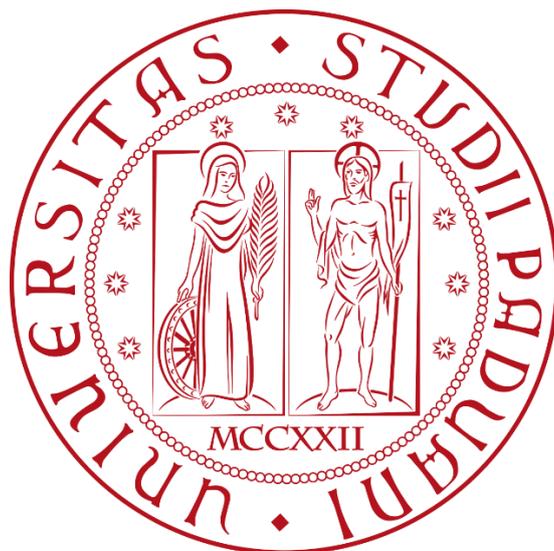


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI**



**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
DELL'INNOVAZIONE DEL PRODOTTO**

**MONITORAGGIO DEL PROCESSO DI PRESSOCOLATA:
ANALISI MEDIANTE SENSORI ED INDIVIDUAZIONE
DEI PARAMETRI GUIDA**

Relatore: Ch.mo Prof. Franco Bonollo

Correlatore: Ing. Alessandro De Mori

Laureando: Nicola Pozza

SOMMARIO

Questo progetto di tesi è stato di supporto e preparatorio alla creazione di un modello predittivo avente funzione di comando di un'isola di pressocolata completamente digitalizzata. Il modello predittivo è un algoritmo che correla dei segnali provenienti da diversi sensori alla qualità dei prodotti.

Lo scopo del lavoro è stato quello di definire i parametri di processo maggiormente influenti sulla qualità di un getto di riferimento. Il getto, prodotto dall'azienda Fisep Srl, è destinato ad applicazioni automobilistiche. Nello specifico il componente viene assemblato su veicoli ibridi ed elettrici di BMW.

Nei primi due capitoli dell'elaborato viene fatta una panoramica del ruolo che stanno avendo le leghe di alluminio nel settore automotive, a questa segue una descrizione del processo di pressocolata.

La tesi si colloca in un contesto di Industria 4.0, ecco che nel Capitolo 3 viene trattata l'applicazione delle innovazioni tecnologiche derivanti dalla quarta rivoluzione industriale ai processi di fonderia.

Nel capitolo 4 è esposta una descrizione del componente oggetto di tesi. Nello stesso capitolo, inoltre, sono elencate le diverse prove che vengono effettuate per verificare la conformità dei getti ai requisiti imposti dal cliente.

Il Capitolo 5 è dedicato alla descrizione dell'isola di pressocolata utilizzata per la produzione dei campioni e dei sensori aggiunti per la digitalizzazione dell'attrezzatura. Nello stesso capitolo sono anche esposte le procedure eseguite in azienda e nel laboratorio di metallurgia del DTG di Vicenza.

Una parte del lavoro è stata la definizione delle fasi di controllo della qualità specifiche per il getto di riferimento. I dati di qualità raccolti sono stati forniti alla società Enginsoft Spa, per correlarli ai relativi segnali dei sensori e, dunque, elaborare il modello predittivo. Nel Capitolo 6 è spiegata nel dettaglio questa procedura per il controllo della qualità.

Nel Capitolo 7 sono presentati i risultati delle attività svolte in laboratorio e sono descritte le analisi effettuate per ricercare i parametri guida, ossia quei parametri di processo che influenzano maggiormente la qualità dei getti.

Nel Capitolo 8 si trovano le conclusioni e considerazioni finali.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	pag. I
INDICE DELLE TABELLE	pag. VII
INTRODUZIONE	pag. 1
CAPITOLO 1 – Le leghe di alluminio	pag. 3
1.1 Le leghe di alluminio	pag. 3
1.2 Applicazioni nel settore automotive	pag. 4
CAPITOLO 2 – La pressocolata	pag. 7
2.1 Processo e isola da pressocolata	pag. 7
2.2 Difetti nella pressocolata	pag. 16
CAPITOLO 3 – Innovazioni digitali nei processi di fonderia	pag. 25
3.1 Processi Foundry 4.0	pag. 25
3.2 Progetto SMARTI 4.0	pag. 30
CAPITOLO 4 – Il caso studio	pag. 33
4.1 Il componente di riferimento	pag. 33
4.2 Prove e requisiti di conformità	pag. 35
4.3 La lega EN AC 43500 (AlSi ₁₀ MnMg)	pag. 47
CAPITOLO 5 – Procedura sperimentale	pag. 53
5.1 Le attrezzature	pag. 53
5.2 Campionatura dei getti	pag. 65
5.3 Elaborazione delle curve dei sensori	pag. 68
5.4 Analisi in laboratorio	pag. 80
CAPITOLO 6 – Raccolta dei dati sulla qualità	pag. 85
6.1 Introduzione alla procedura	pag. 85
6.2 Controlli visivi	pag. 86
6.3 Analisi radiografiche	pag. 91
CAPITOLO 7 – Analisi dei risultati	pag. 93
7.1 Correlazione tra parametri di processo e qualità	pag. 93
7.1.1 Difetto porosità	pag. 93
7.1.2 Pin incompleto e altri difetti	pag. 110
7.2 Risultati delle analisi di laboratorio	pag. 115
7.2.1 Analisi ai raggi X con microfuoco	pag. 115
7.2.2 Analisi metallografica	pag. 118
7.2.3 Criterio di conformità PK	pag. 123

CAPITOLO 8 – Conclusioni	pag. 127
BIBLIOGRAFIA	pag. 129
APPENDICE A	pag. 133
APPENDICE B	pag. 139

INDICE DELLE FIGURE

CAPITOLO 1

Figura 1.1 – Produzione mondiale di CO₂, dal 1990 al 2019, per i diversi settori [5].

Figura 1.2 – Spaceframe e scocca della Ferrari 458 Italia [7].

CAPITOLO 2

Figura 2.1 – Processo di Gravity die casting, fase di riempimento dello stampo con la lega fusa [8].

Figura 2.2 – Macchina per il processo di Low Pressure Die Casting [8].

Figura 2.3 – Rappresentazione schematica dei processi di squeeze casting diretto ed indiretto. [8].

Figura 2.4 – Rappresentazione schematica della pressa a camera calda. [9].

Figura 2.5 – Rappresentazione schematica della pressa a camera fredda. [9].

Figura 2.6 – Rappresentazione schematica delle tre fasi dell'iniezione.

Figura 2.7 – Macrografia (a) e micrografia (b) di un macro-ritiro [14].

Figura 2.8 – Porosità per intrappolamento d'aria visibili da radiografie sul getto di riferimento per questa tesi [15].

Figura 2.9 – Esempio al microscopio ottico di una goccia fredda [15].

Figura 2.10 – Esempio di giunzione [14].

Figura 2.11 – Esempio di contaminazione sul getto di riferimento per la tesi.

Figura 2.12 – Esempio di segni di fatica termica su getto PAN0005.

Figura 2.13 – Esempio di segni di espulsione su getto di riferimento.

Figura 2.14 – Esempio di particolare incompleto.

Figura 2.15 – Esempio di bava su getto di riferimento.

CAPITOLO 3

Figura 3.1 – Rivoluzioni industriali nella storia [17].

Figura 3.2 – Obiettivi realizzativi del progetto SMARTI 4.0.

CAPITOLO 4

Figura 4.1 – Rappresentazione e principali dettagli tecnici dei quattro getti, prodotti da Fisep Srl, che costituiscono la CCU.

Figura 4.2 – Rappresentazione del lato Electric Room del componente PAN0005.

Figura 4.3 – Rappresentazione del lato Water Channel del componente PAN0005.

Figura 4.4 – Superfici del getto PAN0005 soggette al Tape Peeling Test.

Figura 4.5 – Posizionamento dei nastri su PAN0005 per test dedicato.

Figura 4.6 – Rappresentazione schematica delle fasi di applicazione e rimozione dei nastri adesivi usati nel Tape Peeling Test.

Figura 4.7 – Principali tolleranze geometriche sul lato Water Channel del componente PAN0005.

Figura 4.8 – Principali tolleranze geometriche sul lato Electric Room del componente PAN0005.

Figura 4.9 – Attrezzatura utilizzata per svolgere le prove di tenuta.

Figura 4.10 – Superfici testate ed indicazioni fornite da Panasonic Corporation per svolgere le prove di tenuta.

Figura 4.11 – Rappresentazione di tre diverse tipologie di porosità, passanti (in rosso), cieche (in blu) e chiuse (in verde).

Figura 4.12 – Zone critiche del getto PAN0005.

Figura 4.13 – Connettore della zona 3 visibile su una CCU assemblata.

Figura 4.14 – Criterio PK vigente nella zona 3 del getto PAN0005.

Figura 4.15 – Esempio di fase β -Al₅FeSi [25].

Figura 4.16 – Esempio di fase α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ con struttura Chinese script [25].

Figura 4.17 – Esempio di particelle di sludge [25].

CAPITOLO 5

Figura 5.1 – Immagine della pressa IPRI450SC prodotta da ITALPRESSE GAUSS Srl.

Figura 5.2 – Isola di pressocolata di Fisep Srl.

Figura 5.3 – Interfaccia HMe di ITALPRESSE GAUSS Srl.

Figura 5.4 – Sensore di pressione (a) e sensore di temperatura (b) implementati nello stampo, forniti da Electronics GmbH.

Figura 5.5 – Rappresentazione virtuale dei sensori nello stampo, fornita da Enginsoft Spa.

Figura 5.6 – Sezione del modello virtuale dello stampo per PAN0005, realizzata da Tomos Srl.

Figura 5.7 – Stampo per PAN0005 ad inserimento dei sensori ultimato.

Figura 5.8 – Dimensioni principali (a sinistra) e specifiche tecniche (a destra) delle termocamere TTV fornite da Marposs Spa.

Figura 5.9 – Termocamere TTV Marposs installate sulla pressa.

Figura 5.10 – Esempio di mappe termografiche su stampo per PAN0005

Figura 5.11 – Flussometri installati sulla pressa, forniti da Electronics GmbH.

Figura 5.12 – Unità per il controllo a bordo pressa, per i sensori di Electronics GmbH (a) e per le termocamere Marposs (b).

Figura 5.13 – Schermate dalla piattaforma SMART ProdActive.

Figura 5.14 – Soglie dei parametri del DoE definite tramite apposito studio effettuato sul software MAGMA.

Figura 5.15 – Rappresentazione schematica degli andamenti di posizione, velocità e accelerazione del pistone nelle tre fasi del ciclo di iniezione [29].

Figura 5.16 – Andamento della posizione del pistone in funzione del tempo, curva ottenuta dal sensore di posizione del pistone.

Figura 5.17 – Andamento della velocità del pistone in funzione del tempo.

Figura 5.18 – Andamento dell'accelerazione del pistone in funzione del tempo.

Figura 5.19 – Andamento, nel tempo, della pressione misurata dai sensori interni allo stampo.

Figura 5.20 – Andamento, nel tempo, della temperatura misurata dai sensori interni allo stampo.

Figura 5.21 – Andamento nel tempo della pressione esercitata dal pistone.

Figura 5.22 – Andamento nel tempo della contropressione.

Figura 5.23 – Tagli eseguiti con sega a nastro sui campioni. Tagli effettuati nella sequenza (a), (b) e (c).

Figura 5.24 – Aree d'interesse all'indagine radiografica con micro-fuoco.

Figura 5.25 – Tagli effettuati per isolare le superfici sottoposte all'analisi metallografica.

Figura 5.26 – Provini delle sezioni metallografiche.

CAPITOLO 6

Figura 6.1 – Curva di distribuzione normale dell'altezza del biscotto.

Figura 6.2 – Pin del getto PAN0005.

CAPITOLO 7

Figura 7.1 – Andamento della porosità media a seconda della temperatura del forno di mantenimento.

Figura 7.2 – Andamento delle temperature iniziali medie rilevate dalle sette termocoppie.

Figura 7.3 – Immagini della TTV post-lubrificazione di due campioni relativi alle due condizioni di lubrificazione.

Figura 7.4 – Temperature iniziali rilevate dalla termocoppia 7.

Figura 7.5 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 1.

Figura 7.6 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 2.

Figura 7.7 – Parametro A2 e porosità medie del giorno 1.

Figura 7.8 – Parametro A2 e porosità medie del giorno 2.

Figura 7.9 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 1. Rilevazioni effettuate dai sensori di Electronics GmbH.

Figura 7.10 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 2. Rilevazioni effettuate dai sensori di Electronics GmbH.

Figura 7.11 – Andamento della porosità media dei getti a seconda della velocità V1.

Figura 7.12 – VM media dei getti suddivisi in base alla classe di porosità in zona 3.

Figura 7.13 – A2 medio dei getti suddivisi in base alla classe di porosità in zona 3.

Figura 7.14 – Andamento della classe media dei quattro pin in funzione della temperatura del forno di mantenimento.

Figura 7.15 – VM media dei getti suddivisi in base alla classe del pin 3.

Figura 7.16 – Parametro A2 e classe media dei pin dei campioni prodotti il giorno 1.

Figura 7.17 – Parametro A2 e classe media dei pin dei campioni prodotti il giorno 2.

Figura 7.18 – Porosità visibile in zona 3 del campione scartato al controllo visivo.

Figura 7.19 – Porosità media percentuale degli 8 campioni rappresentativi del DoE.

Figura 7.20 – Porosità media percentuale dei 3 campioni scartati alle prove di accettabilità.

Figura 7.21 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 2 dopo attacco chimico (campione 43-1).

Figura 7.22 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 2 dopo attacco chimico (campione 119-2).

Figura 7.23 – Immagine acquisita al microscopio ottico della microstruttura relativa ad una segregazione eutettica, in cui è evidenziata la presenza di fase sludge (zona 2, campione 119-2).

Figura 7.24 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 4 dopo attacco chimico (campione 43-1).

Figura 7.25 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 4 dopo attacco chimico (campione 119-2).

Figura 7.26 – Immagine a bassi ingrandimenti di una porosità da intrappolamento di gas (zona 4, campione 43-1). Acquisizione mediante microscopio ottico.

Figura 7.27 – Immagine a bassi ingrandimenti di vuoti da ritiro interdendritico (zona 2, campione 119-2). Acquisizione mediante microscopio ottico.

Figura 7.28 – Criterio PK nella zona 3 del getto PAN0005.

Figura 7.29 – Immagini panoramiche, acquisite con il microscopio ottico, della zona 3 dei quattro campioni sottoposti alla verifica del criterio PK2.

Figura 7.30 – Rappresentazione del conteggio delle porosità per la verifica del criterio PK2.

APPENDICE A

Figura A.1 – Acquisizioni radiografiche del campione 6-2.

Figura A.2 – Acquisizioni radiografiche del campione 32-1.

Figura A.3 – Acquisizioni radiografiche del campione 37-2.

Figura A.4 – Acquisizioni radiografiche del campione 43-1.

Figura A.5 – Acquisizioni radiografiche del campione 119-2.

Figura A.6 – Acquisizioni radiografiche del campione 125-2.

Figura A.7 – Acquisizioni radiografiche del campione 155-1.

Figura A.8 – Acquisizioni radiografiche del campione 164-1.

Figura A.9 – Acquisizioni radiografiche del campione 58-1.

Figura A.10 – Acquisizioni radiografiche del campione 138-1.

Figura A.11 – Acquisizioni radiografiche del campione 69-2.

INDICE DELLE TABELLE

CAPITOLO 2

Tabella 2.1 – Difetti ed imperfezioni interni [14].

Tabella 2.2 – Difetti ed imperfezioni superficiali [14].

Tabella 2.3 – Difetti ed imperfezioni geometriche [14].

CAPITOLO 4

Tabella 4.1 – Esempi di particolari del PAN0005 sottoposti a controllo visivo.

Tabella 4.2 – Composizione chimica della lega AlSi10MnMg (EN AB 43500) da normativa UNI EN 1706[23].

Tabella 4.3 – Proprietà meccaniche della lega AlSi10MnMg (EN AB 43500) a seconda del contenuto di Mg, da normativa UNI EN 1706[23].

CAPITOLO 5

Tabella 5.1 – Specifiche tecniche principali della pressa IPRI450SC prodotta da ITALPRESSE GAUSS Srl.

Tabella 5.2 – Parametri di processo misurati dalla pressa per ogni ciclo.

Tabella 5.3 – Valori dei parametri di processo utilizzati per la campionatura di getti PAN0005.

Tabella 5.4 – Composizione chimica dei getti del giorno 1 di campionatura.

Tabella 5.5 – Composizione chimica dei getti del giorno 2 di campionatura.

CAPITOLO 6

Tabella 6.1 – Riferimenti usati nella classificazione del difetto bava.

Tabella 6.2 – Riferimenti usati nella classificazione dei pin incompleti.

Tabella 6.3 – Riferimenti usati per la classificazione delle contaminazioni.

Tabella 6.4 – Riferimenti usati per la classificazione delle porosità nelle quattro zone critiche

CAPITOLO 7

Tabella 7.1 – Valori medi delle temperature massime rilevate dalle termocoppie nel giorno 1 di campionatura.

Tabella 7.2 – Valori medi delle temperature massime rilevate dalle termocoppie nel giorno 2 di campionatura.

Tabella 7.3 – Distribuzione delle classi di porosità al variare di temperatura del forno e durata della lubrificazione.

Tabella 7.4 – Temperature medie iniziali lette dalle termocoppie nel giorno 1 di campionatura.

Tabella 7.5 – Temperature medie iniziali lette dalle termocoppie nel giorno 2 di campionatura.

Tabella 7.6 – Temperature massime delle ROI, rilevate dalla TTV dopo lubrifica, dei campioni appartenenti ai designs 72 e 76.

Tabella 7.7 – Influenza della velocità massima di seconda fase sulla porosità media.

Tabella 7.8 – Velocità massime di seconda fase dei campioni con le classi di porosità più elevate.

Tabella 7.9 – Velocità massime di seconda fase dei campioni aventi classe di porosità media pari a 1.

Tabella 7.10 – Distribuzione delle classi dei pin al variare di temperatura del forno e durata della lubrificazione.

Tabella 7.11 – Temperature massime delle ROI, rilevate dalla TTV dopo lubrificazione, dei campioni appartenenti ai designs 72 e 76.

Tabella 7.12 – Influenza della velocità massima di seconda fase sulla qualità dei pin.

Tabella 7.13 – Parametri di processo significativi degli 8 campioni rappresentativi del DoE.

Tabella 7.14 – Percentuale di porosità delle zone critiche degli otto campioni rappresentativi del DoE.

Tabella 7.15 – Percentuale di porosità delle zone critiche dei tre campioni che non hanno superato le prove di accettabilità.

Tabella 7.16 – Conteggio delle porosità, in base alla loro lunghezza, per la verifica del criterio PK2.

APPENDICE B

Tabella B.1 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 1 con lubrificazione a 7,5 s.

Tabella B.2 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 1 con lubrificazione a 5 s.

Tabella B.3 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 2 con lubrificazione a 7,5 s.

Tabella B.4 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 2 con lubrificazione a 5 s.

Tabella B.5 – Designs di parametri impiegati nel primo giorno della campionatura.

Tabella B.6 – Designs di parametri impiegati nel secondo giorno della campionatura.

INTRODUZIONE

Oggi è molto sentita la necessità di innovare il modo di fare impresa. Sono molti i settori industriali che adottano tecnologie ed innovazioni derivanti dalla quarta rivoluzione industriale. Questa tesi, per l'appunto, si colloca all'interno di un progetto inerente all'Industria 4.0.

SMARTI 4.0 è un progetto finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento che ha tra i principali obiettivi la realizzazione di un'isola di pressocolata digitalizzata, presso l'azienda Fisep Srl di Brendola, in provincia di Vicenza.

Il lavoro di tesi si è inserito dopo che l'isola era già stata equipaggiata con diversi sensori, posti sia nella pressa sia dentro lo stampo.

Un'attività del progetto SMARTI 4.0 è quella di implementare nell'isola un modello predittivo in grado di prevedere la qualità dei getti, sulla base delle misure di determinate variabili di processo. Si tratta cioè di definire una relazione matematica per la dipendenza dei difetti dai parametri di produzione. Il lavoro qui esposto è relativo ad una fase istruttoria e preparativa alla creazione del modello predittivo.

A tal scopo è stata svolta una campionatura con lo stampo sensorizzato, il quale è usato per produrre un getto destinato al settore automotive. I campioni sono stati prodotti con parametri di processo ben definiti e spazati all'interno di un DoE appositamente realizzato.

Parte dell'attività di tesi è stata implementare una procedura di controllo qualità, specifica per le risorse di Fisep Srl, e applicarla per classificare i difetti dei campioni.

È stata poi svolta un'analisi con i dati di qualità raccolti, in cui si è cercato di verificare quali fossero le condizioni che hanno portato ai getti con meno difetti e quali variabili di processo abbiano la maggiore influenza sulla qualità.

CAPITOLO 1

LE LEGHE DI ALLUMINIO

1.1 Introduzione

L'alluminio è il terzo elemento più diffuso sulla crosta terrestre, essa ne è composta da circa l'8% [1]. L'alluminio è distinto in primario e secondario. Viene definito alluminio primario quello estratto da un minerale chiamato bauxite, è invece secondario l'alluminio ottenuto da processi di riciclo dei rottami.

L'alluminio è un metallo che cristallizza con un reticolo cubico a facce centrate, questo ne garantisce buona duttilità e malleabilità.

Aggiungendo elementi in lega come silicio, rame, magnesio, zinco e manganese, si possono ottenere leghe destinate ai processi di fonderia o di deformazione plastica. Nello specifico, alle leghe da fonderia è richiesta una buona colabilità, proprietà ottenibile avendo come principale elemento in lega il silicio, tipicamente, in quantità variabile dal 5 al 25 wt.%. Le leghe Al-Si sono impiegate nella produzione dell'80-90% di tutti i getti a livello globale [2].

Le leghe di alluminio sono caratterizzate dal possedere una densità di circa $2,7 \text{ g/cm}^3$ e rientrano in quei materiali definiti come leghe leggere. Ossia leghe metalliche che presentano una densità inferiore alla soglia di $4,5 \text{ g/cm}^3$, valore di riferimento che corrisponde alla densità delle leghe di titanio [3]. Tra le caratteristiche più importanti delle leghe di alluminio ci sono, infatti, le alte proprietà meccaniche specifiche, queste leghe presentano buoni valori del rapporto tra resistenza meccanica e densità.

L'alluminio è soggetto alla formazione di una pellicola di ossido passivante che ne garantisce un'ottima resistenza a corrosione, ciò comporta un'alta durabilità del materiale. Questa qualità è molto apprezzata nei prodotti destinati all'ingegneria civile e al settore marino. Inoltre, in questi settori, l'ampio uso dell'alluminio è giustificato anche dalla sua saldabilità. Tra le applicazioni più note delle leghe di alluminio c'è sicuramente quella nel packaging. Ad oggi, in Europa, circa il 17% dei prodotti in alluminio è assorbito dal packaging, settore secondo solo ai trasporti e all'ingegneria civile, i quali impiegano rispettivamente il 40% ed il 25% dei semilavorati in lega di alluminio [4].

1.2 Applicazioni nel settore automotive

Le leghe di alluminio giocano un ruolo fondamentale in diversi settori industriali, in particolare nel settore dei trasporti. Negli ultimi trent'anni queste leghe hanno avuto un impiego sempre maggiore nella componentistica per autoveicoli. Nel 1990 la quantità media di alluminio in un'automobile era di 50 kg, oggi è di circa 150 kg, e proiezioni per il futuro indicano che si arriverà a 196 kg nel 2025 [4].

Le buone proprietà meccaniche di questo materiale, espresse in termini specifici, soddisfano l'esigenza di dover produrre mezzi di trasporto sempre più leggeri. Veicoli meno pesanti, infatti, non solo permettono prestazioni migliori, ma consentono di diminuire i consumi di carburante e conseguentemente le emissioni di anidride carbonica. Ridurre la produzione di questo gas ad effetto serra è attualmente una sentita necessità per il settore dei trasporti. Esso, come visibile in figura 1.1, è il secondo settore a livello globale per l'emissione annuale di CO₂.

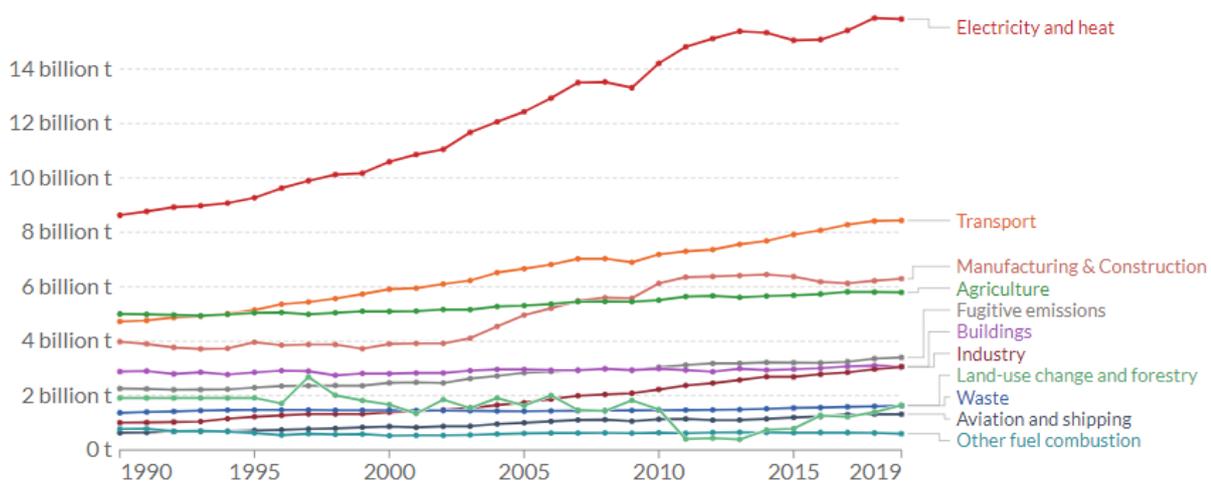


Figura 1.1 – Produzione mondiale di CO₂, dal 1990 al 2019, per i diversi settori [5].

Case automobilistiche come Tesla, BMW, Jaguar Land Rover e Audi, riconoscono che è possibile progettare componenti in alluminio per autoveicoli con una riduzione del peso fino al 40% rispetto alle stesse parti prodotti in acciaio. L'impiego in un'automobile di 100 kg di componenti in alluminio, al posto degli stessi realizzati in acciaio, consente di ridurre le emissioni di anidride carbonica fino a otto grammi per ogni chilometro percorso, con un risparmio di circa 46 litri di carburante all'anno. Ciò ha portato ad un trend in cui i componenti automotive in lega di alluminio stanno velocemente sostituendo quelli in acciaio. L'impiego in espansione di questo materiale è sicuramente influenzato anche dal sopravvento dei veicoli

ibridi ed elettrici nella mobilità di tutti i giorni. In questi veicoli l'utilizzo di componenti meccanici leggeri è estremizzato dalla necessità di compensare il vincolo sul peso delle batterie [4].

Le ragioni del successo delle leghe di alluminio nel settore automotive sono in realtà molteplici. Vengono anche apprezzate caratteristiche dell'alluminio come processabilità, resistenza a corrosione e riciclabilità. L'alluminio è, infatti, un materiale riciclabile infinite volte.

Il massiccio impiego di questo materiale ha spinto ad uno sviluppo di leghe che meglio soddisfano i requisiti necessari ai vari prodotti, destinati a tutte le principali parti del veicolo. Dai classici utilizzi quali parti di carrozzeria e componenti con funzione strutturale, come l'esempio riportato in figura 1.2, si è arrivati ad impieghi per l'impianto elettrico e alla produzione di componenti per lo scambio termico [6].

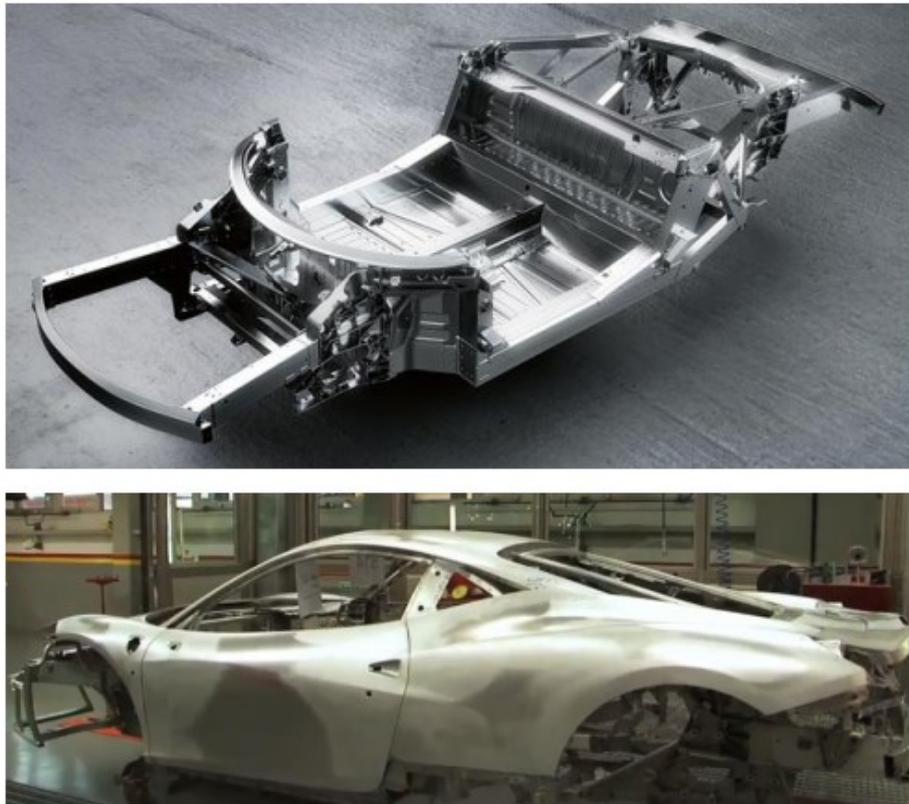


Figura 1.2 – Spaceframe e scocca della Ferrari 458 Italia [7].

CAPITOLO 2

LA PRESSOCOLATA

2.1 Processo e isola di pressocolata

I processi di fonderia per la produzione di getti in lega di alluminio risultano essenziali per soddisfare la richiesta di grandi volumi di componenti meccanici che caratterizza il settore dei trasporti. Questi processi garantiscono la possibilità di ottenere getti automotive di pochi grammi fino a qualche decina di chilogrammi, e con geometria estremamente complessa e vicina a quella richiesta al prodotto finito.

I getti di fonderia sono ottenuti per solidificazione della lega fusa che viene versata dentro uno stampo, il quale definisce la forma al prodotto. Le principali fasi che caratterizzano i processi di fonderia sono le seguenti:

- 1 Fusione della lega fino al raggiungimento dello stato liquido.
- 2 Colata/iniezione della lega fusa dentro lo stampo.
- 3 Riempimento delle cavità dello stampo chiuso.
- 4 Solidificazione e raffreddamento del getto.
- 5 Estrazione del getto.

La pressocolata rientra in quei processi di fonderia che utilizzano uno stampo permanente, e che sono maggiormente impiegati nella produzione di getti destinati al mondo automotive [8].

Questi processi sono:

- *Gravity die casting*. La lega fusa viene versata dentro uno stampo, come mostrato in figura 2.1, e per gravità si ha il riempimento della cavità. È un processo standard per la produzione di getti per autoveicoli. Rappresenta una tecnologia collaudata e di assoluta precisione per la produzione di grandi lotti.



Figura 2.1 – Processo di Gravity die casting, fase di riempimento dello stampo con la lega fusa [8].

- *Low Pressure Die Casting (LPDC)*. Il riempimento della cavità è controllato regolando la pressione nel forno di colata. La lega liquida risale attraverso un condotto il cui ingresso è posizionato al di sotto del pelo libero della massa fusa nel forno. Il processo è notoriamente utilizzato per la produzione di ruote per autoveicoli e blocchi motore. In figura 2.2 è visibile un esempio di macchina dedicata a questa tecnologia.



Figura 2.2 – Macchina per il processo di Low Pressure Die Casting [8].

- *Squeeze casting*. In questo processo viene mantenuta una pressione sul materiale fino alla sua completa solidificazione. Questa tecnologia presenta due varianti, squeeze casting diretto ed indiretto. In figura 2.3 è visibile una rappresentazione schematica delle due varianti di questo processo. Nella prima variante la pressione viene esercitata da un punzone sul getto in solidificazione. Nello squeeze casting indiretto, invece, la pressione è esercitata da un pistone che agisce sul sistema di alimentazione.

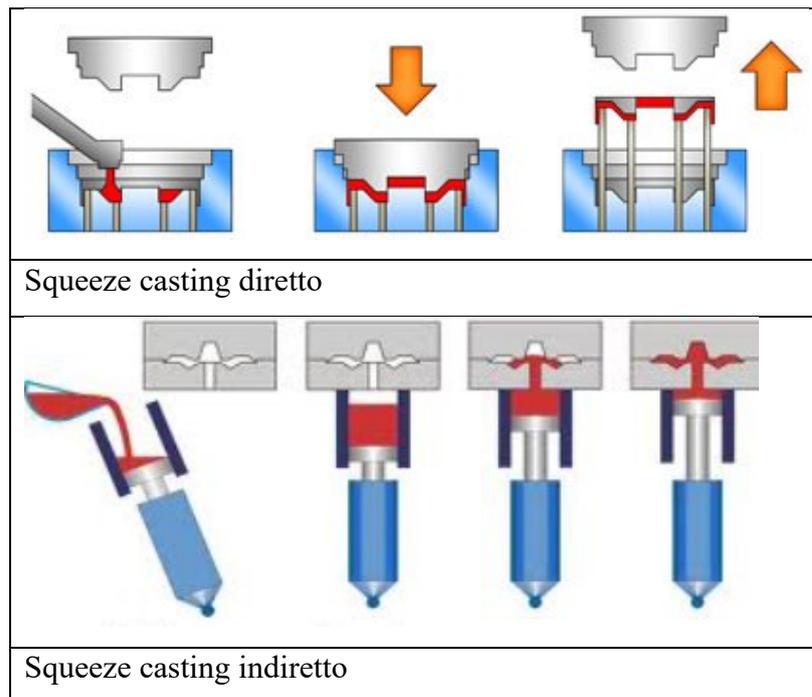


Figura 2.3 – Rappresentazione schematica dei processi di squeeze casting diretto ed indiretto. [8].

Tra questi processi la pressocolata (*High Pressure Die Casting*) è quella con la velocità di produzione più alta. La lega fusa viene iniettata da un pistone dentro ad uno stampo in acciaio mantenuto serrato da un'elevata forza di chiusura, necessaria per vincere la pressione della lega fusa che agisce sull'area proiettata della cavità. Si intuisce così che, maggiore è quest'area, e dunque più grande è il getto da produrre, maggiore sarà la forza di chiusura richiesta alla pressa. Attualmente la pressa più grande esistente è in grado di esercitare 9000 tonnellate di forza di chiusura. La macchina viene prodotta dall'azienda bresciana Idra Group Srl.

Le presse vengono distinte tra quelle che lavorano a camera fredda o camera calda. Le macchine a camera calda vengono utilizzati per leghe metalliche con una bassa temperatura di fusione,

ad esempio, per zinco o piombo. Mentre le presse a camera fredda sono generalmente le più utilizzate nella pressocolata dell'alluminio.

Le presse a camera calda sono caratterizzate dall'aver il pistone che agisce immerso nel materiale fuso contenuto nel crogiolo. La lega fusa, spinta dall'avanzamento del pistone, risale attraverso la camera di iniezione riempiendo lo stampo. Una rappresentazione dell'attrezzatura è visibile in figura 2.4. Questa tecnologia si presta bene per leghe basso-fondenti, poiché temperature elevate potrebbero dar luogo a danneggiamenti prematuri del pistone e della camera di iniezione.

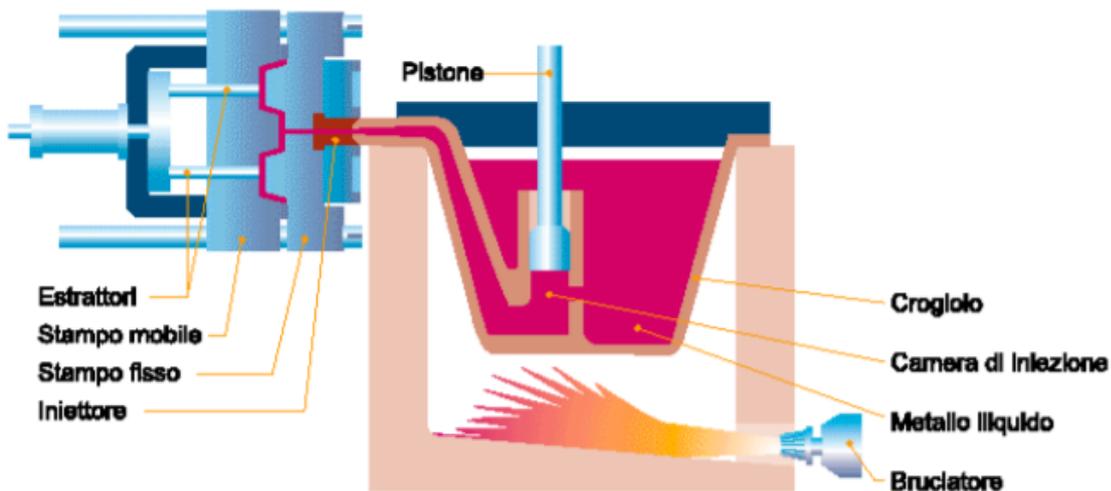


Figura 2.4 – Rappresentazione schematica della pressa a camera calda. [9].

L'utilizzo di una pressa a camera calda permette un controllo migliore della temperatura del fuso, poiché non ci sono trasferimenti della lega dal forno alla camera di iniezione, come invece avviene nelle macchine a camera fredda.

Nel processo con camera fredda la lega è contenuta allo stato liquido in un forno di mantenimento limitrofo alla pressa. Ad ogni ciclo viene riempita la camera di iniezione tramite una tazza che preleva una precisa quantità di materiale dal forno di mantenimento. Successivamente, il pistone avanza e spinge la carica di lega fusa dentro lo stampo chiuso. In figura 2.5 è rappresentata schematicamente la pressa a camera fredda.

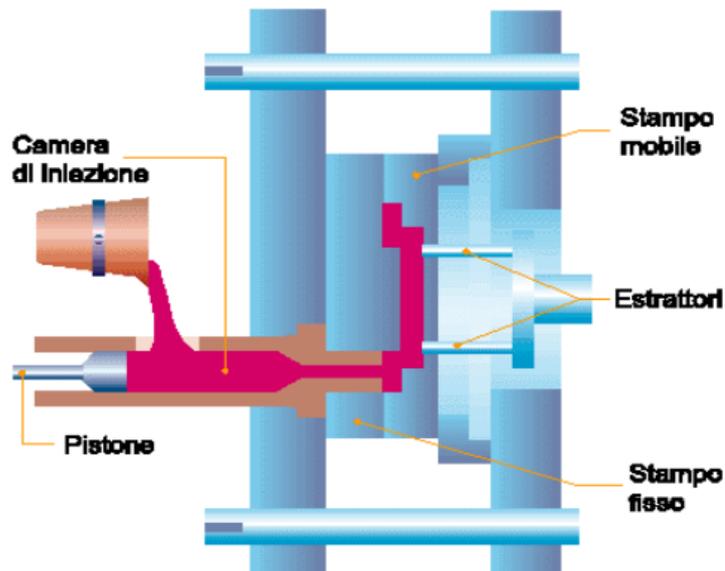


Figura 2.5 – Rappresentazione schematica della pressa a camera fredda. [9].

Si procede ora con un approfondimento sulle fasi del processo di pressocolata mediante camera calda, poiché i campioni oggetto della tesi sono stati ottenuti con questa tecnologia.

- La lega di alluminio viene fusa in un forno fusorio e, tramite una siviera, portata al forno di mantenimento. Il materiale liquido viene tenuto ad una determinata temperatura in questo forno, tipicamente tra i 670 e 710 °C. Successivamente, un sistema automatizzato preleva con una tazza la quantità ottimale di lega fusa e la versa nella camera di iniezione. In questa fase si può arrivare ad avere una perdita di temperatura della lega di 40-50 °C [10]. La temperatura del materiale in fase di iniezione è, dunque, minore rispetto alla temperatura della lega nel forno di mantenimento.
- Dopodiché, si ha l'avanzamento del pistone, così facendo esso spinge la lega fusa dentro lo stampo riempiendone la cavità. Durante questa fase la macchina deve garantire una forza di chiusura tale da vincere le pressioni generate all'interno della cavità dello stampo. Questa forza può essere calcolata nel seguente modo.

$$F = P_i * A * K$$

Dove:

F: forza di chiusura della macchina da garantire [N]

P_i: pressione interna nella cavità [N/mm²]

A: area proiettata della cavità comprensiva di area del getto e del sistema di alimentazione [mm²]

K: coefficiente di sicurezza, tipicamente maggiore o uguale a 1,1 [11]

- Dopo aver atteso il tempo necessario alla completa solidificazione del getto si ha l'apertura dello stampo. Quest'attesa in genere dura dai 10 ai 30 secondi e deve garantire che il pezzo raggiunga una rigidità tale da non deformarsi in fase di estrazione. All'apertura dello stampo il getto si trova generalmente a 260-300 °C [10].
La fase di apertura stampo ed estrazione del pezzo avvengono contemporaneamente. Uno stampo è formato da una parte mobile ed una fissa, rispettivamente ancorate alle piastre mobile e fissa della macchina. In fase di apertura delle due metà stampo la piastra mobile arretra ed il pistone avanza ulteriormente per accompagnare il getto [12]. L'espulsione del pezzo avviene per mezzo degli estrattori, visibili schematicamente in figura 2.5, che spingono il getto nella direzione opposta a quella di apertura della parte mobile. Poi, un braccio robotico aggancia il getto e lo manipola togliendolo dallo stampo per immergerlo successivamente in una vasca contenente acqua per il raffreddamento.
 - Una fase successiva a quella di estrazione del pezzo, tipicamente presente nelle isole di pressocolata più innovative, è la marcatura dei getti. Viene fatto uso di sistemi laser per imprimere dei codici QR ai prodotti. Questi codici sono identificativi per ogni singolo getto e ne garantiscono tracciabilità.
 - Dopo il raffreddamento viene eseguita la tranciatura dei getti. In questa fase, che può essere anch'essa automatizzata, si ha l'asportazione di quelle parti inutili alla funzionalità del prodotto come, ad esempio, bave e canali di alimentazione. L'operazione si esegue usando una pressa con stampo-trancia dedicato. Se questa operazione è automatica il posizionamento del pezzo viene eseguito dal braccio robot. Conclusa la tranciatura viene fatto un controllo visivo del pezzo dall'operatore, se il getto risulta conforme potrà essere imballato.
 - Negli stessi istanti in cui vengono eseguite le fasi di raffreddamento e tranciatura dei getti avviene la lubrificazione dello stampo. Questa, insieme all'iniezione, è sicuramente una delle fasi più importanti di tutto il ciclo. Un meccanismo automatico di assi lineari movimentata il lubrificatore all'interno dello stampo aperto. Il lubrificatore è dotato di molteplici getti per la spruzzatura del lubrificante ed il successivo soffiaggio con aria.
- Lo stampo, una volta riempito con la lega liquida, si porta ad una temperatura di 400-450 °C. Ecco, dunque, che si presenta la necessità di raffreddare lo stampo in breve tempo, in modo da evitarne un eccessivo riscaldamento e per prepararlo alla stampata

successiva. Generalmente la temperatura della superficie dello stampo, a valle della lubrificazione, è di 150-200 °C [10].

I lubrificanti più utilizzati sono quelli a base d'acqua, ossia con il 98-99% di acqua. La restante frazione è composta da parti attive, come cere e polisilossani. L'acqua ha la funzione di trasporto di questi composti e di raffreddare lo stampo. Infatti, quando la goccia di lubrificante entra in contatto con la superficie dello stampo, l'acqua evapora asportando calore, e restano depositate le parti attive. Queste, per effetto del calore, reagiscono e creano un film di pochi micron, in genere inferiore ai 10 µm, che facilita la rimozione del getto e ne migliora l'aspetto estetico della superficie. Un deposito eccessivo di lubrificante potrebbe avere effetti indesiderati. Infatti, potrebbe generarsi all'interno dello stampo chiuso del gas, che verrebbe conseguentemente inglobato nel getto. Inoltre, potrebbe verificarsi un'eccessiva riduzione della temperatura dello stampo. Al contrario, una fase di lubrificazione insufficiente non garantisce un film omogeneo e non raffredda in maniera efficiente la superficie dello stampo. Spesso occorre trovare un compromesso sulla temperatura della superficie dello stampo a valle della lubrificazione:

- Una superficie più calda ritarda il raffreddamento e garantisce maggiore fluidità della lega fusa. Condizione necessaria quando il getto presenta particolari con spessori sottili, dove è bene evitare che solidificazioni premature compromettano il corretto riempimento della cavità.
- Un tempo ridotto della fase di lubrificazione riduce il salto termico a cui è sottoposto lo stampo ad ogni ciclo. Si riduce così la sollecitazione di fatica termica, allungando la vita utile dello stampo. Inoltre, viene ridotto il tempo necessario alla produzione del singolo getto, aumentando così la produttività del processo.
- Una bassa temperatura dello stampo promuove premature chiusure delle sezioni di passaggio della lega, incrementandone le velocità in fase di riempimento e aggravando i fenomeni di erosione dello stampo. Una bassa temperatura dello stampo riduce il tempo necessario alla solidificazione degli attacchi di colata, vanificando l'effetto della pressione esercitata dal pistone in fase di intensificazione.
- Allungare la fase di lubrificazione/raffreddamento dello stampo ha il vantaggio di portare a maggiori velocità di solidificazione del materiale iniettato. Così facendo si favorisce una microstruttura più fine dei getti. In particolare viene

promossa la formazione del *Chill Layer*, ossia uno strato superficiale di pochi decimi di millimetro con una microstruttura più fine rispetto alle altre parti del getto.

Completata la lubrificazione si ha la fase di soffiatura. Dal lubrificatore vengono attivati dei getti d'aria con lo scopo di migliorare la distribuzione delle parti attive sulla superficie dello stampo, ed eliminare un eventuale eccesso di liquido lubrificante rimasto dalla fase precedente.

L'iniezione merita un accurato approfondimento, in quanto fase molto importante del ciclo. Essa può essere suddivisa in tre sotto-fasi caratterizzate da differenti pressioni, avanzamenti e velocità del pistone. Queste sono fase I, fase II e fase III, mostrate schematicamente in figura 2.6.

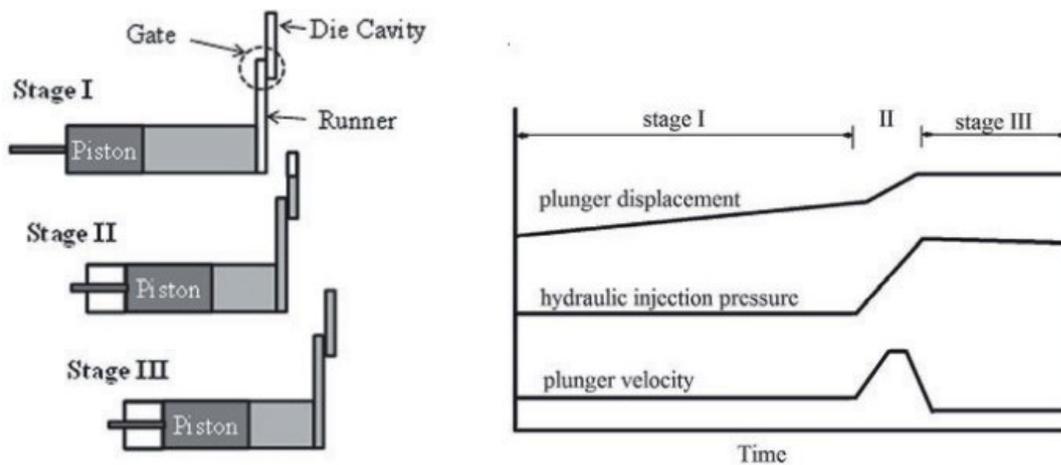


Figura 2.6 – Rappresentazione schematica delle tre fasi dell'iniezione.

