programma.

FRIGORIFERO 281 - INPUT

<i>P</i> _{max} =80	<i>P</i> _{min} =25	<i>N</i> _z =2
Potenza massima esterna per la funzione “concentricita”	Potenza minima interna per la funzione “concentricita”	Numero di cornici di potenza (funzione “concentricita”)

OUTPUT

Figura 5.43: foglio "grid". Somma dell'energia proveniente da preriscaldi e riscaldi per il frigorifero 281.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 5.44: foglio “1stU”. Preriscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	25,0	25,0	25,0	25,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 5.45: foglio "1stL". Preriscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0															
0,0	0,0	80,0	80,0	78,1	76,0	74,1	73,6	73,6	73,6	73,6	73,6	80,0	80,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	79,0	78,7	57,3	44,7	43,0	42,5	42,5	42,5	42,5	42,0	74,4	79,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	0,0	76,8	73,5	73,5	52,0	15,3	20,5	19,8	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	18,2	15,0	52,0	73,5	76,8	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	76,7	73,4	73,4	51,9	15,5	20,8	20,1	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	18,5	15,2	51,9	73,4	76,7	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	76,7	73,5	73,5	52,0	15,1	20,2	19,5	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	17,9	14,8	52,0	73,5	76,7	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	80,0	80,0	66,0	56,1	53,5	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	77,9	80,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	80,0	80,0	78,7	77,4	76,0	75,7	75,7	75,7	75,7	75,7	80,0	80,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0							

Figura 5.46: foglio "2ndU". Riscaldamento superiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0															
0,0	0,0	80,0	80,0	74,1	68,0	64,7	63,9	63,9	63,9	63,9	63,9	80,0	80,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	76,1	74,8	33,9	16,8	17,8	17,6	17,6	17,6	17,6	15,4	64,1	76,1	0,0	0,0							
0,0	0,0	0,0	76,8	73,5	73,5	52,0	15,5	20,9	20,1	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	18,5	15,2	52,0	73,5	76,8	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	76,7	73,4	73,4	51,9	15,5	20,8	20,1	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	18,5	15,1	51,9	73,4	76,7	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	76,1	74,8	33,9	16,8	17,8	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	15,4	64,1	76,1	0,0	0,0						
0,0	0,0	80,0	80,0	74,1	68,0	64,7	63,9	63,9	63,9	63,9	63,9	80,0	80,0	0,0	0,0							
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0							

Figura 5.47: foglio "2ndL". Riscaldamento inferiore. Valore di potenza da assegnare alle lampade reali.

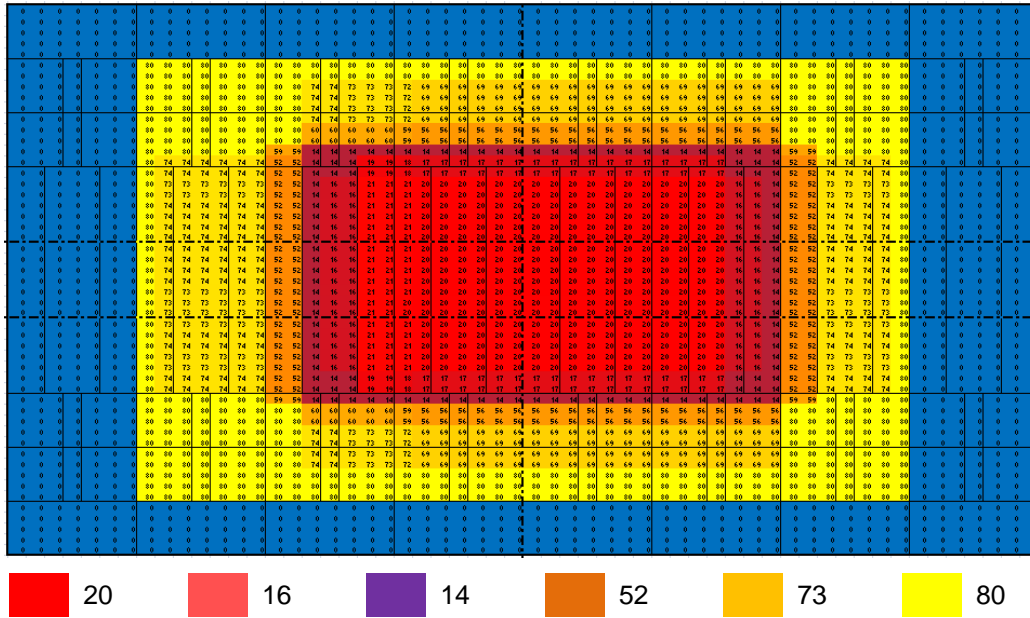


Figura 5.48: foglio "sheet1". Riferimento per il foglio "2ndU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