Vengono di seguito spiegate caratteristiche e problematiche principali riscontrabili nelle tre fasi.

- *Fase I* (prima fase). In fase I il pistone, da fermo, inizia ad avanzare con una velocità costante, tra 0,10 e 0,30 m/s, fino a portare il fronte del fuso in prossimità degli attacchi di colata. Se si eccede con la velocità potrebbe verificarsi un avanzamento della lega con moto turbolento. Ciò porterebbe ad inglobamenti nell'alluminio di bolle dell'aria presente nella camera di iniezione. Al contrario, una fase I caratterizzata da basse velocità di avanzamento del pistone promuove raffreddamenti eccessivi della lega fusa, causando una diminuzione della fluidità della lega, nonché possibili problemi di riempimento.

- *Fase II* (seconda fase). La fase II è caratterizzata da una forte accelerazione del pistone, il quale spinge a velocità elevate il fuso dentro la cavità dello stampo. Si ha così il completo riempimento della cavità. Tipicamente si raggiungono velocità del pistone dai 3 fino ai 7 m/s. Il punto di passaggio dalla fase I alla fase II viene chiamato *Switch Point*, oltre questo istante il pistone subisce forti accelerazioni per poter raggiungere la velocità massima impostata per questa fase.
- *Fase III* (terza fase). L'iniezione si conclude con la fase III, in cui il pistone esercita una forte pressione sul fluido a cavità riempita. L'azione del pistone serve a compensare i ritiri volumetrici a cui è sottoposto il getto durante la solidificazione e a comprimere le bolle d'aria presenti nell'alluminio.

Valori comuni massimi della pressione esercitata dal pistone in questa fase, detta pressione di intensificazione, sono 250-350 bar. Talvolta, però, non si ha una corretta gestione di questa fase. Se durante le fasi I e II si hanno raffreddamenti eccessivi della lega, ad esempio per basse velocità di avanzamento del pistone, la temperatura del fuso quando riempie lo stampo può essere troppo bassa. Si ha così una solidificazione totale o parziale della sezione dell'attacco di colata, in anticipo rispetto al raggiungimento del valore massimo di pressione di intensificazione, vanificando così l'effetto di quest'ultima.

2.2 Difetti nella pressocolata

La pressocolata è per sua natura un processo incapace di garantire un'ottima qualità sui prodotti. Le elevate velocità di iniezione, caratteristiche della pressocolata, portano inevitabilmente ad una serie di difetti interni e superficiali tipici del processo. Le tipologie e le dimensioni dei difetti riscontrabili nei getti sono molto variabili. Normalmente, una produzione di componenti ottenuti per pressocolata ha un tasso di scarto del 5-10% [13]. Ecco perché è un processo che necessita di un continuo e costante studio per poter trovare le condizioni che minimizzino la presenza dei difetti.

È necessario poter identificare in maniera univoca i difetti presenti in un getto. Sono diversi gli approcci che vengono proposti per classificare i difetti. Oltre a quello successivamente approfondito, gli altri sono:

- *Approccio di Cocks*. Metodo di classificazione che fa riferimento alla posizione e alla geometria dei difetti. Viene poi fatta distinzione tra difetti interni e superficiali. I difetti superficiali sono quelli visibili ad occhio nudo, e possono impattare sulle proprietà estetiche e sulla funzionalità dei getti. I difetti interni, invece, influenzano il comportamento del componente durante il suo utilizzo.
- *Approccio di Campbell*. I difetti vengono classificati sulla base della loro origine metallurgica, come proprietà della lega, caratteristiche dello stampo e parametri di processo. Questo metodo mette in luce la causa dei difetti consentendo di intervenire facilmente sulla qualità dei prodotti.
- *Approccio NADCA (North America Die Casting Association)*. È un approccio che valuta la morfologia dei difetti e li classifica in sette categorie. Queste sono poi suddivise in gruppi e sotto-gruppi.

Nella presente tesi verrà adottato il metodo da norma EN 12258-1:20125 presentato in [14], poiché ritenuto più funzionale nell'ambito della pressocolata. Al contrario di altri metodi di classificazione, questo non considera difetti ed imperfezioni come entità che impediscono ad un componente in lega di svolgere la funzione per cui è progettato, ma permette una valutazione più adatta ad un contesto di pressocolata, dove la presenza di anche minime imperfezioni sui componenti è pressoché inevitabile. Questo metodo sviluppa la sua classificazione su tre livelli: *Livello I* – Difetti che vengono distinti sulla base della loro posizione. Si parla di difetti interni, esterni (superficiali e sub-superficiali) e geometrici.

Livello II – In questo livello esistono diverse categorie per poter classificare il singolo difetto in base alla sua origine metallurgica. In questo modo si riesce anche a dare un forte aiuto nella pratica di fonderia, poiché nota l'origine del difetto, risulta più facile intervenire con azioni correttive mirate.

Livello III – Viene definito nello specifico il tipo di difetto.

Vengono di seguito riportati i difetti da normativa EN 12258-1:20125 riscontrabili nei processi di fonderia caratterizzati dall'utilizzo di stampi permanenti, come la pressocolata. La tabella 2.1 definisce i difetti e le imperfezioni interni, la tabella 2.2 classifica difetti ed imperfezioni superficiali, la tabella 2.3 i difetti e le imperfezioni geometriche.

Livello I	Livello II		Livello III	
A - Difetti ed imperfezioni interni	A1	Difetti ed imperfezioni di ritiro	A 1.1	Macro-ritiri
			A 1.2	Ritiri interdendritici
			A 1.3	Porosità planare
	A2	Difetti ed imperfezioni di gas	A 2.1	Porosità da aria intrappolata
			A 2.2	Porosità da idrogeno
			A 2.3	Porosità da umidità residua
			A 2.4	Porosità da lubrificante
	A3	Difetti ed imperfezioni di riempimento	A 3.1	Giunzione
			A 3.2	Sfogliatura
			A 3.3	Goccia fredda
	A4	Fasi indesiderate	A 4.1	Inclusione
			A 4.2	Struttura non desiderata
A5	Difetti di contrazione termica	A 5.1	Cricca a freddo	
		A 5.2	Cricca a caldo	

Tabella 2.1 – *Difetti ed imperfezioni interni [14].*

Livello I	Livello II		Livello III	
B - Difetti ed imperfezioni superficiali	B1	Difetti ed imperfezioni di ritiro	B 1.1	Ricalo
	B2	Difetti ed imperfezioni di gas	B 2.1	Blister
			B 2.2	Pinhole
	B3	Difetti ed imperfezioni di riempimento	B 3.1	Giunzione e vortice
			B 3.2	Sfogliatura
			B 3.3	Goccia fredda
	B4	Fasi indesiderate	B 4.1	Depositi
			B 4.2	Contaminazione o inclusione
	B5	Difetti di contrazione termica	B 5.1	Cricca a freddo
			B 5.2	Cricca a caldo
	B6	Difetti di interazione metallo-stampo	B 6.1	Erosione
			B 6.2	Metallizzazione
			B 6.3	Segni di fatica termica
			B 6.4	Segno da espulsione
			B 6.5	Corrosione dello stampo

Tabella 2.2 – Difetti ed imperfezioni superficiali [14].

Livello I	Livello II		Livello III	
C - Difetti ed imperfezioni geometriche	C1	Mancanza di materiale	C 1.1	Getto incompleto
	C2	Eccesso di materiale	C 2.1	Bava
	C3	Fuori tolleranza	C 3.1	Getto deformato

Tabella 2.3 – Difetti ed imperfezioni geometriche [14].

Tra questi difetti, vengono ora approfonditi quelli maggiormente riscontrati nel contesto in cui è stata sviluppata la tesi.

I *macro-ritiri*, di cui un esempio è visibile in figura 2.7, sono classificati come A 1.1 tra i difetti e le imperfezioni interni. Sono delle cavità che si formano tipicamente in quei punti del getto che solidificano per ultimi, ad esempio in corrispondenza di spessori maggiori. Tra le possibili cause si riconosce un'inadeguata compensazione del ritiro volumetrico in fase di solidificazione del getto.

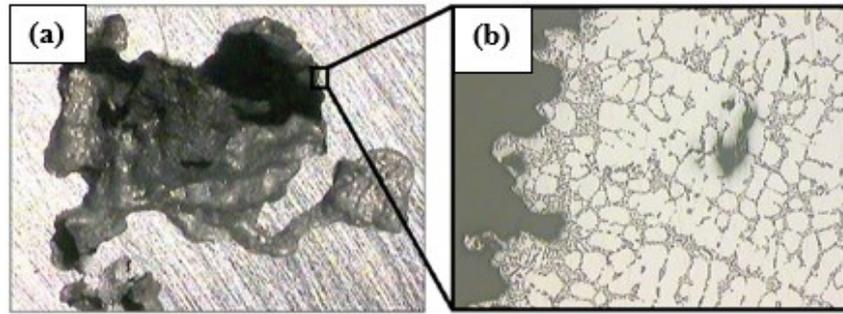


Figura 2.7 – Macrografia (a) e micrografia (b) di un macro-ritiro [14].

Le porosità da intrappolamento d'aria sono tra i difetti più comuni nella pressocolata, aventi un'origine gassosa sono classificate con la codifica A 2.1. Come mostrato in figura 2.8, sono difetti visibili tramite un controllo radiografico, dove appaiono di colore più chiaro rispetto al resto del getto. Durante la fase di iniezione è comune che venga inglobata dell'aria nella lega liquida, ad esempio per moto turbolento della vena fusa. Si generano così dei vuoti di forma sferica o ellissoidale. La spinta del pistone in fase III mitiga la presenza di questi vuoti.

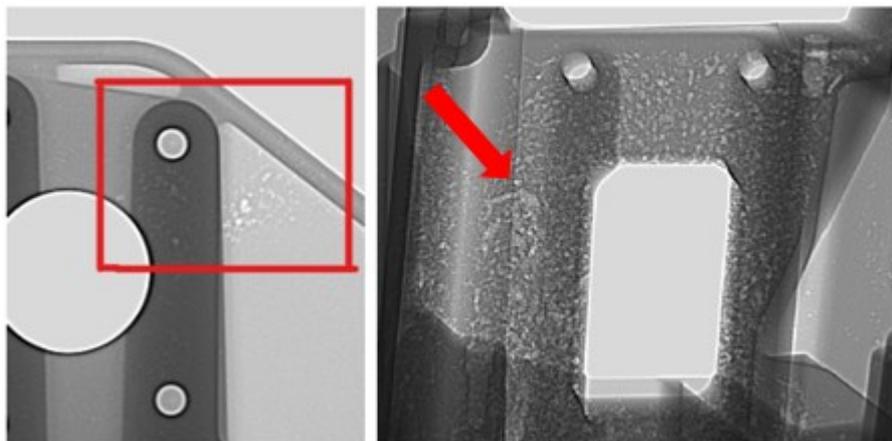


Figura 2.8 – Porosità per intrappolamento d'aria visibili da radiografie sul getto di riferimento per questa tesi [15].

La *goccia fredda* è una piccola porzione di materiale caratterizzata da una forma sferica o ellittica, con una microstruttura più fine rispetto al materiale circostante. Può essere sia superficiale che interna. Questo tipo di difetto si verifica quando, a causa di un riempimento con moto particolarmente turbolento, alcune gocce di lega fusa si separano dal resto della massa solidificando prematuramente una volta a contatto con lo stampo o altro materiale. Spesso a contorno della goccia fredda è presente uno strato di ossido, riconoscibile nell'esempio in figura 2.9 come le chiazze scure e circolari, poiché la goccia solidifica in maniera separata dal resto della massa fusa.

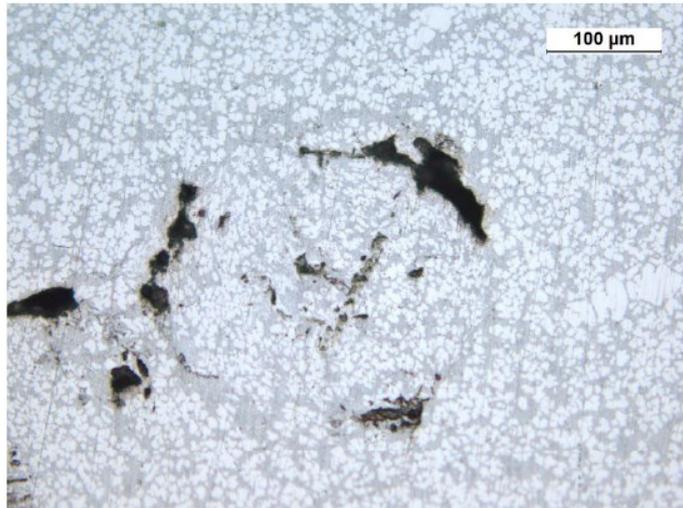


Figura 2.9 – Esempio al microscopio ottico di una goccia fredda [15].

La *giunzione* esiste sia come difetto interno che superficiale, viene così distinto dalle sigle A 3.1 e B 3.1. Si forma quando si incontrano fronti di flusso parzialmente solidificati, per cui non avviene la corretta fusione di questi. Anche in questo caso può essere presente uno strato di ossido in corrispondenza della giunzione, ossia quella striscia più scura evidenziata in figura 2.10.

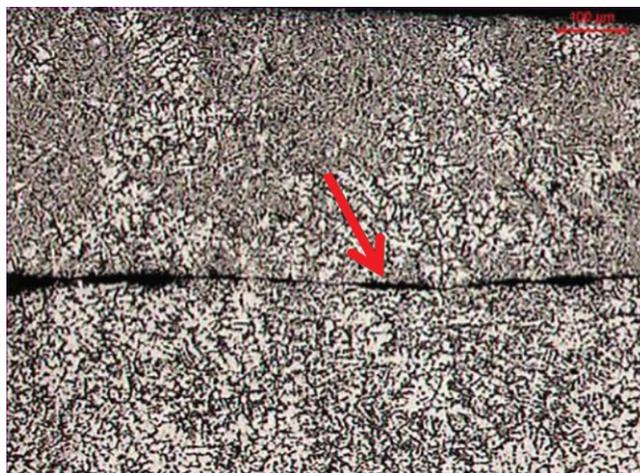


Figura 2.10 – Esempio di giunzione [14].

Il tipo di difetto denominato *contaminazione*, con sigla B 4.2, è riconoscibile come una macchia, tipicamente di colore più scuro rispetto al resto del getto. Sono difetti causati dall'interazione tra la lega e l'ambiente esterno. Un esempio è mostrato in figura 2.11.



Figura 2.11 – Esempio di contaminazione sul getto di riferimento per la tesi.

Un tipo di difetto visibile in getti prodotti con uno stampo usurato sono i *segni di erosione*, classificati al livello III con B 6.1. Il flusso di lega liquida, infatti, a lungo andare erode la superficie dello stampo. Tale fenomeno causa dei segni visibili sul getto solidificato.

Altre imperfezioni dovute ad uno stampo usurato sono i *segni di fatica termica*, definiti dalla normativa come B 6.3. Un esempio è mostrato in figura 2.12. Sono riconoscibili nel getto come sottili creste in rilievo.



Figura 2.12 – Esempio di segni di fatica termica su getto di riferimento.

Le *metallizzazioni* appartengono a quei difetti superficiali dovuti all'interazione tra il metallo e lo stampo. Appaiono come zone a maggiore rugosità o mancanze localizzate di materiale sul getto. Sono dovute alla formazione di fasi intermetalliche sulla superficie dello stampo, con conseguente adesione della lega. Questo difetto si verifica prevalentemente su zone dello stampo soggette a precedenti fenomeni di fatica termica o erosione [14].

Un particolare tipo di difetto superficiale, anch'esso dovuto all'interazione tra metallo e stampo, sono i *segni di espulsione*. Come visibile in figura 2.13, sono dei segni di strisciamento che seguono la direzione di apertura dei due semi-stampi.



Figura 2.13 – Esempio di segni di espulsione su getto di riferimento.

Un difetto geometrico è il *getto incompleto*, un esempio è visibile in figura 2.14. È una lacuna di materiale causata da un'eccessiva viscosità della lega liquida.

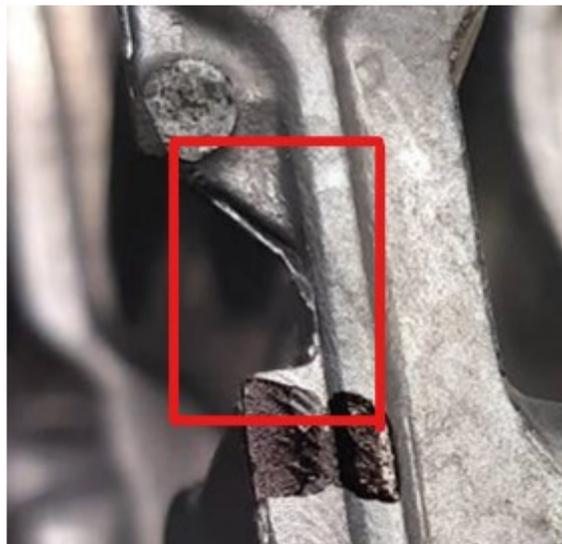


Figura 2.14 – Esempio di particolare incompleto.

Un difetto tipico dei processi di pressocolata è la *bava*, viene classificata tra le imperfezioni geometriche con la designazione C 2.1. Come intuibile dalla figura 2.15, la bava è una porzione di materiale in eccesso presente sul getto. È una fuoriuscita di materiale liquido che si posiziona tra le due parti dello stampo.



Figura 2.15 – Esempio di bava su getto di riferimento.

CAPITOLO 3

INNOVAZIONI DIGITALI NEI PROCESSI DI FONDERIA

3.1 Processi Foundry 4.0

È ormai ben noto che è attualmente in corso la quarta rivoluzione industriale, fenomeno denominato come Industria 4.0 (o *Industry 4.0*). Con questo termine si intende un insieme di innovazioni digitali e tecnologiche sviluppate negli ultimi anni che vengono sempre più applicate nel mondo industriale. Queste tecnologie consentono ad imprese ed aziende di incrementare la propria efficienza e competitività.

Come è brevemente riassunto in figura 3.1, le prime tre rivoluzioni industriali ebbero le seguenti caratteristiche [16]:

- La prima rivoluzione industriale ebbe inizio alla fine del 18° secolo. Il cambiamento che coinvolse il mondo dell'industria fu dovuto all'introduzione dei macchinari azionati dalla potenza del vapore.
- Agli inizi del 20° secolo cominciò la seconda rivoluzione industriale. I progressi tecnologici dell'epoca resero disponibili alle industrie nuove fonti energetiche, quali petrolio, gas ed elettricità.
- La terza rivoluzione industriale si sviluppò nella seconda metà del 20° secolo. È in questo periodo storico che si iniziò a fare uso dell'elettronica, delle telecomunicazioni e dei computer.

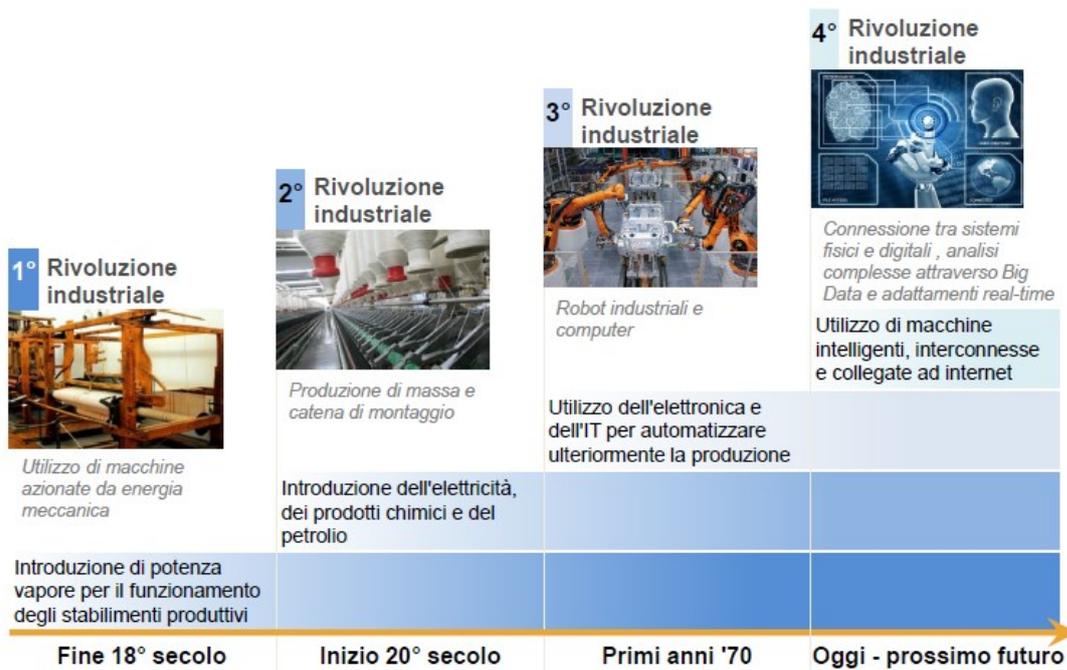


Figura 3.1 – Rivoluzioni industriali nella storia [17].

Recentemente, a sostegno della quarta rivoluzione industriale, il Ministero dello Sviluppo Economico ha stabilito le cosiddette *9 Tecnologie abilitanti* nel *Piano nazionale Industria 4.0* [17].

- *Advanced manufacturing solutions*. Robot collaborativi interconnessi e rapidamente programmabili.
- *Additive Manufacturing*. Stampanti in 3D connesse a software di sviluppo digitali.
- *Augmented Reality*. Realtà aumentata a supporto dei processi produttivi.
- *Simulation*. Simulazione tra macchine interconnesse per ottimizzare i processi.
- *Horizontal/Vertical Integration*. Integrazione di informazioni lungo la catena del valore dal fornitore al consumatore.
- *Industrial Internet*. Comunicazione multidirezionale tra processi produttivi e prodotti.
- *Cloud*. Gestione di elevate quantità di dati su sistemi aperti.
- *Cyber-security*. Sicurezza durante le operazioni in rete e su sistemi aperti.
- *Big Data and Analytics*. Analisi di un'ampia base dati per ottimizzare prodotti e processi produttivi.

Ad oggi, sono ormai largamente impiegate anche altre tecnologie come le *Information and Communication Technologies (ICT)*, le quali stanno accelerando l'applicazione dei *Cyber-Physical Systems (CPS)*, dell'*Internet of Things (IoT)* e dell'*Artificial Intelligence (AI)* [18]. Le ICT sono quelle tecnologie riguardanti i sistemi per la raccolta e la condivisione di

informazioni, mentre i CPS sono reti informatiche collegate a sistemi fisici, come prodotti e processi industriali, da cui raccolgono ed elaborano informazioni. Ben più noti sono i concetti che stanno alla base dell'*Internet of Things* e dell'*Artificial Intelligence*. Per IoT si intende la possibilità di connettere alla rete internet degli oggetti intelligenti, nel caso dell'industria si tratta di macchinari ed attrezzature varie. Nell'AI sono compresi algoritmi sempre più potenti il cui ambizioso traguardo è quello di replicare l'intelligenza umana.

Anche nel settore della fonderia, in particolare nella produzione di leghe leggere, si sta espandendo l'uso delle tecnologie derivanti dallo scenario di Industria 4.0. Queste tecnologie innovative sono sempre più largamente impiegate nei processi produttivi metallurgici. [19].

Si parla, dunque, di *Smart Foundries*, o *Foundries 4.0*, quando ci si riferisce a quelle fonderie che includono i principi di Industria 4.0 nei processi manifatturieri tradizionali. Il fine principale delle *Smart Foundries* è quello di instaurare una produzione in grado di minimizzare la presenza dei difetti sui prodotti e, dunque, minimizzare il tasso di scarto.

Nelle fonderie innovative vengono adottate soluzioni tecnologiche come sistemi automatizzati e robotizzati, oltre che quei sistemi che permettono di digitalizzare le operazioni produttive. Un importante ruolo nell'innovazione del settore metallurgico lo stanno poi avendo anche i software di simulazione, usati per ingegnerizzare il prodotto ed il processo. Sono strumenti software che permettono di simulare il processo di colata e, dunque, ottimizzare il prodotto in termini di tempi, costi e qualità. Altri software, invece, sono di supporto alla fase di progettazione ed industrializzazione della filiera produttiva [18].

Un controllo intelligente della produzione presenta molteplici vantaggi, tra cui quello di avere sistemi produttivi più attenti ad un consumo energetico. Basti pensare, ad esempio, che incrementare la qualità comporta conseguentemente ad una riduzione dell'energia impiegata per la produzione di prodotti scartati. Oppure, un tempo ciclo ottimizzato significa meno risorse utilizzate per il singolo getto. Tutto ciò porta ad una riduzione dei costi di produzione.

È facile intuire come l'impiego di queste tecnologie sia particolarmente sentito nei processi di pressocolata, caratterizzati per loro natura da produzioni con il 5-10% di scarto.

La pressa è l'elemento chiave della filiera produttiva, poiché circa il 60% dei difetti viene generato in fase di stampaggio. Le principali innovazioni nei processi di pressocolata riguardano così l'inserimento di avanzati sensori nella macchina per monitorare e valutare la stabilità delle varie fasi del processo. Una possibile soluzione tecnologica è la creazione, attraverso i sensori, di un'avanzata rete di controllo che possa elaborare e memorizzare ogni dato che influisce sulla qualità [20]. In una prima fase si può implementare nello stampo un sistema di sensori sensibile ai difetti di colata. Tipicamente, i parametri di processo monitorati

all'interno della cavità dello stampo sono pressione e temperatura. La locazione di questi sensori è risultante da complesse simulazioni virtuali del processo di colata, nelle quali si va a ricercare il compromesso tra zone dello stampo in cui i parametri della lega, come pressione e temperatura, sono sensibili alle variabili produttive ed in cui l'inserimento dei sensori è fattibile dal punto di vista tecnico. Nello studio per il posizionamento dei sensori si valuta anche la presenza di canali di raffreddamento ed espulsori. Pertanto, in alcuni casi, non è possibile posizionare i sensori nelle aree in cui appaiono i principali difetti. Molte altre informazioni sul processo possono essere ricavate mediante sensori che non sono posti direttamente sulla cavità dello stampo. Ad esempio, sensori di posizione e pressione per il pistone della pressa che permettono di rilevare informazioni utili a caratterizzare la fase di iniezione della lega liquida. È inoltre possibile utilizzare termocamere per valutare l'influenza della durata della fase di lubrificazione sulla temperatura superficiale dello stampo, evitando così diverse problematiche, come eccessivi raffreddamenti dello stampo.

In generale, gli elementi principali che caratterizzano la digitalizzazione di un processo di fonderia sono i seguenti [18]:

1 – Un controllo da remoto che deve essere applicabile ad impianti già esistenti, e comunque indipendenti dall'azienda produttrice dei macchinari. Questo controllo permette di verificare a distanza variabili come fermate e tempo ciclo. Servono poi database in grado di immagazzinare tutti i dati raccolti, tra cui quelli derivanti dai sensori attivi sulla linea di produzione.

2 – Valutazione in tempo reale dei KPI che definiscono l'OEE dell'impianto. L'obiettivo è, chiaramente, quello di verificare il raggiungimento di un determinato valore di questi indicatori.

3 – Interfacce personalizzate per la visualizzazione in tempo reale dei dati di processo raccolti ed elaborati. Queste interfacce devono essere adattate all'utente, ad esempio, possono essere personalizzate a seconda che siano destinate all'operatore, al responsabile di reparto o al direttore di stabilimento.

4 – L'applicazione dell'*Artificial Intelligence* al processo per ottimizzarlo a seguito delle analisi e degli studi fatti sui dati raccolti dalle precedenti produzioni.

In particolare, l'ultimo punto espone la possibilità di sviluppare un modello predittivo sulla qualità dei getti in grado di servire la produzione. Questi modelli vengono elaborati sulla base di tutti quei parametri di processo che possono influenzare la qualità delle colate. Sono modelli in grado di correlare le variabili di processo ed i dati letti dai molteplici sensori, alla qualità dei getti.

I vantaggi di questo strumento sono facilmente riconoscibili. Modelli di questo tipo portano a conoscenza delle condizioni di processo da cui sono stati ottenuti i prodotti con la migliore

qualità, ed è possibile intervenire in tempo reale quando si devia da tali condizioni durante la normale produzione. Una limitazione è il fatto che questi modelli sono unici e non generalizzati, ossia fanno riferimento ad uno specifico prodotto ottenuto mediante un'attrezzatura dedicata. La fase di sviluppo di questo modello richiede una campionatura del getto in esame. È necessario attivare una produzione di campioni in cui si cambia, in un ben determinato modo, le variabili di processo. Fornendo poi i risultati di qualità dei campioni al modello, esso sarà in grado di determinare le condizioni che hanno portato alla generazione di uno specifico difetto.

3.2 Progetto SMARTI 4.0

SMARTI 4.0 (*Smart Manufacturing for an Automotive Tier 4.0*) è il progetto entro la quale si colloca questa tesi. SMARTI 4.0 è un progetto di ricerca e sviluppo finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento. Il proponente di SMARTI 4.0 è l'azienda Meccanica Cainelli Srl. La volontà dell'azienda è quella di implementare le nuove tecnologie derivanti dalla quarta rivoluzione industriale nel processo di pressocolata. Gli obiettivi proposti in quest'ambito sono:

- Sviluppo ed ottimizzazione di una lega innovativa da pressocolata.
- Implementazione di processi produttivi più flessibili e reattivi. Sviluppo di un'isola di pressocolata completamente digitalizzata.
- Introduzione delle tecniche di additive manufacturing per un impiego nella prototipazione rapida, in alternativa al metodo tradizionale di colata in sabbia per la produzione di prototipi.
- Utilizzo profondo delle tecniche di simulazione digitale per ottenere componenti sempre più performanti e per rispondere in maniera efficace alle esigenze del cliente.

Il progetto si sta sviluppando attraverso i punti realizzativi riassunti brevemente in figura 3.2, composti a loro volta da più attività.

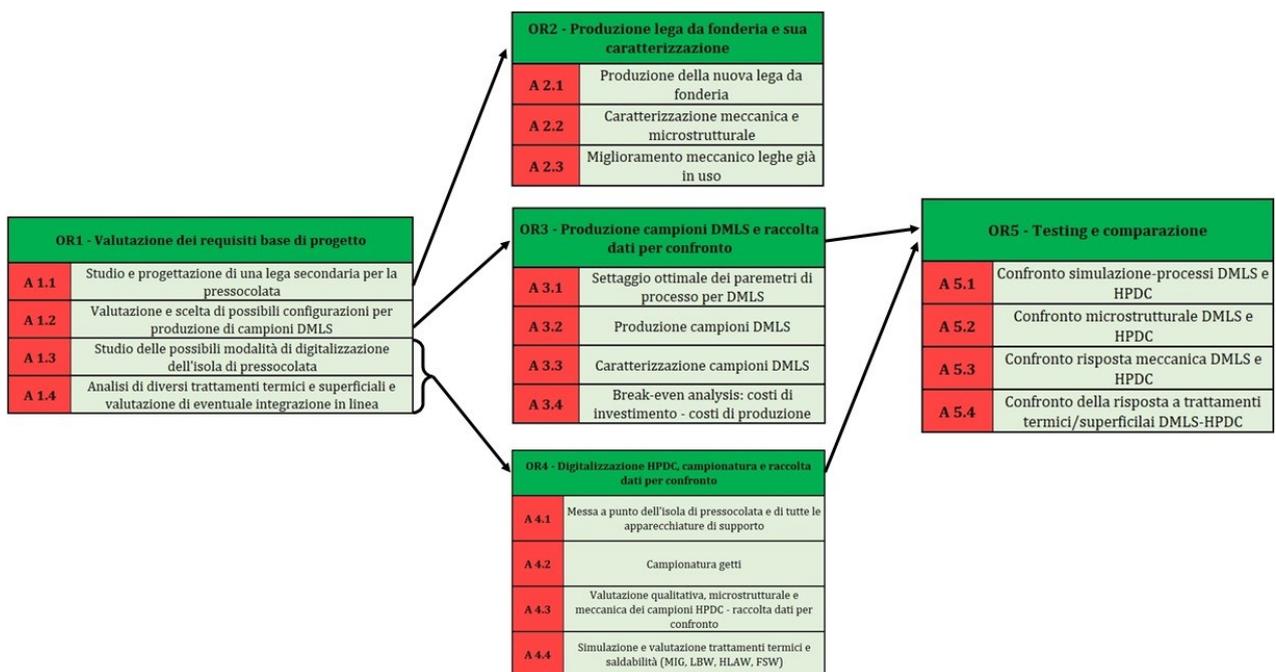


Figura 3.2 – Obiettivi realizzativi del progetto SMARTI 4.0.

Il progetto SMARTI 4.0 ha avuto inizio il 20 gennaio 2020 ed ha una durata prevista di 48 mesi. Nei ruoli di coordinatori ci sono l'Ing. Alessandro De Mori e l'Ing. Eleonora Battaglia. Sono diversi i partner coinvolti nel progetto che collaborano sotto la direzione di Meccanica Cainelli. Nello specifico: Enginsoft Spa, Istituto Italiano d Saldatura (IIS), Fondazione Bruno Kessler, ProM, UniTN, Fisep Srl, New Olef Srl, KTH Royal Institute of Technology e UniPD-Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali (DTG).

Più precisamente, questa tesi si posiziona nella fase di sviluppo dell'isola di pressocolata digitalizzata. I partner che collaborano in questa fase del progetto sono: le fonderie Fisep Srl e New Olef Srl per la produzione dei campioni e le successive lavorazioni meccaniche, la società Enginsoft Spa per il supporto alla digitalizzazione dell'isola, e il laboratorio di metallurgia del DTG per lo svolgimento di diverse analisi.

CAPITOLO 4

IL CASO STUDIO

4.1 Il componente di riferimento

Il getto di riferimento per questa tesi è un *case* progettato da Panasonic Corporation e prodotto presso la fonderia Fisep Srl. È un getto studiato per applicazioni nel settore automotive e la sua funzione è quella di contenere e raffreddare della componentistica elettronica. Il *case* è denominato internamente a Fisep Srl come PAN0005. Questo componente viene assemblato assieme ad altri tre getti, anch'essi prodotti da Fisep Srl, per comporre la *Combined Charging Unit* (CCU). La CCU è un dispositivo di Panasonic montato sulle autovetture iX3 della casa automobilistica tedesca BMW. In figura 4.1 sono visibili le rappresentazioni e le principali caratteristiche tecniche del PAN0005 e degli altri tre getti che compongono la CCU di Panasonic.

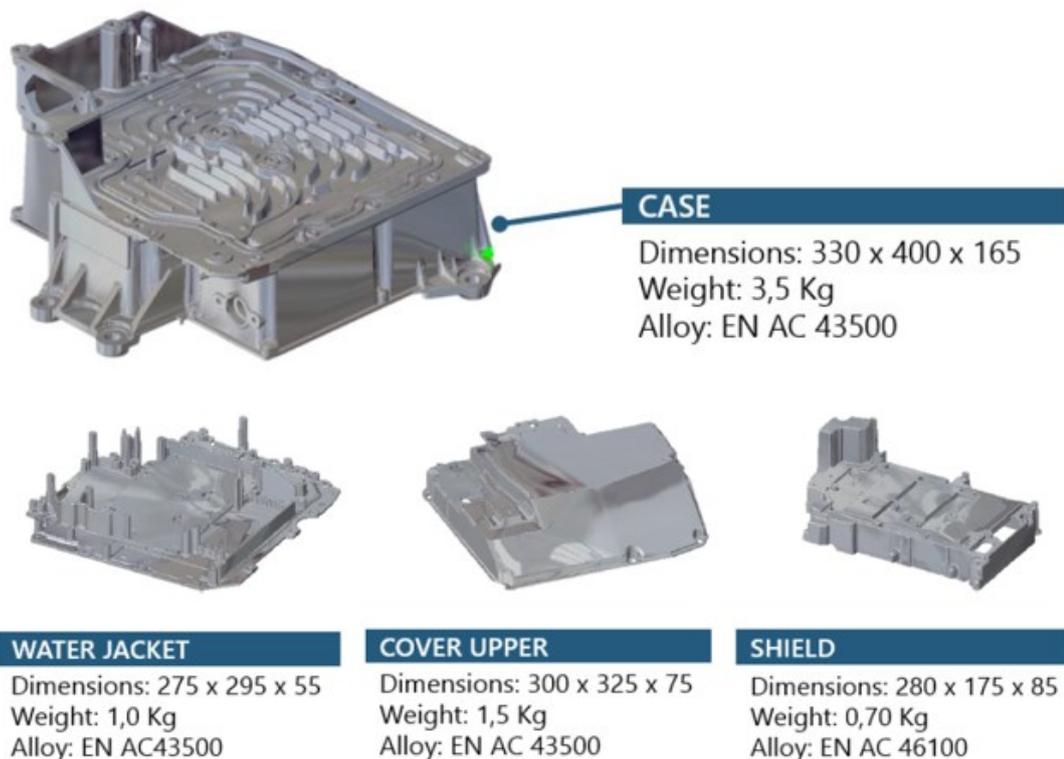


Figura 4.1 – Rappresentazione e principali dettagli tecnici dei quattro getti, prodotti da Fisep Srl, che costituiscono la CCU.

Il getto PAN0005 è caratterizzato dall'aver due lati che svolgono specifiche funzioni. Il lato inferiore, quello mostrato in figura 4.2, è progettato per l'alloggio della componentistica elettronica. Questo lato del componente è chiamato *Electric Room*.

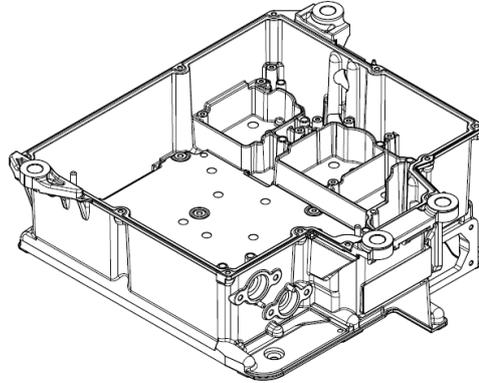


Figura 4.2 – Rappresentazione del lato *Electric Room* del componente PAN0005.

I dispositivi elettronici che vengono assemblati nell'*Electric Room* per questo tipo di studio necessitano di essere raffreddati. Ciò avviene grazie al circuito per lo scambio termico predisposto sul lato superiore del PAN0005, il *Water Channel*, visibile in figura 4.3.

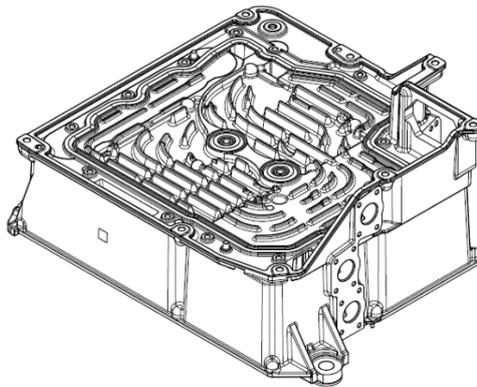


Figura 4.3 – Rappresentazione del lato *Water Channel* del componente PAN0005.

Nel *Water Channel* sono presenti delle alette che hanno lo scopo di migliorare lo scambio termico tra il getto ed il liquido di raffreddamento che viene fatto circolare, ossia una miscela di acqua e glicole. È di fondamentale importanza, dunque, garantire che non ci siano perdite di questo fluido una volta assemblata la CCU. A tale scopo sono stati definiti diversi test per assicurare la funzionalità dei componenti, tali prove vengono approfondite nel paragrafo seguente.

4.2 Prove e requisiti di conformità

Il cliente richiede a Fisep Srl e New Olef Srl una serie di severe procedure di controllo per verificare l'accettabilità del componente PAN0005. Sono ora descritti i principali test a cui è soggetto il *case*.

- TAPE PEELING TEST

Sul getto PAN0005 vengono assemblate delle guarnizioni di tenuta, ad esempio, per contenere il liquido che scorre nel circuito di raffreddamento sul lato *Water Channel*. Il *Tape Peeling Test* serve per verificare che non siano presenti sporco e residui di olio sulle superfici di alloggiamento delle guarnizioni. In figura 4.4 sono mostrate le superfici del getto su cui viene svolto questo test.

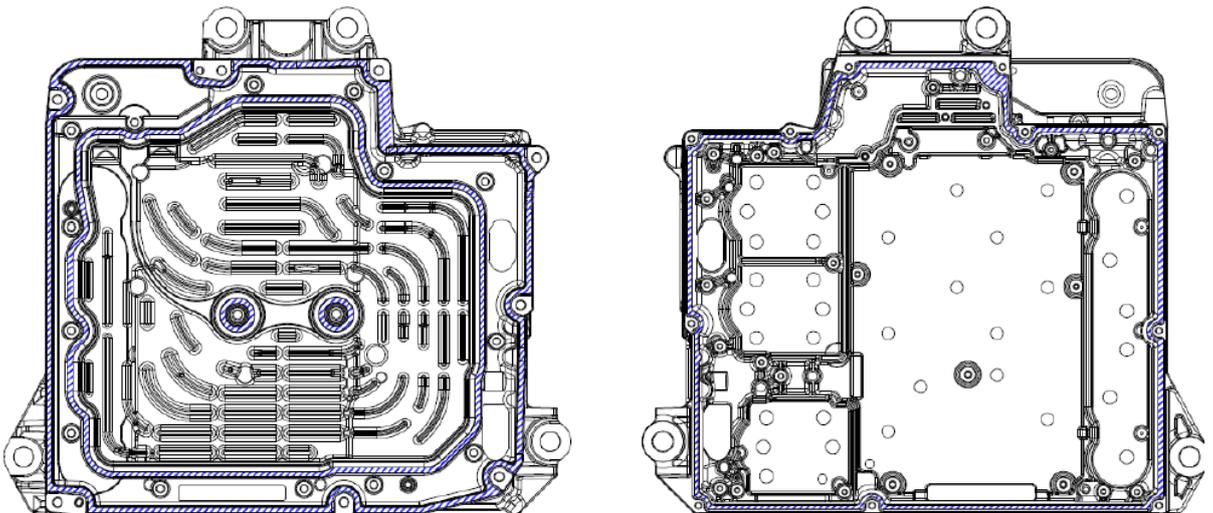


Figura 4.4 – Superfici del getto PAN0005 soggette al *Tape Peeling Test*.

Panasonic fornisce le indicazioni per effettuare il test che viene eseguito con un apposito nastro adesivo. Nello specifico, Panasonic, spiega dove applicare i nastri, come applicarli e come rimuoverli. In figura 4.5 è possibile vedere applicati alcuni dei nastri per il test.

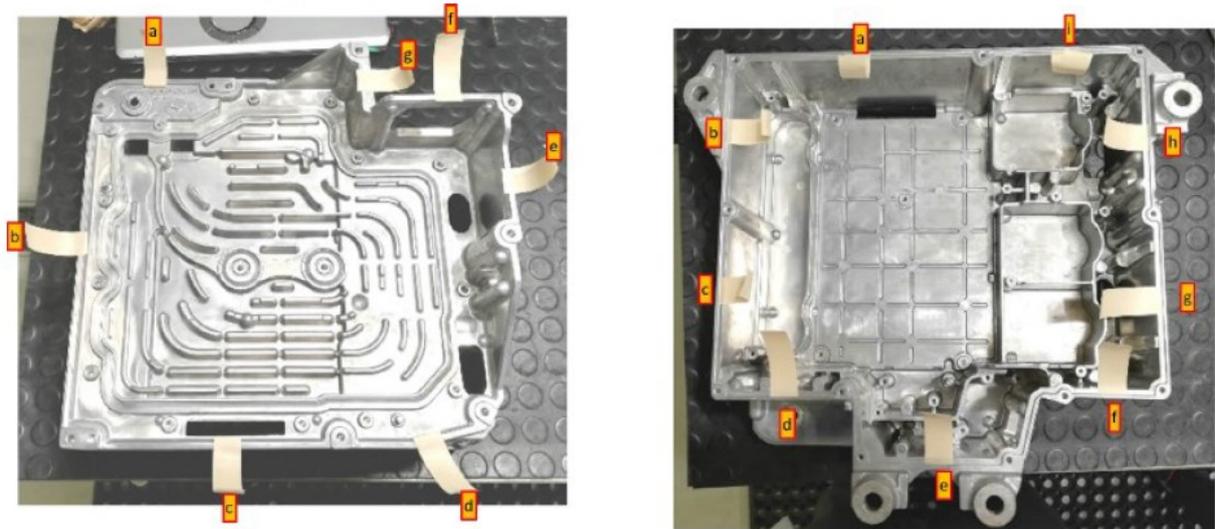


Figura 4.5 – Posizionamento dei nastri su PAN0005 per test dedicato.

Ciascuna di queste strisce adesive ha dimensioni di 19 mm x 50 mm e viene applicata per una lunghezza di 5 mm, con una forza di 49 N.

La rimozione di queste strisce è da eseguirsi tirando, in direzione normale alla superficie soggetta al test, con una forza registrata dal dinamometro di almeno 5,5 N. La velocità di strappo, invece, non deve superare i 5 mm/s. In figura 4.6 è visibile una schematizzazione delle fasi di applicazione e rimozione dei nastri.

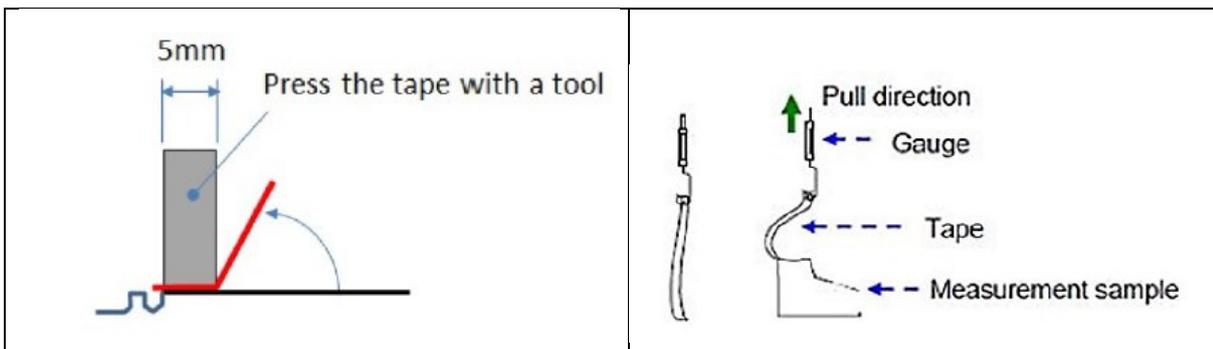
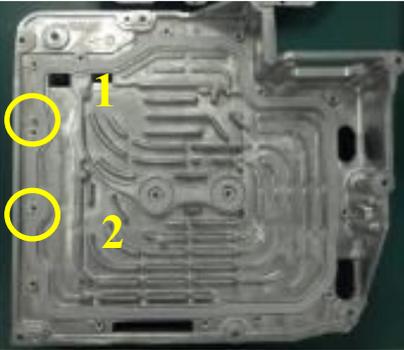


Figura 4.6 – Rappresentazione schematica delle fasi di applicazione e rimozione dei nastri adesivi usati nel Tape Peeling Test.

I nastri, una volta tolti, vengono analizzati per valutare la presenza di residui di olio e confrontati con delle soglie di accettabilità. Il *Tape Peeling Test* viene effettuato su 22 campioni di PAN0005 per ogni lotto di fornitura.

- CONTROLLO VISIVO

I getti PAN0005 vengono anche sottoposti ad un controllo visivo, nello specifico 3 pezzi per ogni lotto di produzione. Per l'esecuzione di questo test, Panasonic Corporation ha fornito delle immagini di riferimento degli eventuali difetti superficiali da controllare. In tabella 4.1 ne sono visibili alcuni esempi.

		
	1 CONFORME	1 NON CONFORME Cricca
		
	2 CONFORME	2 NON CONFORME Cricca

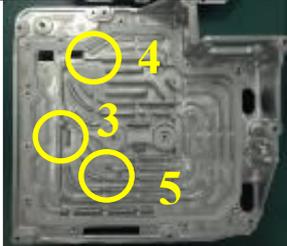
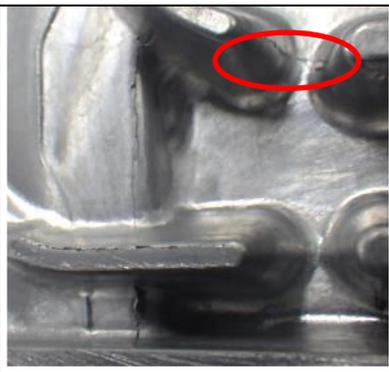
		
	3 CONFORME	3 NON CONFORME Cricca
		
	4 CONFORME	4 NON CONFORME Cricca
		
	5 CONFORME	5 NON CONFORME Cricca

Tabella 4.1 – Esempi di particolari del PAN0005 sottoposti a controllo visivo.

Nel controllo visivo si va a ricercare la presenza di eventuali difetti ed imperfezioni geometriche e superficiali. Come mancanze di materiale, segni da espulsione, metallizzazioni e le cricche mostrate in tabella 4.1.

- CONTROLLO DIMENSIONALE

Viene poi eseguito un controllo dimensionale di 3 pezzi per ogni lotto. Mediante una CMM (*Coordinate Measuring Machine*) viene svolta la verifica del rispetto di determinate tolleranze geometriche e dimensionali, sia prima che dopo le fasi di lavorazioni meccaniche a cui vengono sottoposti i getti PAN0005. Ad esempio, vengono controllate le tolleranze necessarie al garantire la corretta qualità delle superfici di alloggio delle guarnizioni di tenuta.

Nelle figure 4.7 e 4.8 vengono riportate le principali tolleranze geometriche sulle superfici di tenuta.

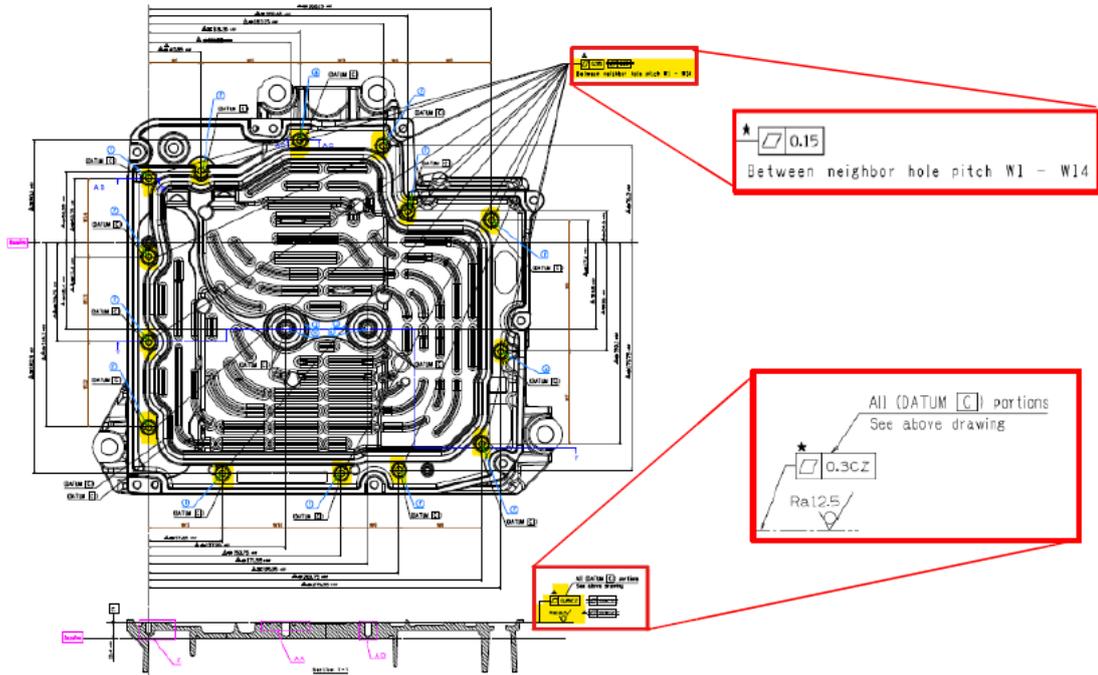


Figura 4.7 – Principali tolleranze geometriche sul lato Water Channel del componente PAN0005.

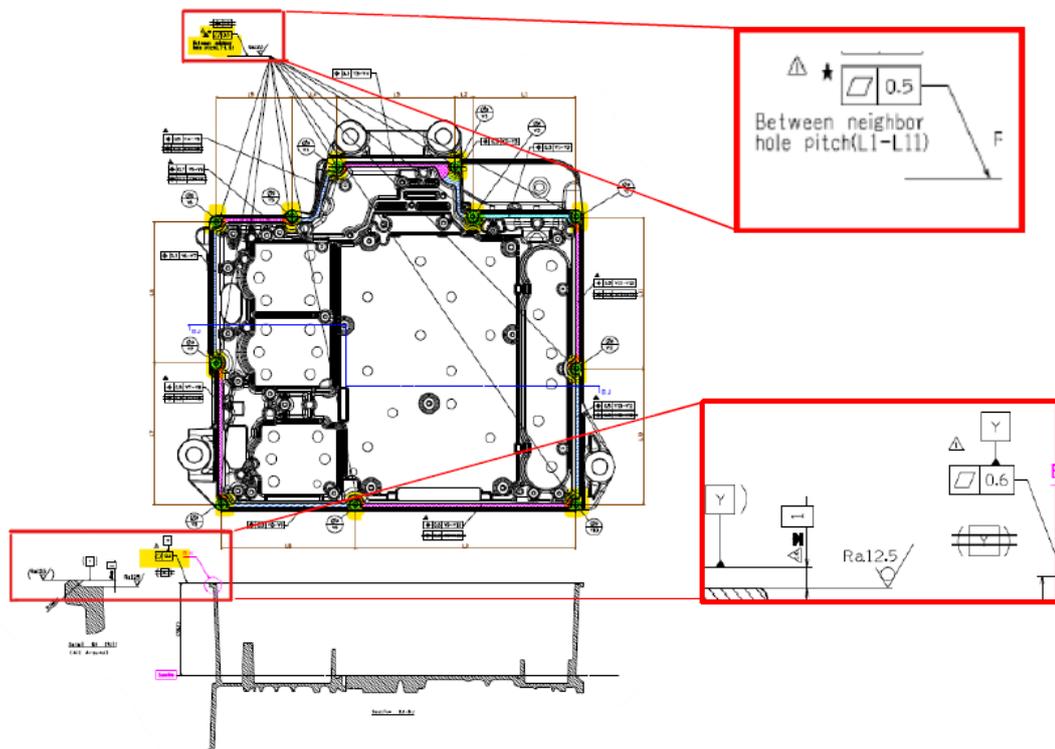


Figura 4.8 – Principali tolleranze geometriche sul lato Electric Room del componente PAN0005.

- PROVE DI TENUTA

Come già evidenziato, la CCU è sede di componenti elettronici e di un fluido per il loro raffreddamento. È fondamentale che non ci sia alcuna perdita di questo liquido. Panasonic ha perciò definito delle prove di tenuta da svolgere su tutti PAN0005 prodotti. In figura 4.9 viene riportata schematicamente l'attrezzatura utilizzata per le prove.

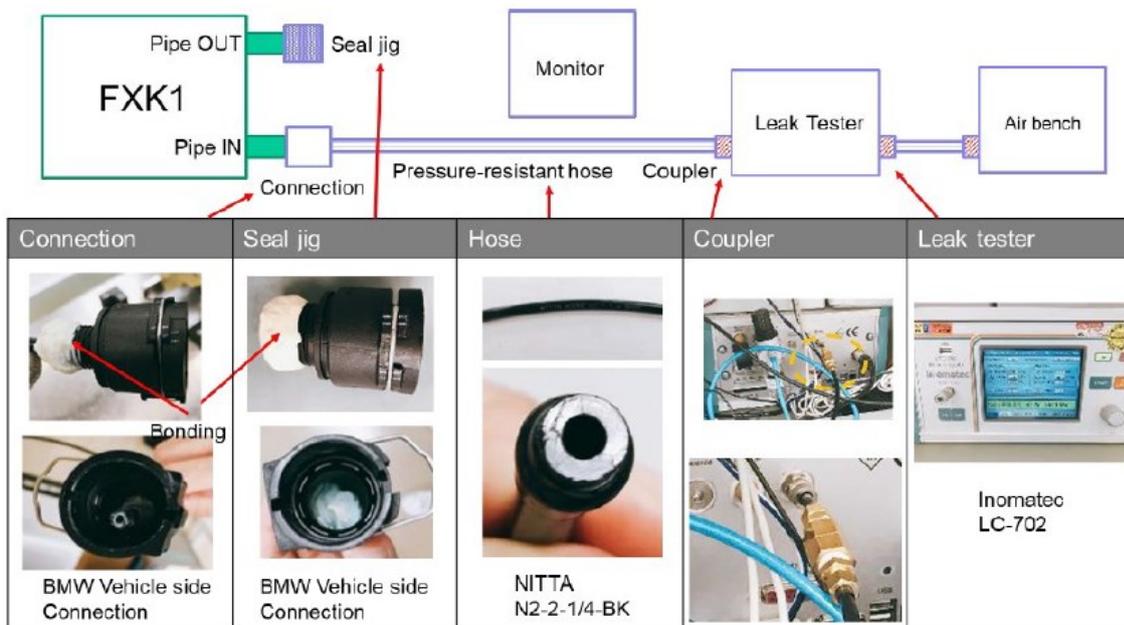
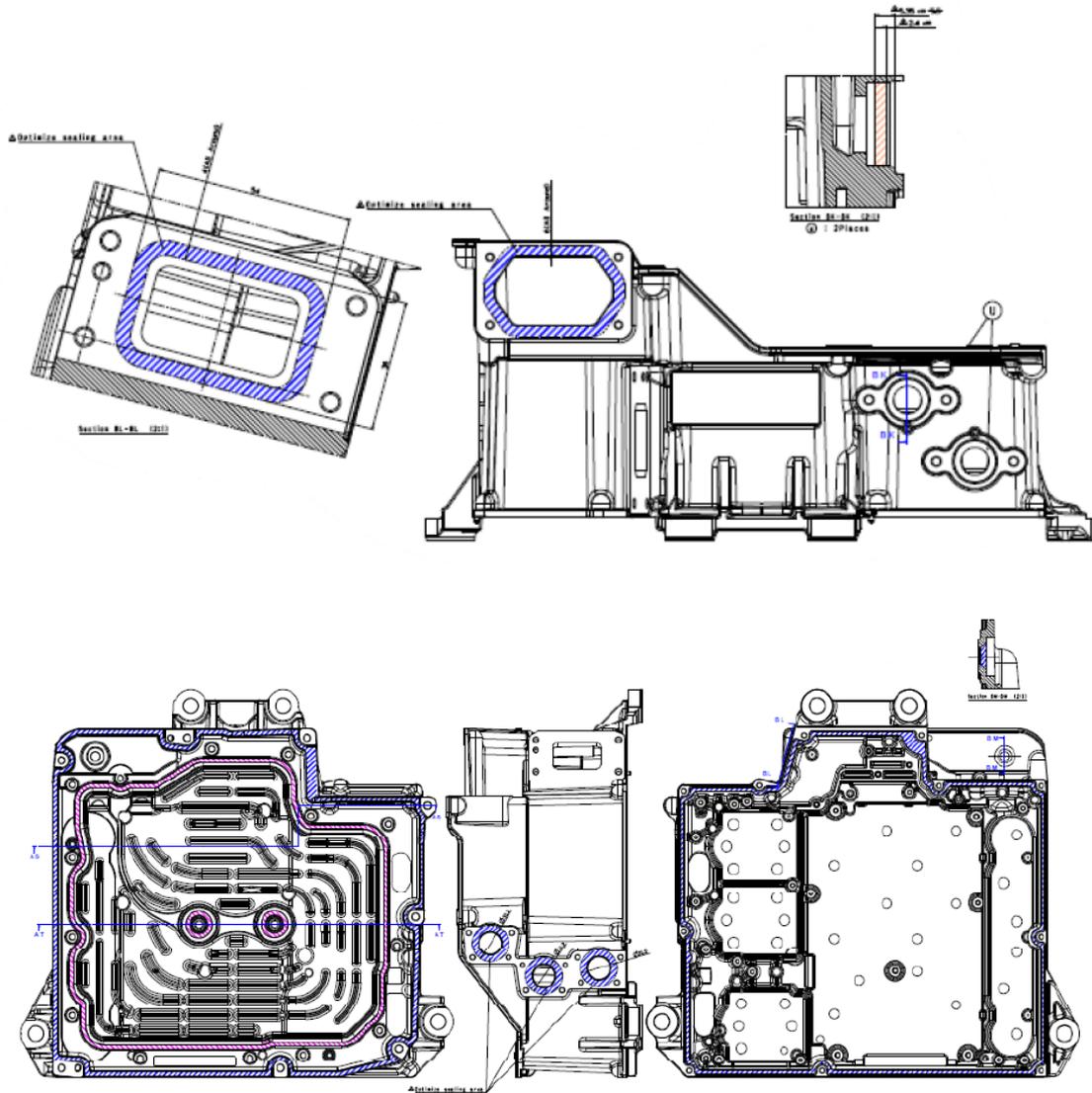


Figura 4.9 – Attrezzatura utilizzata per svolgere le prove di tenuta.

Nello specifico, i getti PAN0005 vengono sottoposti a prove di tenuta a pressione con aria e prove con elio. In figura 4.10 sono visibili le indicazioni di prova definite da Panasonic. In particolare la prova si svolge prima con aria e poi con elio pressurizzato, quest'ultima fase viene eseguita per testare le superfici del getto in cui verranno posizionate le guarnizioni che delimitano il circuito di raffreddamento del lato *Water Channel*. La prova con elio, infatti, garantisce tolleranze più strette nella verifica di possibili perdite, condizione necessaria per evitare perdite dalle guarnizioni del liquido di raffreddamento.



1. Test conditions

Portions where need to be sealed during airtight check and necessary volume for using the criteria.

▲ [Blue hatched] [Red hatched]: Sealing surface

2. Airtight requirement

The case shall meet the criteria mentioned in the table 1.

Table 1

No.	Pressure condition (P inside - P outside)	Criteria Leak rate (Ncc/min) from setting the pressure condition. Pressure change after 60 seconds from setting the pressure condition. Tentative (Pa)	Reference leak rate at 20°C/60%RH at in work volume=10000mm ³
1	Tentative (17kPa)	▲ 5.6Ncc/min Tentative (-2kPa)	70Pa/50sec
2	Tentative (-2kPa)	▲ 60Ncc/min Tentative (-10kPa)	102Pa/50sec

▲ Method of convert to pressure change (ΔP) in case of differential pressure type tester.

$$\Delta P = (V_0/N \cdot ((273+TE) / 273) \cdot (P_0 / (P_0 - \Psi \cdot PV))) \cdot (P_0 / V_w) \cdot (t / 60)$$

[V_0 : Leak rate (Ncc/min), TE : Environmental temperature (°C), P_0 : Atmospheric pressure (Pa abs), Ψ : Humidity (%), PV : Water vapour pressure (Pa atm), V_w : Work volume (cc), t : test time (sec)]

- Pressure condition and criteria are going to be updated.
- ▲ See the flow chart for impregnation process.
- ▲ The conditions for the air leak inspection are as follows.

	Time(s)
Filling	7
Stabilization	20
Measuring	30

1. Test conditions

Portions where need to be sealed during airtight check and necessary volume for using the criteria.

▲ [Blue hatched] [Red hatched]: Sealing surface

2. Airtight requirement

The case shall meet the criteria mentioned in the table 1 or 2.

Table 1

No.	Pressure condition (P inside - P outside)	Criteria Leak rate (Ncc/min) after 60 seconds from setting the pressure condition. Tentative (Pa)	Reference leak rate at 20°C/60%RH at in work volume=28340mm ³
1	Tentative (300kPa)	▲ 0.3Ncc/min Tentative (300kPa)	4.3Pa/50sec

Table 2

No.	Pressure condition (P inside - P outside)	Criteria Helium (PPM) Leak rate by bell jar method from setting the pressure condition.
1	300kPa Abs	0.3Ncc/min

▲ Method of convert to pressure change (ΔP) in case of differential pressure type tester.

$$\Delta P = (V_0/N \cdot ((273+TE) / 273) \cdot (P_0 / (P_0 - \Psi \cdot PV))) \cdot (P_0 / V_w) \cdot (t / 60)$$

[V_0 : Leak rate (Ncc/min), TE : Environmental temperature (°C), P_0 : Atmospheric pressure (Pa abs), Ψ : Humidity (%), PV : Water vapour pressure (Pa atm), V_w : Work volume (cc), t : test time (sec)]

- Pressure condition and criteria are going to be updated.
- ▲ See the flow chart for impregnation process.
- ▲ The conditions for the air leak inspection are as follows.

	Time(s)
Filling	35
Stabilization	45
Measuring	30

Figura 4.10 – Superfici testate ed indicazioni fornite da Panasonic Corporation per svolgere le prove di tenuta.

Le prove di tenuta sui getti vengono eseguite da New Olef Srl dopo che i PAN0005 sono stati lavorati alle macchine utensili, lavati e sottoposti al processo di impregnazione. Panasonic richiede, infatti, quest'ultimo passaggio nel processo produttivo per diminuire il rischio di perdita dalle guarnizioni.

Il processo di impregnazione prevede che una resina metacrilica in forma liquida venga pressurizzata e forzata all'interno di eventuali porosità affioranti sulla superficie dei getti, questa viene poi fatta solidificare mediante reticolazione. Nello specifico, le fasi dell'impregnazione sono:

1. *Dry Vacuum* (vuoto a secco), si usa il vuoto per togliere dalle porosità eventuale sporco e residui presenti.
2. *Wet Vacuum* (vuoto umido), viene creato il vuoto per riempire le porosità con la resina liquida.
3. *Pressurization* (pressurizzazione), tramite l'impiego di alta pressione viene garantito un miglior riempimento delle porosità con la resina.
4. *Dripping* (sgocciolatura), viene rimossa la resina in eccesso.
5. *Cold Washing* (lavaggio a freddo), i getti vengono lavati con acqua fredda.
6. *Curing* (polimerizzazione), la resina è fatta solidificare mediante polimerizzazione/reticolazione.
7. *Drying* (essiccazione), la resina viene sottoposta ad essiccazione.

L'impregnazione può sigillare le porosità passanti e quelle cieche. Una rappresentazione di diverse tipologie di porosità viene mostrata in figura 4.11.

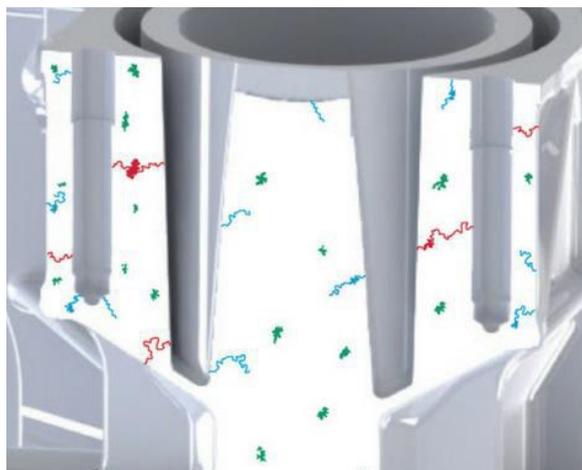


Figura 4.11 – Rappresentazione di tre diverse tipologie di porosità, passanti (in rosso), cieche (in blu) e chiuse (in verde).

In figura 4.11 si possono distinguere:

- *Porosità passanti* (evidenziate in rosso). Sono porosità che attraversano completamente uno spessore del getto. Questo tipo di difetto può essere sigillato in maniera efficace con l'impregnazione.
- *Porosità cieche* (evidenziate in blu). Sono dei vuoti affioranti su una sola superficie, anche queste porosità possono essere riempite di impregnante.
- *Porosità chiuse* (evidenziate in verde). Sono porosità interne, se non vengono esposte dopo lavorazione meccanica non creano particolari problemi per la tenuta.

L'impregnazione con la resina presenta comunque dei limiti, i vuoti che superano una dimensione critica vengono sigillati solo parzialmente, compromettendo così la capacità di tenuta delle guarnizioni.

- CRITERIO PK SULLE POROSITÀ

Per ridurre le possibilità di perdita del liquido refrigerante e, dunque, di un eventuale contatto di questo con i componenti elettronici, Panasonic ha definito dei limiti di accettabilità sulle porosità presenti in quattro aree del getto PAN0005. È possibile definire tali regioni come *zone critiche*. Esse sono superfici che vengono lavorate meccanicamente e in cui sono richiesti stringenti requisiti di tenuta alle guarnizioni dei connettori che vengono lì collegati.

In figura 4.12 è possibile osservare le quattro zone critiche.

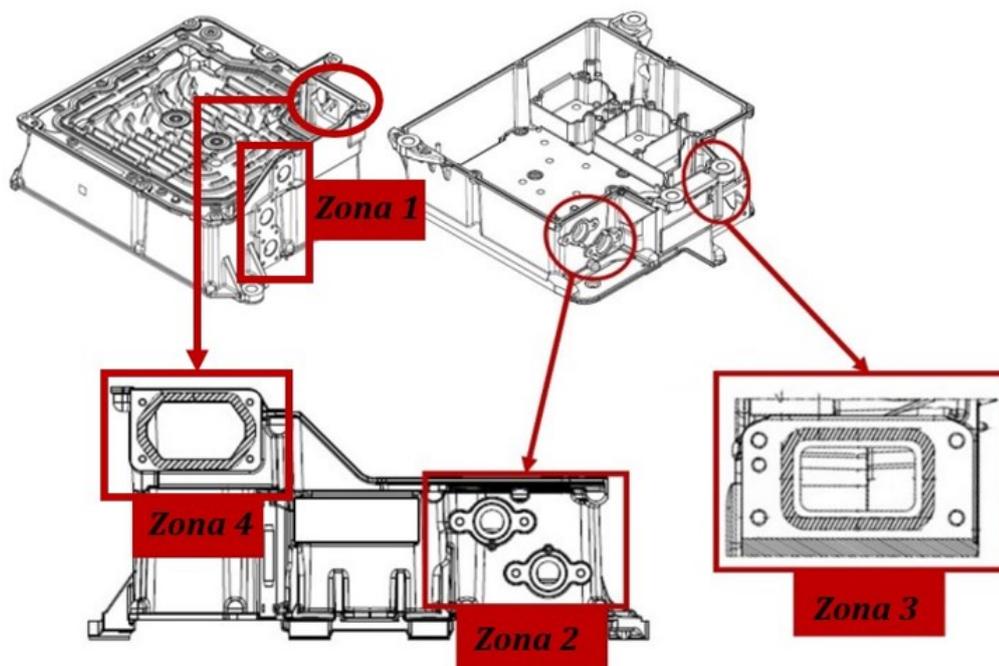


Figura 4.12 – Zone critiche del getto PAN0005.

Nelle superfici lavorate meccanicamente in queste quattro zone del getto vige il criterio PK per la verifica della conformità sulla base delle porosità presenti. La superficie lavorata in zona 3 è, tuttavia, la più problematica dal punto di vista del rispetto dei limiti sulle porosità ammesse. Come visibile in figura 4.13, la zona 3 è sede di alloggiamento di un particolare connettore che serve al trasporto della miscela di liquido refrigerante.

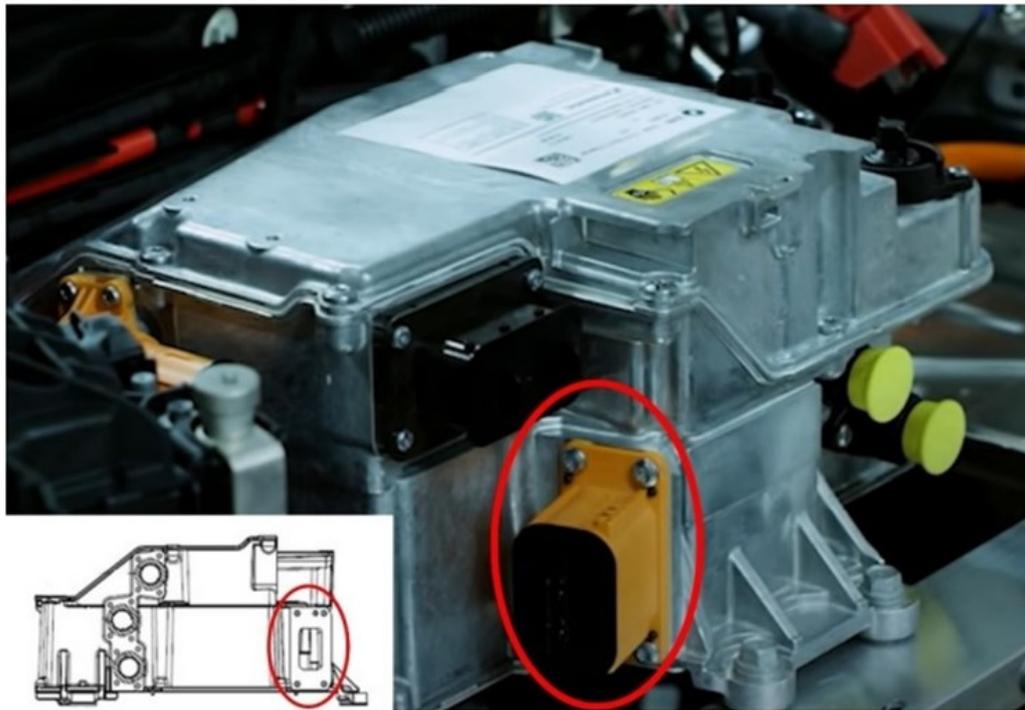
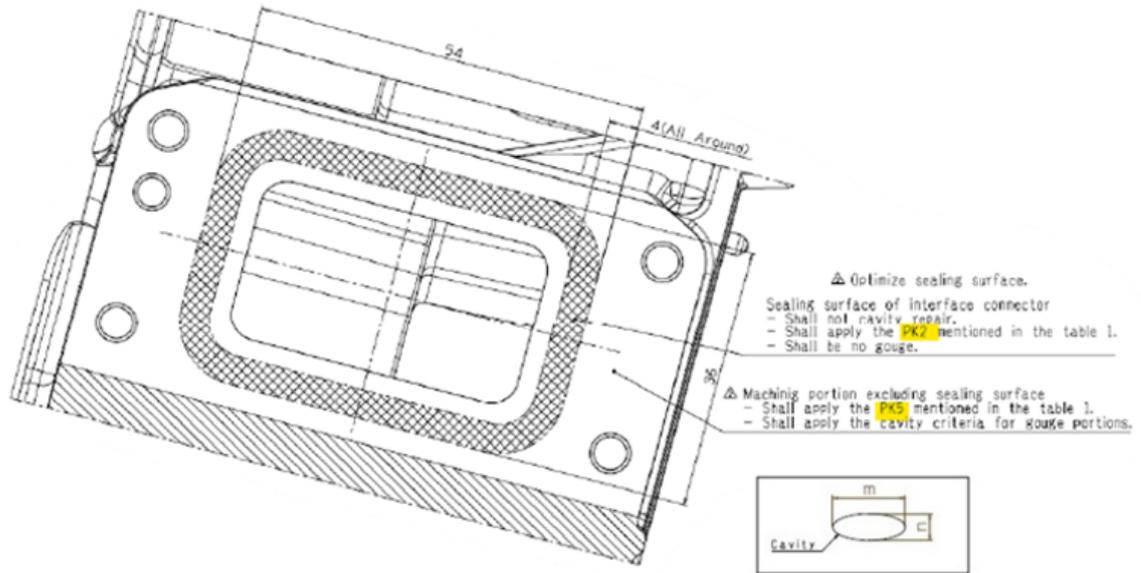


Figura 4.13 – Connettore della zona 3 visibile su una CCU assemblata.

L'eccessiva presenza di vuoti sulla superficie lavorata della zona 3 è una delle maggiori cause di scarto del componente PAN0005. Si è così deciso di approfondire la soglia di accettabilità per le porosità in zona 3. Il criterio per la valutazione delle porosità è mostrato in figura 4.14 ed analizzato di seguito.



Properties	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5
Permissible expansion of a pore(m±n)	m≤0.4mm	m≤0.4mm	m≤0.7mm	m≤1.0mm	m≤2.0mm
Min.permissible edge distance between pores	8mm	8mm	15mm	30mm	30mm
Minimal pore size to be taken into account(m±n)	m>0.2mm	m>0.2mm	m>0.4mm	m>0.6mm	m>0.8mm
Permissible exceptions within distances of at least 80mm per working surface	None	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 1mm A single pore with a max. expansion of 0.6mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 1.5mm A single pore with a max. expansion of 1mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 2mm A single pore with a max. expansion of 1.5mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 2mm A single pore with a max. expansion of 3mm is permissible
Repetition of this exception is not permissible within the distance of a bolt hole.					
Application recommendation	Seal seat for valves	Grooves for rectangular rings that dynamically seal end surface Grooves for lip seal rings, end surface and base Control piston holes Sliding surface for o-rings and lip seal rings Contact surface for O-rings and seal rings	Grooves for rectangular rings that dynamically seal groove base Machined surfaces near sealing points Seal surface for paper seals	Flange surface Roller bearing seat and contact surfaces	Screw pass-through holes

Figura 4.14 – Criterio PK vigente nella zona 3 del getto PAN0005.

Nello specifico, nella regione evidenziata vige il criterio di accettabilità PK2, nel resto della superficie si ha PK5.

Il criterio PK2 stabilisce le seguenti condizioni:

- Dimensione massima dei pori inferiore a 0,4 mm.
- Si accetta un'eccezione per 1 solo poro avente comunque dimensione massima inferiore a 0,6 mm.
- È consentito un accumulo di massimo 3 pori se le distanze da bordo a bordo sono superiori a 1 mm.
- I pori con dimensione massima inferiore a 0,2 mm non si considerano.

Il limite PK5 invece definisce:

- Dimensione massima dei pori inferiore a 2 mm.

- Si accetta un'eccezione per 1 solo poro avente comunque dimensione massima inferiore a 3 mm.
- È consentito un accumulo di massimo 3 pori se le distanze da bordo a bordo sono superiori a 2 mm.
- Pori con dimensione massima inferiore a 0,8 mm non sono considerati.

È chiaro, dunque, che le maggiori difficoltà sono nel rispetto del più stringente criterio PK2. Esso si traduce così in frequenti scarti di prodotto per non conformità. Verrà in seguito valutata l'adeguatezza del criterio al getto PAN0005.

4.3 La lega EN AC 43500 (AlSi₁₀MnMg)

Il componente PAN0005 è realizzato in lega primaria EN AC 43500, anche definita AlSi₁₀MnMg e commercialmente nota come *Silafont 36*. Essa presenta come principale elemento in lega il silicio, come è tipico per le leghe da fonderia. Gli altri elementi presenti, ossia quelli presentati in tabella 4.2, fanno sì che questa lega si presti bene alla produzione di componenti ottenuti per pressocolata per i quali i requisiti di qualità e caratteristiche fisico-meccaniche sono elevati. L'abbondante presenza del silicio, tra 9,0 e 11,5 wt.%, garantisce una buona fluidità del materiale. La fluidità è una proprietà necessaria quando la cavità dello stampo da riempire presenta una geometria complessa, condizione comune per la componentistica automotive. Poi, essendo la lega EN AC 43500 una lega primaria con un ridotto quantitativo di ferro, si ha una limitata presenza nella microstruttura di fasi infragilenti ricche in ferro. Data la criticità dei componenti automotive, è pratica diffusa nel settore l'utilizzo di leghe primarie a basso contenuto di ferro proprio per ridurre la presenza dei precipitati ferrosi che potrebbero compromettere la duttilità del materiale. Infatti, le leghe secondarie ottenute per rifusione dei rottami possono avere una presenza di ferro maggiore dello 0,80 wt.%, quantità eccessiva per componenti destinati al settore automotive [21]. Il ferro, però, facilita l'operazione di estrazione del getto dallo stampo. Il manganese, avendo anch'esso la stessa proprietà, viene aggiunto nella lega fino allo 0,80 wt.% così da compensare la scarsa presenza del ferro [22]. Poi, un ridotto quantitativo di ferro e di rame promuove proprietà quali resistenza alla corrosione e all'usura, lavorabilità e capacità di tenuta in pressione.

LEGA		[wt.%]												
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	impurezze singole	impurezze globali
AlSi10MnMg	min	9,5			0,50	0,10								
	max	11,5	0,15	0,03	0,80	0,50	-	-	0,10	-	-	0,15	SR	0,03

Tabella 4.2 – Composizione chimica della lega AlSi10MnMg (EN AB 43500) da normativa UNI EN 1706[23].

In tabella 4.3 vengono presentate le proprietà meccaniche della lega AlSi₁₀MnMg riportate dal catalogo Raffmetal a seconda della quantità di magnesio contenuto nel materiale. In tabella 4.3 è poi possibile osservare come variano le proprietà in funzione del trattamento termico a cui viene sottoposta la lega. Ad esempio, il trattamento T4, ossia solubilizzazione e invecchiamento naturale, è quello in grado di fornire al materiale i massimi valori di allungamento.

Simbolo	R Carico unitario di rottura		S Carico al limite di snervamento		A Allungamento		HB Durezza Brinell	
	EN 1706	AlSi10MnMg	EN 1706	AlSi10MnMg	EN 1706	AlSi10MnMg	EN 1706	AlSi10MnMg
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[HBW]	[HB]
F	250	250 - 290	120	120 - 150	5	5 - 10	65	75 - 100
T5	270	260 - 330	150	150 - 240	4	3 - 10	80	90 - 115
T6		290 - 350		200 - 280		6 - 12		100 - 115
T4		210 - 260		95 - 140		15 - 22		60 - 75
T7	200	200 - 240	120	120 - 170	12	15 - 20	60	60 - 75

Tabella 4.3 – Proprietà meccaniche della lega AlSi10MnMg (EN AB 43500) a seconda del contenuto di Mg, da normativa UNI EN 1706[23].

La lega AlSi₁₀MnMg presenta un buon compromesso tra resistenza meccanica e duttilità, questo la rende un materiale adatto ad impieghi strutturali e di sicurezza. La microstruttura della lega EN AB 43500 è quella tipica delle leghe Al-Si destinate ai processi di fonderia. Si tratta di una lega ipoeutettica, in quanto ha un tenore di silicio inferiore al 12 wt.%, che presenta una microstruttura formata da matrice di α -Al di forma dendritica e struttura eutettica Al-Si. La morfologia complessiva della microstruttura subisce importanti variazioni a seconda delle velocità di raffreddamento che caratterizzano la fase di solidificazione. Tipicamente, un componente ottenuto tramite processi di fonderia presenta una microstruttura molto più fine nella zona superficiale dove c'è uno smaltimento termico più elevato rispetto alle zone interne. Ciò si verifica perché in queste regioni, grazie appunto alle più alte velocità di raffreddamento dovute al contatto con lo stampo, i meccanismi di nucleazione superano i meccanismi di accrescimento. Si innescano così molteplici punti di nucleazione nel materiale in solidificazione, favorendo la formazione di una microstruttura fine [21].

Data la scarsa solubilità del ferro nell'alluminio solido, inferiore allo 0,05%, le fasi intermetalliche secondarie più comuni nella microstruttura di questa lega sono β -Al₅FeSi e α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ [24]. Nello specifico, la presenza di manganese in lega e le elevate velocità di raffreddamento promuovono la formazione della fase α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ a discapito della fase β -Al₅FeSi, stabile in condizioni di equilibrio, portando ad un significativo miglioramento delle proprietà meccaniche. Le particelle β -Al₅FeSi, visibili in figura 4.15, si presentano in forma di lamelle sottili, mentre le particelle α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ possono avere una morfologia poliedrica o a scrittura cinese. Un esempio di quest'ultima forma è in figura 4.16.

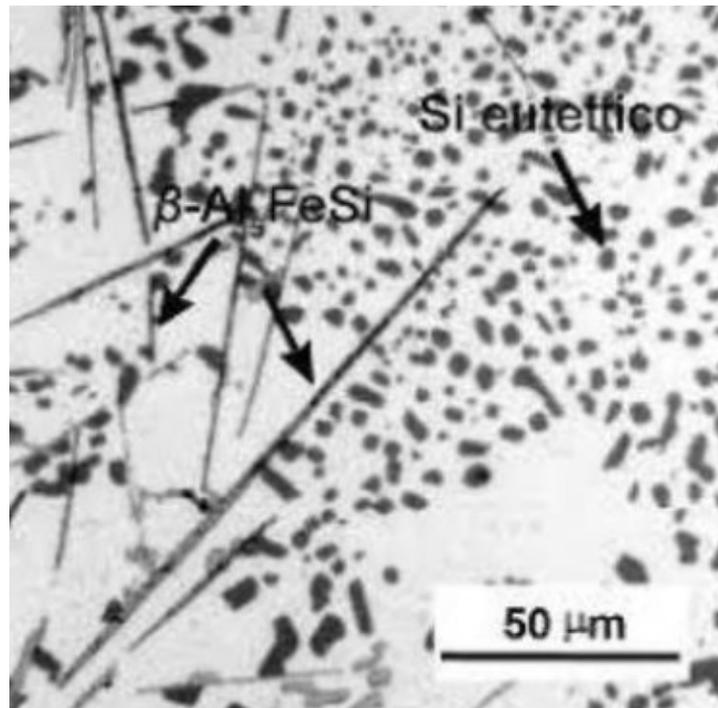


Figura 4.15 – Esempio di fase $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ [25].

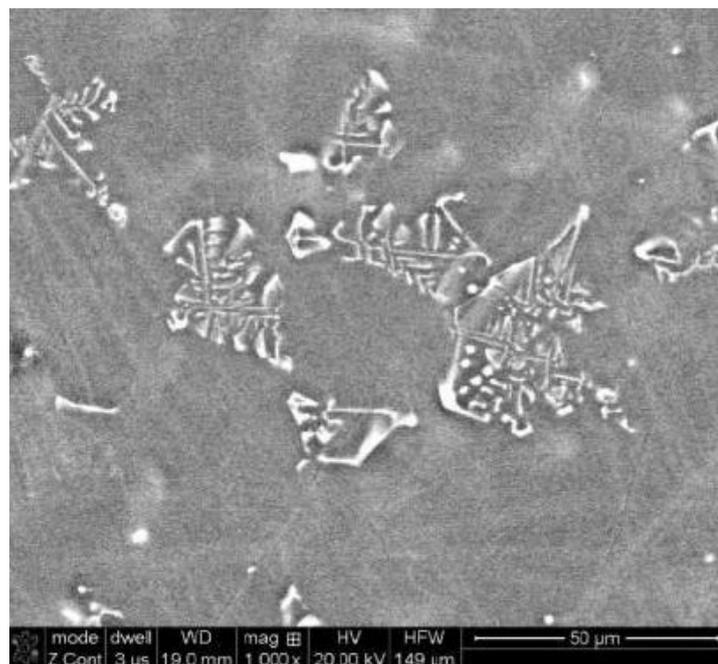


Figura 4.16 – Esempio di fase $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ con struttura Chinese script [25].

Un effetto analogo a quello del manganese lo si può avere con il cromo, in quanto i due elementi possono sostituirsi a vicenda nel reticolo cristallino della particella $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ [26]. L'aggiunta di manganese e cromo può però portare alla formazione di composti primari detti *sludge phases*, mostrati in figura 4.17.

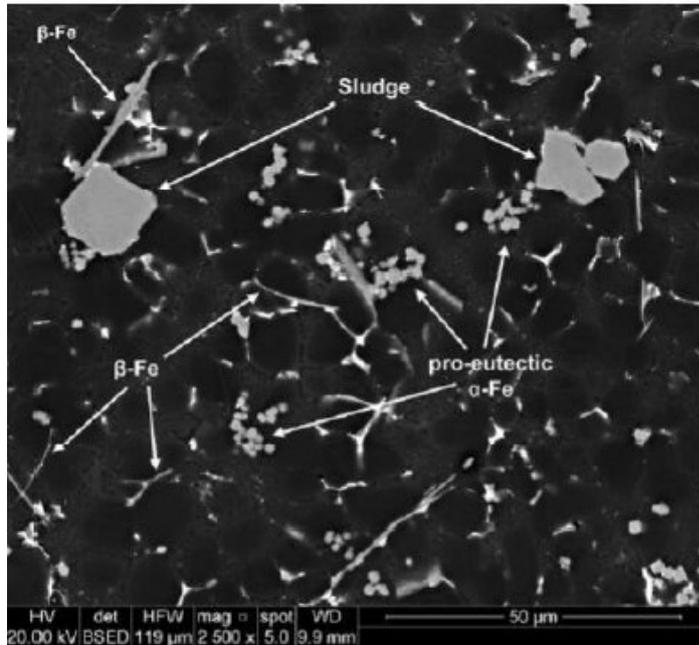


Figura 4.17 – Esempio di particelle di *sludge* [25].

La fase *sludge* è critica in quanto può generare diversi problemi. Ad esempio, formandosi quando la lega è ancora allo stato liquido ed avendo un alto peso specifico, può accumularsi sul fondo del forno di mantenimento. Questo è un fenomeno particolarmente sentito nel processo di pressocolata, dove per ridurre i tempi dovuti al raffreddamento dei getti e per preservare le attrezzature, si tende a mantenere la lega liquida a basse temperature, 670-710°C. La *sludge phase*, inoltre, può compromettere la fluidità della lega e ridurne la sua capacità di riempire in maniera efficiente le zone più sottili della cavità dello stampo.

La tendenza di una lega a generare queste fasi primarie ricche in ferro, per sola funzione della sua composizione chimica, può essere stimata con il parametro *Sludge Factor* (SF).

$$SF = (1 \times \text{wt.\%Fe}) + (2 \times \text{wt.\%Mn}) + (3 \times \text{wt.\%Cr})$$

Ecco, dunque, che l'aggiunta di manganese o cromo col fine di eliminare la presenza dei composti $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ può avere come effetto indesiderato l'aumento delle dimensioni e della frazione delle *sludge phases*.

Viene di seguito riportata una breve trattazione degli effetti sulle proprietà meccaniche dei principali elementi presenti in lega.

- *Manganese*. Come precedentemente evidenziato, il manganese mitiga gli effetti negativi del ferro sulle proprietà meccaniche. Ciò si spiega perché il manganese promuove la formazione dei precipitati ferrosi di forma più compatta $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ in sostituzione di quelli lamellari

β -Al₅FeSi, portando effetti benefici sulla duttilità del materiale [26]. Fasi intermetalliche sottili e dure fungono da punti di concentrazione per le tensioni quando il componente viene sottoposto a sforzi. Questo favorisce l'insorgere di cricche che portano a rotture anticipate, limitando così la capacità di deformarsi del materiale.

- *Silicio*. All'aumentare della quantità di silicio si ha una formazione maggiore della struttura eutettica. Le lamelle di silicio sono più dure e fragili rispetto alle dendriti di alluminio. Con più silicio, dunque, si ha una lega più resistente meccanicamente ma con una diminuzione della duttilità [27].

- *Magnesio*. Questo elemento può produrre variazioni sulle proprietà meccaniche del materiale non trascurabili, in particolare se la lega viene sottoposta a trattamento termico, dopo il quale si formano i precipitati rafforzanti Mg₂Si.

Variando la quantità di questo elemento, anche solo all'interno dei limiti massimo e minimo previsti da normativa per la lega EN AB 43500, si può ottenere un materiale adatto a diversi impieghi in ambito automotive, come riportato nei seguenti esempi:

- Mg wt.% 0,13 – 0,19. Quantità adatta a parti critiche in caso di urto. Generalmente sono componenti che vengono trattati termicamente per evitare invecchiamento naturale a lungo termine e per massimizzarne la duttilità. Un'applicazione tipica è per parti di giunti flangiati.
- Mg wt.% 0,18 – 0,24. Applicazione tipica per componenti automotive trattati termicamente alla quale sono richieste buone proprietà a fatica e di resistenza agli urti. Leghe con questa composizione vengono utilizzate per produrre, ad esempio, supporti per blocchi motore.
- Mg wt.% 0,24 – 0,35. Per componenti con requisiti di alto carico di snervamento e capacità di resistere agli urti. Come componentistica per lo sterzo degli autoveicoli.
- Mg wt.% 0,24 – 0,35. Quantità adatta alla produzione di componenti strutturali di alto livello trattati termicamente [22].

- *Ferro*. All'aumentare del quantitativo di ferro si manifesta un crescendo degli effetti deleteri che può avere sulla duttilità della lega. Si ha, infatti, una presenza maggiore delle particelle infragilenti β -Al₅FeSi, le quali si presentano anche in forma più grossolana poiché aggiungendo ferro alla lega si alza la temperatura di formazione di queste fasi. Le fasi β -Al₅FeSi più grossolane possono ostruire parzialmente i canali di riempimento, aumentando così la quantità di vuoti nel getto.

Il ferro è comunque un elemento in grado di ridurre la presenza di metallizzazioni e di cricche a caldo.

CAPITOLO 5

PROCEDURA SPERIMENTALE

5.1 Le attrezzature

I getti PAN0005, oggetto di studio in questo elaborato, sono stati prodotti presso lo stabilimento di Fisep Srl a Brendola (VI). La macchina utilizzata è una pressa a camera fredda del tipo IPR1450SC prodotta da ITALPRESSE GAUSS Srl. Una rappresentazione della pressa è visibile in figura 5.1. Il codice 1450 si riferisce alle tonnellate che la macchina è in grado di esercitare come forza di chiusura. Questa forza viene garantita dal sistema a ginocchiera che blocca le due semi-metà dello stampo.



Figura 5.1 – Immagine della pressa IPR1450SC prodotta da ITALPRESSE GAUSS Srl.

In tabella 5.1 vengono riportate le specifiche tecniche principali della macchina.

Specifiche	Valore	u.m.
Dimensioni globali (L x W x H)	11,3 x 4,1 x 3,86	m
Massa della macchina	105	ton
Massima forza di chiusura	14219	kN
Massima forza di iniezione	1226	kN
Massima forza di estrazione	579	kN
Corsa di iniezione	850	mm
Corsa di estrazione	260	mm
Corsa del piano mobile	1200	mm
Distanza delle colonne	1150 x 1150	mm
Minima altezza dello stampo	400	mm
Massima altezza dello stampo	1300	mm
Dimensioni piastra supporto stampi	1780 x 1780	mm
Dimensioni minime dello stampo	860 x 860 o Ø800	mm
Massima area proiettabile (per una pressione di 400 kg/cm ²)	3625	cm ²
Massima massa del getto	21,8	kg

Tabella 5.1 – Specifiche tecniche principali della pressa IPR1450SC prodotta da ITALPRESSE GAUSS Srl.

La pressa appartiene ad un'isola di pressocolata completamente automatizzata. L'isola è comprensiva di un forno di mantenimento e di un meccanismo di alimentazione della camera d'iniezione dedicati, un sistema per la marcatura e una pressa per la tranciatura dei getti. Sul PAN0005 viene impresso un codice QR identificativo del singolo pezzo tramite un sistema laser. In questo modo è possibile tenere traccia della data e dell'ora di produzione di ogni getto, e dunque anche risalire ai relativi parametri di processo misurati e restituiti dalla pressa.

In figura 5.2 è visibile l'isola di pressocolata di Fisep Srl utilizzata per la produzione dei campioni. Nella figura sono identificati i principali macchinari che compongono l'isola, questi sono:

- 1- Forno di mantenimento.
- 2- Sistema di movimentazione del cucchiaio dosatore.
- 3- Pressa.
- 4- Sistema di movimentazione della testa per la lubrificazione.
- 5- Braccio robotico automatizzato.
- 6- Sistema di marcatura laser.
- 7- Pressa per la tranciatura.