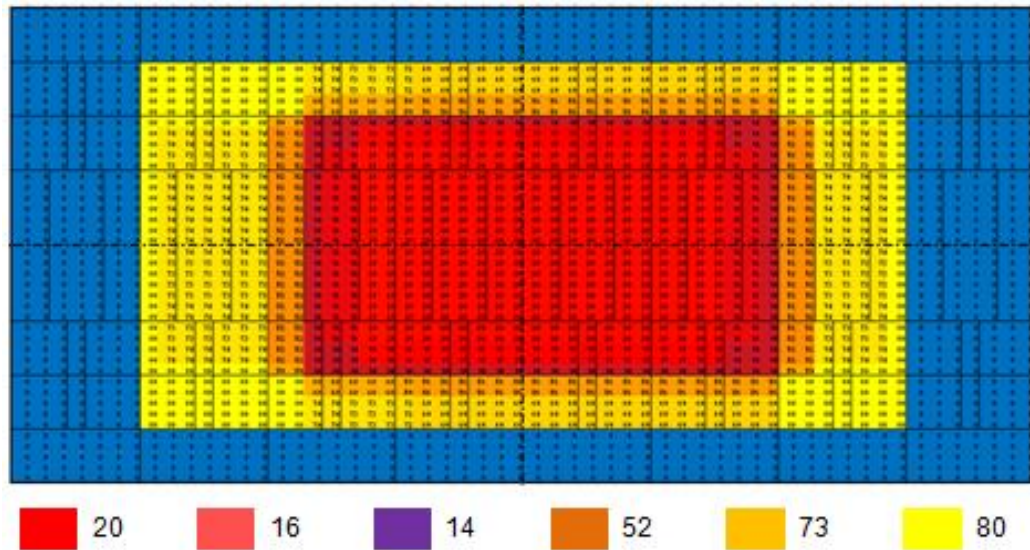


Figura 5.49: foglio "sheet2". Riferimento per il foglio "2ndL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

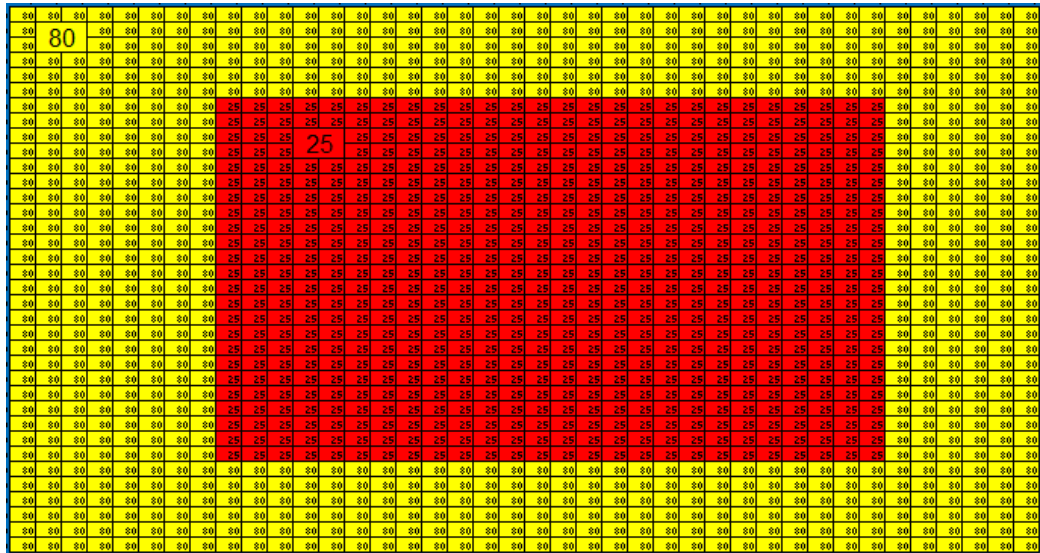


Figura 5.51: foglio "conc". Risultato della funzione "concentricita".

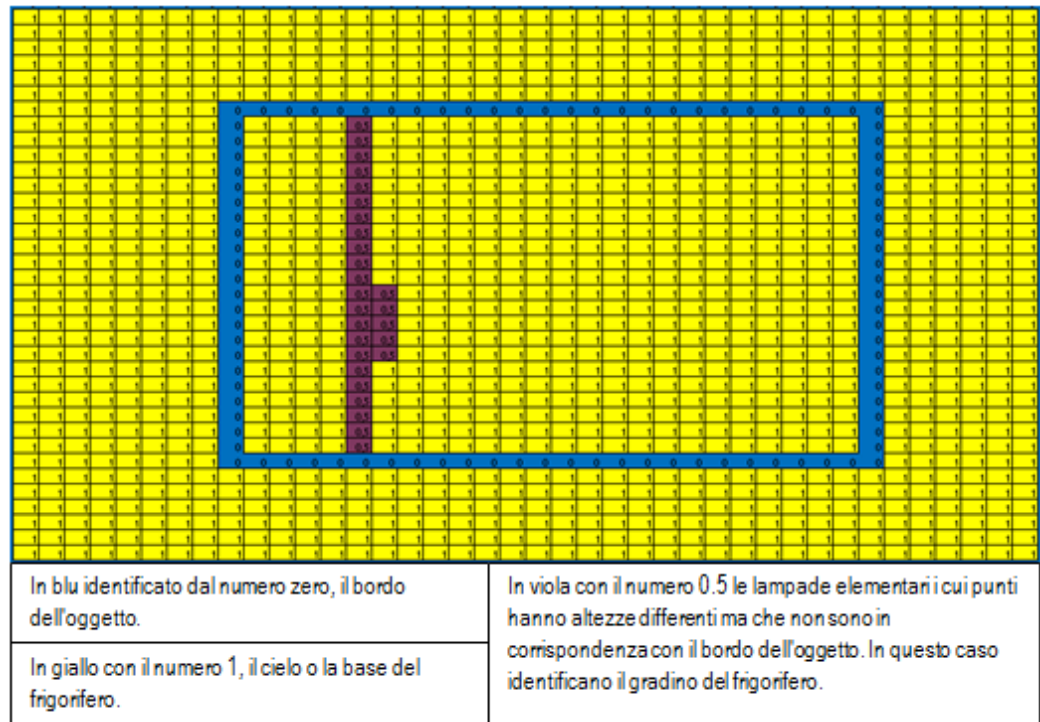


Figura 5.50: foglio "bol". Risultato dell'identificazione del bordo dell'oggetto. La funzione "concentricita" si basa su questa matrice.

Figura 5.52: foglio "x". Risultato della funzione "concentricita" corretto in base alla lunghezza delle sezioni parallele al lato lungo

Figura 4.53: foglio "y". Risultato della funzione "concentricita" corretto in base alla lunghezza delle sezioni parallele al lato corto

Figura 5.54: foglio "pow". Media aritmetica dei valori contenuti nei fogli "x" e "y".

Figura 5.55: foglio "1stUpper". Riferimento per il foglio "1stU", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

Figura 5.56: foglio "1stLower". Riferimento per il foglio "1stL", contiene i valori di potenza assegnati alle lampade elementari.

Per le macchine in linea con la disposizione delle lampade presente nell'appendice 2 (tipo 2 nella pagina relativa agli INPUT), sui preriscaldi, al posto di fare la media aritmetica per riportarsi alle lampade reali, si considera il valore di potenza dato alle lampadine elementari in corrispondenza con il centro di quelle reali (celle piccole bordate in nero in Figura 5.55 e Figura 5.56). La stessa considerazione è stata fatta nella versione 1 del programma.

4.3.1 Confronto con i dati Whirlpool®

Anche per questa versione, al fine di avere un confronto con i dati forniti dalla Whirlpool®, si è guardata la quantità di energia proveniente da preriscaldi e riscaldi incidente su zone del foglio aventi la dimensione delle lampadine elementari.

Di seguito si riportano dettagliatamente i risultati ottenuti per il frigorifero 281. Nell'appendice 12 si trovano queste stesse informazioni per le altre celle considerate. Alla fine di questo sottocapitolo vi è una tabella che riassume il contenuto dell'appendice 12.

Figura 5.57: differenza relativa tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma. Versione 2, frigorifero 281

In ciascuna cella vi è il risultato di $\frac{dati_{whirlpool} - risultati_{matlab}}{dati_{whirlpool}}$.

Come per la versione 1 sono stati colorati in blu i valori minori di zero ed in giallo quelli maggiori.

Guardando la Figura 5.57 si nota che seguendo i risultati *matlab* bisognerebbe scaldare le zone più esterne molto di più rispetto ai dati Whirlpool®. In particolare nelle prime e nelle ultime due righe della matrice in Figura 5.57 vi è un valore pari a -1.46 mentre nelle zone in blu delle prime e delle ultime due colonne vi è un valore pari a -2.04. Come già detto il tenere accese anziché spente le lampade molto lontane dal pezzo significa avere una maggior schermatura di calore rispetto all'ambiente esterno.

I valori contenuti nella matrice in Figura 5.57 sono stati riportati in un istogramma per vedere quale fosse il loro andamento.