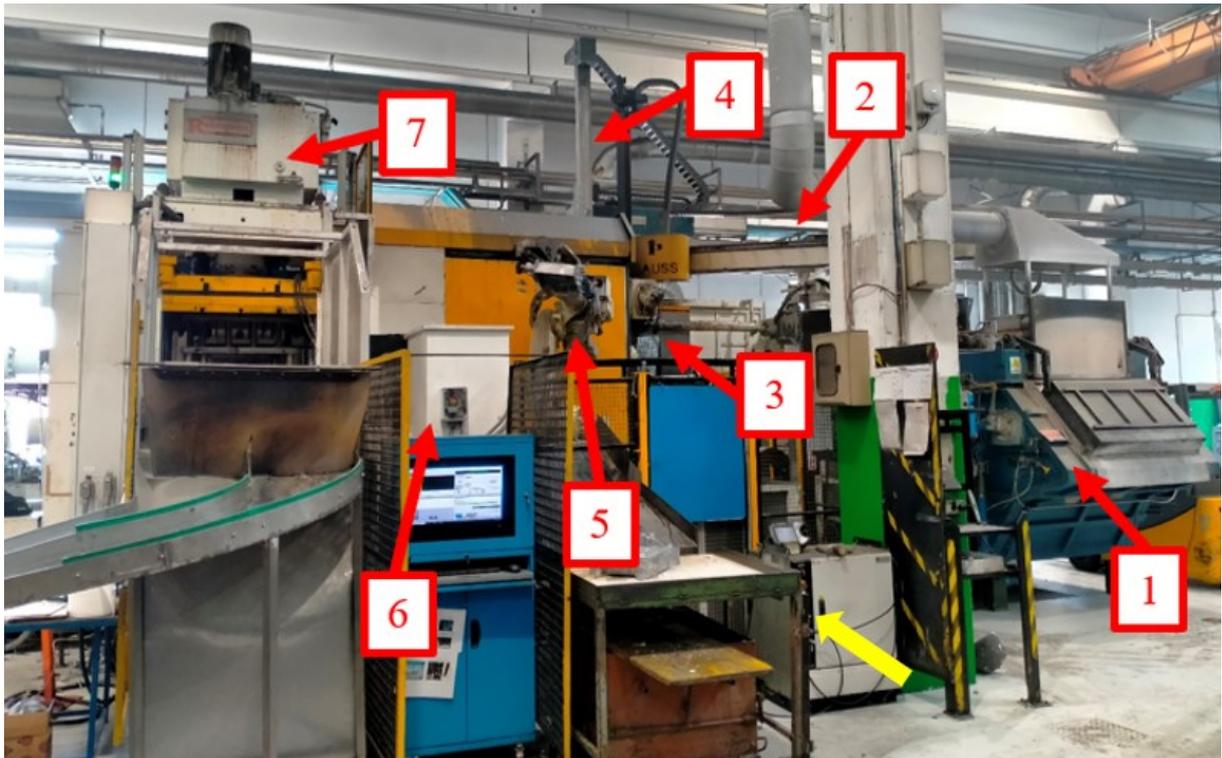


Figura 5.2 – Isola di pressocolata di Fisep Srl.

In figura 5.2 è visibile, oltre allo scivolo di scarico della pressa per la tranciatura, un altro scivolo evidenziato con un indicatore giallo. Questo scivolo è dedicato ai pezzi definiti come scarto dal sistema di controllo della pressa. La macchina, infatti, è in grado di scartare in modo automatico dei getti in determinate condizioni. Ad esempio, quando viene ripresa la produzione dopo un fermo vengono scartati, in numero variabile a seconda della durata del fermo, i primi pezzi prodotti. Questo avviene per permettere alla macchina di raggiungere il regime termico e le altre condizioni di normale regime di processo.

La pressa è dotata di un sistema di monitoraggio interno per le molteplici variabili di processo. Questo sistema, appositamente sviluppato per le presse di ITALPRESSE GAUSS Srl, è stato chiamato HMe. L'interfaccia utente del quadro di comando della macchina appare come in figura 5.3. Il sistema HMe consente inoltre di valutare gli andamenti e l'efficienza del processo mediante metodi statistici SPC (*Statistical Process Control*).



Figura 5.3 – Interfaccia HMe di ITALPRESSE GAUSS Srl.

In tabella 5.2 sono esposti in dettaglio i parametri di processo che vengono misurati dalla pressa per ogni getto prodotto. Questi dati sono forniti da un sistema di sensori in dotazione standard per questo modello di pressa.

CODICE	DESCRIZIONE
C1	Corsa di prima fase
T1	Tempo di prima fase
V1	Velocità media di prima fase
GP	Massima pressione dell'olio in prima fase
C2	Corsa di seconda fase
T2	Tempo di seconda fase
V2	Velocità media di seconda fase
VM	Velocità massima di seconda fase
CC	Corsa di intensificazione (terza fase)
T3	Tempo di intensificazione (terza fase)
TD	Tempo di ritardo tra seconda e terza fase
PM	Massima pressione dell'olio in terza fase
PF	Pressione misurata dopo 2 s dall'inizio della seconda fase
VA	Velocità massima all'attacco di colata
PR	Pressione di riempimento alla velocità massima di seconda fase
PS	Pressione misurata sul metallo
SM	Spessore del biscotto
T3S	Tempo tra iniezione e terza fase

Tabella 5.2 – Parametri di processo misurati dalla pressa per ogni ciclo.

Alcuni dei dati presenti in tabella 5.2 verranno presi in considerazione per le analisi successive col fine di ricercare eventuali correlazioni tra i parametri di processo e la qualità dei getti.

In ambito del progetto SMARTI 4.0 è in atto il piano di digitalizzazione dell'isola di pressocolata. Il piano prevede l'aggiunta di un elevato numero di sensori che forniranno i segnali necessari al modello predittivo per poter valutare la presenza dei difetti nei getti. Viene di seguito fornita una breve descrizione della procedura di implementazione di questi sensori, dei quali alcuni sono stati installati nello stampo, mentre altri nella pressa.

Per monitorare l'azione del pistone della pressa nella fase di riempimento sono stati installati i seguenti sensori di Electronics GmbH:

- 1 sensore di posizione del pistone. Il sensore rileva gli avanzamenti, nel tempo, del pistone all'interno della camera di iniezione. Derivando rispetto al tempo il segnale di questo sensore è possibile ottenere la velocità e l'accelerazione del pistone. Con il sensore di posizione è possibile verificare l'effettivo raggiungimento dei valori di corsa e velocità impostati per le fasi I, II e III del riempimento dello stampo.
- 1 sensore per il monitoraggio della pressione sugli accumulatori della pressa per la fase III. È un sensore in grado di rilevare la pressione che il pistone esercita sulla lega all'interno della camera di iniezione. Il sensore permette di misurare la pressione di intensificazione esercitata dal pistone in fase III.
- 1 sensore per il monitoraggio della contropressione nella camera di iniezione. Questo sensore acquisisce informazioni sulla pressione che si oppone all'avanzamento del pistone, è così possibile monitorare eventuali anomalie che caratterizzano questa fase. Ad esempio un moto non regolare nell'avanzamento del pistone, fenomeno definito come grippaggio.

Questi tre sensori acquisiscono segnali con una frequenza di 1000 Hz per i primi 10 secondi della fase di iniezione contati a partire dal momento in cui inizia ad avanzare il pistone.

Sono poi stati inseriti 7 termocoppie e 3 sensori di pressione nella cavità dello stampo per PAN0005 già esistente. Delle rappresentazioni dei sensori di pressione e di temperatura sono mostrate in figura 5.4.

I sensori di pressione sono usati per la misura della pressione che si genera tra la lega e la superficie dello stampo. Le misurazioni effettuate possono dare informazioni utili relative alle fasi di riempimento dello stampo e di solidificazione del getto, specialmente se vengono implementati molteplici sensori nella cavità dello stampo. Ad esempio, è possibile valutare delle anomalie in fase III, come dei cali della pressione di intensificazione esercitata dal pistone. Tipicamente, questi sensori sono in grado di rilevare pressioni fino a 2000 bar.

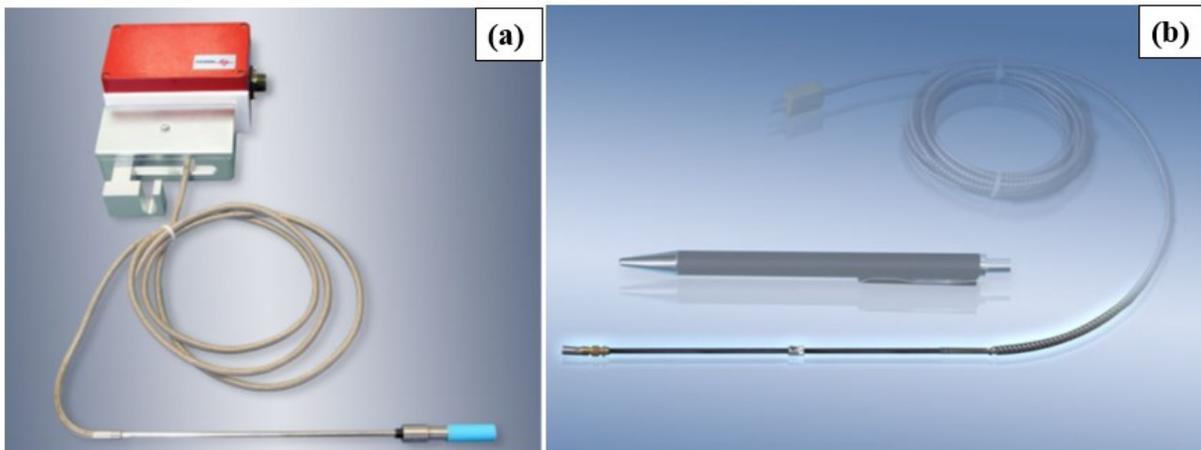


Figura 5.4 – Sensore di pressione (a) e sensore di temperatura (b) implementati nello stampo, forniti da Electronics GmbH.

La temperatura dello stampo e del fuso sono sicuramente tra i parametri più importanti da dover monitorare. I sensori come la termocoppia in figura 5.4 consentono di monitorare lo sviluppo della temperatura interna alla cavità durante tutta la fase di riempimento e anche durante la fase di solidificazione [10].

Anche questi sensori, termocoppie e sensori di pressione, forniscono delle curve relative alle misurazioni effettuate con una frequenza di campionamento di 1000 Hz per i primi 10 secondi del ciclo della pressa.

Il posizionamento delle due tipologie di sensori nello stampo è una procedura complessa e delicata. Occorre, infatti, individuare le zone dello stampo più sensibili ai parametri processo, ossia quelle regioni della cavità in cui a fronte di una variazione dei parametri di processo si ha un cambiamento apprezzabile della pressione e della temperatura della lega, nonché della presenza dei difetti riscontrabili.

Lo studio svolto tramite il software MAGMA ha permesso quindi di individuare quelle zone dello stampo più adatte all'alloggiamento dei sensori. In questa fase è stata coinvolta l'azienda che ha fornito lo stampo. Questo perché nella scelta della posizione dei singoli sensori si deve tenere conto anche della presenza degli estrattori e dei circuiti per la termoregolazione, i quali potrebbero impedire l'esecuzione delle lavorazioni meccaniche sullo stampo necessarie all'installazione dei sensori.

Per valutare sul software le correlazioni tra variabili di processo, segnali dei sensori e qualità, è stata svolta una vera e propria campionatura virtuale in cui i parametri di processo sono stati fatti variare sulla base di un apposito DoE [28].

I parametri di processi scelti per il DoE sono:

- Curva di iniezione.
- Pressione di intensificazione.
- Temperatura iniziale del fuso.
- Tempo di lubrificazione.

Queste variabili, nel complesso, hanno portato alla realizzazione di più di 300 designs definiti a partire dai valori dei parametri di processo della produzione reale. È stato così possibile posizionare termocoppie e sensori di pressione come rappresentato virtualmente in figura 5.5. Nello specifico, quelli evidenziati in arancione sono le termocoppie, quelli in viola sono i sensori di pressione, mentre quelli barrati sono degli esempi di sensori valutati in sede di progetto e risultanti essere in una posizione inadeguata. Successivamente, sono state eseguite le operazioni di inserimento dei sensori nello stampo. In prima fase è stato eseguito un approfondito studio sul modello virtuale dello stampo per progettare le sedi di alloggiamento dei sensori ed i canali per i cavi. In figura 5.6 viene riportata, come esempio esplicativo, una sezione del modello digitale tridimensionale dello stampo. Nella figura sono visibili alcuni dei canali appositamente progettati per il passaggio dei cavi.

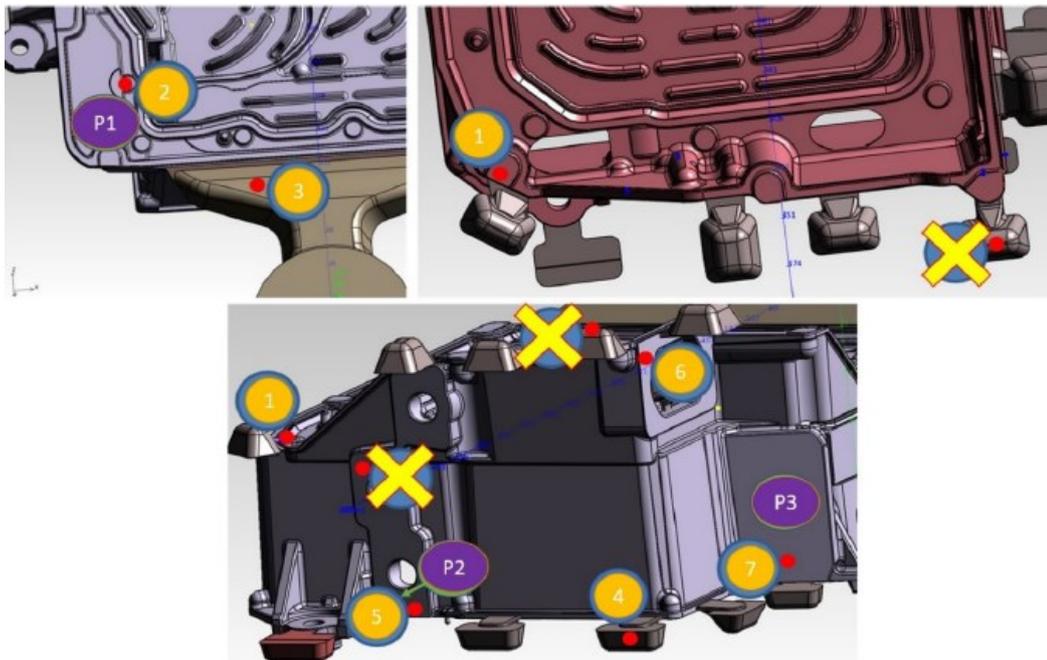


Figura 5.5 – Rappresentazione virtuale dei sensori nello stampo, fornita da Enginsoft Spa.

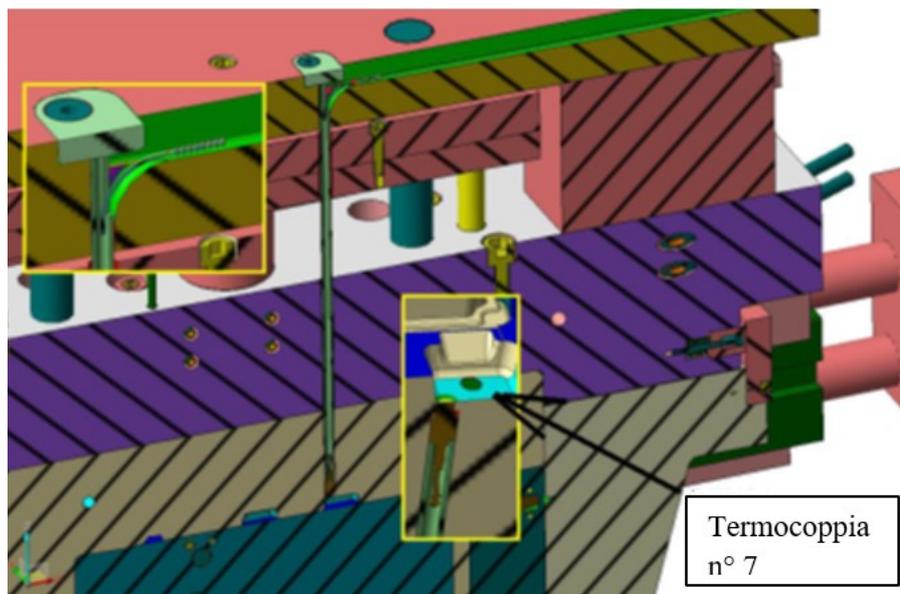


Figura 5.6 – Sezione del modello virtuale dello stampo per PAN0005, realizzata da Tomos Srl.

Successivamente sono state eseguite le lavorazioni meccaniche e sono stati installati i diversi sensori. In figura 5.7 è possibile vedere lo stampo, con i sensori installati, usato per la produzione del componente PAN0005.

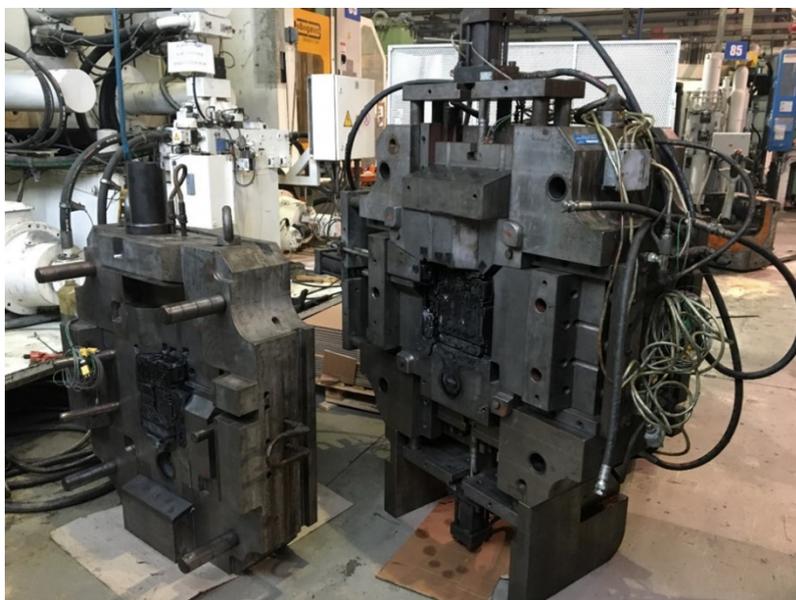


Figura 5.7 – Stampo per PAN0005 ad inserimento dei sensori ultimato.

Tra i sensori implementati nella pressa sono presenti anche due termocamere ad infrarossi *Total Thermal Vision* (TTV), fornite da Marposs Spa. Le specifiche tecniche e le principali dimensioni delle termocamere sono riportate in figura 5.8.

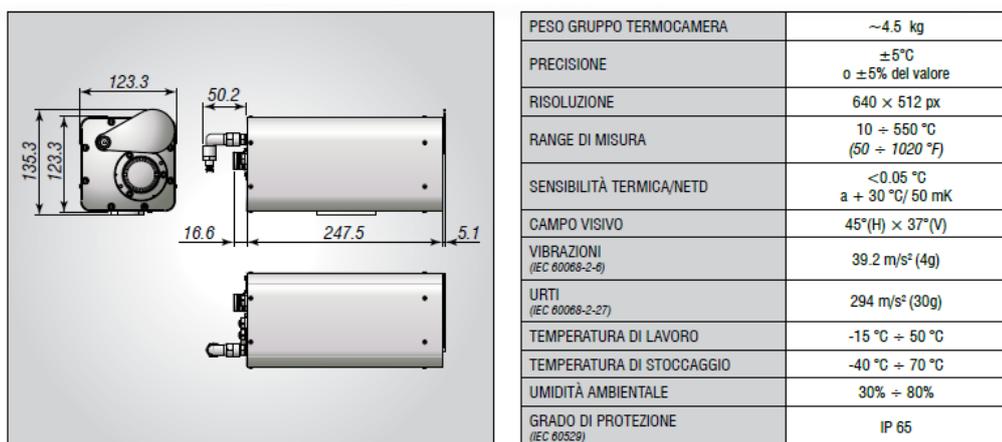


Figura 5.8 – Dimensioni principali (a sinistra) e specifiche tecniche (a destra) delle termocamere TTV fornite da Marposs Spa.

Una termocamera è dedicata alle acquisizioni sulla parte fissa ed una per la parte mobile dello stampo. Le termocamere montate sulla pressa di Fisep Srl sono visibili in figura 5.9.



Figura 5.9 – Termocamere TTV Marposs installate sulla pressa.

La termocamera è un sensore in grado di creare una mappa termografica per ogni metà stampo con 10 zone di interesse (definite ROI, *Region of Interest*). Le ROI sono una suddivisione delle mappe termografiche, per ciascuna di queste ROI viene restituita la temperatura massima rilevata. Le acquisizioni con la termocamera vengono fatte prima e dopo la fase di lubrificazione. In figura 5.10 sono riportati degli esempi di mappe termografiche della metà stampo fissa.

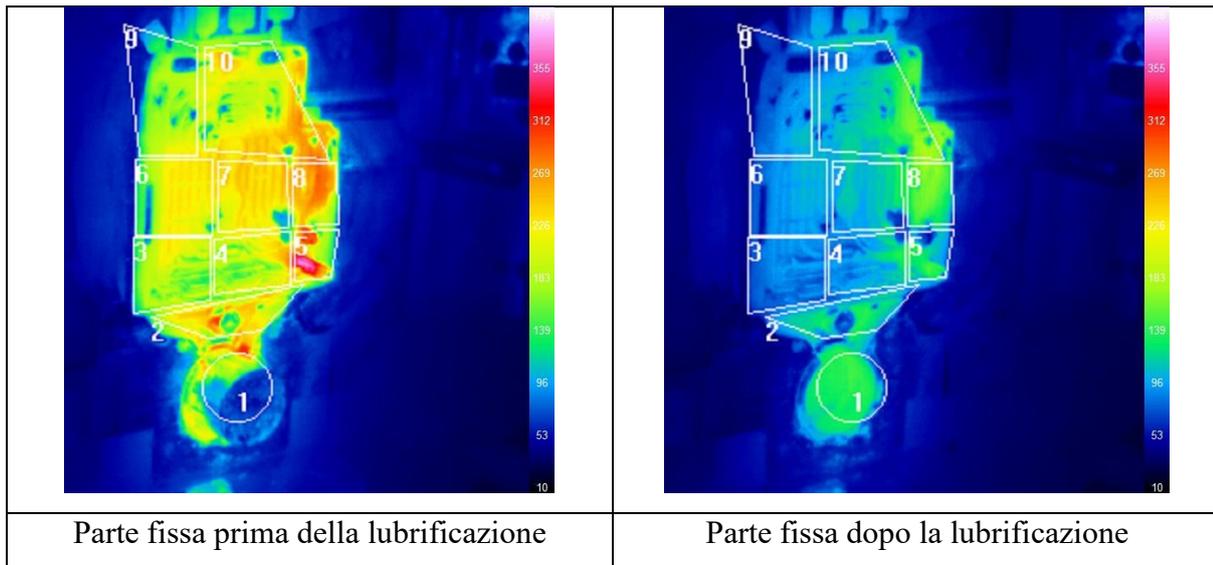


Figura 5.10 – Esempio di mappe termografiche su stampo per PAN0005.

Sensori come le termocamere contribuiscono al miglioramento dei processi di pressocolata. Chi opera nel settore della pressocolata spesso ha a che fare con forniture per clienti del mondo automotive, i quali possono richiedere volumi produttivi molto alti. Ecco, dunque, che si presenta la necessità di ridurre quanto più possibile il tempo ciclo del processo. Tramite l'utilizzo di questi sensori è possibile una riduzione del tempo necessario alla fase di lubrificazione, da cui ne deriva una diretta riduzione del tempo ciclo per ogni getto prodotto.

Inoltre, il monitoraggio mediante termocamere permette di individuare velocemente quelle anomalie che non sono strettamente legate alla fase di iniezione. Ad esempio, dei malfunzionamenti del circuito di termoregolazione delle due metà stampo.

Sulla pressa sono poi stati installati anche due flussometri, mostrati in figura 5.11, uno per la metà fissa dello stampo ed uno per la mobile. Questi sensori forniti da Electronics GmbH consentono di misurare la quantità di lubrorefrigerante utilizzata in ogni ciclo della pressa. La fase di lubrificazione viene comandata con un tempo di azione di questo liquido, costante per ogni ciclo. I flussometri permettono così di controllare la ripetibilità dei cicli produttivi verificando, dunque, eventuali variazioni della quantità di liquido utilizzato.

È inoltre presente un sensore, sempre fornito da Electronics GmbH, per la rilevazione delle condizioni ambientali, quali temperatura e umidità.



Figura 5.11 – Flussometri installati sulla pressa, forniti da Electronics GmbH.

Sono poi presenti a bordo pressa due unità per il controllo dei segnali acquisiti dai sensori. Le unità sono visibili in figura 5.12.

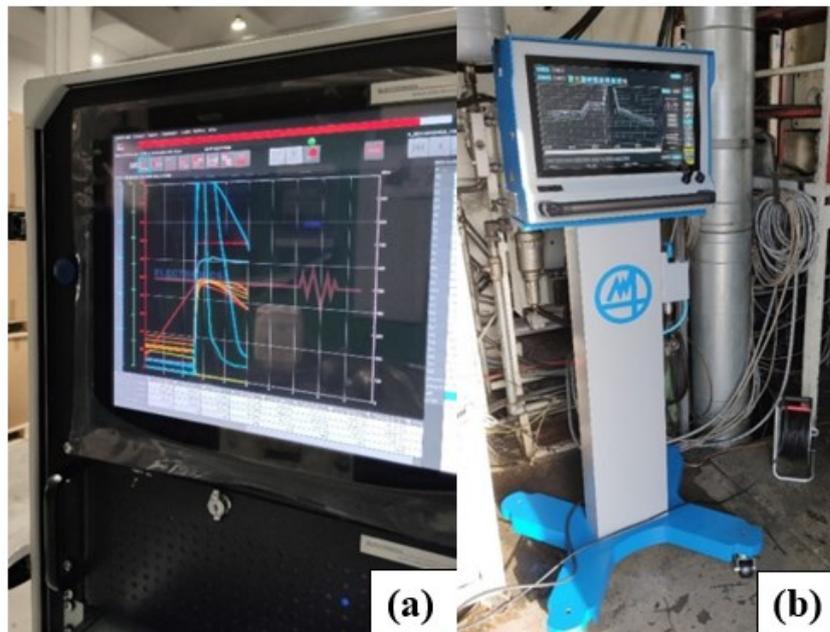


Figura 5.12 – Unità per il controllo a bordo pressa, per i sensori di Electronics GmbH (a) e per le termocamere Marposs (b).

Una unità è dedicata ai sensori di Electronics GmbH, l'altra alle due termocamere.

I diversi sensori sono inoltre collegati ad una piattaforma multimediale chiamata SMART ProdActive, realizzata da Enginsoft Spa. SMART ProdActive è un sistema digitale per il controllo intelligente di linee di produzione.

La piattaforma permette la visualizzazione in tempo reale e l'archiviazione dei segnali dei sensori. SMART ProdActive consente anche di elaborare, tramite un'apposita programmazione, i segnali dei sensori da cui poter ricavarne molteplici dati. Come, ad esempio, i parametri descritti nel Paragrafo 5.3.

In figura 5.13 sono esposti alcuni esempi di schermate della piattaforma.

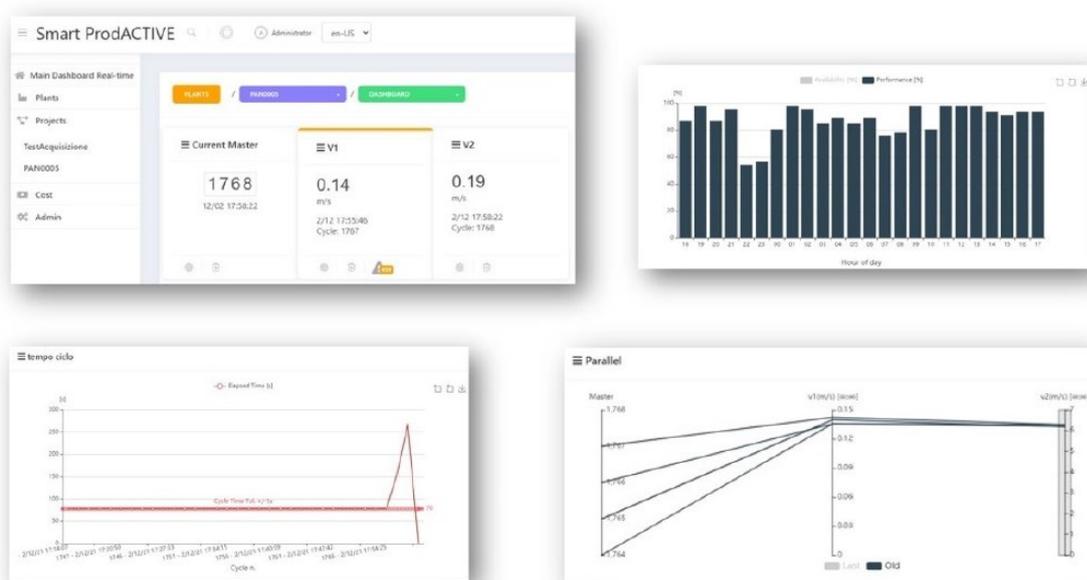


Figura 5.13 – Schermate dalla piattaforma SMART ProdActive.

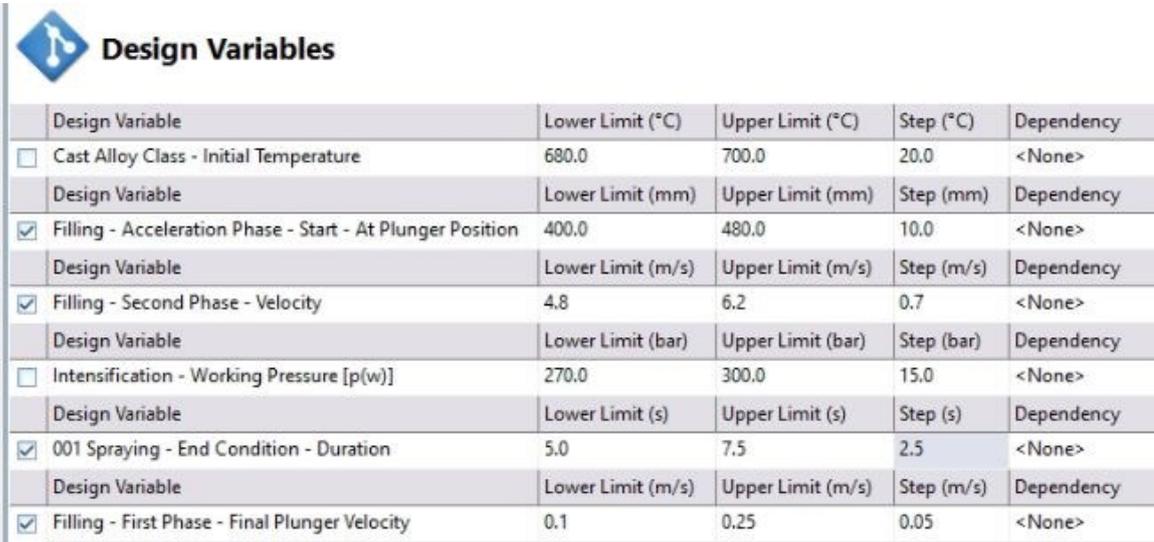
Una volta completata l'attivazione dell'isola di pressocolata con i nuovi sensori, è stata eseguita la validazione di tutta l'attrezzatura tramite una produzione di getti PAN0005. È stato verificato che tutti i sensori funzionassero correttamente e che fossero collegati alle diverse piattaforme per il monitoraggio. Durante le attività di messa a punto dell'isola di pressocolata sono anche stati definiti i range di lavoro dei parametri macchina utilizzabili per la produzione di massa del componente PAN0005. Sulla base di queste attività è stato possibile definire dei limiti massimi e minimi per parametri come corse e velocità delle tre fasi dell'iniezione. Questi valori di parametri sono stati la base di partenza per la realizzazione di un approfondito DoE, necessario alla campionatura descritta in seguito.

5.2 Campionatura dei getti

Successivamente alla validazione dell'attrezzatura, c'è stata una produzione di 322 campioni di PAN0005 presso Fisep Srl. Il progetto SMARTI 4.0 prevede la realizzazione di un modello predittivo da implementare nell'isola di pressocolata digitalizzata. Per la realizzazione del modello è necessaria una vasta acquisizione di dati sulla qualità dei getti da poter correlare con le variabili di processo.

I campioni sono stati prodotti variando i principali parametri di processo in accordo con un DoE, e con il supporto dei dati raccolti nella breve produzione di campioni svolta per validare l'attrezzatura. Il DoE è stato definito in modo tale da consentire di stabilire eventuali relazioni esistenti tra un set di variabili in input (principali parametri di processo) e le proprietà finali (qualità dei campioni).

Il DoE è stato inizialmente elaborato mediante l'utilizzo del software MAGMA. Lo studio virtuale ha restituito come primo set di variabili in input quello mostrato in figura 5.14.



Design Variable	Lower Limit (°C)	Upper Limit (°C)	Step (°C)	Dependency
<input type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Initial Temperature	680.0	700.0	20.0	<None>
Design Variable	Lower Limit (mm)	Upper Limit (mm)	Step (mm)	Dependency
<input checked="" type="checkbox"/> Filling - Acceleration Phase - Start - At Plunger Position	400.0	480.0	10.0	<None>
Design Variable	Lower Limit (m/s)	Upper Limit (m/s)	Step (m/s)	Dependency
<input checked="" type="checkbox"/> Filling - Second Phase - Velocity	4.8	6.2	0.7	<None>
Design Variable	Lower Limit (bar)	Upper Limit (bar)	Step (bar)	Dependency
<input type="checkbox"/> Intensification - Working Pressure [p(w)]	270.0	300.0	15.0	<None>
Design Variable	Lower Limit (s)	Upper Limit (s)	Step (s)	Dependency
<input checked="" type="checkbox"/> 001 Spraying - End Condition - Duration	5.0	7.5	2.5	<None>
Design Variable	Lower Limit (m/s)	Upper Limit (m/s)	Step (m/s)	Dependency
<input checked="" type="checkbox"/> Filling - First Phase - Final Plunger Velocity	0.1	0.25	0.05	<None>

Figura 5.14 – Soglie dei parametri del DoE definite tramite apposito studio effettuato sul software MAGMA.

Successivamente, si è deciso di modificare queste variabili fornite dallo studio virtuale per adattarle alla reale produzione di massa del getto PAN0005. Le variabili di input definitive del DoE sono, dunque, quelle mostrate in tabella 5.3.

T forno [°C]	675	705							
Spray [s]	7,5	5							
V1 [m/s]	0,10	0,15	0,20	0,25					
C1 [mm]	400	410	420	430	440	450	460	470	480
VM [m/s]	4,8	5,5	6,2						

Tabella 5.3 – Valori dei parametri di processo utilizzati per la campionatura di getti PAN0005.

In tabella 5.3 sono esposti i valori assunti dai parametri:

- *T forno* [°C]. Temperatura impostata nel forno di mantenimento.
- *Spray* [s]. Tempo di azione del lubrificante.
- *V1* [m/s]. Velocità del pistone durante la fase I.
- *C1* [mm]. Corsa del pistone in fase I.
- *VM* [m/s]. Velocità massima raggiunta dal pistone in fase II.

Occorre specificare che, per la campionatura, non sono stati inclusi tutti i designs di parametri relativi a tutte le combinazioni dei dati riportati in tabella 5.3, ma ne sono stati considerati 120. Queste 120 combinazioni di parametri di processo sono state ritenute le più significative, a livello virtuale, in termini di variabilità della qualità riscontrabile sui campioni. I campioni relativi ai primi 60 designs sono stati prodotti il primo giorno di campionatura con una temperatura del forno di mantenimento di 675 °C. Gli stessi 60 designs sono stati riprodotti il secondo giorno di campionatura, portando però la temperatura a 705 °C.

Sono così stati prodotti un totale di 322 campioni per una variazione complessiva di 120 designs.

Si specifica che la pressione di intensificazione non è tra i parametri variati nel DoE, essa è stata mantenuta costante a 300 bar, valore ritenuto ottimale per la produzione dei PAN0005.

Per ciascuno dei 120 designs sono stati prodotti almeno due campioni. Questo per una migliore affidabilità dal punto di vista statistico dei dati raccolti e per assicurarsi che per ogni design ci fosse una completa acquisizione con tutti i sensori installati.

I campioni sono stati prodotti in condizioni di prova controllate. Ossia ci si è assicurati che le composizioni chimiche della lega EN AC 43500 fusa nel forno di mantenimento rientrassero nei valori stabiliti della normativa UNI EN 1706. Le percentuali in peso degli elementi in lega sono state ricavate tramite lo spettrometro di massa presente in Fisep Srl e sono esposte nelle tabelle 5.4 e 5.5.

[wt.%]	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Ni	Zn	Ti	Sr
EN AC 43500 secondo UNI EN 1706		9,5-11,5	<0,03	0,1-0,5	<0,15	0,5-0,8			<0,1	<0,15	
EN AC 43500 misurata	Bal.	10,11	0,008	0,208	0,126	0,552	0,006	0,011	0,022	0,073	0,008

Tabella 5.4 – Composizione chimica dei getti del giorno 1 di campionatura.

[wt.%]	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Ni	Zn	Ti	Sr
EN AC 43500 secondo UNI EN 1706		9,5-11,5	<0,03	0,1-0,5	<0,15	0,5-0,8			<0,1	<0,15	
EN AC 43500 misurata	Bal.	10,15	0,015	0,208	0,134	0,551	0,006	0,012	0,023	0,072	0,011

Tabella 5.5 – Composizione chimica dei getti del giorno 2 di campionatura.

Periodicamente, durante la campionatura, è stata verificata la temperatura della lega nel forno di mantenimento per mezzo di una sonda ad immersione collegata, tramite una termocoppia di tipo K, ad un pirometro digitale. Le rilevazioni hanno riportato temperature comprese nell'intervallo di ± 15 °C rispetto alle temperature nominali del forno. Sono poi state monitorate anche temperatura e umidità dell'ambiente nei due giorni di campionatura con un termometro/igrometro digitale.

5.3 Elaborazione delle curve dei sensori

Successivamente, sono stati analizzati i segnali acquisiti dai sensori di Electronics GmbH durante la campionatura istruttiva di 322 getti PAN0005.

In questa sezione della tesi vengono presentati i parametri estratti dai sensori aggiuntivi e valutati in fase di creazione del modello predittivo. Si ribadisce che questo algoritmo serve per correlare le variabili di processo, tramite i sensori, ai difetti. In fase preliminare occorre stabilire a priori come elaborare le curve dei sensori. Questo perché il modello, per funzionare, deve ricevere dei valori scalari e non intere sequenze di dati che insieme formano le curve dei segnali acquisiti dai sensori. Nel lavoro qui presentato si va a definire quali scalari saranno oggetto di studio e come questi saranno estratti dalle curve dei sensori.

Il modello predittivo è, dunque, una relazione matematica che lega i dati scalari dei sensori ai risultati dell'analisi di qualità. La procedura stabilita per la raccolta dei dati sulla qualità è spiegata nel capitolo successivo.

Di seguito vengono esposte alcune premesse a riguardo del lavoro svolto.

- Quando viene fatto riferimento a valori di derivate, il metodo per il calcolo di queste è il seguente:

$$\dot{x}_k = \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t}$$

Dove il valore Δt corrisponde al periodo di campionamento, x_k è il segnale del k -esimo istante, \dot{x}_k è invece la derivata del segnale all'istante di campionamento k .

- Le curve di velocità e di accelerazione del pistone sono state ottenute derivando la curva *Plunger Position*, ossia la curva ricavata dal sensore di posizione del pistone. È chiaro, dunque, che le tre curve sono frutto dello stesso sensore.
- I sensori che restituiscono le curve qui presentate lavorano tutti con un periodo di campionamento di 1 millisecondo.

Vengono di seguito elencate le varie fasi dell'elaborazione dei segnali dei sensori:

- SUDDIVISIONE DELLE CURVE DI INIEZIONE

Per il lavoro di elaborazione delle curve dei sensori è stato necessario trovare un metodo numerico per l'individuazione delle tre fasi che compongono l'iniezione. Vengono così definiti numericamente i tre istanti significativi che caratterizzano la fine di una fase e l'inizio della successiva:

- *ts2 (fine fase I - inizio fase II)*: definito come il momento in cui l'accelerazione raggiunge un valore maggiore o uguale a 50 m/s^2 e presenta un andamento crescente per almeno 5 punti di campionamento successivi. Si è deciso, dunque, di valutare tramite il sensore sul pistone il reale istante in cui avviene lo *Switch Point*, ossia il punto di commutazione dalla fase I alla fase II. La soglia di accelerazione di 50 m/s^2 è indicativa del rapido incremento di velocità del pistone che determina il passaggio da una fase all'altra. La condizione di andamento crescente per almeno i 5 millisecondi successivi serve a garantire che tale punto venga selezionato in maniera corretta, e non confuso con andamenti anomali in fase I dovuti a grippaggi del pistone.
- *te2 (fine fase II – inizio fase III)*: primo istante successivo al minimo assoluto della curva di accelerazione in cui si raggiunge un valore di accelerazione non negativo. La fase II si conclude con il riempimento della cavità, ciò porta ad un brusco arresto del pistone, subito dopo il quale avviene la fase III in cui il pistone torna ad avanzare lentamente. C'è perciò un cambio di segno dell'accelerazione in questo intervallo di pochi millisecondi, si è scelto di considerare questo fenomeno come passaggio da fase II a III.
- *te3 (tempo di fine terza fase)*: definito come l'istante successivo a *te2* a partire dal quale la velocità del pistone rimane ad un valore di velocità compreso tra 0 e $0,005 \text{ m/s}$ per almeno 10 punti di campionamento seguenti. Per stabilire quale potesse essere il criterio adatto a definire la conclusione della fase III si è cercato, dal sensore di posizione, un fenomeno che fosse indicativo del momento in cui la spinta del pistone smette di essere efficace poiché il getto è pressoché solido. Dopo diverse considerazioni è stata stabilita questa velocità come indicativa di fine fase III. Si è pensato che fosse una velocità sufficientemente bassa per poter considerare trascurabile l'avanzamento del pistone, segno di un biscotto ormai solido. La scelta della condizione di permanenza ad una velocità inferiore a $0,005 \text{ m/s}$ per almeno 10 millisecondi serve ad escludere il momento del passaggio da fase II a fase III, in cui si ha un brusco arresto del pistone. Quindi, velocità inferiori a $0,005 \text{ m/s}$ ma per uno o due punti di campionamento al massimo. Occorre poi specificare che nella pratica l'operatore imposta nella pressa un *Tempo di azione moltiplica*, ossia il tempo di spinta effettivo del pistone in fase di intensificazione. Nella scelta del criterio per *te3* è stato verificato che la fine del *Tempo di azione moltiplica* fosse successiva a *te3*.

Le tre fasi dell'iniezione sono, dunque, così definite:

- Fase I, dal primo punto di campionamento a *ts2*. Il campionamento eseguito dai sensori, lo si ricorda, ha inizio nel primo istante in cui il pistone inizia ad avanzare.

- Fase II, da t_{s2} a t_{e2} .
- Fase III, da t_{e2} a t_{e3} .

In figura 5.15 è possibile vedere un esempio schematico delle curve di corsa, velocità e accelerazione del pistone suddivise dagli istanti t_{s2} , t_{e2} e t_{e3} .

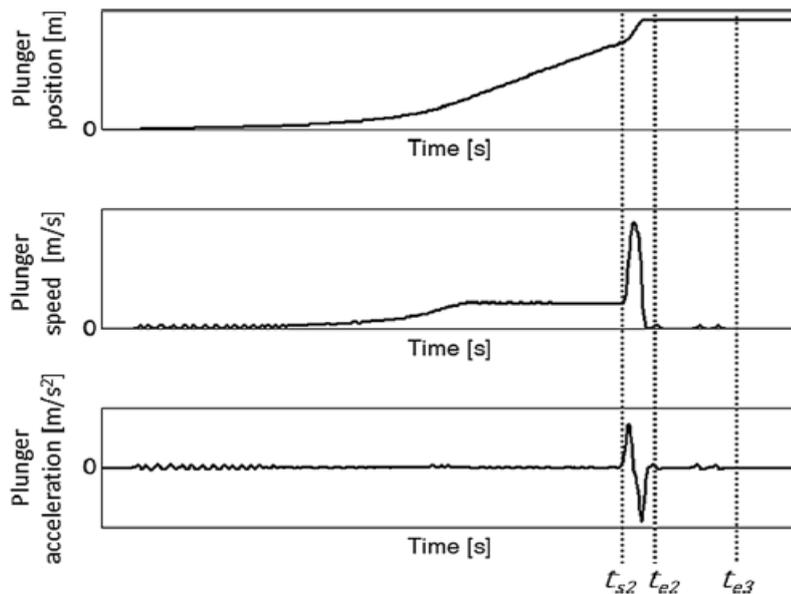


Figura 5.15 – Rappresentazione schematica degli andamenti di posizione, velocità e accelerazione del pistone nelle tre fasi del ciclo di iniezione [29].

- CURVE DI POSIZIONE (*Plunger Position*)

La curva *Plunger Position* è rappresentativa della posizione del pistone in funzione del tempo. Da *Plunger Position*, di cui un esempio è visibile figura 5.16, viene ricavata la corsa del pistone negli istanti t_{s2} , t_{e2} e t_{e3} , così da avere indicazione precisa di quello che è l'avanzamento del pistone nelle tre fasi. I tre punti sono indicati in figura con p_1 , p_2 e p_3 .

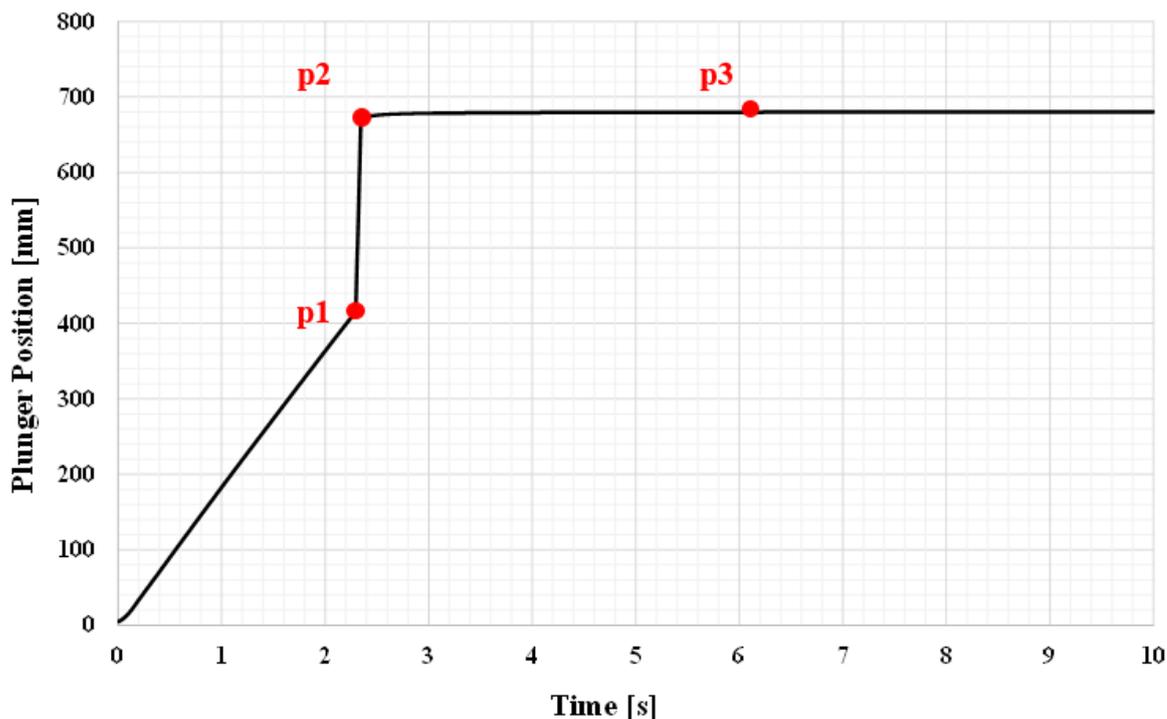


Figura 5.16 – Andamento della posizione del pistone in funzione del tempo, curva ottenuta dal sensore di posizione del pistone.

Le correlazioni generali con la qualità attese sono concordi con quanto è ormai noto nel settore della pressocolata. Nello specifico, da queste rilevazioni ci si aspetta complessivamente una qualità più bassa nelle corse di prima fase più lunghe, per il fatto che potrebbe esserci un eccessivo raffreddamento della lega prima del riempimento della cavità. Mentre per corse più corte si potrebbero riscontrare maggiori porosità a seguito di turbolenze eccessive nella fase successiva [10].

- CURVE DI VELOCITÀ (*Plunger Velocity*)

La curva *Plunger Velocity*, visibile in figura 5.17, è ottenuta derivando rispetto al tempo la curva *Plunger Position*. Da questo segnale vengono estratti i valori medi e massimi della velocità del pistone nelle fasi I, II e III, nonché la deviazione standard nella sola fase I. Si è scelta la deviazione standard come parametro rappresentativo di eventuali grippaggi del pistone. Infatti, ciò che ci si aspetta è che a fronte di un grippaggio in fase I ci siano delle oscillazioni sulla velocità del pistone, fenomeno tanto più accentuato quanto maggiore è l'irregolarità nell'avanzamento del pistone. È importante valutare la presenza del grippaggio poiché potrebbe causare un'eccessiva turbolenza della lega fusa [10].