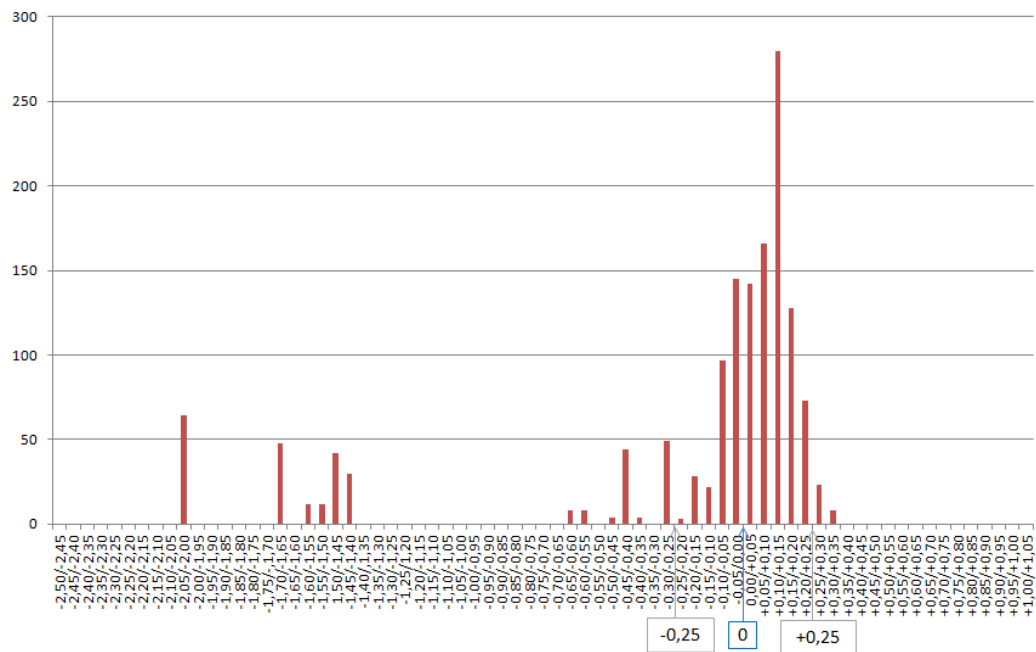


Figura 5.58: istogramma di confronto tra i risultati *matlab* e i dati Whirlpool®. Versione 2, frigorifero 281

Considerando anche le lampade esterne al prenilastra si hanno il 75,3% dei valori compresi nel range ± 0.25 e il 70% nel range ± 0.20 . Se non si guardano i valori nei bordi più esterni (prime ed ultime due righe e due colonne) le percentuali di valori accettabili arrivano al 89,9% e al 83,3%.

In Tabella 5.6 sono riportate le percentuali di valori compresi nei range ± 0.25 e ± 0.20 ottenute sulle altre celle termoformate singolarmente. Come per la prima versione, nel calcolo delle percentuali, non sono state considerate le lampade esterne al premilastra.

Tabella 5.6: confronto coi dati Whirlpool®. Celle termoformate singolarmente, versione 2

	cella 281	cella 244	cella tall	frigo sbs	freezer sbs
Percentuale nel range $\pm 0,25$	89,9	90,9	82,1	90,5	92,1
Percentuale nel range $\pm 0,20$	83,3	83,5	65,0	84,4	87,1

Confrontando la Tabella 5.6 con la Tabella 5.3 si può vedere che i risultati ottenuti con il secondo metodo sono migliori di quelli conseguiti con il primo. Per questo motivo e per la maggior semplicità d'utilizzo, il secondo metodo ha più probabilità di essere installato sul calcolatore delle termoformatrici. In quest'ottica si è voluto considerare il metodo basato sulla lunghezza delle sezioni parallele al lato lungo e corto del foglio (il secondo) anche per la termoformatura contemporanea di due celle.

4.4.2 Versione 2 per le celle doppie

Si ricorda che la termoformatura contemporanea di due celle prevede di creare due palloni distinti grazie all'utilizzo di una barra passante per la mezzeria relativa al lato lungo del foglio. Per poter considerare questa particolarità si sono dovute apportare delle leggere modifiche al metodo inizialmente sviluppato. In particolare si sono mantenute a potenza minima tutte le lampade in corrispondenza con la barra centrale e, per il calcolo delle lunghezze delle sezioni, si sono considerate in modo distinto le due metà del foglio.

I risultati forniti dal programma per il freezer doppia cella e per il freezer 304 si trovano in appendice 11. Di seguito si riportano i confronti con i dati Whirlpool®.

FREEZER DOPPIA CELLA

Tabella 5.7: input della versione 2 per il freezer doppia cella

$P_{max}=75$	$P_{min}=30$	$N_z=2$
Potenza massima esterna per la funzione “concentricita”	Potenza minima interna per la funzione “concentricita”	Numero di cornici di potenza (funzione “concentricita”)

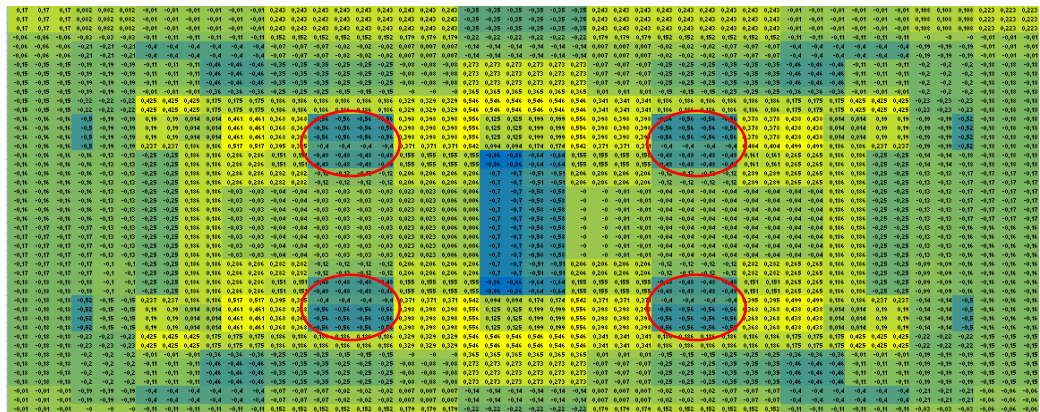


Figura 5.59: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Versione 2, freezer doppia cella

Guardando la Figura 5.59 si nota che vi sono alcune zone in cui, secondo i risultati del programma, bisognerebbe fornire molta più energia rispetto ai dati Whirlpool®. In particolare le 4 aree evidenziate dagli ovali rossi potrebbero essere molto critiche perché si trovano in corrispondenza con le pareti del pezzo da termoformare. Se si considerano i dati in Figura 5.59 si ha il 47,7% di valori compresi nel range $\pm 0,25$ e il 33,6% nel range $\pm 0,20$. Questo potrebbe essere ritenuto un risultato poco soddisfacente però se si appartano delle leggere modifiche ai valori di potenza ottenuti sui 4 piani di riscaldamento le percentuali aumentano al 67,4% e al 45,4%. In particolare sui due piani di preriscaldamento è stata posta a potenza minima una cornice di lampade che inizialmente era a potenza massima e, sui due piani di riscaldamento, sono state spente le lampade più esterne così come nei dati Whirlpool®.

In Figura 5.60 è riportato l'istogramma delle differenze relative tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma leggermente modificati.

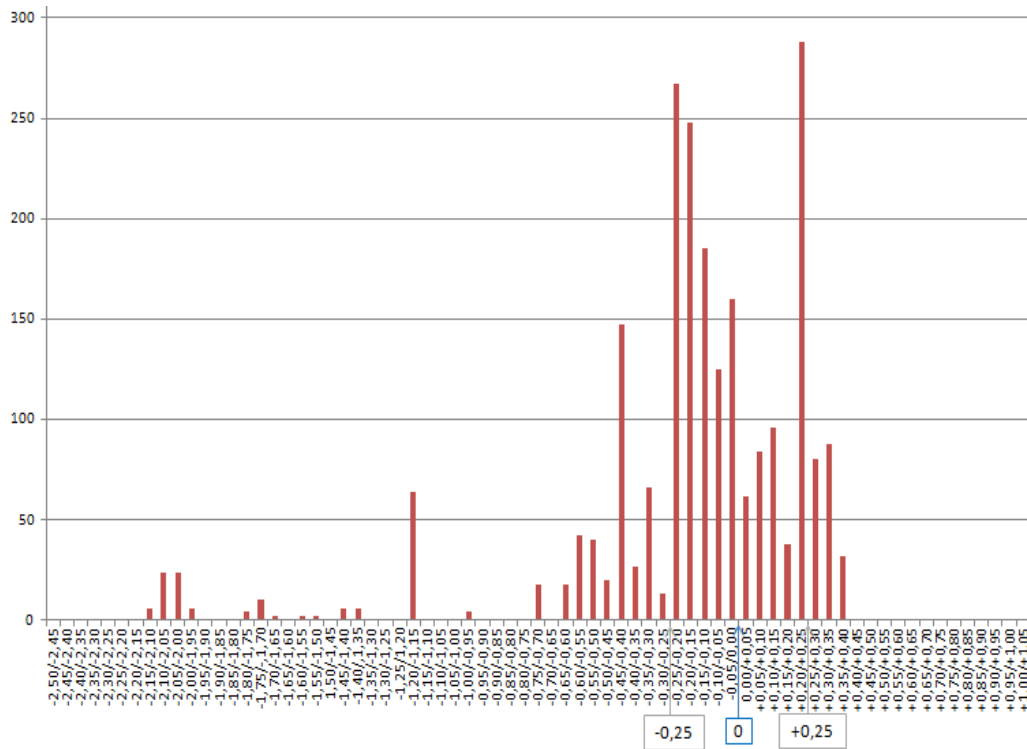


Figura 5.60: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 2, freezer doppia cella

FREEZER 304

Tabella 5.8: input della versione 2 per il freezer 304

$P_{max}=75$	$P_{min}=30$	$N_z=2$
Potenza massima esterna per la funzione “concentricita”	Potenza minima interna per la funzione “concentricita”	Numero di cornici di potenza (funzione “concentricita”)