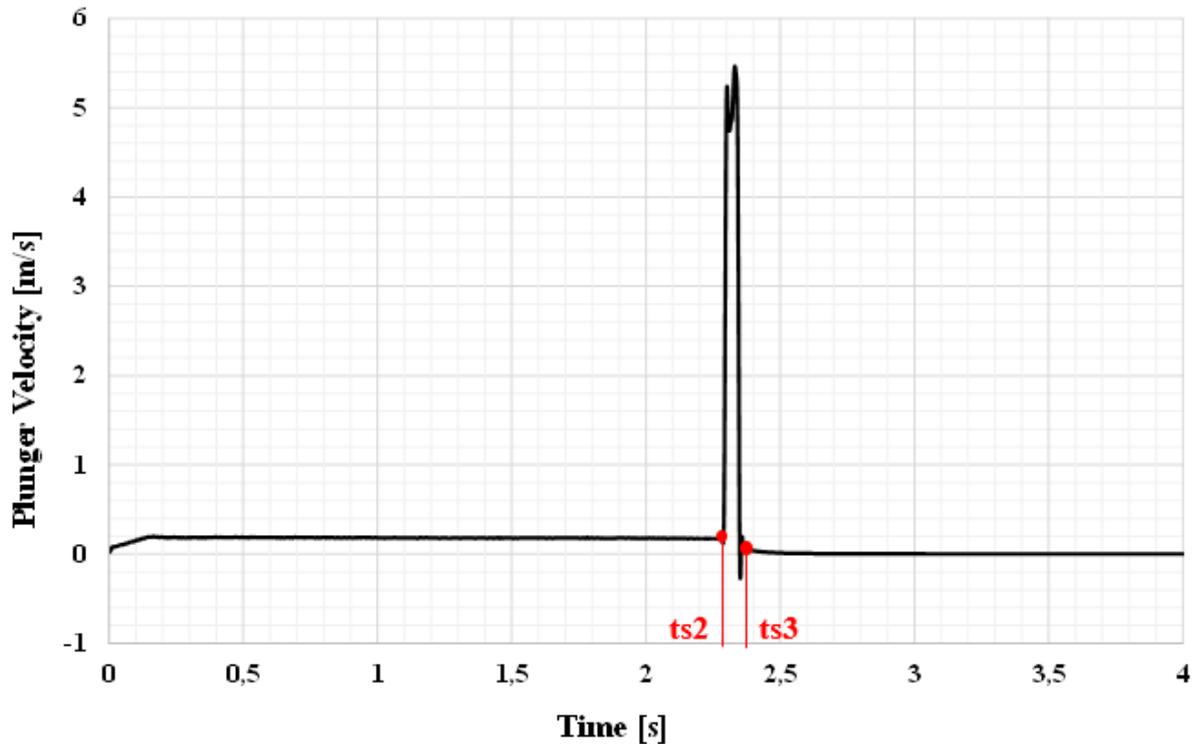


Figura 5.17 – Andamento della velocità del pistone in funzione del tempo.

Altro parametro ricavabile dalla curva *Plunger Velocity* è E_f , espresso in m^3/s^2 , viene così definito:

$$E_f = \int_0^{te3} \dot{x}(t)^3 dt \cong \int_0^{te2} \dot{x}(t)^3 dt$$

Dove $\dot{x}(t)$ è la velocità del pistone all'istante t-esimo. Essendo la velocità trascurabile durante la terza fase, è possibile approssimare tale valore calcolandolo solamente fino alla fine della seconda fase. Questo parametro è rappresentativo dell'energia associata alle forze di flusso scambiate tra la lega fusa e le pareti della camera di iniezione e dello stampo. Queste forze hanno azione su eventuali particelle solide presenti. Dunque, ci si aspetta una correlazione tra la qualità ed E_f come esposto in [29].

- CURVE DI ACCELERAZIONE (*Plunger Acceleration*)

È la curva ottenibile derivando rispetto al tempo *Plunger Velocity*. In figura 5.18 ne è visibile un esempio. Il picco di accelerazione visibile in figura è relativo all'accelerazione che subisce il pistone in fase II, in cui esso deve raggiungere la velocità massima richiesta. La forte decelerazione, invece, è dovuta al riempimento della cavità dello stampo.

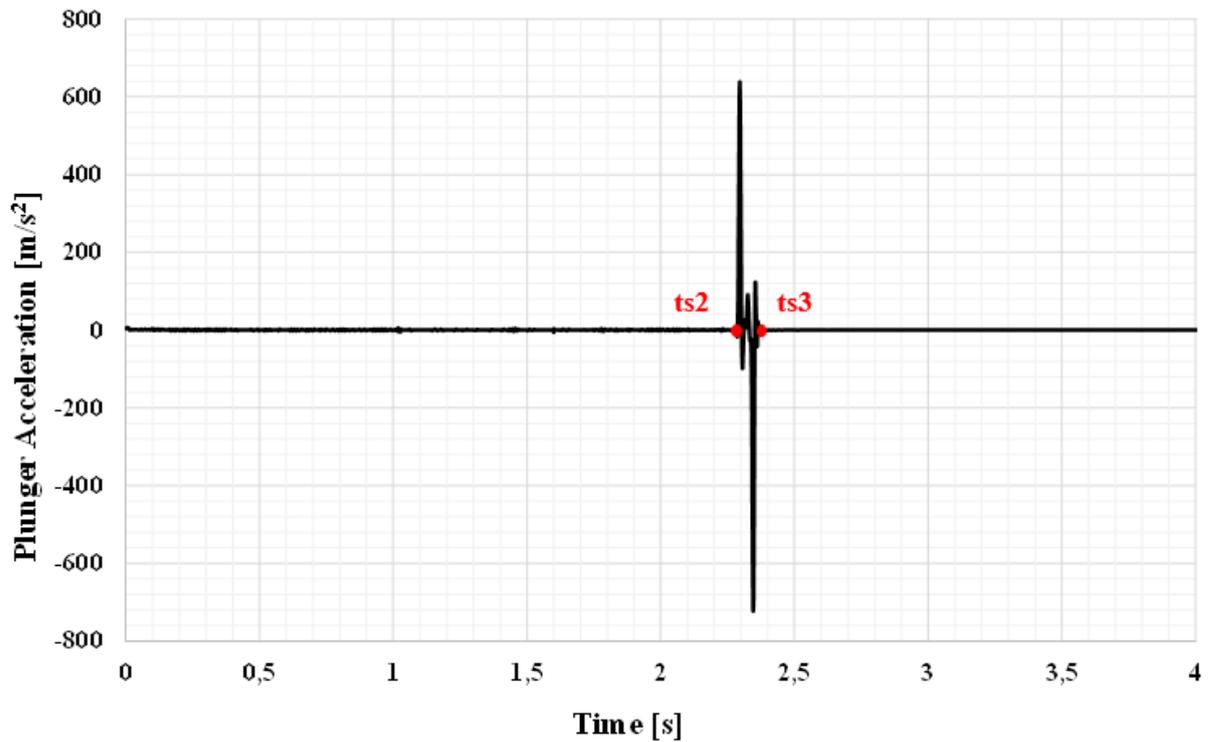


Figura 5.18 – Andamento dell’accelerazione del pistone in funzione del tempo.

Dalle curve *Plunger Acceleration* vengono estratti i valori massimo e minimo di accelerazione del pistone nel completo intervallo di acquisizione, oltre che il valore quadratico medio (RMS, *root mean square*) espresso in m/s^2 e calcolato solo in fase II come segue:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{ts2}^{te2} \ddot{x}(t)^2 dt}{te2 - ts2}}$$

Dove $\ddot{x}(t)$ è il valore all’istante t-esimo di accelerazione del pistone. Questo parametro è rappresentativo delle forze d’inerzia che il pistone trasmette alla lega fusa in fase II [30]. Ci si aspetta che al crescere di a_{RMS} aumenti la qualità dei getti. Più alti valori di a_{RMS} comportano elevate forze sul fluido che contribuiscono a frammentare ossidi e altre particelle solide, e a far collassare le bolle d’aria inglobate [29].

- CURVE DEI SENSORI DI PRESSIONE INTERNI ALLO STAMPO (*Pressure*)

La curva in figura 5.19 è un esempio dell’andamento della pressione, espressa rispetto al tempo, che la lega esercita sui sensori interni allo stampo.

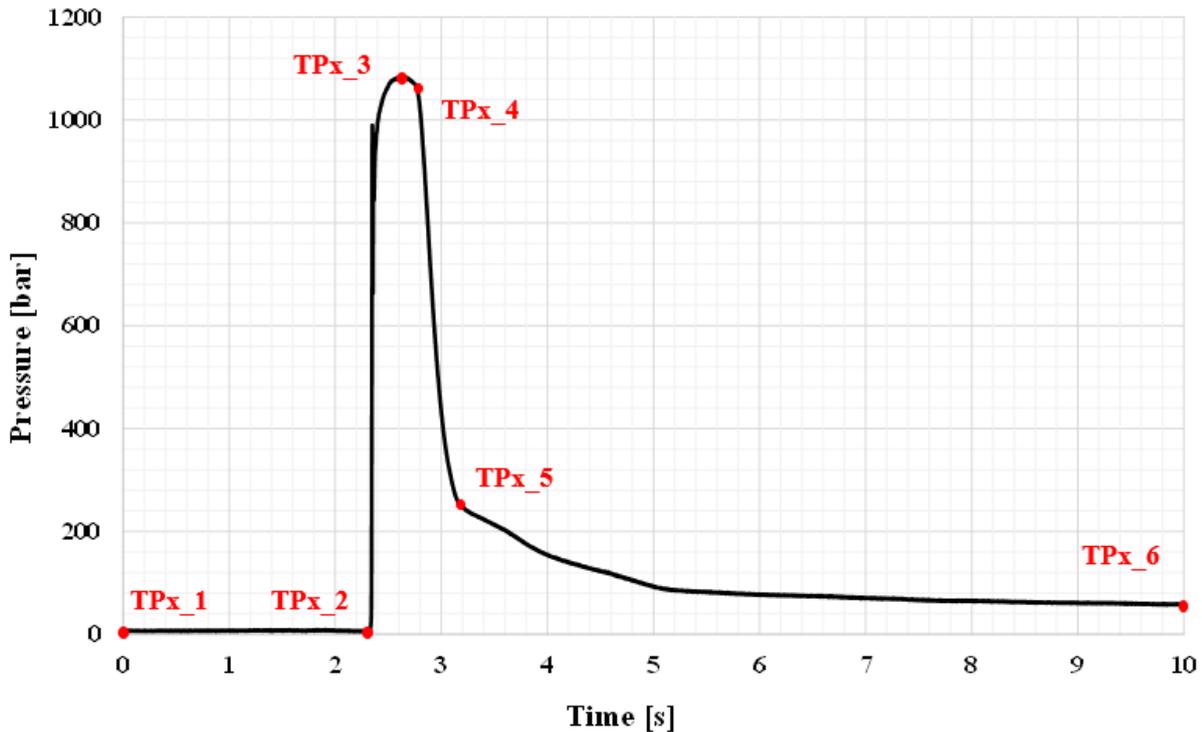


Figura 5.19 – Andamento, nel tempo, della pressione misurata dai sensori interni allo stampo.

Per ciascuno dei sensori presenti in cavità (in seguito indicati con “x”) vengono forniti i valori di *Pressure* e *Time* dei seguenti punti.

- TPx_1: rappresenta la pressione rilevata all’inizio di ogni ciclo.
- TPx_2: rappresenta il momento in cui la lega fusa, spinta dal pistone, entra in contatto con i sensori. Dopo questo istante vengono infatti raggiunti velocemente i valori massimi di pressione. Numericamente, TPx_2, viene definito come l’istante nel quale la derivata rispetto al tempo della pressione raggiunge un valore maggiore o uguale a 10000 bar/s (corrispondente ad una crescita di 10 bar tra due misure successive).
- TPx_3: rappresenta il punto in cui si verifica la pressione massima di tutto il ciclo.
- TPx_4: punto valutato quando si ha una derivata di *Pressure*, rispetto al tempo, minore o uguale a -3000 bar/s successivamente a TPx_3, ossia quando si scende dal plateau di 3 bar in due punti misurati consecutivamente. Il calo di pressione che si verifica dal punto TPx_4 è dovuto al getto che solidifica, il quale è soggetto ad un ritiro volumetrico. Il ritiro porta ad una diminuzione dei carichi che agiscono sulla superficie dello stampo e, dunque, sui sensori.
- TPx_5: è dato dal primo punto che ritorna ad una derivata maggiore o uguale a 500 dopo il punto TPx_4, ovvero quando si sale di 0,5 bar in due punti consecutivi.

- TPx_6: rappresenta l'ultimo valore di pressione rilevato dal sensore.
- tu_24: tempo espresso in millisecondi che intercorre tra TPx_2 e TPx_4.
- tu_25: tempo espresso in millisecondi che intercorre tra TPx_2 e TPx_5.

tu_24 e tu_25 sono stati scelti per rappresentare il tempo in cui la lega è sottoposta alle pressioni maggiori del ciclo.

- CURVE DEI SENSORI DI TEMPERATURA INTERNI ALLO STAMPO (*Temperature*)

In figura 5.20 è rappresentata una tipica curva ottenuta dalle termocoppie interne allo stampo.

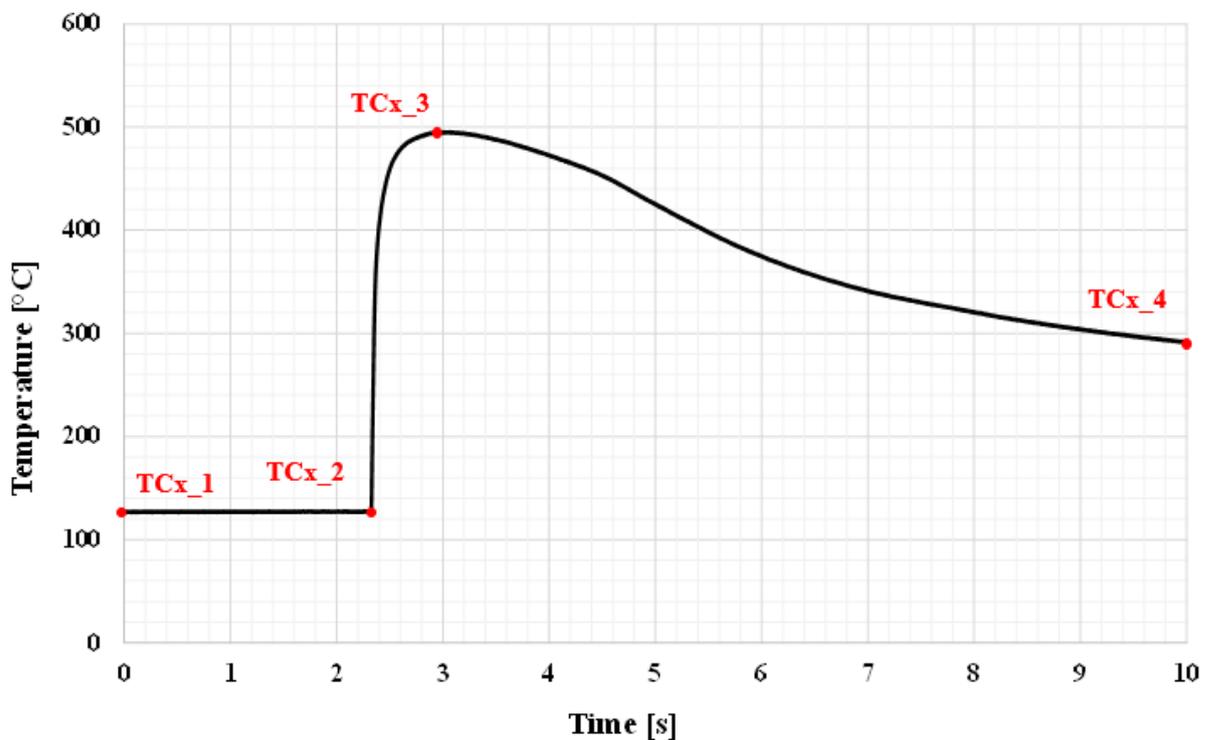


Figura 5.20 – Andamento, nel tempo, della temperatura misurata dai sensori interni allo stampo.

Per ciascuno dei punti rappresentati in figura 5.20 vengono ricavati i valori di *Temperature* e di *Time*. Le curve rilevate in ogni ciclo della pressa sono sette e appartengono alle termocoppie presenti nella cavità dello stampo. I sette sensori vengono definiti con *Temperature 1-2-3-4-5-6 e 7* (di seguito indicati con “x”).

- TCx_1: è la temperatura rilevata all’inizio di ogni ciclo.
- TCx_2: rappresenta l’istante oltre il quale si osserva una rapida crescita di temperatura dovuta all’ingresso della lega fusa nella cavità dello stampo. Per individuare questo punto è stata impostata una soglia di derivata della temperatura rispetto al tempo, permettendo

così di individuare matematicamente l'inizio di tale fenomeno. È il primo punto in cui si ha una derivata maggiore o uguale a $3000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, dunque, quando si misura un incremento minimo di 3°C in un millisecondo.

- TCx_3: è il punto di massimo della curva.
- TCx_4: rappresenta l'ultima temperatura rilevata dal sensore.
- TCx_A: area sottesa alla curva da TC_x2 a TCx_4 [31]. TCx_A è un parametro già impiegato in una tesi precedente per valutare l'andamento della temperatura nel tempo.

Occorre specificare che i valori di temperatura misurati dal sensore non corrispondono alle temperature reali della lega in cavità. I segnali registrati dai sensori sono uno strumento utile per poter fare dei confronti, a livello qualitativo, tra molteplici curve. Ad esempio, come verrà esposto in seguito, un confronto tra le temperature dei punti TCx_1 e TCx_3 ricavati delle curve relative ai campioni di PAN0005.

- CURVE DI PRESSIONE DEL PISTONE (*Head Pressure*)

Le curve *Head Pressure* sono fornite dal sensore posto sull'accumulatore della pressa per la terza fase. Il segnale registrato corrisponde alla pressione che il pistone esercita sulla lega fusa nella camera di iniezione durante il riempimento. Un esempio di curva è in figura 5.21.

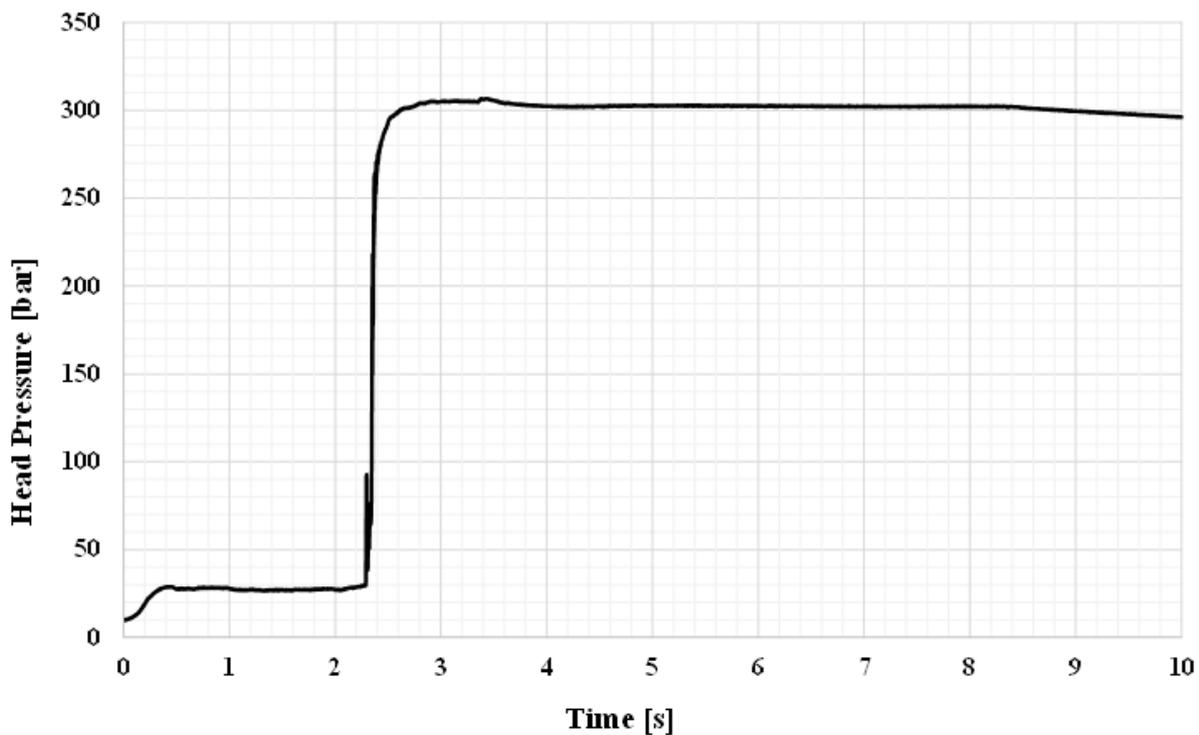


Figura 5.21 – Andamento nel tempo della pressione esercitata dal pistone.

Dalle curve *Head Pressure* si ricava il valore massimo di pressione completo dei valori di *Head Pressure* e di *Time*, ed il parametro L_i espresso in bar m e definito come il lavoro delle forze di pressione. Si ha che:

$$L_i = \int_{te2}^{te3} p(t)dx = \int_{te2}^{te3} p(t)\dot{x}(t)dt$$

Dove $p(t)$ è la *Head Pressure* all'istante t -esimo e $\dot{x}(t)$ è la *Plunger Velocity* all'istante t -esimo. L'intervallo di integrazione è il tempo compreso tra gli istanti $te2$ e $te3$, ossia la fase III. Questo parametro misura il lavoro svolto dalle forze esercitate dal pistone sulla lega in fase di intensificazione. Come spiegato in [32], si ritiene utile considerare questo parametro in aggiunta al valore massimo rilevato dal sensore. In questo modo è possibile valutare se eventuali raffreddamenti prematuri del getto potrebbero vanificare l'effetto di impaccamento del pistone. In tal caso ci si aspetta che tale fenomeno sia relativo ai valori più bassi di L_i .

- CURVE DI CONTRO-PRESSIONE (*Counter Pressure*)

In figura 5.22 viene mostrato un esempio di curva della contropressione che agisce sul pistone durante l'iniezione.

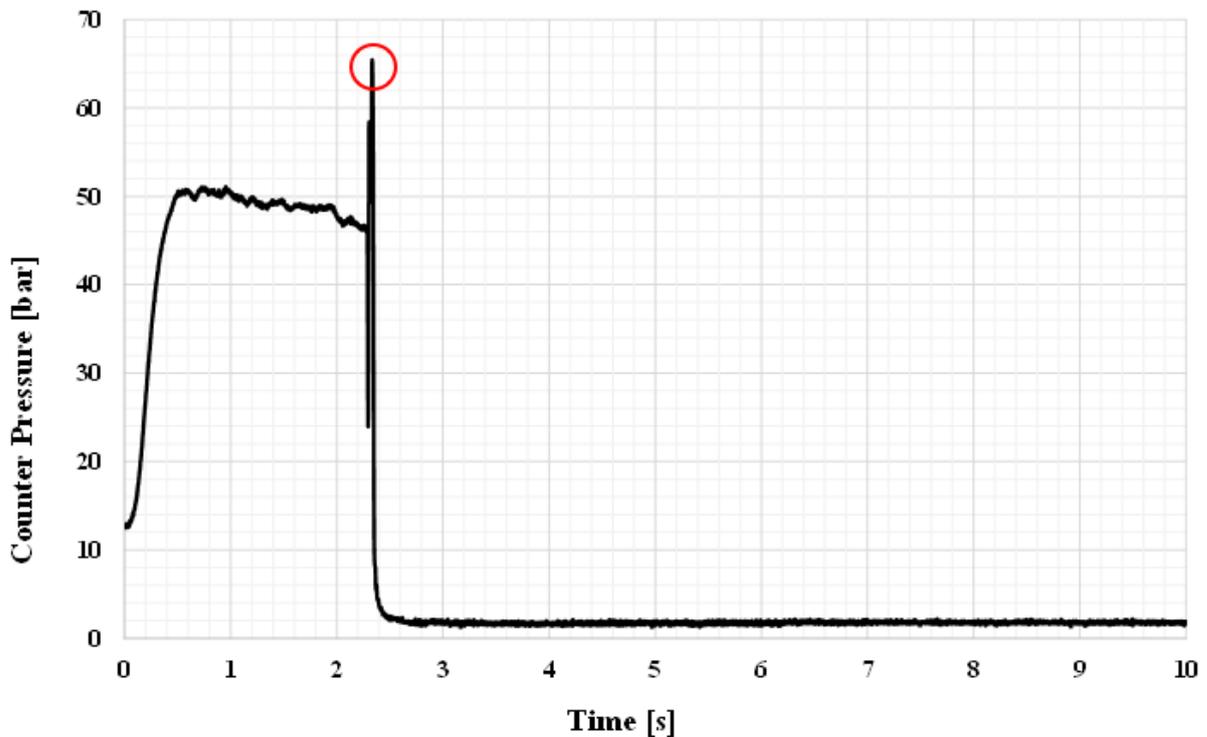


Figura 5.22 – Andamento nel tempo della contropressione.

Dalle curve *Counter Pressure* si valuta il valore massimo completo dei valori di *Counter Pressure* e *Time*, come evidenziato in figura 5.22.

- DATI SUI FLUSSOMETRI

Vengono riportati i valori di flusso di lubrificante utilizzato per ogni ciclo. In questo modo è possibile verificare la ripetibilità del processo.

Questi parametri scalari estratti dai sensori saranno di input alla fase di elaborazione del modello predittivo, nella quale si andrà a ricercare le maggiori correlazioni tra i parametri e la qualità dei campioni.

Riassumendo, i parametri ricavati dai sensori sono:

- 3 dalla curva di posizione del pistone (*Plunger Position*);
 - Corsa del pistone all'istante t_{s2} .
 - Corsa del pistone all'istante t_{e2} .
 - Corsa del pistone all'istante t_{e3} .
- 8 dalla curva di velocità del pistone (*Plunger Velocity*);
 - Valore medio della velocità del pistone in fase I.
 - Valore massimo della velocità del pistone in fase I.
 - Valore medio della velocità del pistone in fase II.
 - Valore massimo della velocità del pistone in fase II.
 - Valore medio della velocità del pistone in fase III.
 - Valore massimo della velocità del pistone in fase III.
 - Deviazione standard della velocità del pistone in fase I.
 - E_f , parametro rappresentativo dell'energia associata alle forze di flusso.
- 3 dalla curva di accelerazione del pistone (*Plunger Acceleration*);
 - Valore massimo di accelerazione del pistone registrato nel completo intervallo di acquisizione.
 - Valore minimo di accelerazione del pistone registrato nel completo intervallo di acquisizione.
 - a_{RMS} , parametro rappresentativo delle forze d'inerzia che il pistone trasmette alla lega in fase II.
- 8 per ognuna delle curve dei 3 sensori di pressioni interni allo stampo (*Pressure*);
 - TPx_1.
 - TPx_2.

- TPx_3.
- TPx_4.
- TPx_5.
- TPx_6.
- tu_24.
- tu_25.
- 5 per ognuna delle curve ricavate dalle 7 termocoppie (*Temperature*);
 - TCx_1.
 - TCx_2.
 - TCx_3.
 - TCx_4.
 - TCx_A.
- 2 dalla curva di pressione del pistone (*Head Pressure*);
 - Valore massimo di pressione del pistone registrato nel completo intervallo di acquisizione.
 - L_i , parametro rappresentativo del lavoro svolto dalle forze esercitate dal pistone sulla lega in fase III.
- 1 dalla curva di contropressione;
 - Valore massimo di contropressione registrato nel completo intervallo di acquisizione.
- Segnali registrati dai flussometri;

5.4 Analisi in laboratorio

Tutti i campioni prodotti sono stati sottoposti ad una raccolta dei dati sulla loro qualità. La procedura di questa operazione, che verrà spiegata in dettaglio nel capitolo successivo, prevede anche una classificazione delle porosità presenti nei campioni mediante un'analisi radiografica eseguita con la macchina in dotazione a Fisep Srl. Si è deciso di svolgere anche un'analisi radiografica, per specifici campioni ritenuti significativi, con la strumentazione del laboratorio del DTG poiché comprensiva di un software per l'elaborazione delle immagini. La macchina per le radiografie del DTG è dotata di microfuoco, il punto focale per la sorgente dei raggi è stato impostato a 8 μm . Il software utilizzato per lo studio delle immagini è *Leica LAS 3.8*. Come prima fase, sono stati tagliati i campioni con una sega a nastro, come mostrato in figura 5.23.

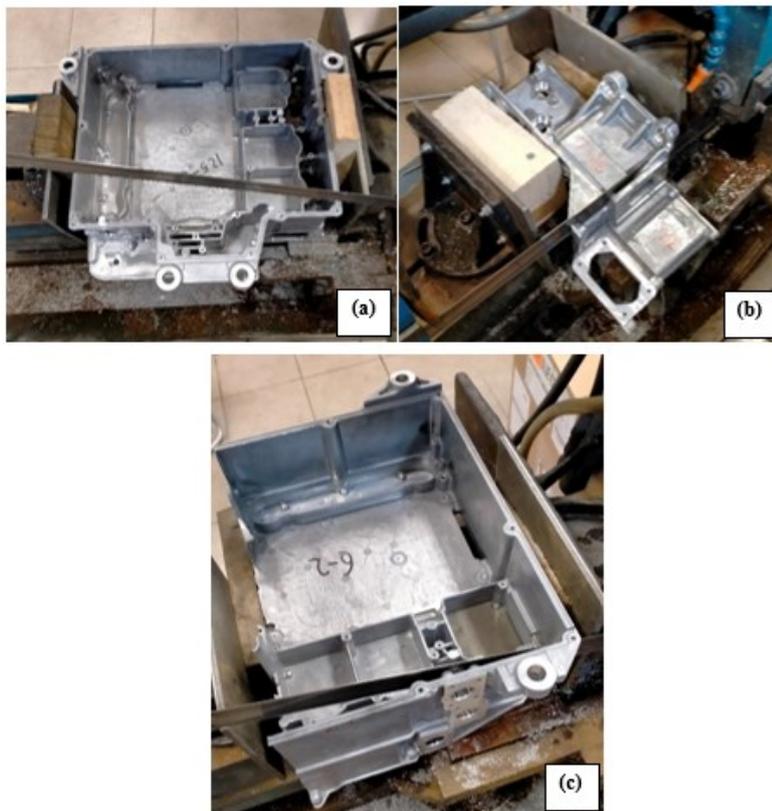


Figura 5.23 – Tagli eseguiti con sega a nastro sui campioni. Tagli effettuati nella sequenza (a), (b) e (c).

Questi tagli hanno permesso di isolare le quattro zone critiche dei campioni che si è deciso di sottoporre all'analisi ai raggi X con microfuoco.

Una volta completata l'acquisizione delle radiografie è stato possibile elaborare le immagini con il software dedicato. Le immagini sono state ritagliate e convertite in scala di grigi. Sono poi state impostate le maschere binarie ed i filtri. È stato così possibile misurare la porzione di area occupata da porosità. In figura 5.24 vengono riportati degli esempi di immagini elaborate e le rispettive aree di interesse, sulla quale è stata misurata la frazione di area relativa ai vuoti. Le aree dell'indagine sono relative alle superfici lavorate meccanicamente delle quattro zone critiche del getto PAN0005.

Tutte le immagini acquisite in quest'analisi sono riportate nell'Appendice A.

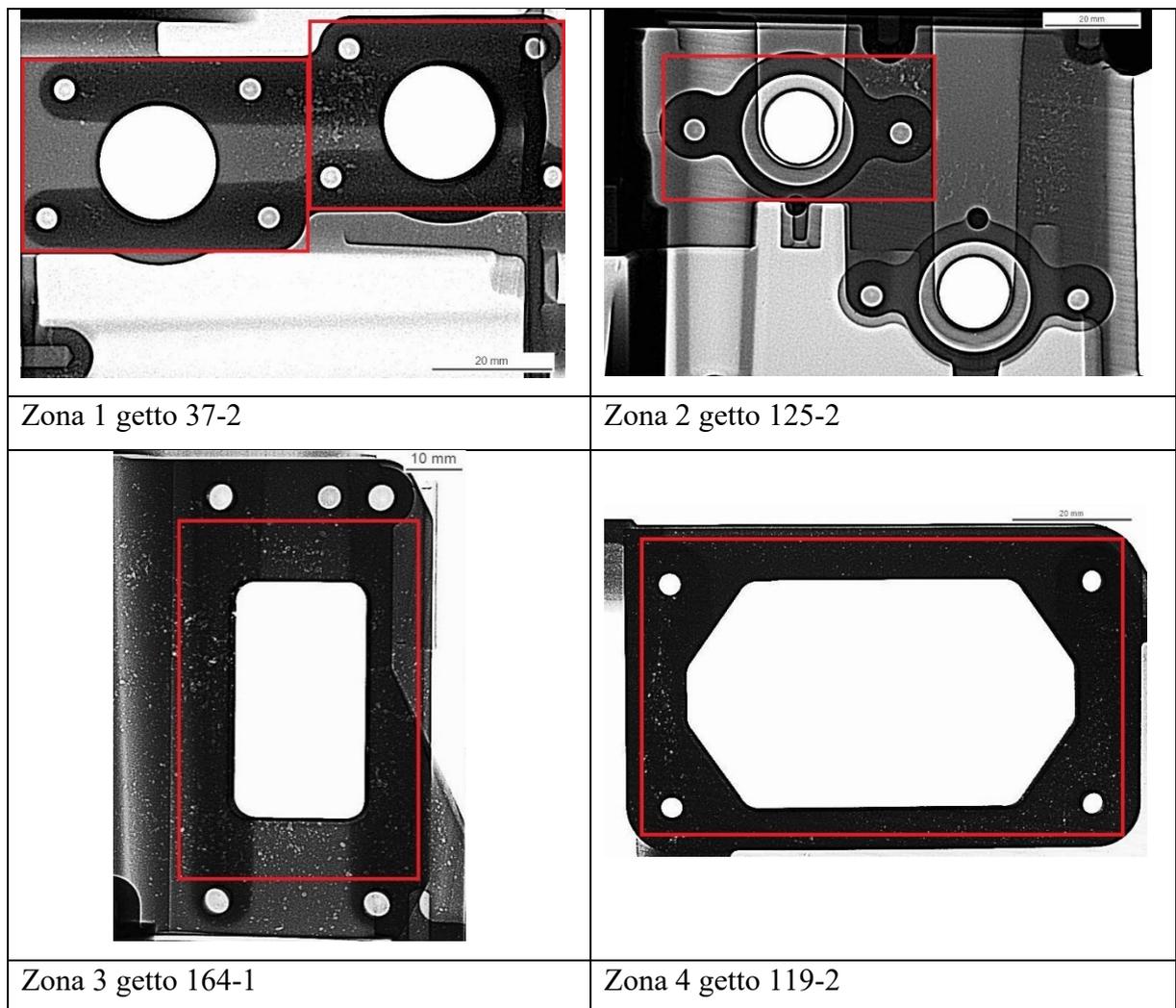


Figura 5.24 – Esempi di radiografie delle quattro zone critiche, con le rispettive aree d'interesse all'indagine radiografica con micro-fuoco.

È stata poi svolta un'analisi metallografica sui campioni ritenuti più interessanti per questo tipo di studio, come spiegato in seguito. Questi getti sono stati sezionati con una sega a nastro ed una troncatrice, i tagli effettuati sono rappresentati in figura 5.25.

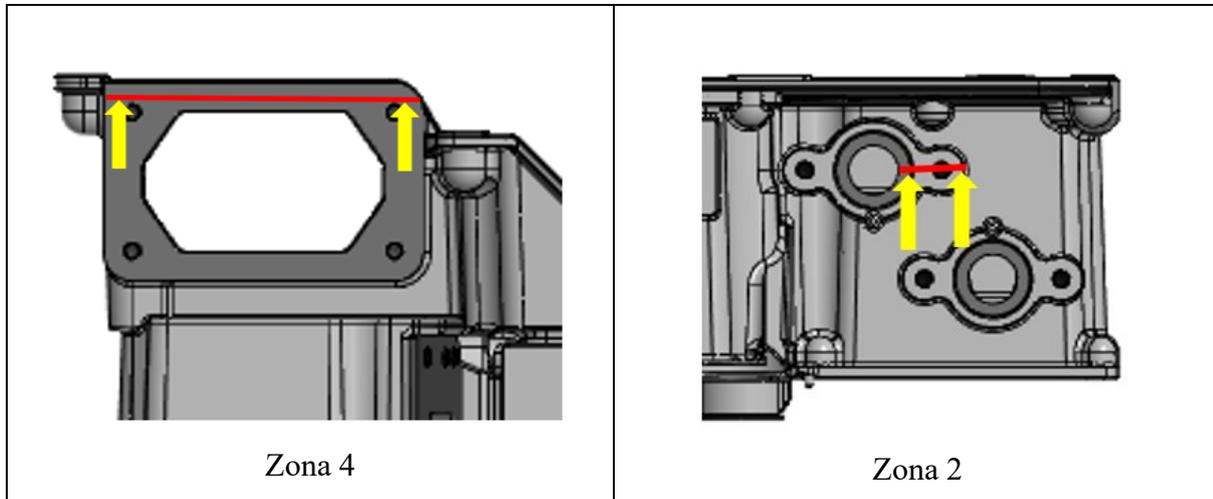


Figura 5.25 – Sezioni effettuate per isolare le superfici sottoposte all'analisi metallografica.

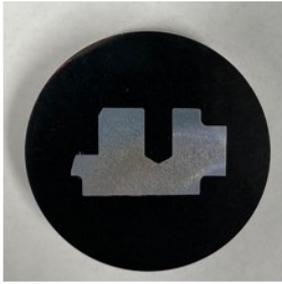
Si è deciso di osservare la microstruttura delle zone 2 e 4 poiché rappresentative di regioni del getto con spessori diversi. Nello specifico, in zona 2 la parete è spessa circa 25 mm, mentre in zona 2 lo spessore è inferiore a 10 mm. Le sezioni ottenute sono state successivamente inglobate, a caldo i provini ricavati dalla zona 2 e a freddo quelli dalla zona 4. Per i provini inglobati a freddo è stata impiegata una resina poliesteri con un 3% di catalizzatore.

Successivamente, sono state lucidate le superfici dei provini con carte abrasive di grana P180 fino a P2400, ed infine con pasta diamantata da 6 μm e soluzione di ossido di silicio.

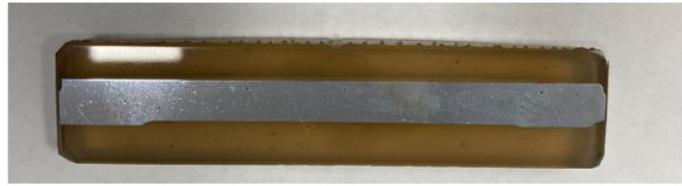
I campioni sono poi stati sottoposti, per circa 40 secondi, ad attacco chimico *Keller*. Nello specifico, il composto utilizzato era formato dal 95% di acqua, il 2,5% di acido nitrico, l'1,5% di acido cloridrico e dall'1% di acido fluoridrico.

Il reagente *Keller* è tipicamente impiegato per aumentare il contrasto tra le diverse fasi presenti nella microstruttura delle leghe di alluminio.

In figura 5.26 vengono riportati degli esempi dei provini ottenuti.



Zona 2



Zona 4

Figura 5.26 – *Provini delle sezioni metallografiche.*

Il microscopio ottico utilizzato per l'analisi microstrutturale dei campioni è il modello *DMC2900* di *Leica*, le immagini acquisite sono poi state elaborate con il software *Leica LAS 4.1*. L'analisi al microscopio ha consentito di indagare la microstruttura dei campioni.

Infine, sono state separate le superfici lavorate meccanicamente della zona 3 di specifici getti. I provini ottenuti sono stati lucidati per la verifica al microscopio ottico del criterio PK vigente in quelle superfici.

CAPITOLO 6

RACCOLTA DEI DATI SULLA QUALITÀ

6.1 Introduzione della procedura

La fase del progetto successiva alla produzione dei 322 campioni è stata un'approfondita raccolta di dati sulla qualità dei getti PAN0005.

Il modello predittivo ha la funzione di poter correlare matematicamente i dati raccolti in quest'analisi di qualità ai parametri estratti dai diversi sensori presenti nell'isola di pressocolata. Si è cercato di sviluppare una procedura più strutturata e oggettiva possibile per tutta la parte di controllo qualità. Lo si è fatto creando una scala di valutazione su cinque classi, da 1 a 5, per ogni tipologia di difetto considerato. La classe minore, ossia la classe 1, è relativa all'assenza del difetto o alla condizione meno gravosa rilevata, mentre la classe 5 corrisponde alla condizione peggiore di presenza del difetto.

Per standardizzare l'assegnazione delle classi ai difetti sono state definite delle immagini di riferimento. È stata fatta la scelta di tenere la stessa scala per il medesimo tipo di difetto indipendentemente dalla locazione nel getto. In modo da poter dunque individuare come si potrebbe spostare il difetto a seconda dei parametri di processo impostati.

Tutta la procedura qui presentata è stata applicata a ciascuno dei 322 campioni di PAN0005.

6.2 Controlli visivi

Il controllo visivo svolto su tutti i campioni è stato sviluppato secondo le seguenti fasi, le quali verranno successivamente descritte e dettagliate.

- FASE 1 – Misurazione del biscotto, analisi delle bave e tranciatura dei campioni.
- FASE 2 – Controllo dei quattro pin.
- FASE 3 – Controllo visivo generale su tutto il pezzo.
- FASE 4 – Acquisizione ed analisi di fotografie digitali dei getti.

- FASE 1

Prima del controllo visivo vero e proprio è stata fatta la misura del biscotto, l'analisi delle bave eventualmente presenti e la tranciatura dei campioni. È stato, infatti, necessario controllare le bave prima di tranciare i getti, poiché quest'ultima operazione poteva asportare parte del materiale in eccesso.

La misura del biscotto dei getti è stata fatta con un calibro digitale ed è servita per verificare che non ci fosse un'eccessiva variabilità sulla quantità di lega iniettata. In figura 6.1 viene presentata la curva di distribuzione normale dell'altezza del biscotto con una media di 45,9 mm ed una deviazione standard di 3,9 mm. In base ai valori riscontrabili durante la normale produzione di getti PAN0005, è possibile affermare che quei valori di media e deviazione standard validano la ripetibilità dell'altezza per i 322 campioni.

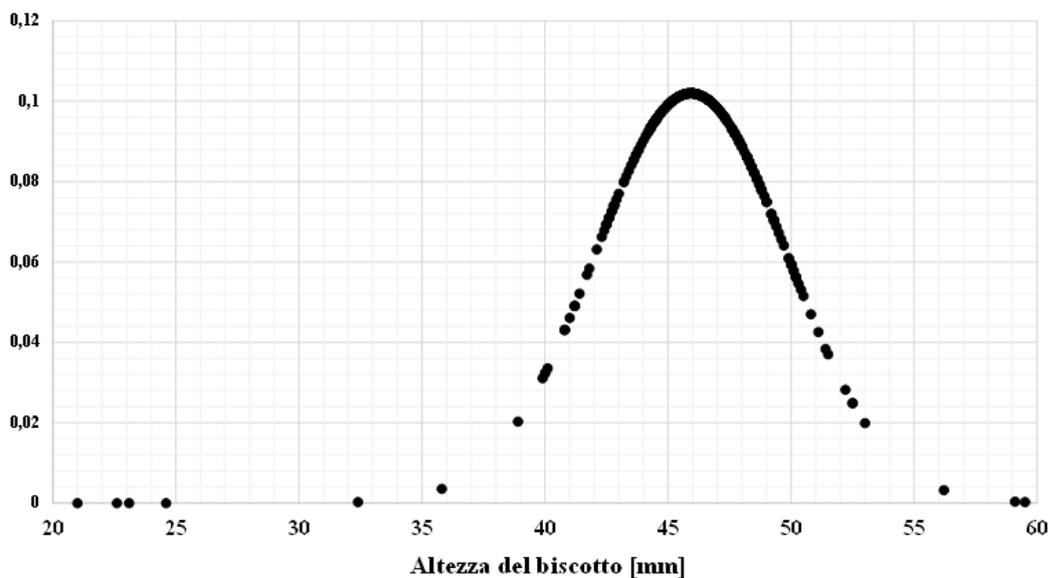


Figura 6.1 – Curva di distribuzione normale dell'altezza del biscotto.

Vengono ora riportati in tabella 6.1 i riferimenti usati per poter classificare su 5 classi il difetto bava, avente codice C 2.1 nella normativa EN 12258-1:20125. Per sintesi sono mostrate le immagini di riferimento per le classi 1,3 e 5. Le bave rilevate si sono tutte formate tra i carrelli mobili presenti nello stampo.

	<p>CLASSE 1: Assenza totale di bave.</p>
	<p>CLASSE 3: Bava non solo sui fori, ma anche sulla parte esterna del componente. Sporgenza della bava per una lunghezza di 1-2 cm.</p>
	<p>CLASSE 5: Bava che si estende per oltre 5 cm dalla superficie del pezzo.</p>

Tabella 6.1 –Riferimenti usati nella classificazione del difetto bava.

Si specifica che questo tipo di imperfezione non compromette la funzionalità del getto, nemmeno nella classe 5.

- FASE 2

I pin valutati sono quattro e numerati come in figura 6.2. Questi pin hanno la funzione di essere delle geometrie di riferimento per i macchinari che eseguono le successive fasi di montaggio della componentistica elettronica. La non conformità dei pin è tra le principali cause di scarto del componente PAN0005. Ecco perché è importante poter risalire alle condizioni di processo che minimizzano il verificarsi di questo problema.

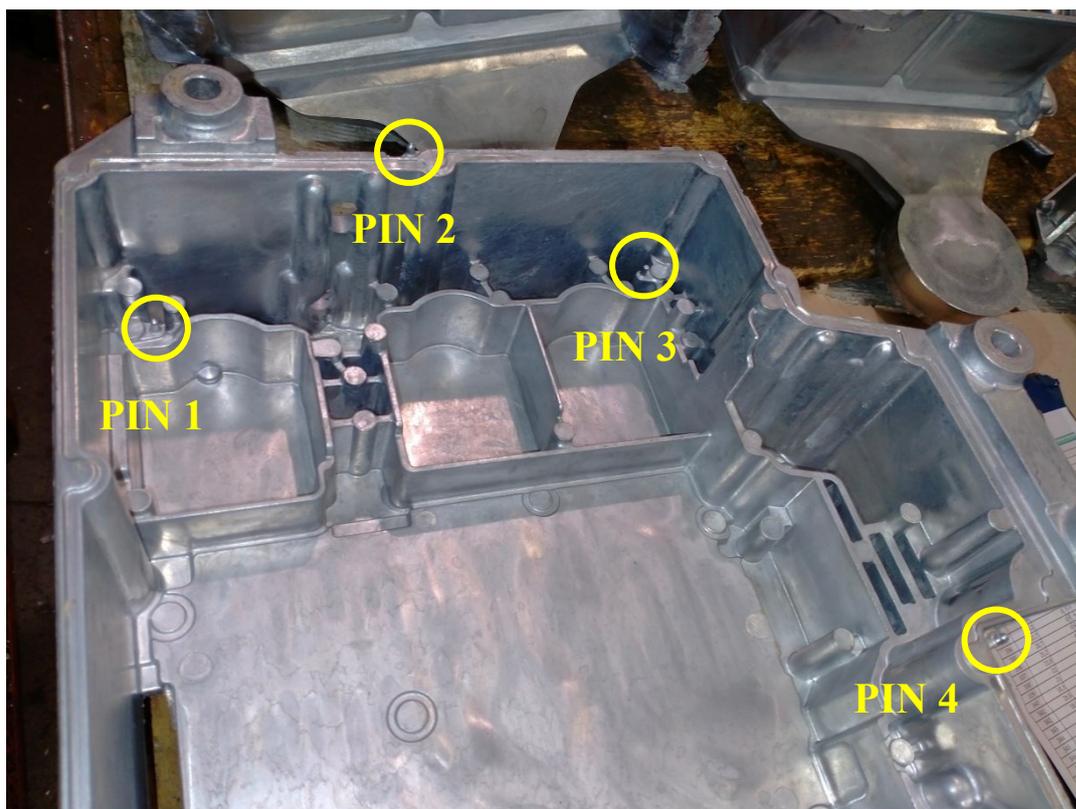


Figura 6.2 – Identificazione dei pin del getto PAN0005.