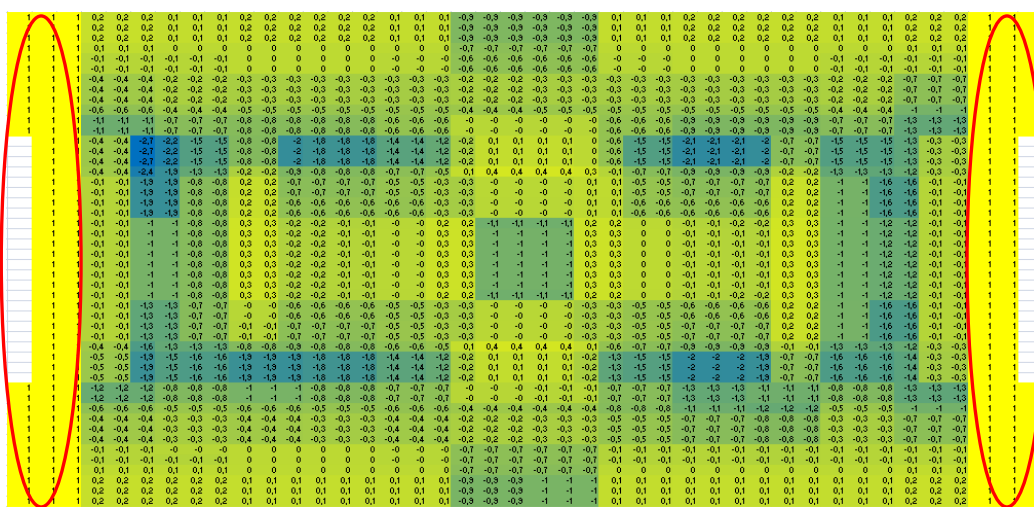


Figura 5.61: differenza relativa tra i dati Whirlpool e i risultati del programma. Versione 2, freezer 304

In riferimento alla Figura 5.61 a differenza dei casi esposti precedentemente, si nota che le lampade più esterne che secondo i dati Whirlpool® dovrebbero essere accese alla massima potenza, sui risultati del programma sono spente (zone evidenziate dagli ovali rossi).

Se si considerano i risultati del programma senza apportare ulteriori modifiche si hanno il 35,9% di valori compresi nel range ± 0.25 ed il 31,1% nel range ± 0.20 . Se si accendono le lampade più esterne del riscaldamento superiore, le percentuali aumentano al 51,7% e al 36,6%.

In Figura 5.62 è riportato l'istogramma delle differenze relative tra i dati Whirlpool® e i risultati del programma leggermente modificati.

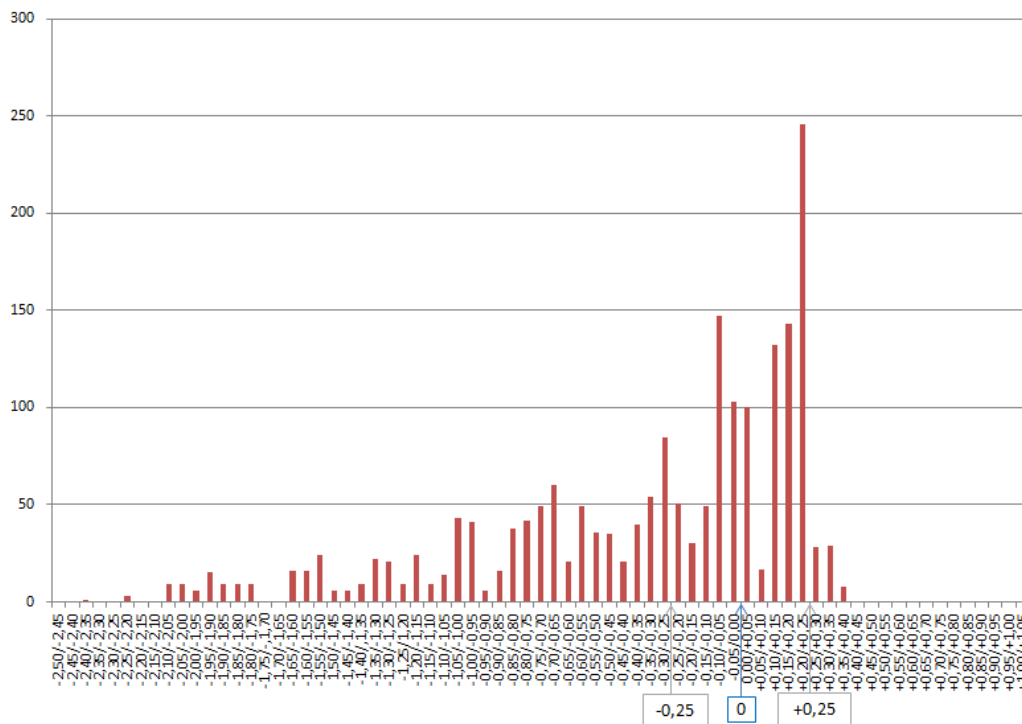


Figura 5.62: istogramma di confronto tra i risultati matlab e i dati Whirlpool®. Versione 2, freezer 304

I risultati ottenuti con questo secondo metodo nel caso di due celle termoformate contemporaneamente sembrano essere poco soddisfacenti. Sicuramente ulteriori approfondimenti potrebbero portare a dei miglioramenti. Bisogna sempre ricordare che il confronto è stato fatto con una sola delle possibili mappe dei riscaldi a cui possono essere associate le celle analizzate.

4.5 Confronto risultati versione 1 e 2

In Tabella 5.9 si riporta la percentuale di valori compresa nei range $\pm 0,25$ e $\pm 0,20$ ottenuta con le due versioni del programma per tutte le celle frigorifero/freezer considerate.

Tabella 5.9: riassunto dei confronti coi dati Whirlpool®

	cella 281	cella 244	cella tall	frigo sbs	freezer sbs	freezer doppia cella	freezer 304
VERSIONE 1: input							
Pmax	80	80	80	80	80	73	80
Pmin	20	20	20	20	20	35	25
numero di zone	2	2	2	2	2	2	2
Potenza iniziale	30	30	30	30	30	//	//
c11	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	//	//
c21	0,7	0,7	0,5	0,2	0,2	//	//
risultati							
Percentuale nel range $\pm 0,25$	82,2	89,9	76,4	90,6	92,3	67,4	69,6
Percentuale nel range $\pm 0,20$	64,1	80,7	55,8	80,6	88,2	57,0	66,7
VERSIONE 2: input							
Pmax	80	80	65	55	55	75	75
Pmin	25	25	25	30	30	30	30
numero di zone	2	2	2	2	2	2	2
risultati							
Percentuale nel range $\pm 0,25$	89,9	90,9	82,1	90,5	92,1	67,4	51,73
Percentuale nel range $\pm 0,20$	83,3	83,5	65,0	84,4	87,1	45,4	36,64

Per quanto riguarda le celle termoformate singolarmente si nota che in entrambe le versioni sono stati utilizzati gli stessi input per la coppia di celle normali con gradino (281 e 244) e altri input per la coppia di celle side by side (frigorifero e freezer). Gli input forniti alla cella Tall hanno dei valori intermedi tra quelli dati alla coppia di frigoriferi normali e quelli dati alla coppia side by side. Purtroppo, per quanto riguarda la cella Tall, non si sono potuti fare confronti appropriati per mancanza di dati relativi ad una cella simile ad essa.

Nella versione 1 si è variata solo l'importanza della funzione "concentricita" sui preriscaldi e sui riscaldi. I valori iniziali di potenza ed il numero di zone utilizzate sono gli stessi per tutti i modelli.

Il materiale delle celle frigorifero Whirlpool® è polistirolo. Probabilmente si sono potuti fornire gli stessi input di potenza perché è stato utilizzato un unico materiale. L'importanza dei risultati della funzione "concentricita" decresce con l'aumentare del rapporto profondità pezzo/larghezza apertura.

I risultati riassunti in Tabella 5.9 confermano le considerazioni fatte dagli operatori secondo cui le celle side by side sono più facili da termoformare in quanto vengono utilizzati fogli di partenza dalle dimensioni maggiori. La cella Tall è quella che richiede maggiore attenzione perché non è provvista del gradino che facilita l'adagiarsi del materiale sullo stampo.

Per quanto riguarda le due celle termoformate contemporaneamente i risultati ottenuti con la prima versione sono migliori di quelli della seconda probabilmente perché al primo metodo si sono apportate modifiche più rilevanti per avvicinarsi maggiormente ai dati forniti.

La parte relativa alle due celle termoformate contemporaneamente potrebbe essere approfondita ulteriormente in un futuro lavoro.

Capitolo 5

Conclusioni

Il lavoro svolto è stato richiesto dall'azienda Forma s.r.l. del gruppo CANNON che si occupa della costruzione di termoformatrici. Il software attualmente installato sulle macchine prevede il settaggio manuale della percentuale di accensione di ciascuna lampada dei piani di riscaldamento. Nel presente lavoro di tesi sono stati sviluppati due metodi per creare in modo automatico un'iniziale mappa dei riscaldi relazionata con la forma dell'oggetto che si vuole ottenere. Entrambi i metodi sono basati sui ragionamenti di operatori esperti per cui sono stati implementati dopo aver parlato con essi ed assistito a delle prove di termoformatura. La validazione dei risultati è stata fatta confrontando le mappe dei riscaldi ottenute dalle due versioni del programma con alcune mappe effettivamente utilizzate in produzione relative a celle frigorifero e freezer. Per quanto riguarda i pezzi termoformati singolarmente il secondo metodo che è di più facile utilizzo, fornisce risultati migliori. In particolare entrambi i metodi sembrano funzionare molto bene per le celle side by side e un po' meno per quelle normali che, secondo gli stessi operatori, sono più difficili da termoformare. Il caso di due celle termoformate contemporaneamente richiede, invece, maggiori sviluppi per poter giungere a risultati migliori.

I due metodi sono svincolati dalle differenti configurazioni dei piani di riscaldamento perché basati su lampade elementari sottomultiple di quelle reali.

Il presente lavoro di tesi è stato sottoposto all'attenzione del personale tecnico della Forma s.r.l. del gruppo CANNON. L'attività svolta ha riscosso consensi positivi sia tra gli operatori specializzati nel riscaldamento del materiale sia tra il personale addetto ad altri settori.