A ciascun pin è stato dato un giudizio di qualità su cinque classi, da 1 a 5, riportato nell'Appendice B. I riferimenti imposti sono esposti in tabella 6.2. All'interno dell'ambito di elaborazione e sviluppo della tesi si è deciso di assumere come soglia di accettabilità per i pin la classe 1.

Il pin incompleto è definibile come difetto classificato con il codice C 1.1 nella specifica normativa.

	<p>CLASSE 1: Assenza di imperfezioni sul pin.</p>
	<p>CLASSE 3: Pin completo nella sua forma ma con presenza di crepe lungo la sua lunghezza. Questo tipo di difetto si forma quando la lega che va a riempire la cavità dei pin è presumibilmente troppo fredda, dunque parzialmente solidificata. Ciò compromette l'integrità del pin.</p>
	<p>CLASSE 5: Pin non completo. Tipicamente si trova assenza della punta.</p>

Tabella 6.2 –Riferimenti usati nella classificazione dei pin incompleti.

- FASE 3

Viene svolto un controllo visivo generale su tutto il pezzo. Durante questa fase sono stati trovati e classificati questi tipi di difetti:

- Segni di estrazione.
- Segni di fatica termica.

Data la presenza sistematica e la natura di questi due difetti si esclude che possano essere influenzati dalla variazione dei parametri di processo. È stato deciso così di non considerarli nell'analisi e nell'elaborazione del modello predittivo.

- FASE 4

In questa fase del controllo qualità sono state acquisite le immagini in formato digitale delle quattro zone critiche dei getti. Le fotografie sono poi state visionate per ricercare eventuali difetti superficiali. Si specifica, però, che in fase di analisi delle immagini è stata rilevata la sola presenza di contaminazioni sulla superficie dei campioni, ossia l'imperfezione classificata con B 4.2 nella normativa EN 12258-1:20125. Questa tipologia di difetto non produce scarto nemmeno nella condizione più gravosa. Vengono di seguito riportati per completezza, in tabella 6.3, i riferimenti per la misura di questa imperfezione.

		CLASSE 1
		CLASSE 3
		CLASSE 5

Tabella 6.3 – Riferimenti usati per la classificazione delle contaminazioni.

6.3 Analisi radiografiche

La necessità di ridurre le porosità nei getti è fortemente sentita in tutto il settore della pressocolata, in particolare in ambiti più avanzati e spinti tecnologicamente come quello automotive. Come già evidenziato, data la delicata funzione del PAN0005 e degli altri getti che compongono la CCU, Panasonic ha imposto severi criteri di conformità sulle porosità accettabili nei componenti. Un'importante porzione degli scarti che si verificano durante il normale processo produttivo del PAN0005 è proprio dovuta al mancato rispetto dei limiti sulle porosità nei getti. Ecco, dunque, che poter correlare le porosità nei getti con le condizioni di processo risulta di fondamentale importanza per poter controllare e ridurre la presenza del difetto. In sede di progetto di tesi si è deciso di analizzare le quattro zone critiche del getto per tutti i più di trecento campioni. Sono queste le zone dei componenti, lo si ricorda, che dopo essere state lavorate meccanicamente sono soggette alla verifica dei limiti PK sulle porosità.

Per quest'analisi radiografica è stata utilizzata una macchina a raggi X di tipo industriale senza microfuoco. Col fine di velocizzare il processo ed ottenere immagini quanto più confrontabili possibile, è stato creato un programma automatico di acquisizione delle radiografie. La radiografia di ogni zona è stata rilevata con specifici valori di tensione, corrente e parametri di elaborazione dell'immagine così da avere la migliore qualità possibile.

Una volta completate le operazioni di acquisizione delle immagini sono stati scelti i riferimenti per poter valutare le porosità su 5 classi. In tabella 6.4 sono esposti i riferimenti impiegati nella valutazione delle porosità in zona 3.

L'assegnazione delle classi alle porosità nelle diverse zone è stata svolta attraverso un confronto qualitativo tra le relative radiografie e i riferimenti. Dalle radiografie si è cercato di valutare sia la densità di vuoti che le loro dimensioni.

Internamente a Fisep Srl si è deciso di scegliere una classe media di porosità pari a 2 come soglia di accettabilità dei componenti.

Come per gli altri difetti, anche la scala per le porosità è indipendente dalla posizione del difetto.

Una volta valutati tutti i campioni è stato possibile fare diverse considerazioni che verranno presentate nei capitoli successivi.

Le valutazioni delle porosità nelle quattro zone critiche dei 322 campioni sono riportate nell'Appendice B.

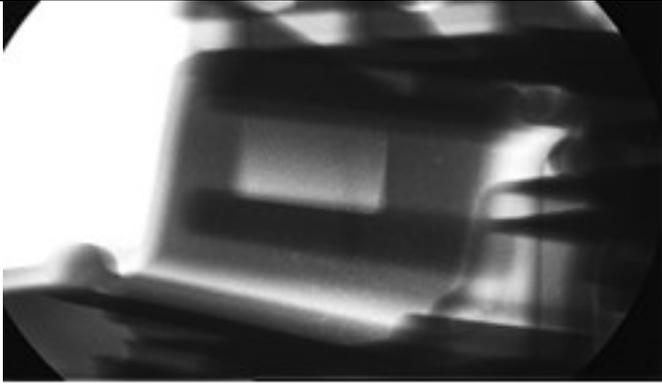
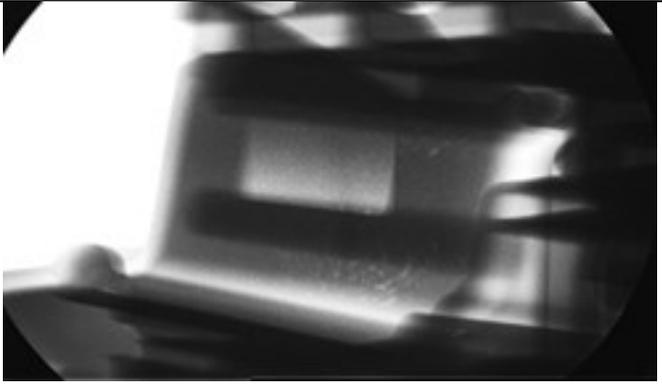
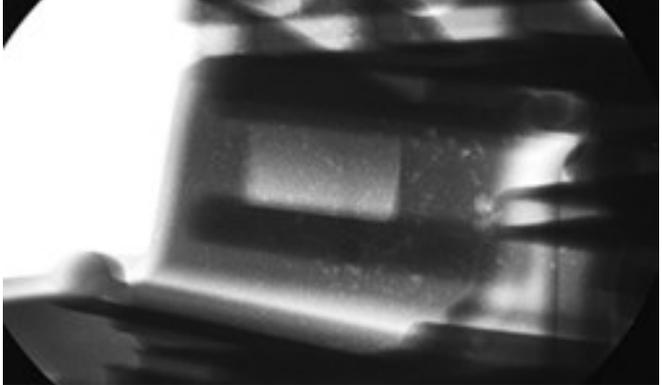
	<p>CLASSE 1</p>
	<p>CLASSE 3</p>
	<p>CLASSE 5</p>

Tabella 6.4 – Riferimenti usati per la classificazione delle porosità in zona 3.

CAPITOLO 7

ANALISI DEI RISULTATI

7.1 Correlazioni tra variabili di processo e qualità

Nei seguenti paragrafi sono descritte le indagini svolte con il supporto dei dati dei sensori per ricercare eventuali relazioni della qualità dei getti con i diversi parametri di processo. Questo studio ambisce a determinare da quali di questi parametri è maggiormente influenzata la qualità, ossia le variabili che possono essere dei parametri guida per il monitoraggio dell'isola di pressocolata digitalizzata.

I sensori valutati sono sia quelli già originariamente disponibili nella pressa sia quelli di Electronics GmbH aggiunti per digitalizzare l'impianto. Nello specifico:

- Con i dati relativi ai sensori della pressa sono stati considerati tutti i 322 campioni prodotti.
- I dati dei sensori aggiuntivi sono invece relativi a 120 getti lavorati e testati a tenuta, scelti tra i 322 campioni.

Tra i 322 campioni ne sono stati scelti 120 per essere lavorati meccanicamente e testati a tenuta in New Olef Srl. Ciascuno dei 120 campioni è relativo ad ogni design di parametri impiegato nel DoE. Con ogni design di parametri, però, sono stati prodotti almeno due campioni. Il criterio di valutazione adottato per la scelta del campione all'interno di un singolo design è stato quello di selezionare il getto che presentava caratteristiche del profilo di iniezione misurate dalla pressa più simili a quelle nominali. Ossia quei campioni che hanno le minori differenze tra i valori misurati e quelli teorici di corsa di prima fase, velocità di prima fase e velocità massima di seconda fase.

7.1.1 Difetto porosità

Le porosità sono tra i difetti più comuni ed ostici nel settore della pressocolata. Ecco perciò che comprendere come ridurre la presenza di questo difetto è molto importante, soprattutto per una produzione di getti con requisiti di tenuta come quello in esame.

Il punto di partenza di questo studio sono stati i dati di qualità ottenuti dall'indagine radiografica svolta presso Fisep Srl. Va ricordato che a ciascuno dei 322 pezzi è stata assegnata una classe di valutazione delle porosità presenti da 1 a 5, per ognuna delle quattro zone critiche.

In prima analisi è stata studiata l'influenza sulle porosità della temperatura impostata sul forno di mantenimento della pressa. Si specifica che l'unica differenza tra i designs di parametri nei due giorni di campionatura è stata proprio questa temperatura. Più precisamente, nel giorno 1 la temperatura impostata nel forno era di 675 °C, mentre nel giorno 2 era di 705 °C.

In figura 7.1 viene mostrato l'andamento delle porosità medie nelle quattro zone critiche di tutti i 322 campioni a seconda del giorno di campionatura.

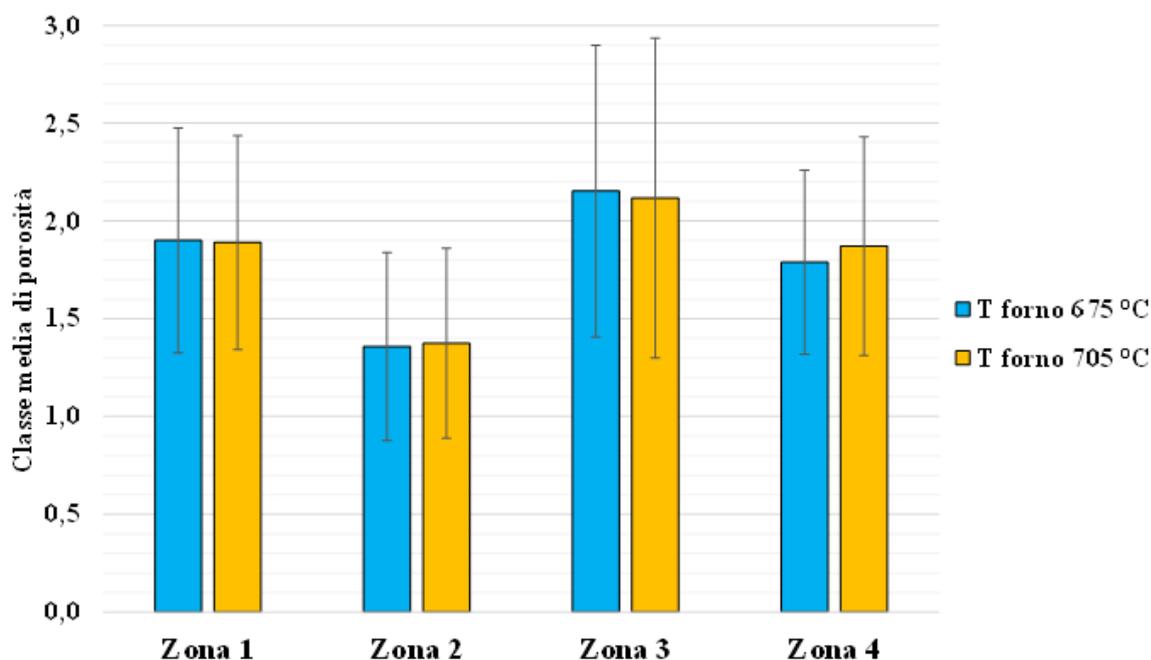


Figura 7.1 – Andamento della porosità media a seconda della temperatura del forno di mantenimento.

Si osserva come le due differenti temperature lascino pressoché inalterate queste valutazioni delle classi medie. Questo fenomeno può essere spiegato con i dati riportati nelle tabelle 7.1 e 7.2, in cui sono presenti i valori medi delle temperature massime rilevate dai sensori per i 120 campioni. Nelle tabelle è stata fatta una suddivisione in base alla temperatura del forno e ai tempi di azione del lubrificante.

Giorno 1 - T forno 675 °C								
[°C]	Sens. Temp. 1		Sens. Temp. 2		Sens. Temp. 3		Sens. Temp. 4	
	T_max 1	Dev. St. 1	T_max 2	Dev. St. 2	T_max 3	Dev. St. 3	T_max 4	Dev. St. 4
Spray 7,5 s	493	1,8	513	1,7	509	3,2	467	1,5
Spray 5 s	491	2,1	520	2,1	509	2,5	471	1,3
[°C]	Sens. Temp. 5		Sens. Temp. 6		Sens. Temp. 7			
	T_max 5	Dev. St. 5	T_max 6	Dev. St. 6	T_max 7	Dev. St. 7		
Spray 7,5 s	474	3,2	489	1,8	493	3,0		
Spray 5 s	478	2,4	494	2,7	497	2,0		

Tabella 7.1 – Valori medi delle temperature massime rilevate dalle termocoppie nel giorno 1 di campionatura.

Giorno 2 - T forno 705 °C								
[°C]	Sens. Temp. 1		Sens. Temp. 2		Sens. Temp. 3		Sens. Temp. 4	
	T_max 1	Dev. St. 1	T_max 2	Dev. St. 2	T_max 3	Dev. St. 3	T_max 4	Dev. St. 4
Spray 7,5 s	493	1,7	513	2,3	508	4,1	467	1,7
Spray 5 s	494	1,8	522	2,9	512	2,5	472	1,5
[°C]	Sens. Temp. 5		Sens. Temp. 6		Sens. Temp. 7			
	T_max 5	Dev. St. 5	T_max 6	Dev. St. 6	T_max 7	Dev. St. 7		
Spray 7,5 s	478	2,0	488	1,4	489	4,6		
Spray 5 s	483	2,4	497	1,8	499	1,9		

Tabella 7.2 – Valori medi delle temperature massime rilevate dalle termocoppie nel giorno 2 di campionatura.

Analizzando i dati presenti in queste tabelle si può dedurre che le due temperature del forno di mantenimento, 675 e 705°C, generano una ridotta variabilità sulle temperature massime rilevate. Valutando il singolo sensore si notano, infatti, pochi gradi di differenza sia tra giorno 1 e giorno 2, sia tra le rilevazioni con lubrificazione lunga e corta. La variabilità massima è stata riscontrata sulla termocoppia 7 il secondo giorno di campionatura, ed è relativa ad una differenza di 10 °C.

Tuttavia è stato visto, come presentato nell'Appendice B, che gli unici campioni ad aver ricevuto una valutazione di classe 1 su tutte le quattro zone sono stati prodotti il giorno 2, quindi con l'impostazione di temperatura più alta. Ciò porta a considerare la temperatura di 705 °C maggiormente efficace per l'ottenimento di getti con meno porosità rispetto alla temperatura di 675 °C.

In tabella 7.3 è stata valutata la temperatura del forno di mantenimento insieme alle due condizioni di lubrificazione impiegate. In tabella 7.3 è visibile la distribuzione delle classi del difetto per le quattro zone critiche di tutti i campioni prodotti.

GIORNO 1 - T forno 675 °C						
Spray		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
7,5 s	Zona 1	17,6%	70,3%	10,8%	1,4%	0,0%
	Zona 2	74,3%	25,7%	0,0%	0,0%	0,0%
	Zona 3	18,9%	63,5%	13,5%	1,4%	2,7%
	Zona 4	12,2%	83,8%	4,1%	0,0%	0,0%
5 s	Zona 1	24,7%	66,2%	9,1%	0,0%	0,0%
	Zona 2	54,5%	45,5%	0,0%	0,0%	0,0%
	Zona 3	10,4%	58,4%	27,3%	3,9%	0,0%
	Zona 4	35,1%	63,6%	1,3%	0,0%	0,0%
GIORNO 2 - T forno 705 °C						
Spray		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
7,5 s	Zona 1	3,8%	79,5%	15,4%	1,3%	0,0%
	Zona 2	66,7%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%
	Zona 3	3,8%	51,3%	35,9%	7,7%	1,3%
	Zona 4	3,8%	82,1%	12,8%	1,3%	0,0%
5 s	Zona 1	34,4%	63,4%	2,2%	0,0%	0,0%
	Zona 2	59,1%	40,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Zona 3	34,4%	55,9%	7,5%	1,1%	1,1%
	Zona 4	37,6%	58,1%	4,3%	0,0%	0,0%

Tabella 7.3 – Distribuzione delle classi di porosità al variare di temperatura del forno e durata della lubrificazione.

Si nota come riducendo la durata della fase di spruzzatura del lubrificante si ha in generale un'influenza positiva sulla presenza di porosità nelle quattro zone. Nello specifico:

- *Zona 1.* Con Spray impostato a 5 s il massimo livello di porosità riscontrato passa dalla classe 4 alla classe 3 in entrambe le condizioni di temperatura. Inoltre, nei due giorni si evidenziano importanti aumenti di getti valutati con la classe 1, in particolare nel giorno 2 dove i campioni passano da circa il 4% al 34%.
- *Zona 2.* In questa zona passando da 7,5 a 5 s di Spray si è verificata una riduzione della percentuale di getti di classe 1, per entrambi i giorni di campionatura. Essa, però, è la zona che presenta sempre la qualità migliore. Si ritiene così trascurabile questo debole peggioramento.
- *Zona 3.* Riducendo la lubrificazione nel giorno 1 è stato evitato il raggiungimento di porosità di classe 5. È stato però rilevato un aumento dei campioni aventi la classe 3 in questa zona critica, da circa il 14% al 27%. Sono stati invece riscontrati importanti

miglioramenti della qualità nel giorno 2, infatti, i getti di classe 1 passano da circa il 4% al 34%.

- *Zona 4.* Si ha un importante incremento del numero di getti di classe 1, dal 12% al 35% il giorno 1 e dal 4% al 38% il giorno 2. Inoltre, con la temperatura a 705 °C il massimo livello di porosità riscontrato passa dalla classe 4 alla classe 3.

Complessivamente le condizioni migliori in termini di porosità sono state rilevate con la temperatura del forno di mantenimento impostata a 705 °C e una lubrificazione di 5 s. È, infatti, questa combinazione dei due parametri che ha restituito il maggior numero di campioni aventi porosità di classe 1 nelle zone 1, 3 e 4. Come già evidenziato, si ritiene trascurabile il risultato nella zona 2 poiché è quella in cui è stata registrata la migliore qualità.

Il fatto che una lubrificazione più corta porti a dei miglioramenti in termini di porosità può essere dovuto ad un conseguente aumento della temperatura superficiale dello stampo prima dell'ingresso della lega. In questo modo si ritarda la solidificazione del getto, permettendo al pistone di lavorare per più tempo durante la fase III [33].

Per un'ulteriore verifica di ciò si è deciso di studiare i dati dei sensori di temperatura interni allo stampo. Nelle tabelle 7.4 e 7.5 sono esposte le temperature medie lette dalle 7 termocoppie dei 120 campioni prima dell'ingresso in cavità della lega fusa, ossia le temperature dei punti definiti TCx_1. Tali dati sono correlati alla temperatura a cui si stabilizza la superficie dello stampo dopo la fase di lubrificazione. I valori nelle tabelle sono stati ricavati facendo la media tra i campioni suddivisi in base alla temperatura del forno e al tempo di Spray.

Giorno 1 - T forno 675 °C								
[°C]	Sens. Temp. 1		Sens. Temp. 2		Sens. Temp. 3		Sens. Temp. 4	
	T_iniz 1	Dev. St. 1	T_iniz 2	Dev. St. 2	T_iniz 3	Dev. St. 3	T_iniz 4	Dev. St. 4
Spray 7,5 s	125	1,5	183	4,3	180	5,0	117	0,8
Spray 5 s	141	1,7	207	6,9	195	6,1	136	2,8
[°C]	Sens. Temp. 5		Sens. Temp. 6		Sens. Temp. 7			
	T_iniz 5	Dev. St. 5	T_iniz 6	Dev. St. 6	T_iniz 7	Dev. St. 7		
Spray 7,5 s	126	1,8	128	2,3	110	1,4		
Spray 5 s	155	6,3	147	3,2	140	3,7		

Tabella 7.4 – Temperature medie iniziali lette dalle termocoppie nel giorno 1 di campionatura.

Giorno 2 - T forno 705 °C								
[°C]	Sens. Temp. 1		Sens. Temp. 2		Sens. Temp. 3		Sens. Temp. 4	
	T_iniz 1	Dev. St. 1	T_iniz 2	Dev. St. 2	T_iniz 3	Dev. St. 3	T_iniz 4	Dev. St. 4
Spray 7,5 s	126	1,1	186	5,4	184	5,4	121	1,2
Spray 5 s	144	1,6	213	5,8	201	3,7	140	1,9
[°C]	Sens. Temp. 5		Sens. Temp. 6		Sens. Temp. 7			
	T_iniz 5	Dev. St. 5	T_iniz 6	Dev. St. 6	T_iniz 7	Dev. St. 7		
Spray 7,5 s	128	2,1	128	1,5	113	4,0		
Spray 5 s	164	5,4	151	2,7	147	3,0		

Tabella 7.5 – Temperature medie iniziali lette dalle termocoppie nel giorno 2 di campionatura.

Dalle tabelle 7.4 e 7.5 è possibile osservare come passando da 7,5 a 5 secondi di azione del lubrificante si ha un sistematico aumento di queste temperature. Nello specifico, si va da aumenti di 15 °C per la termocoppia 3 il giorno 1, fino a 36 °C nel sensore 5 il giorno 2. Risulta così lecito evidenziare una forte sensibilità della temperatura superficiale dello stampo ai tempi della fase di lubrificazione. In figura 7.2 è visibile una rappresentazione grafica dei dati esposti nelle tabelle 7.4 e 7.5. È così possibile notare come sia molto più significativo l'aumento di temperatura dovuto alla riduzione della lubrificazione, rispetto all'aumento dovuto ad una temperatura del forno di mantenimento di 705 °C.

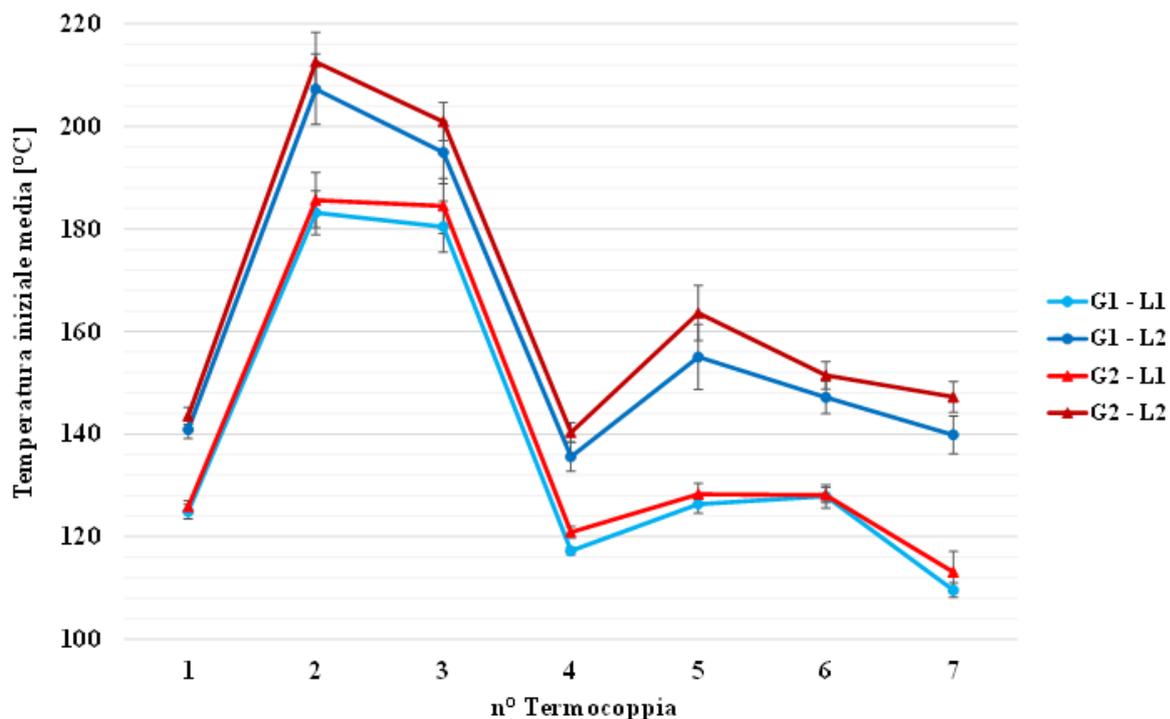


Figura 7.2 – Andamento delle temperature iniziali medie rilevate dalle sette termocoppie.

Sono stati osservati anche i risultati delle termocamere. In figura 7.3 vengono presi come esempio due campioni del giorno 2 appartenenti a due designs che differivano del solo tempo di lubrificazione. Nello specifico, il campione di codice 6-2 appartenente al design 72 (D72) con 7,5 s, ed il campione 101-2 del design 76 (D76) con lubrificazione a 5 s. Per completezza si riporta che questi due designs hanno velocità e corsa di prima fase rispettivamente di 0,1 m/s e 400 mm, e velocità massima di seconda fase di 4,8 m/s, tutti valori agli estremi del DoE.

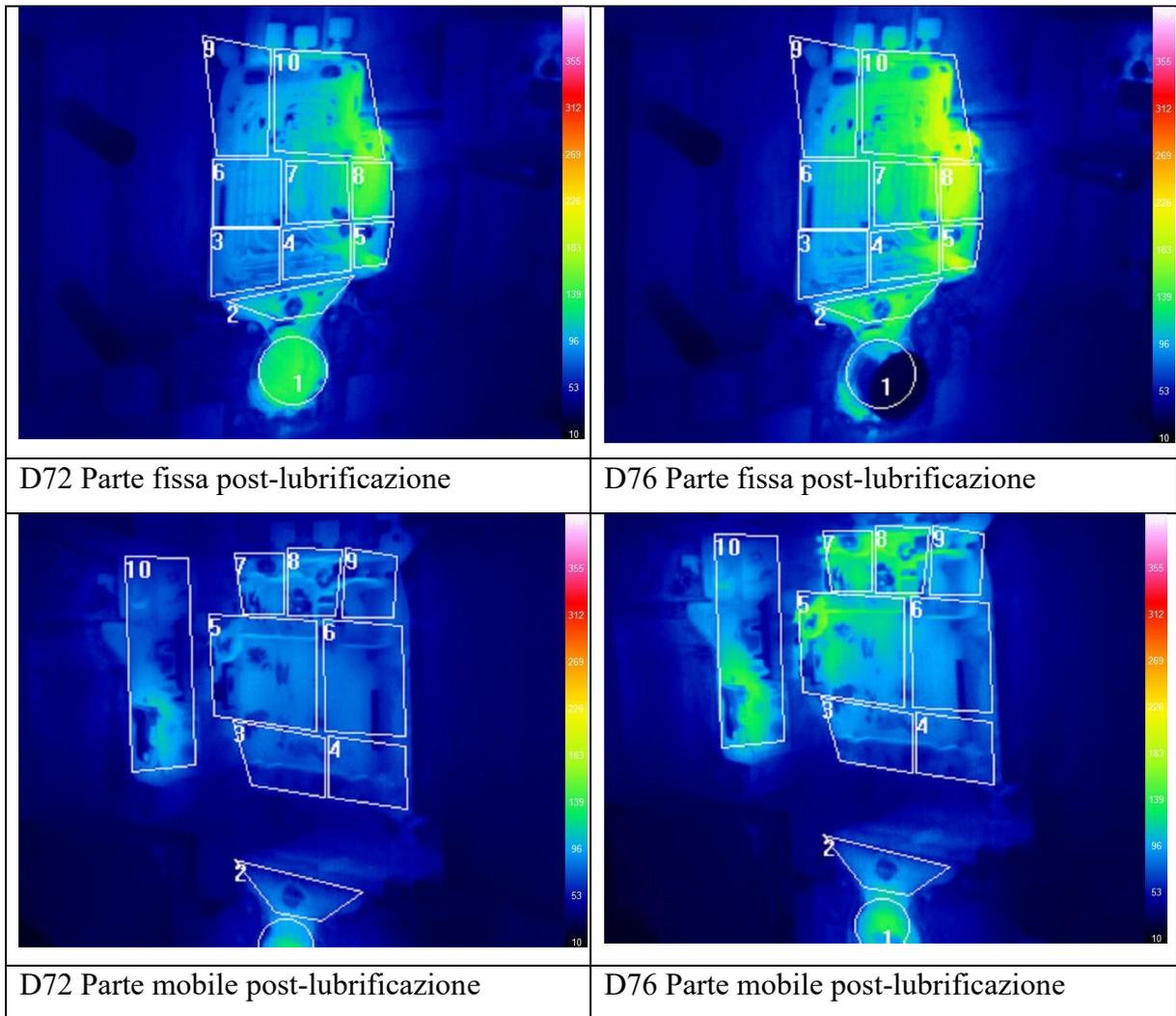


Figura 7.3 – Immagini della TTV post-lubrificazione di due campioni relativi alle due condizioni di lubrificazione.

In tabella 7.6 vengono riportati i valori massimi delle dieci ROI delle mappe termografiche visibili nella figura precedente. Avendo a disposizione due termocamere è stato possibile osservare questi valori per entrambe le parti dello stampo.

		ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8	ROI 9	ROI 10
P. FISSA [°C]	D72 (7,5 s)	204	186	152	185	204	162	188	220	164	222
	D76 (5 s)	175	209	163	226	253	180	231	261	187	265
P. MOBILE [°C]	D72 (7,5 s)	186	156	136	132	159	150	165	162	159	172
	D76 (5 s)	199	170	159	142	220	177	212	215	201	204

Tabella 7.6 – Temperature massime delle ROI, rilevate dalla TTV dopo lubrifica, dei campioni appartenenti ai designs 72 e 76.

Anche dai risultati delle termocamere sono rilevabili degli aumenti di temperatura su tutta la superficie dello stampo a seguito della riduzione della fase di lubrificazione.

Da quanto osservato finora si evince che uno studio mediante sensori sugli effetti del tempo di lubrificazione può risultare molto utile. Nel caso in esame, come esposto in tabella 7.3, si è visto che una lubrificazione ridotta tende a migliorare la qualità dei getti PAN0005 in termini di porosità. Una riduzione del tempo di lubrificazione porta poi a molteplici vantaggi. Tra questi, viene accorciato il tempo ciclo, si usa una minore quantità di liquido e si riduce la sollecitazione di fatica termica sullo stampo.

È stato poi approfondito l'effetto della lubrificazione e della temperatura del forno in zona 3, in quanto regione più critica per la maggiore presenza di porosità. In figura 7.4 vengono riportate le temperature iniziali del ciclo di iniezione dei 120 campioni rilevate dalla termocoppia numero 7. Questo sensore è quello posizionato in prossimità della zona 3. Nella figura seguente per G1 e G2 si intende primo e secondo giorno di campionatura, per L1 ed L2 una lubrificazione di rispettivamente 7,5 e 5 s.

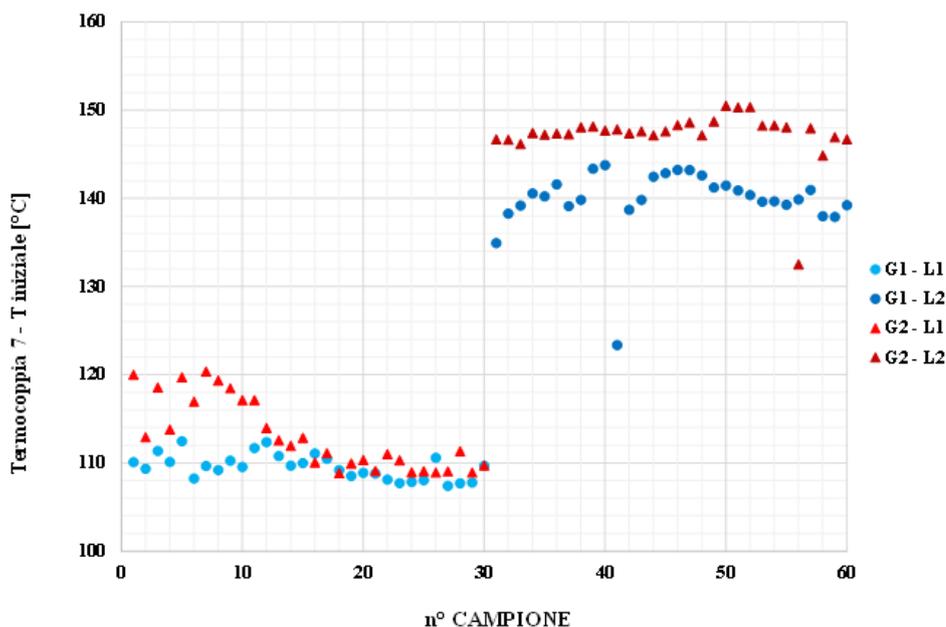


Figura 7.4 – Temperature iniziali rilevate dalla termocoppia 7.

Si nota che nella condizione che restituisce meno porosità, ossia una lubrificazione corta, sono stati registrati i valori più alti di temperatura. Altra conferma dell'ipotesi che una qualità migliore sia dovuta ad una fluidità maggiore del materiale.

Si specifica che gli andamenti discontinui della temperatura visibili in figura 7.4 sono dovuti ad un equilibrio termico instabile dello stampo, conseguenza dei continui cambiamenti dei parametri di processo durante la campionatura.

Successivamente l'analisi si è spostata sulla velocità massima raggiunta dal pistone durante la seconda fase. Si ricorda che a fronte del DoE suggerito da Enginsoft Spa si hanno tre valori di velocità impostati, ossia 4,8, 5,5 e 6,2 m/s.

In tabella 7.7 è stata fatta una distinzione tra i campioni con una valutazione media inferiore a 2 ed il resto. Presso Fisep Srl è stato deciso di assumere una classe media di 2 come soglia di riferimento indicativa di una produzione di PAN0005 a basso contenuto di porosità. Per quanto riguarda la dicitura utilizzata nella tabella 7.7 per VM_th si indica il valore di velocità massima in termini nominali, ossia quelli impostati sulla pressa, mentre per VM si fa riferimento al valore restituito dai sensori interni alla pressa.

Giorno 1 - T forno 675 °C					
Classe media di porosità	%VM_th = 4,8 m/s	%VM_th = 5,5 m/s	%VM_th = 6,2 m/s	VM MEDIA [m/s]	DEV. STD. [m/s]
≤ 2	23,7%	37,4%	38,9%	5,6	0,5
> 2	85,0%	15,0%	0,0%	4,9	0,2
Giorno 2 - T forno 705 °C					
Classe media di porosità	%VM_th = 4,8 m/s	%VM_th = 5,5 m/s	%VM_th = 6,2 m/s	VM MEDIA [m/s]	DEV. STD. [m/s]
≤ 2	21,1%	36,6%	42,3%	5,7	0,5
> 2	65,7%	31,4%	2,9%	5,1	0,3

Tabella 7.7 – Influenza della velocità massima di seconda fase sulla porosità media.

Come prima cosa si nota che circa il 40% dei getti con la classe del difetto più bassa è ottenuto da designs con velocità di 6,2 m/s, sia nel giorno 1 che nel giorno 2. Mentre circa il 37% con la velocità di 5,5 m/s. Condizione opposta invece per le classi di porosità più alte, più del 65% dei getti è relativo a velocità di 4,8 m/s. Passando poi ai valori medi di VM si ha 5,7 m/s per la condizione di qualità migliore, contro una VM media di circa 5 m/s per la peggiore.

Questi risultati sono concordi con quanto elaborato nelle tesi precedenti di Pantano [34] e Pegoraro [31], dove è stato visto su un campione ridotto di getti PAN0005 che le porosità si

presentano in entità minore nei set di produzione con la velocità massima di seconda fase definita a 6,5 m/s. Si può dunque pensare che per la produzione di PAN0005 con la pressa IP1450SC di Fisep Srl, per minimizzare le porosità, sia necessario impostare sulla curva di iniezione una velocità massima di 6,2 – 6,5 m/s. Probabilmente questa velocità garantisce un buon compromesso tra un riempimento veloce della cavità dello stampo e assenza di ulteriori turbolenze che potrebbero inglobare più aria nel liquido.

A conferma di questa ipotesi si hanno anche i dati dei getti peggiori in termini di porosità dei due giorni della campionatura. Come è esposto in tabella 7.8, i due campioni sono stati prodotti con le velocità VM più basse registrate.

	Codice campione	Classe di porosità				VM_th [m/s]	VM [m/s]
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4		
Giorno 1	43-1	4	2	5	3	4,8	4,64
Giorno 2	4-2	4	2	5	4	4,8	4,51

Tabella 7.8 – Velocità massime di seconda fase dei campioni con le classi di porosità più elevate.

In tabella 7.9 vengono invece esposti i risultati sulle velocità dei 12 campioni che hanno ottenuto un punteggio di classe 1 su tutte e quattro le zone critiche.

Giorno 2 - T forno 705 °C					
Classe media di porosità	%VM_th = 4,8 m/s	%VM_th = 5,5 m/s	%VM_th = 6,2 m/s	VM MEDIA [m/s]	DEV. STD. [m/s]
1	0,0%	16,7%	83,3%	6,2	0,3

Tabella 7.9 – Velocità massime di seconda fase dei campioni aventi classe di porosità media pari a 1.

Si osserva che 10 di questi, cioè l'83,3%, appartengono a set con VM_th di 6,2 m/s. Come già evidenziato questi 12 campioni sono stati prodotti nel giorno 2. È lecito ipotizzare che la combinazione di alte velocità durante la fase di riempimento e una temperatura più elevata della lega possa dar luogo a getti con basso contenuto di porosità. Questa combinazione porta a tempi minori d'iniezione e ad una maggiore fluidità del fuso, condizione che può migliorare il processo di intensificazione in fase III. Infatti, si dà più tempo all'azione del pistone che può così vincere vuoti e ritiri [33]. Inoltre, si ha che le forze di flusso scambiate tra la lega fusa e le pareti della camera d'iniezione e dello stampo sono proporzionali al quadrato della velocità.

Queste forze agiscono anche sui siti di nucleazione preferenziali per le porosità, destabilizzandole e migliorando così la qualità interna dei getti. [29].

Nelle figure 7.5 e 7.6 vengono riportati, per ciascuno dei 322 campioni, i valori puntuali del parametro VM e la relativa classe di porosità mediata tra le quattro zone critiche. I due grafici permettono di visualizzare l'andamento della qualità dei getti in termini di porosità al variare della velocità VM. In particolare si nota che oltre la soglia di 6 m/s è stato possibile ottenere quasi totalmente getti PAN0005 con una classe di porosità media inferiore, o uguale, a 2.

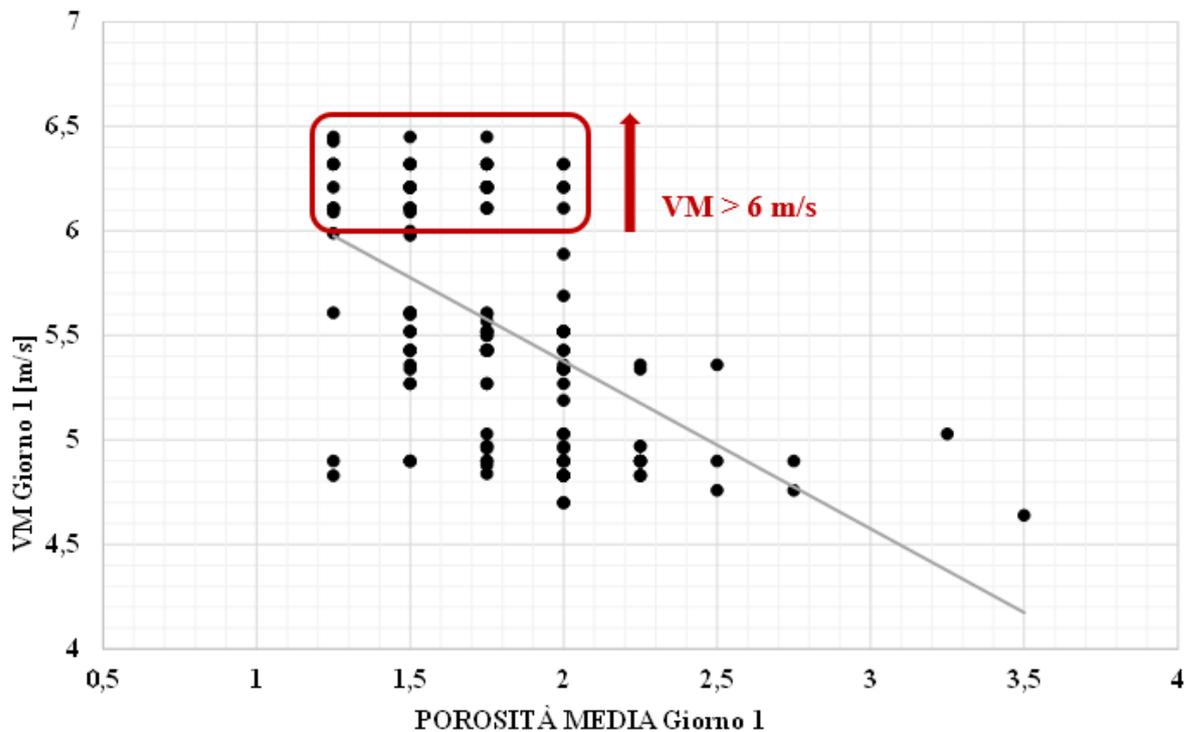


Figura 7.5 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 1.

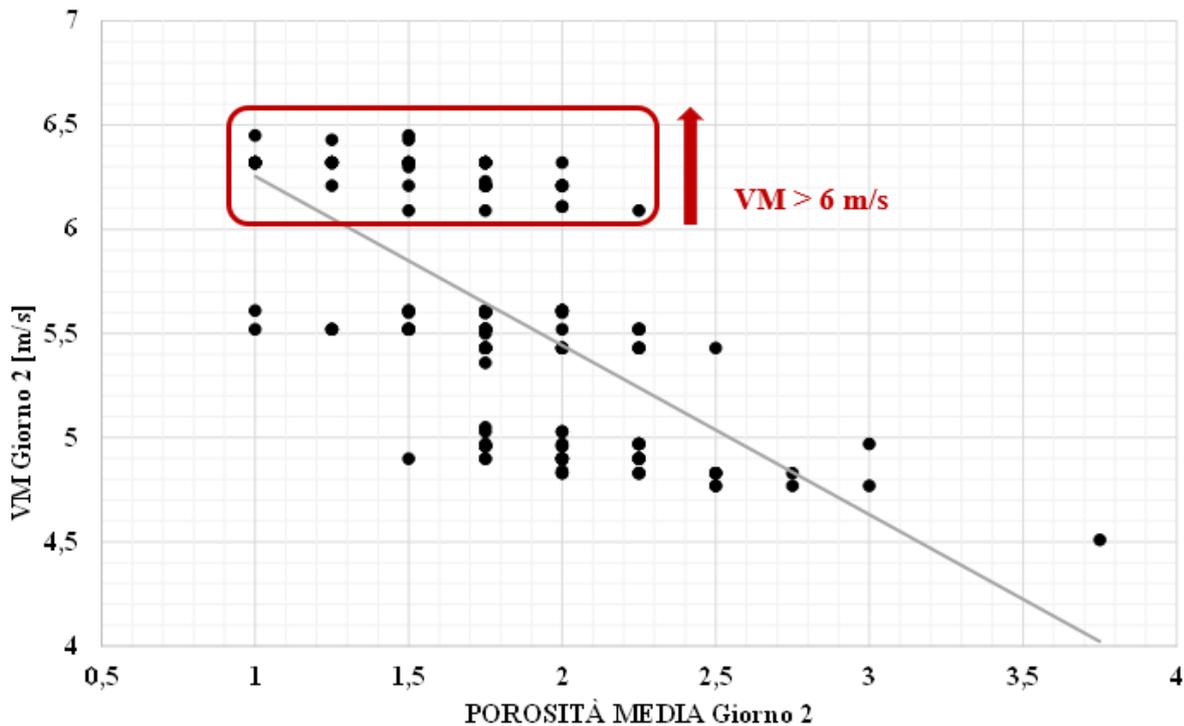


Figura 7.6 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 2.

A fronte di questi dati si ritiene corretto affermare che la velocità massima di seconda fase fornita dal sistema di misurazione interno alla pressa può essere ritenuta un parametro consultabile per produrre getti di buona qualità. Condizione ottenibile impostando nella pressa una velocità massima sul profilo d’iniezione di 6,2 m/s e verificando che vengano effettivamente mantenute velocità di picco superiori a 6 m/s. Occorre specificare, però, che è bene non spingersi oltre questi valori di velocità nella produzione dei getti. Infatti, velocità troppo elevate possono ridurre la vita utile dello stampo accelerando i fenomeni erosivi che la lega fusa ha sulla superficie della cavità

Precedentemente si è già parlato del ruolo che potrebbero avere i parametri integrali sulla qualità dei campioni. È ben noto che il profilo del moto del pistone ha, senza dubbio, una enorme influenza sulla qualità dei getti. A livello industriale, infatti, a fronte di un’anomala crescita di scarti durante la normale produzione, il profilo di iniezione è solitamente la prima variabile su cui gli addetti vanno ad agire. A tal scopo sono diverse le pubblicazioni in letteratura che vanno a correlare la qualità dei prodotti pressocolati con i parametri descrittivi del moto del pistone. Come spiegato in [35], spesso si considerano solo valori puntuali per descrivere le tre fasi del ciclo di iniezione. Ad esempio corse e velocità massime del pistone. Il problema del considerare dei parametri scalari relativi a grandezze puntuali è che si trascura il modo con cui questi vengono raggiunti e per quanto tempo il pistone permane a questi valori.

È per questo motivo che tra le variabili di processo da considerare nel modello predittivo si è scelto di includere anche i parametri integrali studiati in [29]: l'accelerazione quadratica media a_{RMS} , il lavoro del pistone in terza fase L_i ed E_f rappresentativo dell'energia associata alle forze di flusso.

L'estrazione di questi parametri dalle curve dei sensori è però complessa ed elaborata. Tra i parametri di processo che la pressa misura sono presenti T2 e C2, essi sono rispettivamente la durata e la corsa del pistone in seconda fase. È stato così definito il parametro A2.

$$A2 = \frac{C2}{T2^2} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Questo parametro è facilmente ottenibile dai dati forniti dalla pressa e può così essere analizzato in fase di monitoraggio delle variabili di processo anche nel caso in cui non siano presenti sensori aggiuntivi. Esso può essere visto come un parametro rappresentativo delle accelerazioni del pistone in seconda fase.

Nelle figure 7.7 e 7.8 sono visibili i punti delle coppie formate da A2 e le classi di porosità medie dei 322 getti.

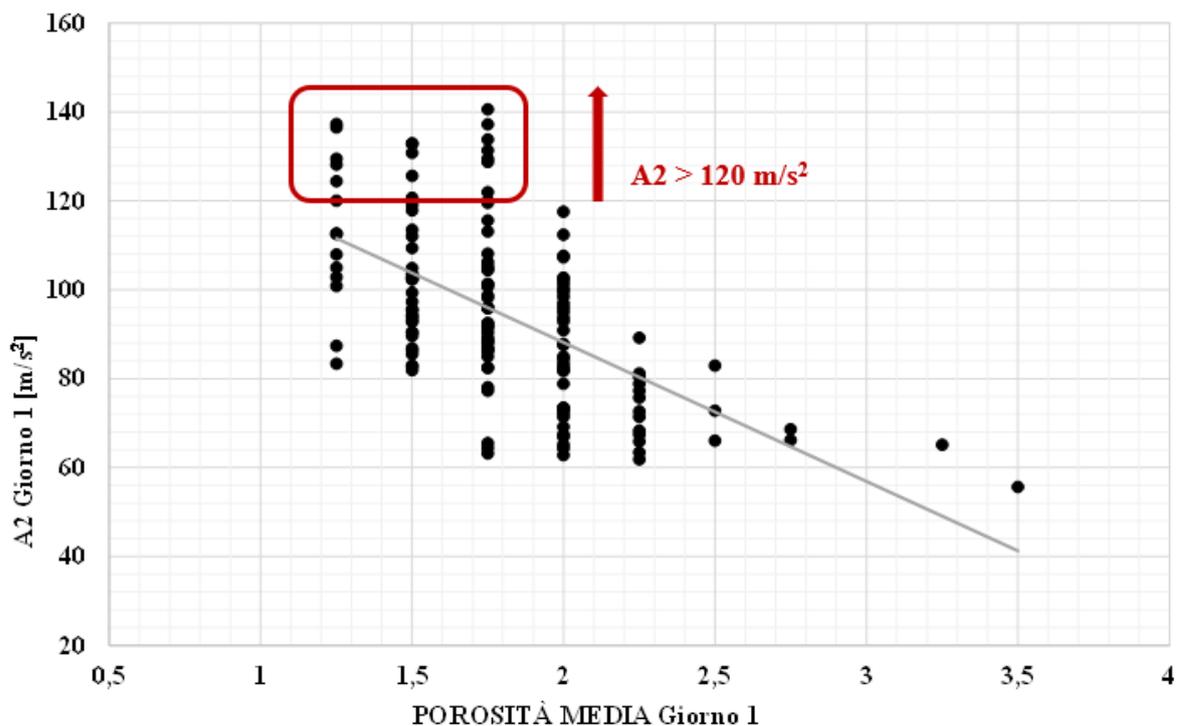


Figura 7.7 – Parametro A2 e porosità medie del giorno 1.

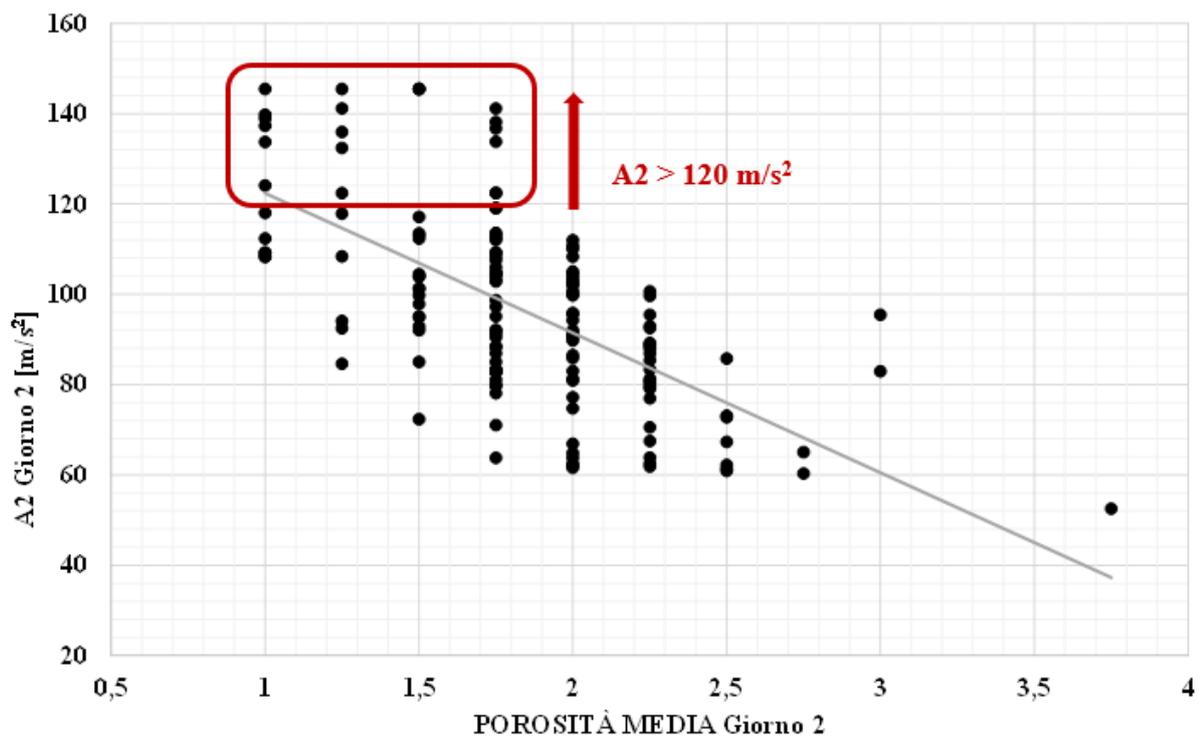


Figura 7.8 – Parametro A2 e porosità medie del giorno 2.

Questi grafici mostrano un'influenza del parametro A2 sulla porosità dei getti. Ciò che ci si aspetta è che con il parametro a_{RMS} , anch'esso rappresentativo dell'accelerazione subita dal pistone, ci sia una più forte relazione con la qualità dei campioni.

Il parametro a_{RMS} viene rilevato da sensori più performanti rispetto ai sensori della pressa, da cui sono restituiti C2 e T2, ed è inoltre ottenuto tramite un calcolo integrale.

È, però, interessante notare nelle figure 7.7 e 7.8 come a valori di A2 superiore ai 120 m/s^2 è stato possibile ottenere tutti getti con una porosità media inferiore alla classe 2, sia con la temperatura del forno di mantenimento impostata a 705 °C che a 675 °C . Si è poi visto che valori del parametro A2 superiori a 120 m/s^2 sono ottenibili impostando una corsa di prima fase C1 maggiore, o uguale, a 450 mm insieme ad una velocità VM di 6,2 m/s. In questo modo si riduce la corsa disponibile per la seconda fase forzando così la pressa ad imprimere accelerazioni maggiori al pistone per raggiungere la velocità massima impostata.

Anche con il parametro A2 è, dunque, possibile stabilire un valore di soglia per ottenere getti di buona qualità.

Sono poi stati analizzati i segnali forniti dal sensore di Electronics GmbH posto sul pistone della pressa come ulteriore verifica di quanto osservato finora. Per questa analisi sono stati scelti i 120 campioni rappresentativi dei designs della campionatura. Sono così state valutate le

classi medie di porosità al variare delle velocità massime registrate durante l'iniezione. Gli andamenti sono visibili in figura 7.9 e figura 7.10.

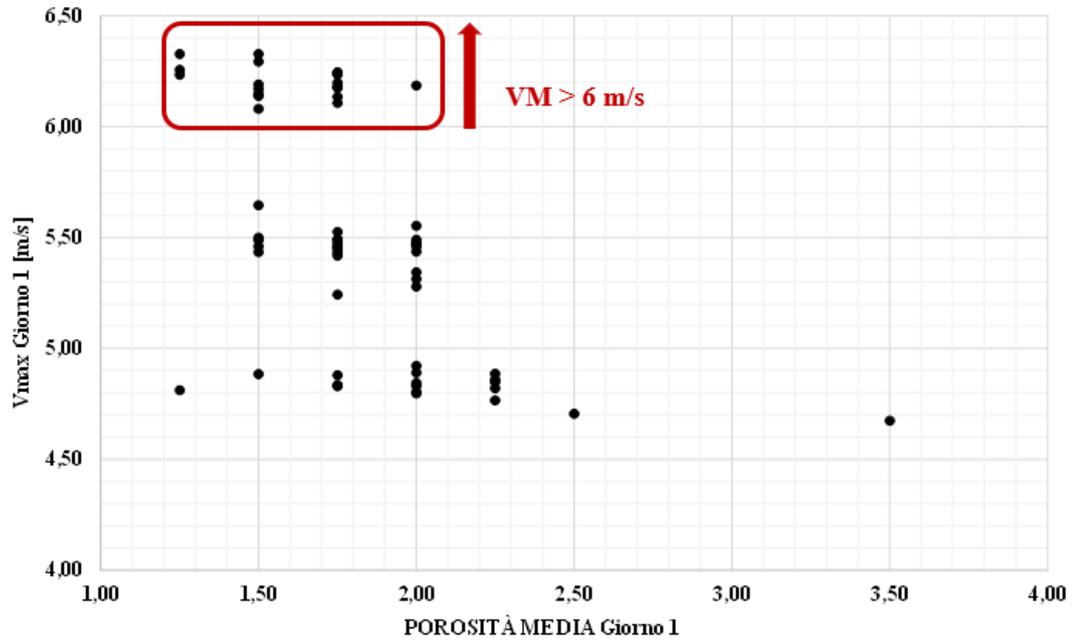


Figura 7.9 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 1. Rilevazioni effettuate dai sensori di Electronics GmbH.

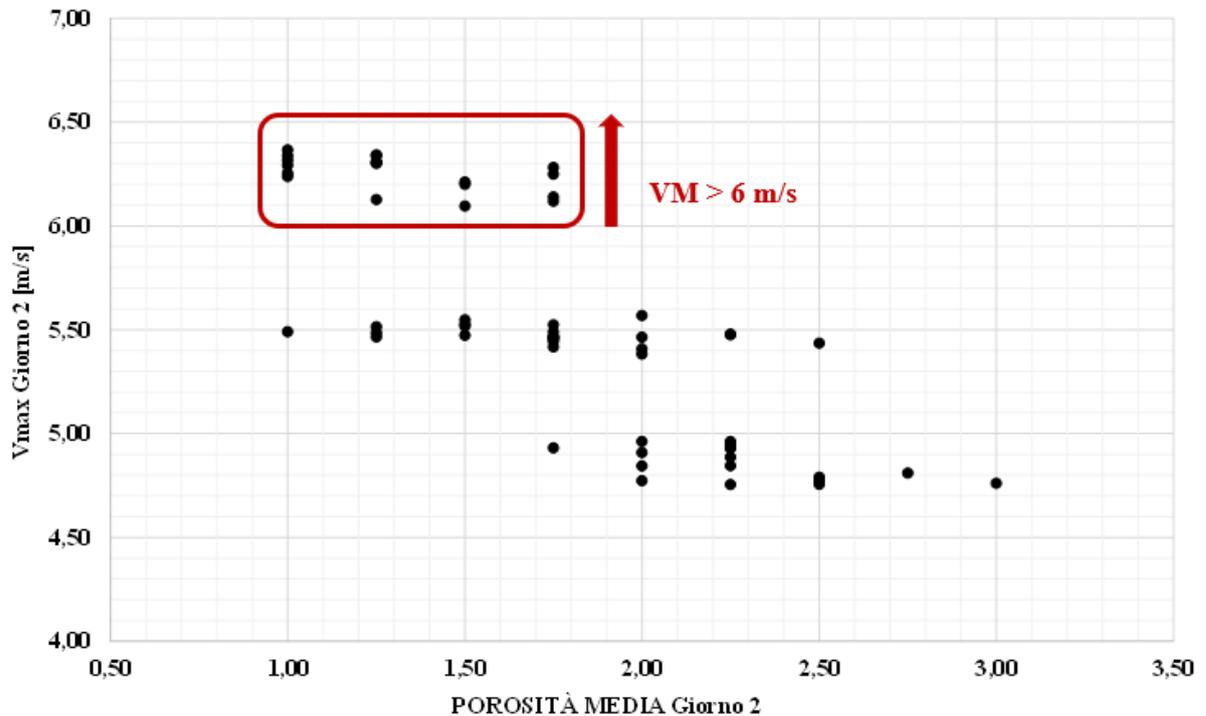


Figura 7.10 – Velocità massime di seconda fase e porosità medie del giorno 2. Rilevazioni effettuate dai sensori di Electronics GmbH.

Da questi due grafici si nota che è possibile trarre conclusioni analoghe allo studio basato sui risultati dei sensori della pressa. Infatti, anche dai sensori di Electronics GmbH si osserva che per velocità maggiori dei 6 m/s non sono stati riscontrati campioni con classe media di porosità maggiore di 2.

Successivamente è stata valutata un'eventuale influenza della velocità di fase I, nei valori: 0,10 – 0,15 – 0,20 e 0,25 m/s, sulle porosità dei 322 campioni. In figura 7.11 è possibile osservare i valori medi delle classi di porosità dei getti suddivisi in base al dato di V1 con cui sono stati prodotti e al giorno di campionatura. In figura si nota che nel giorno 1 passando da V1 pari a 0,10 m/s a 0,25 m/s c'è stato un aumento della porosità media di circa il 24%. Tuttavia, nel giorno 2 l'aumento è inferiore al 10% e la porosità media rilevata per V1 di 0,20 m/s è inferiore alla porosità media dei getti prodotti con V1 di 0,15 m/s. Complessivamente, dunque, si ritiene non significativa l'influenza della variazione di V1 nei quattro valori impiegati nel DoE.

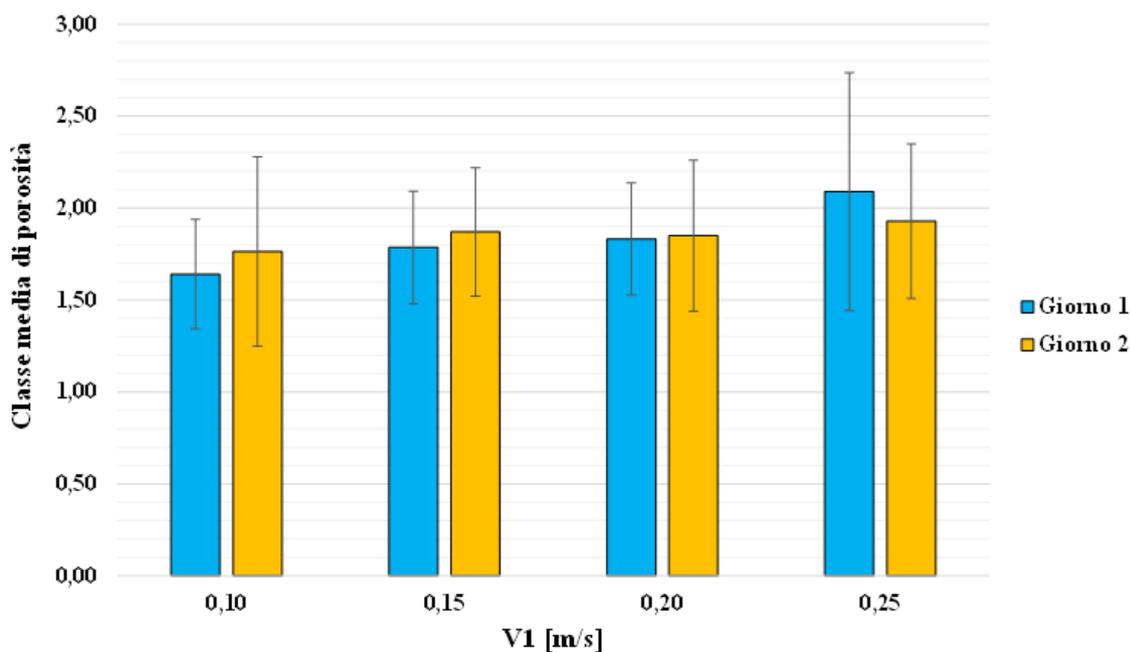


Figura 7.11 – Andamento della porosità media dei getti a seconda della velocità V1.

Come già specificato, la zona 3 del getto è quella maggiormente critica per le porosità presenti. Si è così pensato di approfondire la ricerca di eventuali parametri di processo tramite cui è possibile controllare la presenza di vuoti in questa regione del getto.

I risultati trovati sono esposti nelle figure 7.12 e 7.13. In queste figure sono rappresentati valori medi dei parametri VM e A2. La media è stata fatta suddividendo i 322 campioni in base alla classe di porosità in zona 3 e al giorno di produzione.

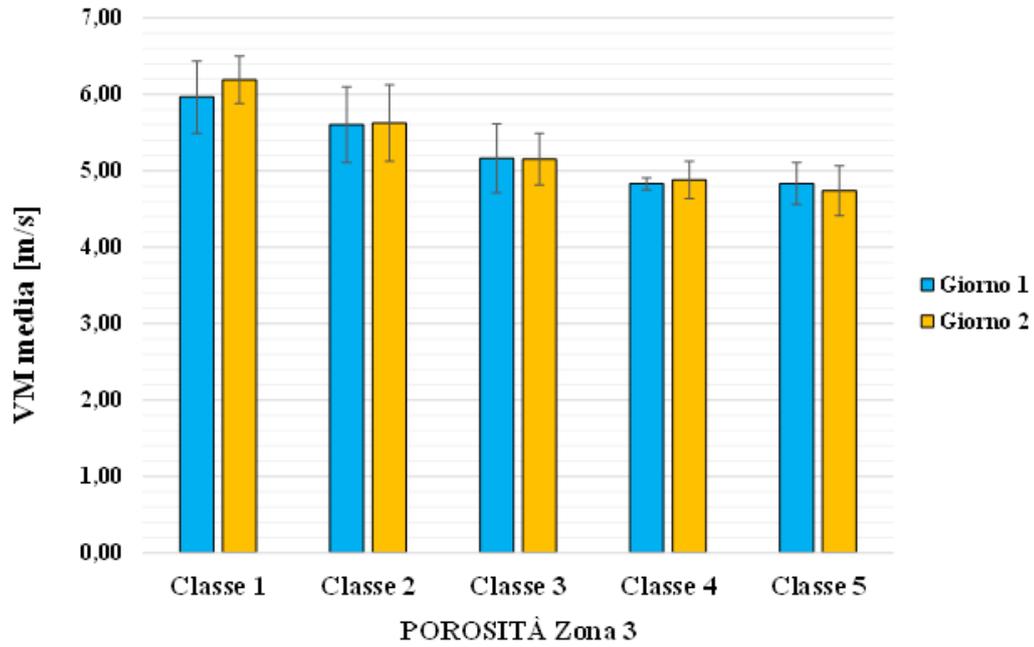


Figura 7.12 – VM media dei getti suddivisi in base alla classe di porosità in zona 3.

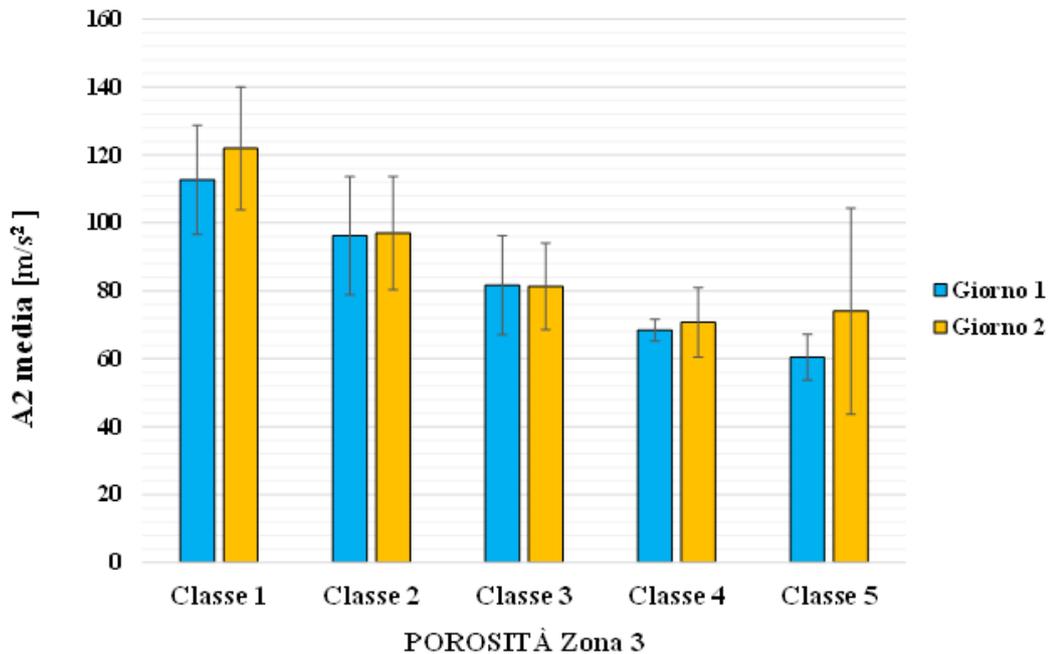


Figura 7.13 – A2 medio dei getti suddivisi in base alla classe di porosità in zona 3.

È possibile notare che mediamente i valori dei parametri VM e A2 decrescono al crescere della classe del difetto in questa zona. Questo comportamento richiama quello osservato con la classe media di porosità dei getti.

7.1.2 Pin incompleto e altri difetti

In questa parte della tesi verrà svolta una ricerca su quali parametri di processo possono essere influenti sulla qualità dei pin del getto PAN0005. Si ricorda che questi pin sono delle geometrie di riferimento per i macchinari che assemblano le parti elettroniche sui getti lavorati. Ecco, quindi, che un pin incompleto può causare seri problemi sui successivi passaggi del processo produttivo. Sono così state ricercate le condizioni che hanno portato ad avere getti con tutti e quattro i pin valutati con la classe 1. La classe media dei pin pari a 1 è stata assunta come soglia di riferimento per l'accettabilità dei componenti.

Come per le zone critiche del getto, anche tra i quattro pin ne esistono di maggiormente soggetti al difetto. Nello specifico, il pin 3 è l'unico ad avere raggiunto la classe 5, quindi un grave mancato riempimento della geometria. Al contrario, il pin 4 sembra essere insensibile alle variazioni dei parametri di processo poiché è sempre stato valutato con la classe 1.

Come prima cosa viene approfondito l'effetto della temperatura del forno di mantenimento in figura 7.14.

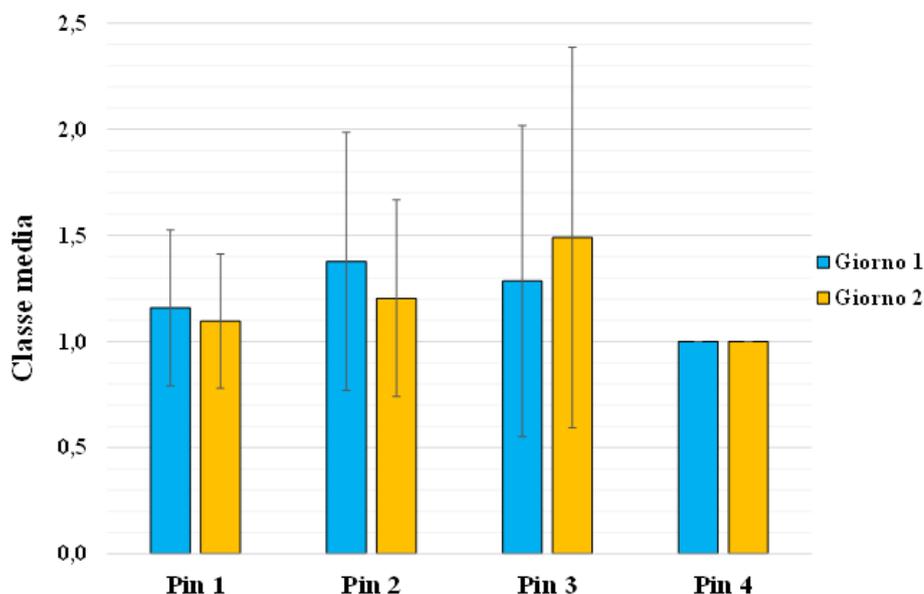


Figura 7.14 – Andamento della classe media dei quattro pin in funzione della temperatura del forno di mantenimento.

Nella variazione della temperatura del forno da 675 °C a 705 °C, si nota una riduzione della classe media dei pin 1 e 2, si ha invece un aumento della classe media per il pin 3. Si è deciso di valutare l'effetto della lubrificazione insieme alla temperatura del forno di mantenimento, come mostrato in tabella 7.10.

GIORNO 1 - T forno 675 °C						
Spray		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
7,5 s	Pin 1	81,1%	18,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Pin 2	70,3%	21,6%	6,8%	1,4%	0,0%
	Pin 3	83,8%	9,5%	1,4%	4,1%	1,4%
	Pin 4	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5 s	Pin 1	87,0%	13,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Pin 2	66,2%	31,2%	2,6%	0,0%	0,0%
	Pin 3	81,8%	11,7%	3,9%	2,6%	0,0%
	Pin 4	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GIORNO 2 - T forno 705 °C						
Spray		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
7,5 s	Pin 1	91,0%	9,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Pin 2	74,4%	21,8%	3,8%	0,0%	0,0%
	Pin 3	64,1%	16,7%	15,4%	1,3%	2,6%
	Pin 4	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5 s	Pin 1	91,3%	7,5%	1,3%	0,0%	0,0%
	Pin 2	90,0%	8,8%	1,3%	0,0%	0,0%
	Pin 3	78,8%	11,3%	5,0%	5,0%	0,0%
	Pin 4	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabella 7.10 – Distribuzione delle classi dei pin al variare di temperatura del forno e durata della lubrificazione.

Dalla tabella è possibile osservare quanto segue:

- *Pin 1.* Riducendo la lubrificazione aumentano i pin di classe 1 del giorno 1 mentre restano pressoché invariati il giorno 2.
- *Pin 2.* Il giorno 1, con Spray a 5 s, si ha una lieve riduzione dei pin di classe 1 dal 70% al 66% a fronte, però, della riduzione della classe massima da 4 a 3. Invece, con la temperatura del forno impostata a 705 °C, una riduzione della durata della lubrificazione ha portato i pin 2 di classe 1 dal 74% al 90%.
- *Pin 3.* Con Spray di 5 s si è evitato il raggiungimento della classe 5 e il giorno 2 i getti con pin 3 di classe 1 passano dal 64% al 79%.

Valutando questi risultati complessivamente, si ritiene positiva l'influenza della riduzione del tempo di lubrificazione sulla qualità dei pin. Inoltre, nella combinazione con Spray di 5 s e temperatura di 705 °C è stata osservata, nell'insieme, la maggior quantità di getti con pin di classe 1. Come già visto, un tempo di 5 secondi di Spray favorisce una più alta temperatura superficiale dello stampo. Questa condizione può aver così contribuito a mantenere una fluidità più elevata della lega ed aver così permesso di riempire meglio la sottile cavità dei pin.

Un'ulteriore conferma arriva dai risultati delle termocamere. In tabella 7.11 si vede come la temperatura massima della ROI 7 della parte mobile è tra le più influenzate dal tempo di lubrificazione. I dati delle acquisizioni post-lubrificazione sono relativi ai campioni già esposti, ossia quelli appartenenti ai designs 72 e 76. La ROI 7 è quella che include il pin 3 per il quale passando ad una lubrificazione più breve si evita il raggiungimento della classe 5.

		ROI 1	ROI 2	ROI 3	ROI 4	ROI 5	ROI 6	ROI 7	ROI 8	ROI 9	ROI 10
P. MOBILE [°C]	D72 (7,5 s)	186	156	136	132	159	150	165	162	159	172
	D76 (5 s)	199	170	159	142	220	177	212	215	201	204
	Δ tra D76 e D72	14	15	23	10	61	27	47	54	42	33

Tabella 7.11 – Temperature massime delle ROI, rilevate dalla TTV dopo lubrificazione, dei campioni appartenenti ai designs 72 e 76.

Come per le porosità, anche i pin incompleti si presentano in maniera ridotta con velocità massime di seconda fase più elevate, come esposto in tabella 7.12. In questa tabella sono stati isolati i getti con tutti e quattro i pin di classe 1.

Giorno 1 - T forno 675 °C					
Classe media pin	%VM_th=4,8 m/s	%VM_th=5,5 m/s	%VM_th=6,2 m/s	VM MEDIA [m/s]	DEV. STD. [m/s]
=1	24,3%	33,8%	41,9%	5,6	0,6
>1	39,0%	35,1%	26,0%	5,4	0,6
Giorno 2 - T forno 705 °C					
Classe media pin	%VM_th=4,8 m/s	%VM_th=5,5 m/s	%VM_th=6,2 m/s	VM MEDIA [m/s]	DEV. STD. [m/s]
=1	19,4%	38,7%	41,9%	5,7	0,5
>1	47,7%	30,8%	21,5%	5,3	0,6

Tabella 7.12 – Influenza della velocità massima di seconda fase sulla qualità dei pin.

In tabella 7.12 si nota che in entrambi i giorni di campionatura i getti con tutti i pin in perfette condizioni sono stati prodotti per la maggior parte con la velocità massima di seconda fase più alta. Condizione opposta, invece, per i getti con classe media maggiore di uno.

Sono poi stati approfonditi gli effetti della velocità VM sulla qualità del pin 3, l'unico ad aver raggiunto la classe 5. Come è visibile in figura 7.15, i pin 3 valutati con la classe 1 sono relativi a getti prodotti con la velocità VM mediamente più elevata.

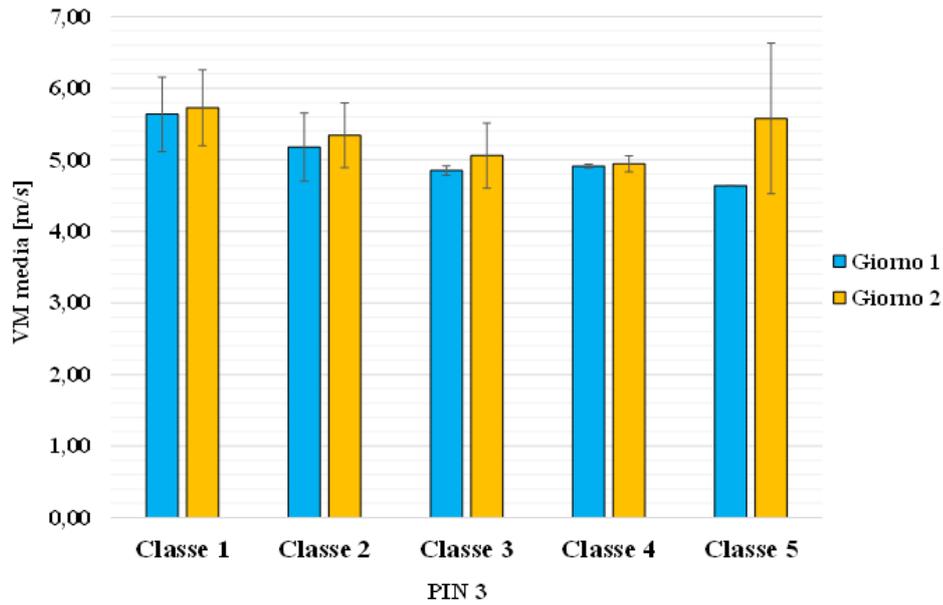


Figura 7.15 – VM media dei getti suddivisi in base alla classe del pin 3.

Si sottolinea che il dato anomalo sui pin di classe 5 del giorno 2 è dovuto ad un ridotto numero di campioni, tra i quali è presente un getto prodotto con velocità di 6,2 m/s.

Successivamente, è stata valutata la relazione tra il parametro A2 e la qualità dei pin. Come si nota dalle figure 7.16 e 7.17, l'effetto di questo parametro sulla qualità dei pin è meno marcato rispetto alla presenza di porosità nelle zone critiche del getto PAN0005. Si rimanda a quanto esposto nelle figure 7.7 e 7.8.

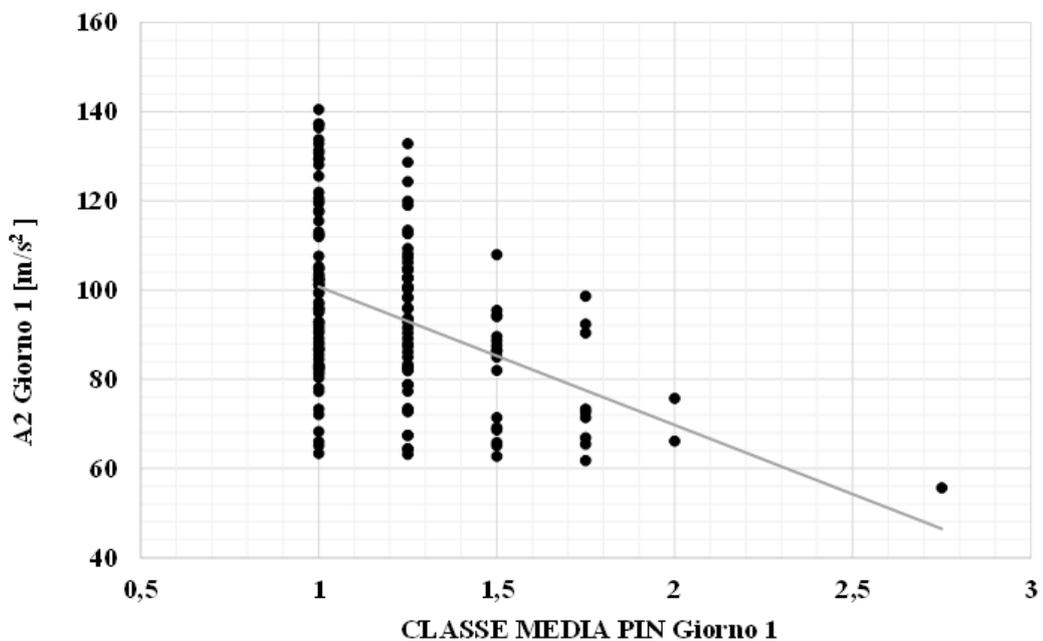


Figura 7.16 – Parametro A2 e classe media dei pin dei campioni prodotti il giorno 1.

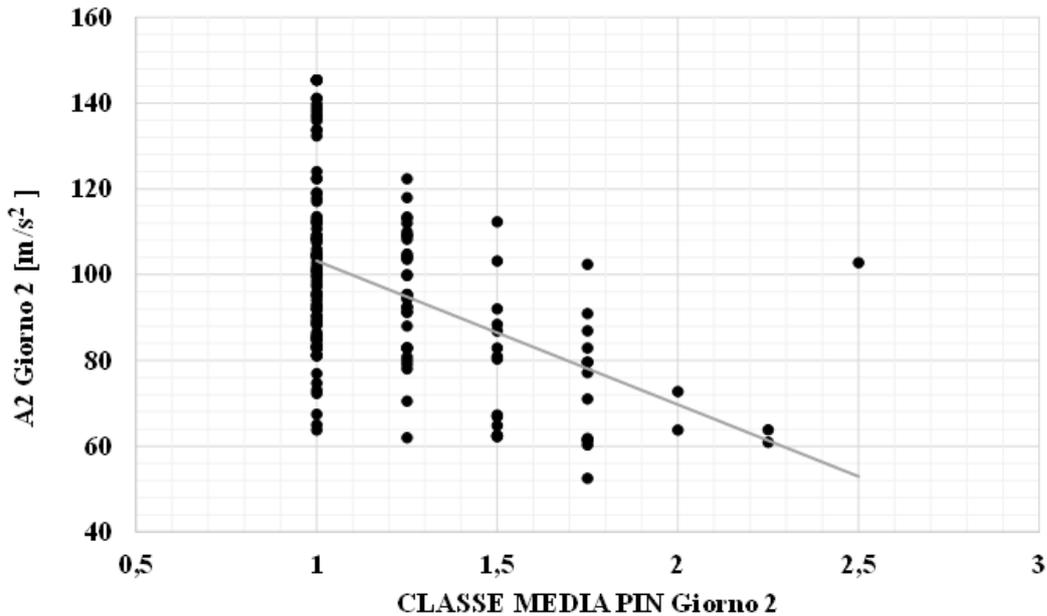


Figura 7.17 – Parametro A2 e classe media dei pin dei campioni prodotti il giorno 2.

Sia per A2 che per VM non è stato possibile definire una soglia che garantisca l'ottenimento di getti con pin tutti valutati con la classe 1, ossia la condizione che sancisce la conformità del getto.

Per questo tipo di difetto non sono state trovate altre relazioni significative coi parametri di processo.

Per quanto riguarda i restanti difetti valutati durante la procedura di controllo qualità, ossia contaminazioni e bave, non è stato riscontrato nessun chiaro collegamento con i parametri del processo. Date le modalità di formazione delle contaminazioni si ritiene che la loro presenza sia di natura casuale e non correlata ai parametri fatti variare nella campionatura. Sono necessari, invece, ulteriori approfondimenti sulla formazione delle bave.

7.2 Risultati delle analisi di laboratorio

Nei paragrafi successivi vengono riportati i risultati delle prove sperimentali svolte presso il laboratorio di metallurgia del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali di Vicenza.

7.2.1 Analisi ai raggi X con microfuoco

Tra i 120 campioni lavorati meccanicamente e testati a tenuta 11 sono stati analizzati nel laboratorio di metallurgia del DTG di Vicenza con lo scopo di approfondire la presenza di porosità ed altri difetti. Nello specifico, gli 11 campioni sono:

- 8 getti per spaziare i parametri agli estremi del DoE della campionatura. Nella tabella 7.13 sono riportati i parametri di processo principali degli 8 campioni selezionati per rappresentare il DoE.

Codice getto	T forno	Spray	VM_th
32-1	675 °C	7,5 s	6,2 m/s
155-1		5 s	
43-1		7,5 s	4,8 m/s
164-1		5 s	
37-2	705 °C	7,5 s	6,2 m/s
119-2		5 s	
6-2		7,5 s	4,8 m/s
125-2		5 s	

Tabella 7.13 – Parametri di processo significativi degli 8 campioni rappresentativi del DoE.

Dalla tabella 7.13 si vede che i campioni scelti sono rappresentativi dei due giorni di campionatura e delle due condizioni della fase di lubrificazione. Presentano poi valori estremi della velocità massima di seconda fase. Questi parametri sono ritenuti, a valle delle precedenti analisi, quelli con la maggiore influenza sulla qualità dei getti prodotti.

- 1 campione scartato in fase di controllo visivo a causa di un evidente vuoto presente nella superficie lavorata meccanicamente della zona 3, come mostrato in figura 7.18.



Figura 7.18 – Porosità visibile in zona 3 del campione scartato al controllo visivo.

- 2 campioni risultati non conformi dopo la prova di tenuta ad aria. I due getti hanno riportato una perdita di aria dall'involucro maggiore della soglia di 5,6 Ncc/min.

La prima fase dello studio è stata l'analisi della frazione di area occupata da porosità nelle radiografie delle quattro regioni critiche. In tabella 7.14 sono esposti gli esiti del calcolo della percentuale di quest'area per gli 8 campioni rappresentativi dei parametri del DoE.

Codice getto	T forno	Spray	VM_th	Porosità Zona 1 [%]	Porosità Zona 2 [%]	Porosità Zona 3 [%]	Porosità Zona 4 [%]	Porosità media [%]
32-1	675 °C	7,5 s	6,2 m/s	1,03	1,81	2,45	0,95	1,74
155-1		5 s		2,12	1,26	4,48	1,32	2,90
43-1		7,5 s	4,8 m/s	5,49	1,47	8,57	6,83	5,62
164-1		5 s		1,79	2,14	4,72	2,36	3,07
37-2	705 °C	7,5 s	6,2 m/s	1,09	0,58	3,25	1,75	1,86
119-2		5 s		1,31	1,72	3,09	0,94	1,92
6-2		7,5 s	4,8 m/s	2,46	1,40	3,07	1,29	1,92
125-2		5 s		0,94	1,69	5,02	2,54	3,08

Tabella 7.14 – Percentuale di porosità delle zone critiche degli otto campioni rappresentativi del DoE.

In tabella 7.14 sono osservabili le percentuali di porosità in relazione alla temperatura del forno di mantenimento (T forno), al tempo di azione del lubrificante (Spray) e alla velocità massima nominale di seconda fase (VM_th). L'analisi radiografica ha restituito risultati in linea con la relazione tra presenza di vuoti e velocità massima osservata precedentemente. Infatti, in tabella 7.14 si nota che per entrambi i giorni di campionatura, a parità di temperatura del forno e durata della lubrificazione, i getti prodotti con velocità di 6,2 m/s hanno riportato mediamente una

percentuale di porosità inferiore ai getti prodotti con 4,8 m/s di velocità. Ciò è un'ulteriore conferma dell'influenza di questo parametro sulla qualità dei campioni. In figura 7.19 è visibile una rappresentazione dei dati di porosità media riportati in tabella 7.14.

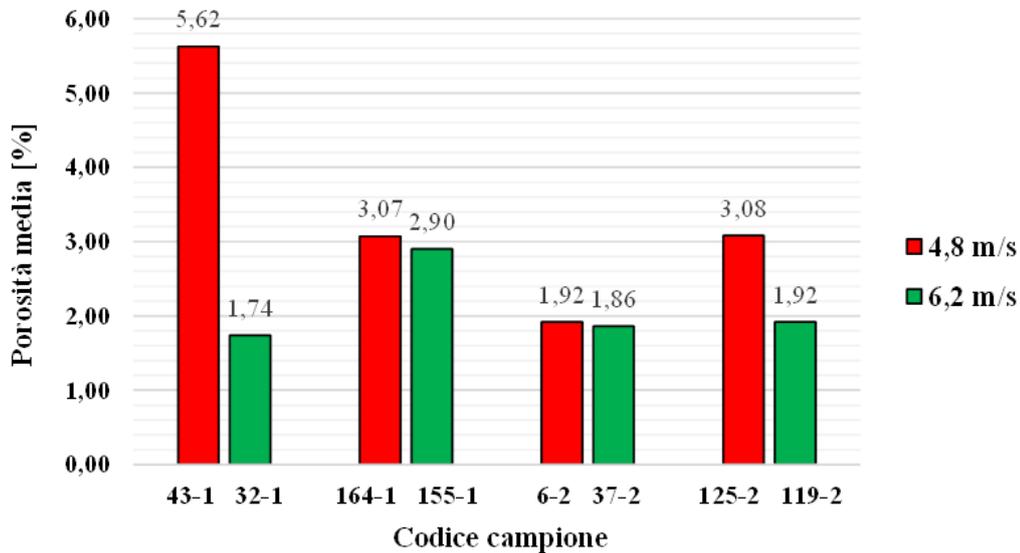


Figura 7.19 – Porosità media percentuale degli 8 campioni rappresentativi del DoE.

In tabella 7.15 sono visibili le percentuali di porosità dei tre campioni che non hanno superato le prove di accettabilità. Nello specifico, il getto 58-1 è stato scartato al controllo visivo per eccessivi vuoti in zona 3, mentre i campioni 138-1 e 69-2 non hanno superato il test a tenuta.

Codice getto	T forno	Spray	VM_th	Porosità Zona 1 [%]	Porosità Zona 2 [%]	Porosità Zona 3 [%]	Porosità Zona 4 [%]	Porosità media [%]
58-1	675 °C	7,5 s	4,8 m/s	2,88	2,09	8,43	2,08	3,87
138-1	675 °C	5 s	5,5 m/s	1,44	1,87	9,51	1,60	3,61
69-2	705 °C	7,5 s	6,2 m/s	1,60	0,71	4,36	2,57	2,31

Tabella 7.15 – Percentuale di porosità delle zone critiche dei tre campioni che non hanno superato le prove di accettabilità.

È interessante notare, come evidenziato in figura 7.20, che anche la porosità media rilevata in questi tre campioni diminuisce col crescere della velocità.

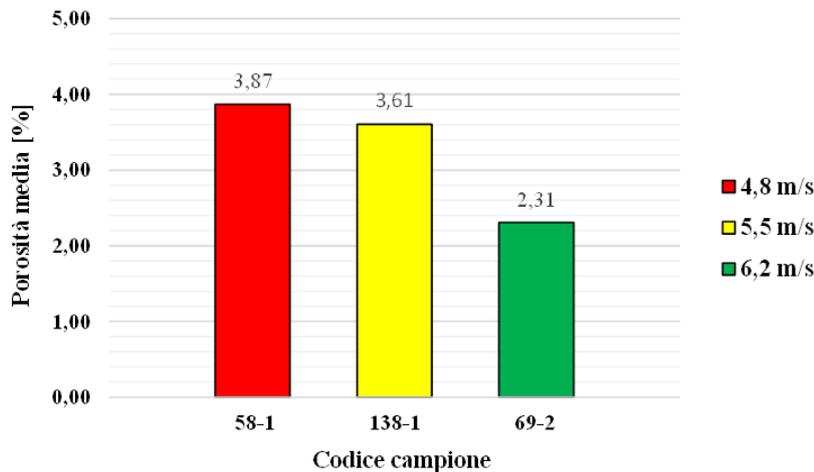


Figura 7.20 – Porosità media percentuale dei 3 campioni scartati alle prove di accettabilità.

Inoltre, ciò che si evince osservando le tabelle 7.14 e 7.15 è che non risulta possibile stabilire delle soglie di porosità percentuale media che possano definire in maniera netta il superamento delle prove a cui sono sottoposti i getti PAN0005. Si nota che il campione con codice 43-1 presenta una porosità maggiore del getto 69-2 in tutte le zone critiche, ciononostante il campione 43-1 ha superato tutte le prove di accettabilità.

7.2.2 Analisi microstrutturale

Tra questi 11 campioni sono poi stati scelti i campioni aventi codifica 119-2 e 43-1 per l'analisi microstrutturale. Come criterio per la scelta si è deciso di valutare i due campioni appartenenti ai designs di parametri ritenuti come il migliore ed il peggiore dal punto di vista della qualità. Più precisamente:

- *119-2*. Campione che è stato ottenuto con la combinazione di parametri ritenuta migliore dal punto di vista della qualità. Il campione 119-2 è stato prodotto con una temperatura del forno di mantenimento di 705 °C, una lubrificazione di 5 s ed una velocità massima di seconda fase impostata a 6,2 m/s.
- *43-1*. Questo campione, invece, è stato prodotto con la combinazione di parametri ritenuta meno efficace, ossia con la temperatura del forno più bassa, una lubrificazione di 7,5 s e con la velocità massima di 4,8 m/s.

Sono state analizzate le zone 2 e 4 dei due getti secondo le sezioni esposte nel Capitolo 5. Come visibile in figura 7.21 e 7.22, la lega presenta una tipica microstruttura formata da α -Al di morfologia dendritica e struttura eutettica Al-Si. In zona 2 si nota una microstruttura più fine

nella regione superficiale rispetto alla parte centrale della sezione. Questa differenza sulla microstruttura è dovuta a diverse velocità di raffreddamento che interessano queste due regioni. La parte esterna del getto è a contatto con la superficie dello stampo ed è, dunque, soggetta ad una maggiore asportazione del calore. Ciò favorisce una microstruttura più fine rispetto alle regioni interne.

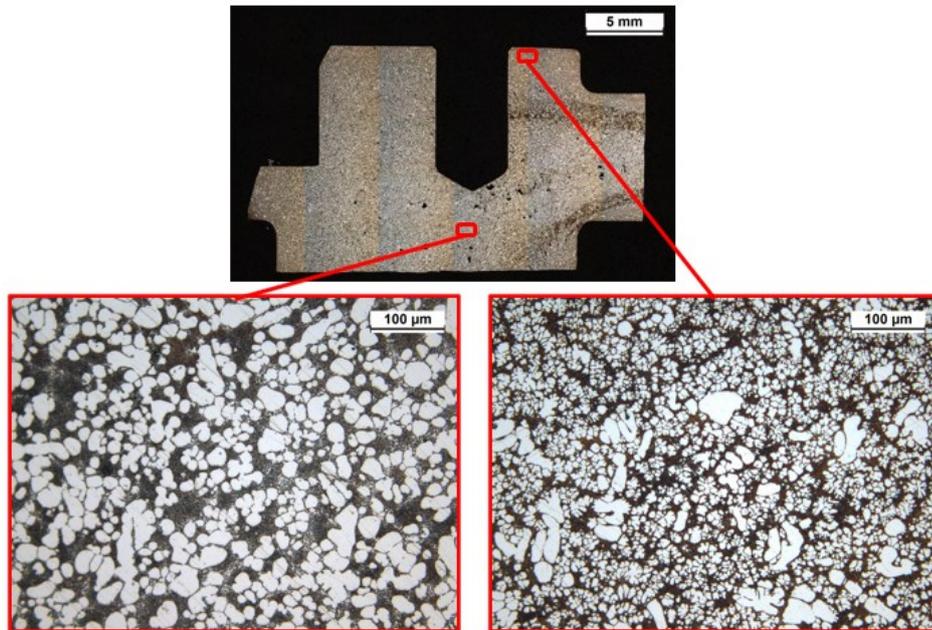


Figura 7.21 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 2 dopo attacco chimico (campione 43-1).