Gli operatori più specializzati nell'utilizzo delle termoformatrici, hanno ritenuto di grande utilità la funzione che crea le cornici concentriche di potenza. Questa è stata scritta per adattarsi a profili anche non rettangolari e può gestire un numero molto alto di cornici diminuendo il loro spessore (il limite inferiore è pari ad una lampada elementare). I due metodi si differenziano nell'apportare successive modifiche alle cornici concentriche di potenza. Il primo provvede a correzioni basate sulla differenza di altezza dei punti dell'oggetto, la loro importanza deve essere specificata via input dall'utente. Il secondo, invece, procede in modo automatico basandosi sulla lunghezza di alcune sezioni dell'oggetto parallele al lato corto e lungo del foglio iniziale (le silhouette). Purtroppo non si è potuto testare la validità dei due metodi attraverso prove sperimentali su una termoformatrice reale. Secondo il parere di operatori esperti, però, i risultati forniti dai due programmi sono soddisfacenti.

Nel prossimo futuro si potrebbe installare il compilatore *matlab* e uno dei due metodi (preferibilmente il secondo), su una termoformatrice e verificare se gli operatori trovino realmente giovamento dal suo utilizzo.

Dato che il programma sarebbe installato direttamente sulla macchina tutte le informazioni riguardanti i piani di riscaldamento verrebbero inserite all'interno di esso, ciò faciliterebbe ulteriormente l'utente che non dovrebbe più specificare in input queste informazioni.

Durante l'implementazione si è posta attenzione a scrivere un programma modulare costituito da più funzioni in modo da poter facilmente apportare delle modifiche.

Ulteriori analisi potrebbero riguardare il materiale utilizzato e portare all'identificazione di alcuni parametri legati ad esso.

BIBLIOGRAFIA

- [ACC] Simulation and optimization of Thermoforming and Blow Molding, Accuform [on line]
<http://www.t-sim.com/index.htm>
- [Can01] *Thermoforming process and machines*, CANNON Forma, thermoforming systems. 3rd edition, September 2001
- [Bah99] S.N. Bhattacharya, H.C. Lau, *Material characterisation for computer simulation of thermoforming*, Rheology and Materials Processing Centre Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT University) Melbourne Victoria Australia, March 1999
- [Ber12] Per Bergström, *IGES Toolbox: Extracts the parameter data in an IGES file to Matlab*, December 2006 (Updated March 2012)
[on line] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13253-iges-toolbox>
- [Dee09] Jerry Dees, *FEA Simulations of Thermoforming – Using Hyperelastic Material Properties*, Engineering simulations LLC, scientific article, 2009
- [Don05] Y. Dong, R.J.T. Lin and D. Bhattacharyya, *Finite Element Simulation on Thermoforming Acrylic Sheets Using Dynamic Explicit Method*, Centre for Advanced Composite Materials (CACM), Department of Mechanical Engineering, University of Auckland, New Zealand, September 2005
- [Fra05] Achille Francone, *Characterisation of heating systems for thermoforming machines considering performance of the selected polymeric materials*, Tesi di laurea in ingegneria delle materie plastiche, Politecnico di Torino A.A. 2004/05
- [Ill01] Adolf Illing, *Thermoforming-a practical guide*, Hanser 2001
- [Kaz92] David O. Kazmer, *Simulation of the blow molding and thermoforming processes*, GE Plastics, Pittsfield, MA, 1992

- [Kni99] Mikell Knights, *VIRTUAL THERMOFORMING--READY FOR PRIME TIME?*, Plastics technology, May 1999
- [NS11] CADFLOW France, *T-SIM pour une pédagogie de l'Eco Conception*, Newsletter November 2011
- [NS12_1] CADFLOW France, *ERCE Plasturgie sécurise ses clients par la Rhéologie*, Newsletter January 2012
- [NS12_2] CADFLOW France, *T-SIM parfaitement intégré aux formations plastique et même plus*, Newsletter March 2012
- [ORB] *Impianti infrarossi-Cenni di teoria ed applicazioni*, Orione di Bistulfi dal 1949 infrarossi e strumentazione [on line]
<http://www.orionesrl.it/>
- [SP12] Swiss Plastic 2012-Le salon du plastiques, *Un nouveau modèle de PVT pour améliorer la précision.*
- [Tho06] Vincent Thomson, Nadia Bhuiyan, Patrick Girard, and Sohail Khan, *Improved mathematical modeling for the sheet reheat phase during thermoforming*, Society of Plastics Engineers, plastic research on-line, 2006
- [Thr87] James L. Throne, *Thermoforming*, SPE Hanser Publishers 1987
- [Xu99] Haihong Xu, John Wysocki, David Kazmer, Paul Bristow, Bernard Landa, Joe Riello, Charlie Messina, Ramesh Marrey, *SHRINKAGE STUDY OF THERMOFORMED PARTS*, University of Massachusetts Amherst, scientific article, 1999
- [Zei91] Ibrahim Zeid, *CAD/CAM Theory and practice*, McGraw-Hill 1991