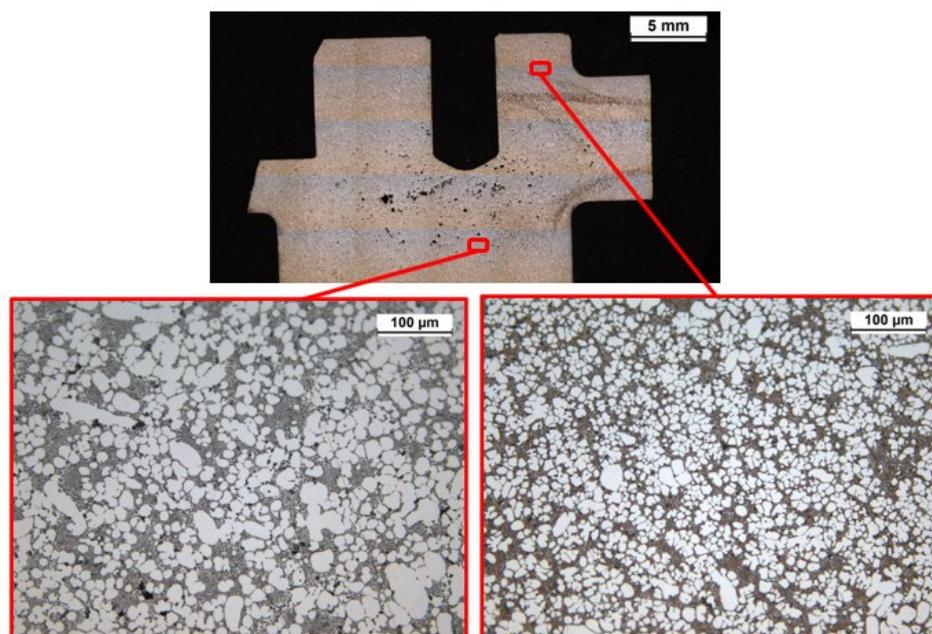


Figura 7.22 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 2 dopo attacco chimico (campione 119-2).

Inoltre, è stata riscontrata la presenza di bande di segregazione di eutettico, in figura 7.23 ne è esposta un'immagine acquisita al microscopio ottico. Nella stessa figura è possibile osservare anche la presenza di fase *sludge* in forma di composti di piccole dimensioni plasmati successivamente alla formazione delle dendriti di α -Al.

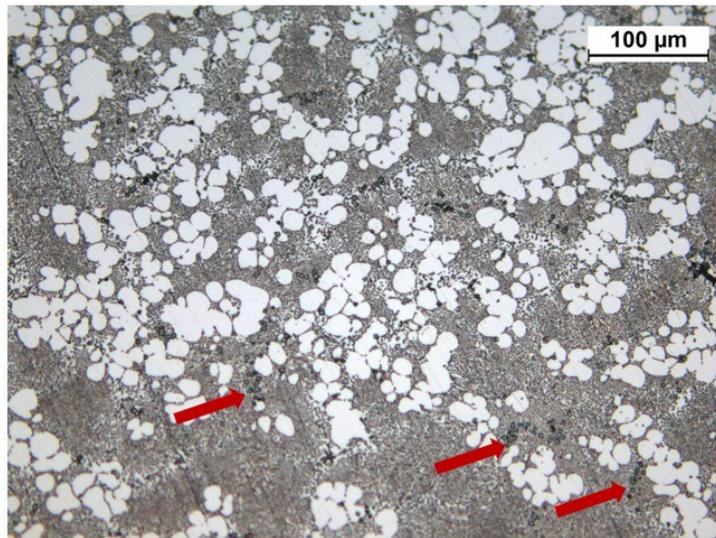


Figura 7.23 – Immagine acquisita al microscopio ottico della microstruttura relativa ad una segregazione eutettica, in cui è evidenziata la presenza di fase *sludge* (zona 2, campione 119-2).

Date le dimensioni ridotte delle particelle, inferiori ai 10 μm , la presenza di fase *sludge* sui campioni analizzati può essere considerata scarsa ed innocua per il processo e la lavorabilità del getto. Fasi *sludge* aventi la stessa morfologia di quelle evidenziate in figura 7.23 sono state riscontrate in tutti i campioni analizzati.

Dalle immagini ricavate dalle sezioni in zona 4, e riportate in figura 7.24 e figura 7.25, è visibile una minore differenza delle dimensioni delle dendriti tra il bordo e la regione centrale. Dato lo spessore ridotto della sezione si hanno omogenee velocità di raffreddamento che caratterizzano tutta l'area d'indagine.

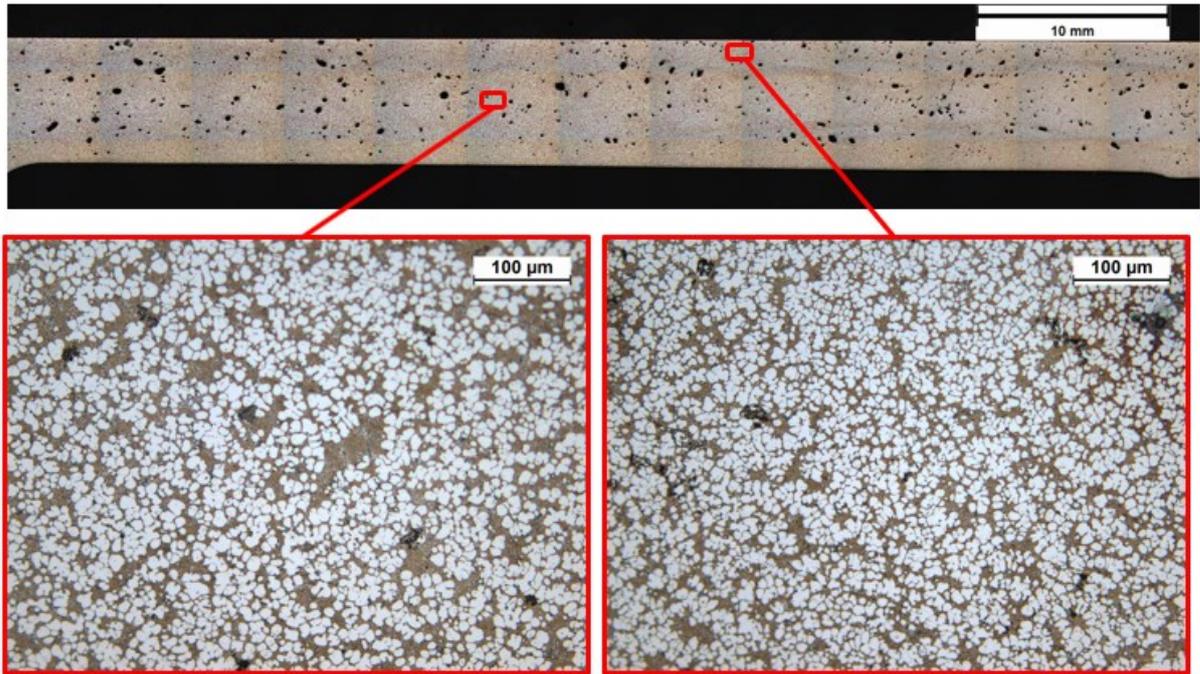


Figura 7.24 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 4 dopo attacco chimico (campione 43-1).

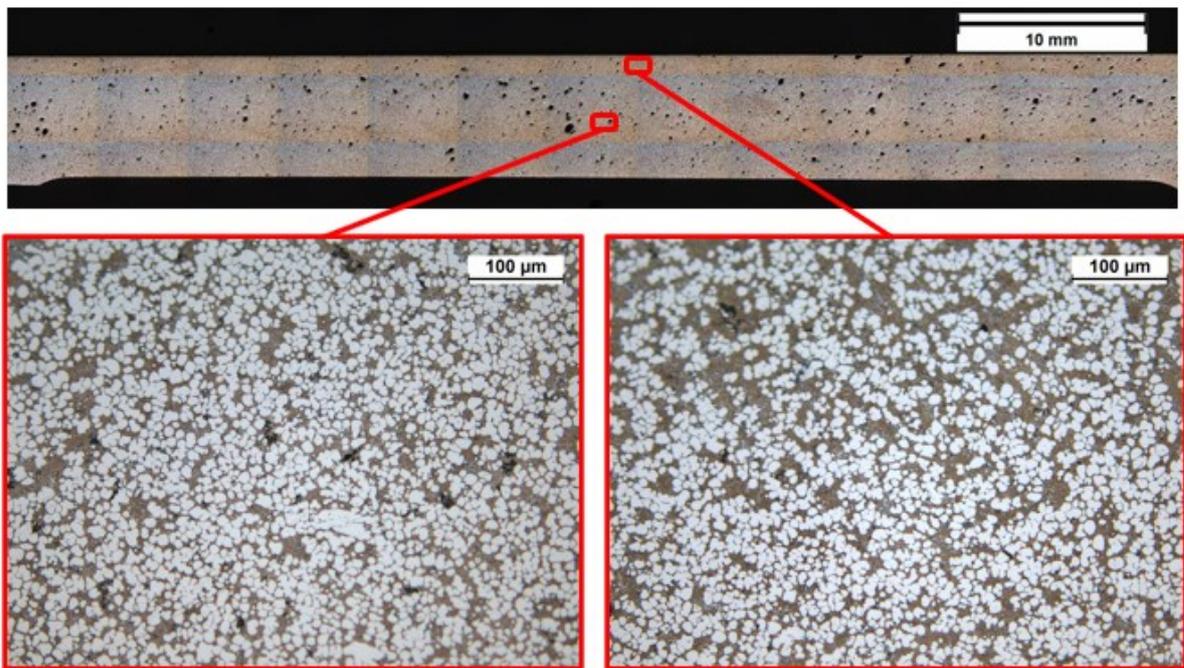


Figura 7.25 – Immagini acquisite al microscopio ottico della microstruttura in zona 4 dopo attacco chimico (campione 119-2).

In generale, sulle sezioni analizzate sono presenti porosità di origine gassosa, distinguibili dalla tipica morfologia circolare, e vuoti da ritiro interdendritico. Degli esempi sono riportati nelle figure 7.26 e 7.27.

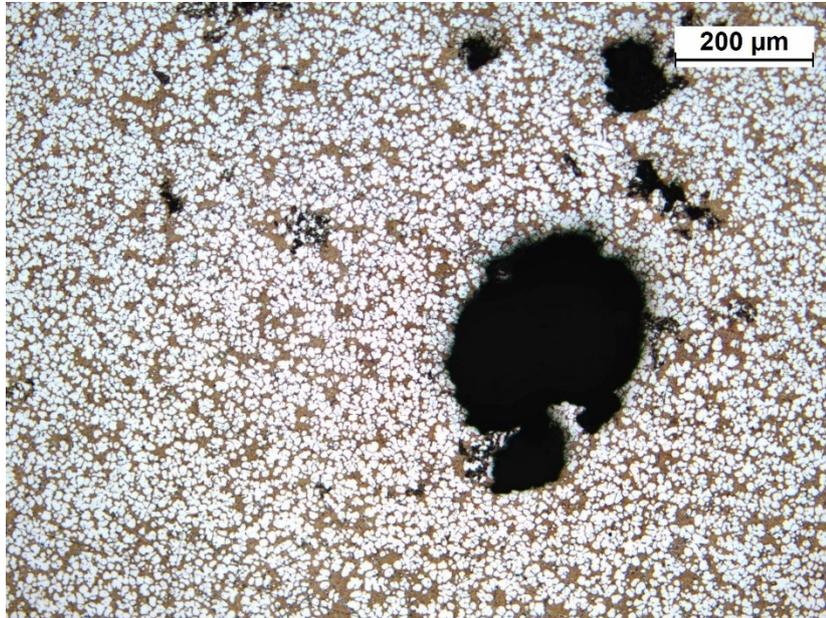


Figura 7.26 – Immagine a bassi ingrandimenti di una porosità da intrappolamento di gas (zona 4, campione 43-1). Acquisizione mediante microscopio ottico.

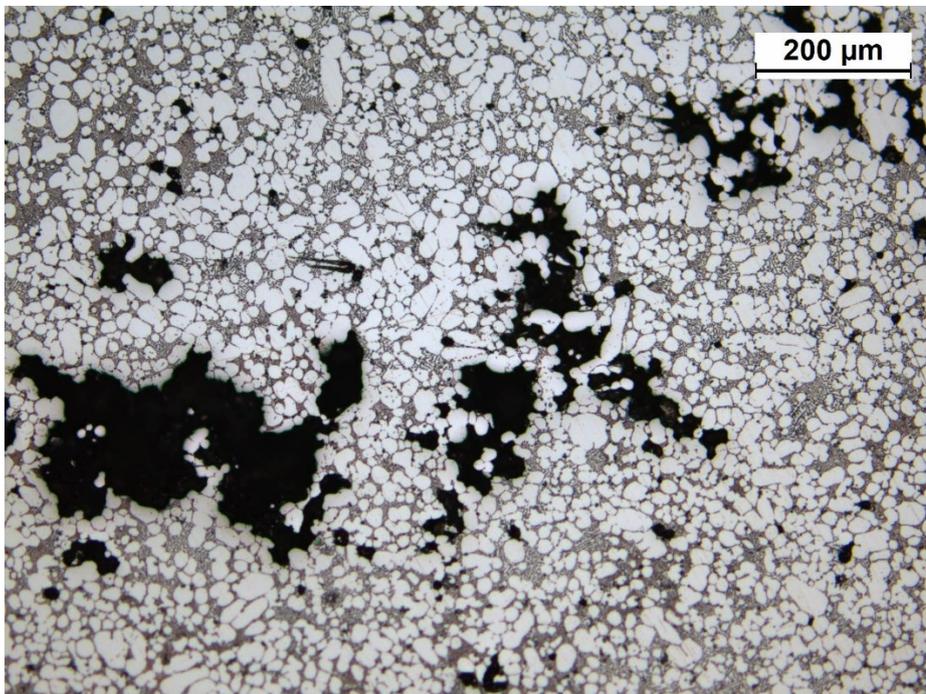


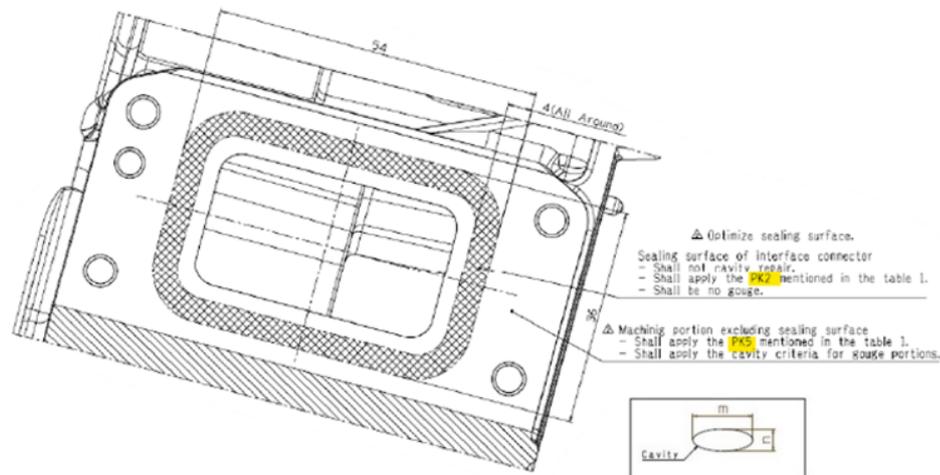
Figura 7.27 – Immagine a bassi ingrandimenti di vuoti da ritiro interdendritico (zona 2, campione 119-2). Acquisizione mediante microscopio ottico.

Il ritiro interdendritico si forma a causa di una scarsa alimentazione del metallo liquido all'interno degli spazi interdendritici, ciò impedisce la compensazione del ritiro volumetrico in fase di solidificazione.

Tra i due getti analizzati non si evidenziano rilevanti differenze in termini di microstruttura, nonostante siano campioni appartenenti a designs di parametri con caratteristiche opposte.

7.2.3 Criterio di conformità PK

Tra i campioni che sono stati sottoposti ad analisi radiografica con microfuoco 8 sono rappresentativi dei principali parametri del DoE. Poi, tra questi 8 getti, ne sono stati scelti 4 per la verifica del criterio di conformità PK imposto dal cliente. Per questi campioni è stato verificato il rispetto del criterio PK2 nella superficie di alloggiamento della guarnizione di tenuta in zona 3, come riproposto in figura 7.28. Si è scelto di fare questa verifica nella zona 3 dei campioni poiché dalle analisi radiografiche con microfuoco è risultata essere la zona con la maggiore quantità di porosità, si rimanda ai risultati mostrati nelle tabelle 7.14 e 7.15.



Properties	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5
Permissible expansion of a pore(m±n)	m≤0.4mm	m≤0.4mm	m≤0.7mm	m≤1.0mm	m≤2.0mm
Min.permissible edge distance between pores	8mm	8mm	15mm	30mm	30mm
Minimal pore size to be taken into account(m±n)	m>0.2mm	m>0.2mm	m>0.4mm	m>0.6mm	m>0.8mm
Permissible exceptions within distances of at least 80mm per working surface	None	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 1mm A single pore with a max. expansion of 0.6mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 1.5mm A single pore with a max. expansion of 1mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 2mm A single pore with a max. expansion of 1.5mm is permissible	Accumulation of 3 pores permissible with min edge distances of 2mm A single pore with a max. expansion of 3mm is permissible
Repetition of this exception is not permissible within the distance of a bolt hole.					
Application recommendation	Seal seat for valves	Grooves for rectangular rings that dynamically seal end surface Grooves for lip seal rings, end surface and base Control piston holes Sliding surface for o-rings and lip seal rings Contact surface for O-rings and seal rings	Grooves for rectangular rings that dynamically seal groove base Machined surfaces near sealing points Seal surface for paper seals	Flange surface Roller bearing seat and contact surfaces	Screw pass-through holes

Figura 7.28 – Criterio PK nella zona 3 del getto PAN0005.

Nello specifico, i campioni analizzati sono: 119-2, 43-1, 125-2 e 32-1. Come già esposto, i campioni 119-2 e 43-1 sono rappresentativi di designs opposti in termini di qualità ottenibile. I campioni 125-2 e 32-1 esprimono invece delle condizioni di processo intermedie rispetto a quelle precedenti. Infatti, il campione 125-2 è relativo ad un'alta temperatura del forno, una fase di lubrificazione di 5 s, ma una velocità di 4,8 m/s. Mentre il campione 32-1 è stato prodotto con una temperatura di 675 °C, una lubrificazione di 7,5 s e la velocità massima impostata a 6,2 m/s.

I campioni sono stati sottoposti ad una preparazione metallografica, dopo la quale è stato possibile acquisire le immagini panoramiche mostrate in figura 7.29 e verificare il rispetto del limite PK2 sulla superficie di tenuta.

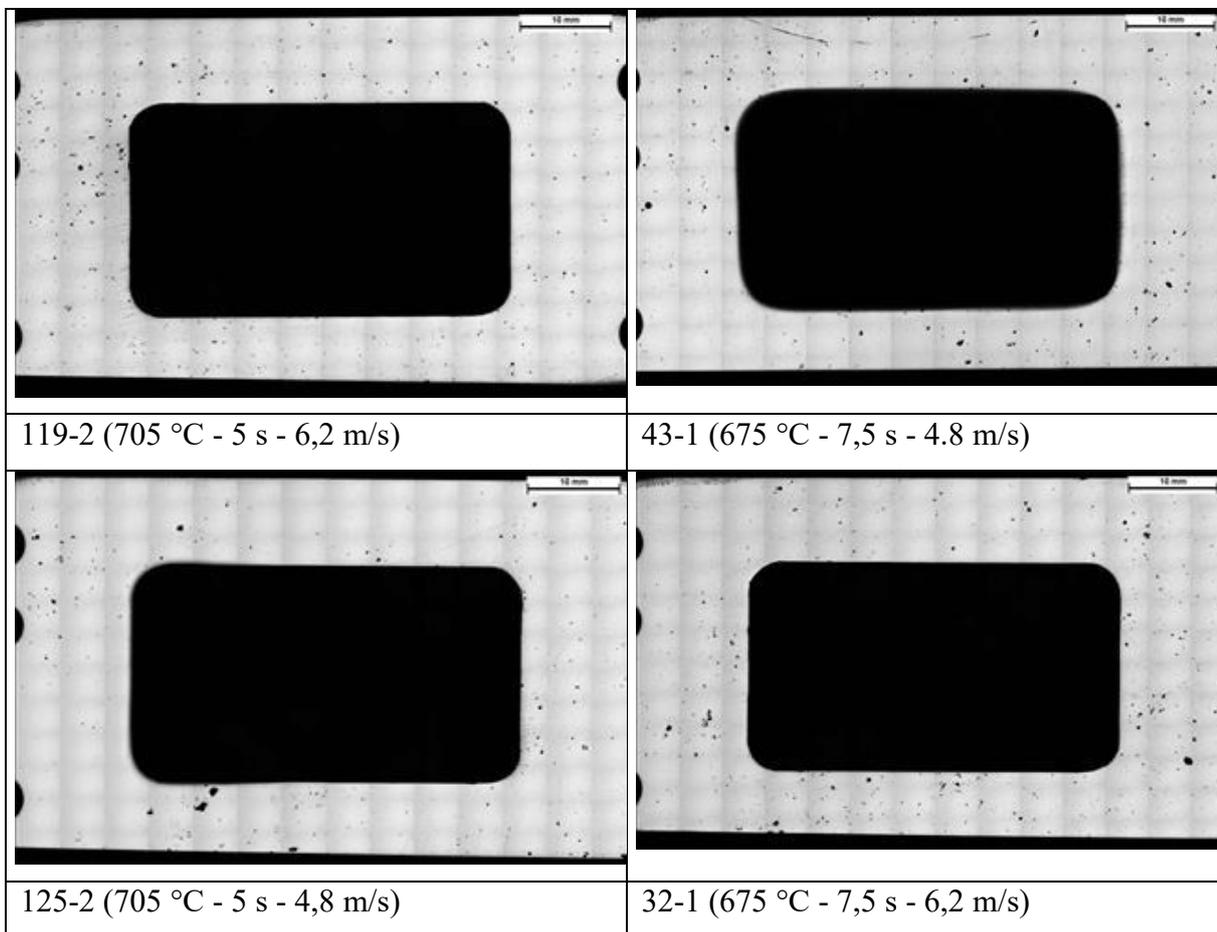


Figura 7.29 – Immagini panoramiche, acquisite con il microscopio ottico, della zona 3 dei quattro campioni sottoposti alla verifica del criterio PK2.

Nella superficie di tenuta, lo si ricorda, è ammessa una dimensione massima dei vuoti inferiore a 0,4 mm ad eccezione di un solo poro avente una dimensione massima di 0,6 mm. È inoltre

consentito un accumulo di massimo 3 pori aventi una distanza minima da bordo a bordo di 1 mm. Come visibile in tabella 7.16, nessuno dei getti analizzati ha rispettato i requisiti del criterio PK2.

Campione	Porosità superficiale	1 -200 µm	201 -400 µm	401 -600 µm	601 -800 µm	801 -1000 µm	>1000 µm	Totale
119-2	0,23%	214	47	5	0	0	0	266
43-1	0,25%	105	47	10	1	1	0	164
125-2	0,19%	103	27	1	2	0	1	134
32-1	0,27%	205	46	10	1	2	0	264

Tabella 7.16 – Conteggio delle porosità, in base alla loro lunghezza, per la verifica del criterio PK2.

In figura 7.30 è visibile una rappresentazione dei dati mostrati in tabella 7.16.

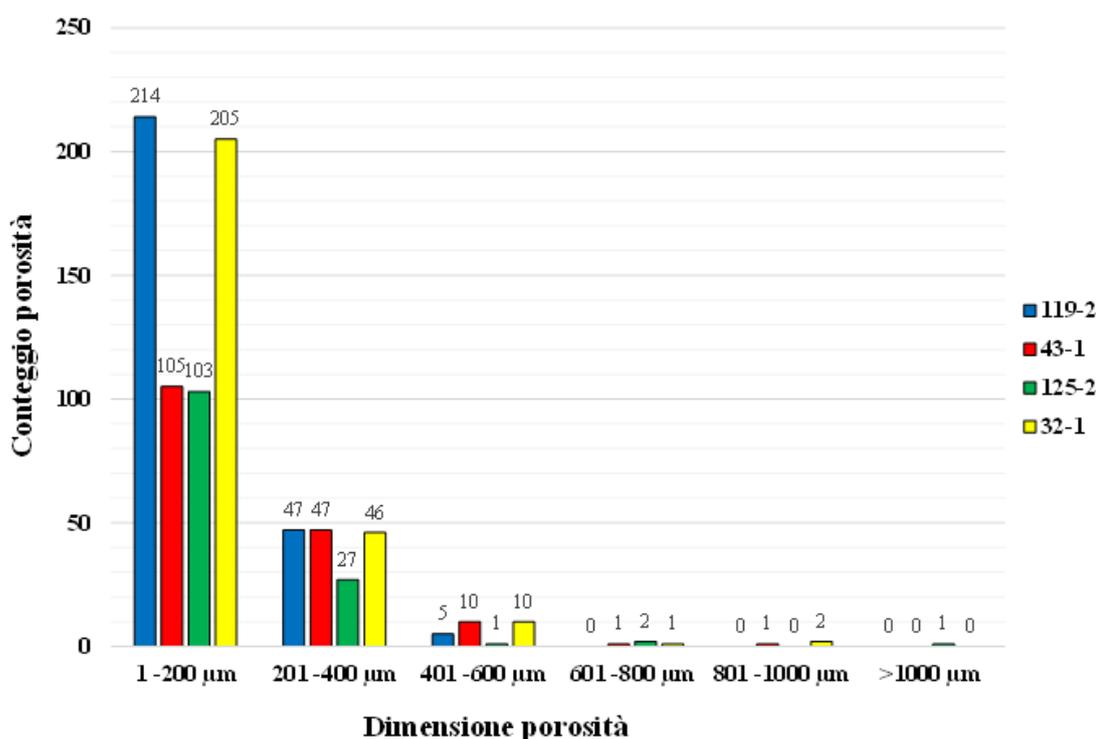


Figura 7.30 – Rappresentazione del conteggio delle porosità per la verifica del criterio PK2.

Questi quattro campioni, pur non essendo conformi alla soglia di accettabilità PK2, hanno comunque superato i test di tenuta. Sulla base di questi risultati e di quelli riportati dagli altri elaborati di tesi svolti nell'ambito del progetto SMARTI 4.0, si ritiene eccessivamente stringente il criterio PK stabilito da Panasonic Corporation.

Si suggerisce, dunque, una revisione del metodo di verifica e accettabilità delle porosità.

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

Ad oggi, è molto sentita nel settore della pressocolata la necessità di raggiungere standard di qualità sempre più elevati. L'utilizzo di sensori nello stampo e nella pressa offre la possibilità di acquisire una serie di nuove conoscenze, utili a migliorare la qualità dei prodotti.

A fronte delle diverse analisi effettuate con il supporto dei risultati dei sensori, si ritiene corretto affermare che la qualità del getto di riferimento è maggiormente influenzata dai seguenti parametri:

- *Temperatura del forno di mantenimento.* È stato osservato che gli unici campioni con porosità di classe 1, in tutte e quattro le zone critiche, sono stati prodotti con la temperatura più alta. Si propone un'impostazione standard della temperatura del forno a 705 °C per la normale produzione dei getti PAN0005.
- *Durata della fase di lubrificazione.* È stato riscontrato che con un tempo di azione del lubrificante ridotto si ha una migliore qualità dei componenti. I campioni prodotti con una lubrificazione di 5 s hanno riportato una presenza più contenuta di porosità e di pin incompleti rispetto ai campioni relativi ai designs con 7,5 s di Spray. In particolare, riducendo la durata della lubrificazione si è passati dal 4% al 34% dei getti aventi una porosità di classe 1 nella zona 3. Occorre specificare, però, che l'aumento di temperatura della superficie dello stampo, dovuto ad una riduzione della durata della lubrificazione, potrebbe accelerare i fenomeni di usura che coinvolgono lo stampo stesso.
- *Velocità massima in fase II.* Questo parametro di processo è risultato essere uno dei più importanti dal punto di vista degli effetti sulla qualità dei getti PAN0005. È stato osservato che all'aumentare della velocità si ha una presenza minore di porosità, nonché pin di migliore qualità. È stato inoltre visto che oltre la soglia di 6 m/s, è possibile ottenere quasi totalmente getti PAN0005 con una classe di porosità media inferiore, o uguale, a 2.
- *Parametro A2.* È un parametro creato in ambito del progetto di tesi, ed è ricavabile da due variabili misurate dai sensori dalla pressa impiegata per la produzione del getto di riferimento. Il parametro A2 è così definito:

$$A2 = \frac{C2}{T2^2} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

La variabile C2 è la corsa del pistone in fase II, mentre T2 è il tempo che il pistone impiega a percorrere C2.

A2 si è rivelato un parametro particolarmente influente sulle porosità presenti nei campioni. A classi minori di questo difetto sono stati osservati mediamente valori più elevati di A2. Nello specifico, con valori di A2 maggiori di 120 m/s² si è evitata la produzione di campioni con classe media di porosità superiore a 2.

Dalle analisi svolte nel laboratorio di metallurgia, è stato inoltre rilevato che:

- Non è possibile definire una soglia netta di porosità percentuale oltre la quale non avviene il superamento delle prove di tenuta a cui sono sottoposti i getti. È stato riscontrato che getti non conformi possono presentare meno porosità di getti scartati ai test di tenuta.
- Nessuno dei campioni soggetti alla verifica del criterio PK2 ha rispettato i limiti imposti dal cliente. Ciononostante, gli stessi campioni hanno comunque superato le prove di tenuta. Si ritiene opportuna una revisione del criterio PK.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Daniele Veschi, 1989, *L'alluminio e le sue leghe - Metallurgia, trattamenti termici, metallografia, proprietà meccaniche e processi fusori*, Biblioteca Tecnica Hoepli
- [2] F. C. Robles-Hernandez, J. M. Herrera Ramírez, R. Mackay, 2017, *Al-Si Alloys – Automotive, Aeronautical and Areospace Applications*, Springer
- [3] I. Polmear, D. StJohn, J. F. Nie, M. Qian, 2017, *Light Alloys – Metallurgy of the Light Metals*, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann
- [4] European Aluminium - www.european-aluminium.eu
- [5] Our World in Data - Emission by sector - www.ourworldindata.org
- [6] Sviluppi dell'alluminio per automotive - A&L Aluminium Alloys Pressure Diecasting Foundry Techniques - www.publiteconline.it
- [7] The Aluminium Automotive Manual: car body and body structures, 2013 - European Aluminium Association - www.alueurope.eu
- [8] The Aluminium Automotive Manual: manufacturing: casting methods, 2013 - European Aluminium Association - www.alueurope.eu
- [9] <https://www.custompartnet.com/wu/die-casting>
- [10] N. Gramegna, F. Bonollo, 2016, *Smart Control and Cognitive System applied to the HPDC Foundry 4.0*, Assomet Servizi Srl, Ensinssoft Spa
- [11] A. E. Maria Miglierina, “Tecnica fusoria di pressocolata per leghe di alluminio: ottimizzazione del processo e del warm-up”, Politecnico di Milano, 2009
- [12] North America Die Casting Association, 2007, *Introduction to die casting*

- [13] F. Bonollo, N. Gramegna, G. Timelli, “High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges”, *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 67, n. 5, 2015, pp. 901-908
- [14] E. Fiorese, F. Bonollo, G. Timelli, L. Arnberg, E. Gariboldi “New Classifications of Defects and Imperfections on Aluminium Alloy Castings”, *International Journal of Metalcasting*, Vol. 9, 2015, pp. 56-66
- [15] S. Zine, “Simulazione e controllo di processo per l’ottimizzazione della qualità di getti pressocolati in lega di alluminio”, Università degli studi di Padova, 2021
- [16] The 4 Industrial Revolutions - www.ied.eu
- [17] Piano nazionale Industria 4.0 - Ministero dello sviluppo economico
- [18] N. Gramegna, F. Greggio, F. Bonollo, “Digital Transformation to Foundry 4.0”, *73WCF*, 2018
- [19] What is Foundry 4.0? - Foundry M&T - www.foundrymag.com
- [20] B. Kujat, N. Gramegna, M. Benvenuti, “Innovative control and real-time quality prediction for the casting production of aluminum alloy structural components at AUDI AG”, MUSIC Project
- [21] G. Timelli, S. Ferraro, F. Grosselle, F. Bonollo, F. Voltazza, L. Capra, “Caratterizzazione meccanica e microstrutturale di leghe di alluminio pressocolate”, *La Metallurgia Italiana*, n.1, 2011, pp. 5-17
- [22] A. Zovi, F. Casarotto, “Silafont-36, the low iron ductile die casting alloy development and applications”, *La metallurgia italiana*, Giugno 2007, pp. 33-38
- [23] UNI EN 1706:2020 Technical Standard and Ranges for Properties – Raffmetal

- [24] X.Y. Jiao, C.F. Liua, Z.P. Guo, G.D. Tongc, S.L. Ma, Y. Bi, Y.F. Zhang, S.M. Xiong, “The Characterization of Fe-rich Phases in a High-Pressure Die Cast Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloy”, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 51, 2020, pp. 54-62
- [25] F. Bonollo, “Progetto SMARTI – Report avanzamento OR1”, Università degli studi di Padova
- [26] S. Ferraro, G. Timelli, “Influence of Sludge Particles on the Tensile Properties of Die-Cast Secondary Aluminum Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 46B, April 2015, pp. 1022-1034
- [27] Xiangzhen Zhu, Hailin Yang, Xixi Dong, Shouxun Ji, “The effects of varying Mg and Si levels on the microstructural inhomogeneity and eutectic Mg₂Si morphology in die-cast Al-Mg-Si alloys”, *J Mater Sci*, Vol. 54, December 2018, pp. 5773–5787
- [28] Enginsoft Spa, “Definizione della posizione e analisi di sensitività dei sensori sullo stampo PAN0005”
- [29] E. Fiorese, F. Bonollo, “Plunger Kinematic Parameters Affecting Quality of High-Pressure Die-Cast Aluminum Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 47, July 2016, pp. 3731-3743
- [30] E. Fiorese, “Process parameters affecting quality of high-pressure die cast aluminium alloys”, Università degli studi di Padova
- [31] L. Pegoraro, “Ottimizzazione della qualità di getti pressocolati in lega di alluminio tramite implementazione di sensori all'interno dello stampo”, Università degli studi di Padova, 2022
- [32] E. Fiorese, F. Bonollo, “Simultaneous Effect of Plunger Motion Profile, Pressure, and Temperature on the Quality of High-Pressure Die-Cast Aluminum Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 47, December 2016, pp. 6453-6465

[33] D. R. Gunasegaram, B. R. Finnin, F. B. Polivka, “Melt flow velocity in high pressure die casting: its effect on microstructure and mechanical properties in an Al–Si alloy”, *Materials Science & Technology*, Vol. 23, n.7, 2007, pp. 847–856

[34] M. Pantano, “Variazione dei parametri di processo per l’ottimizzazione della qualità di getti pressocolati in lega di alluminio”, Università degli studi di Padova, 2021

[35] E. Fiorese, F. Bonollo, E. Battaglia, “A Tool for Predicting the Effect of the Plunger Motion Profile on the Static Properties of Aluminium High Pressure Die Cast Components”, *Metals*, 8-798, 2018

APPENDICE A

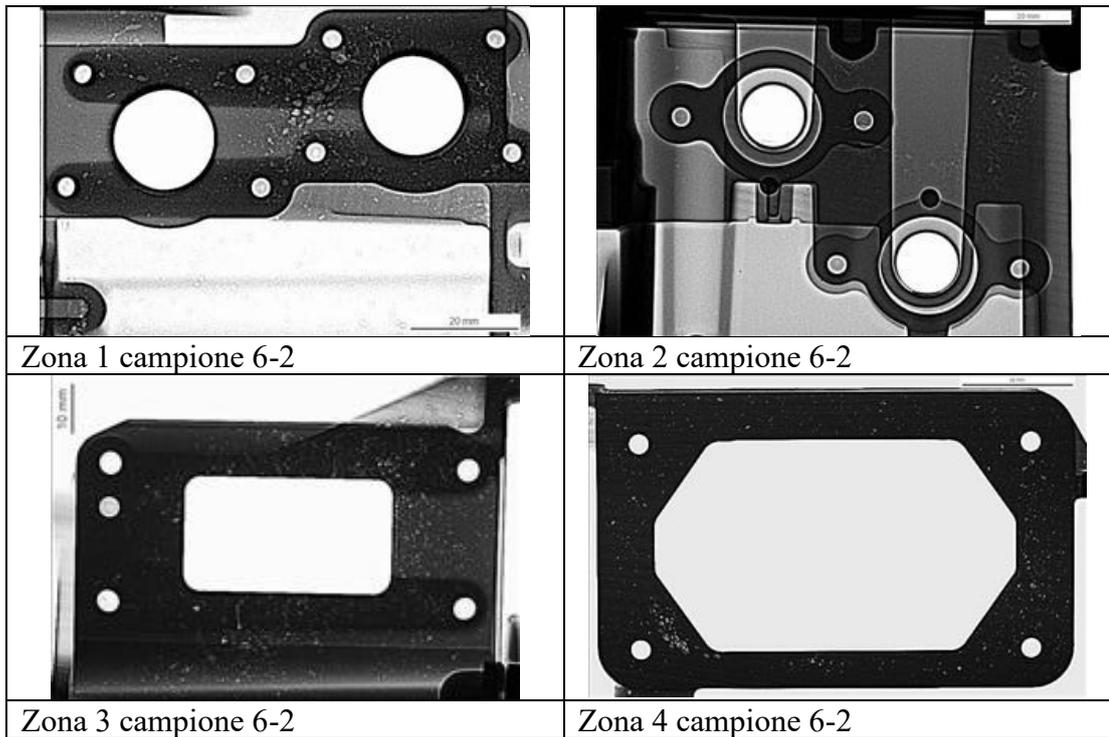


Figura A.1 – Acquisizioni radiografiche del campione 6-2.

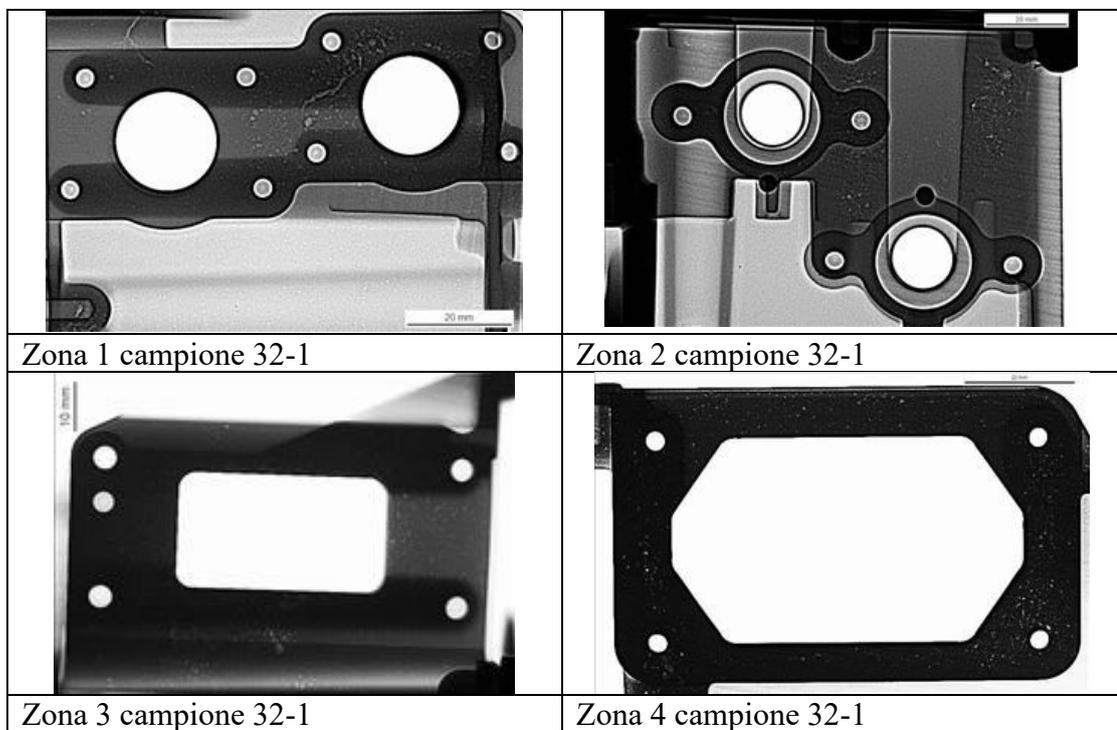


Figura A.2 – Acquisizioni radiografiche del campione 32-1.

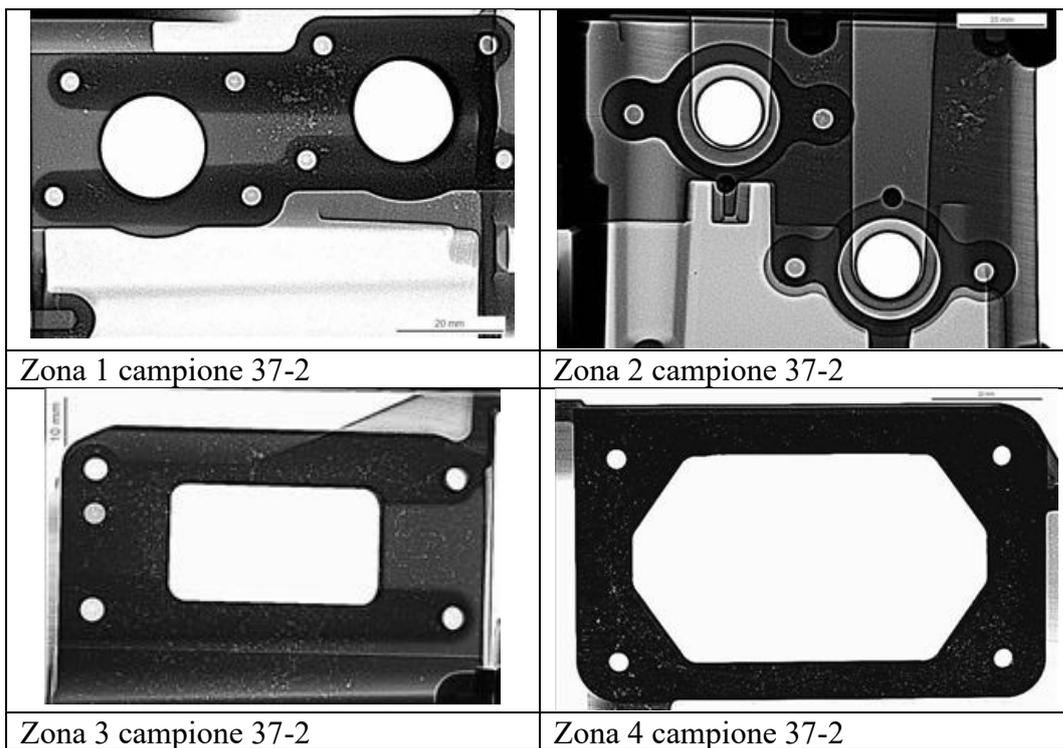


Figura A.3 – Acquisizioni radiografiche del campione 37-2.

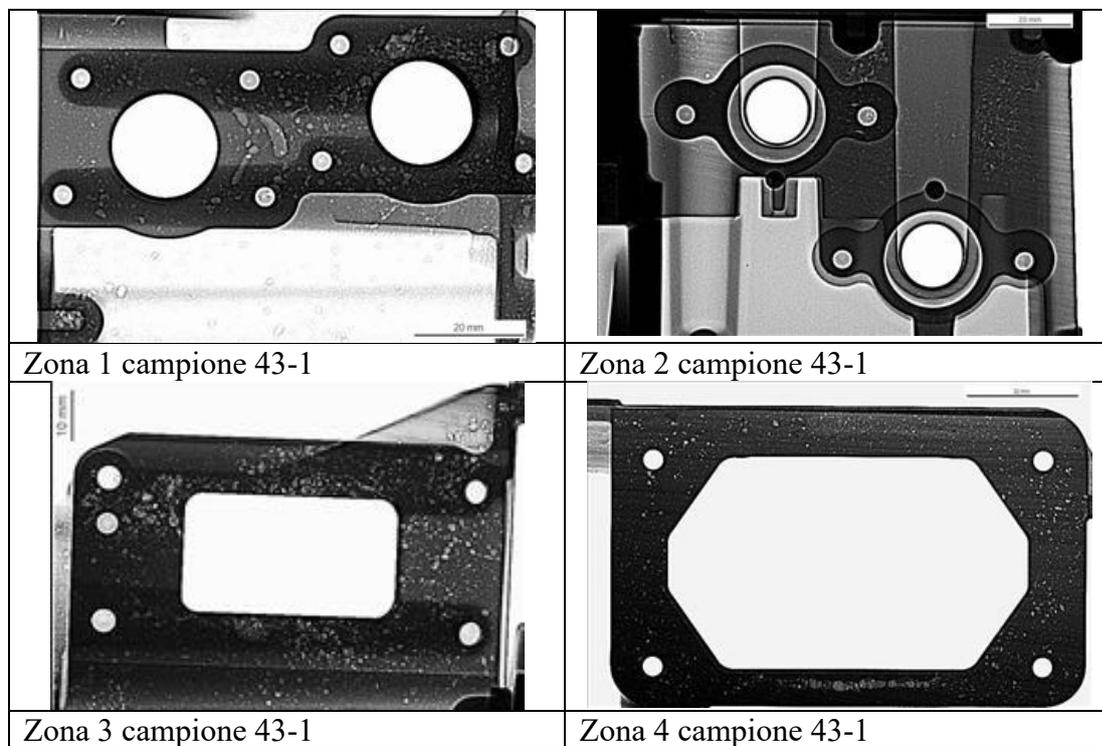


Figura A.4 – Acquisizioni radiografiche del campione 43-1.

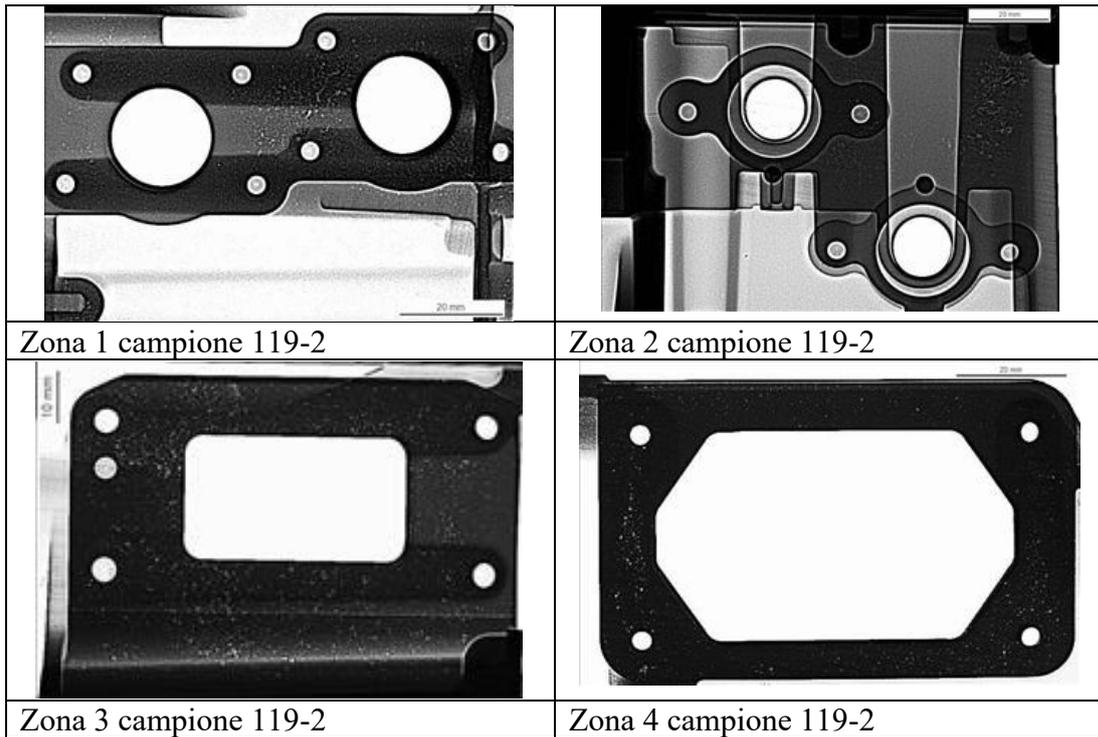


Figura A.5 – Acquisizioni radiografiche del campione 119-2.

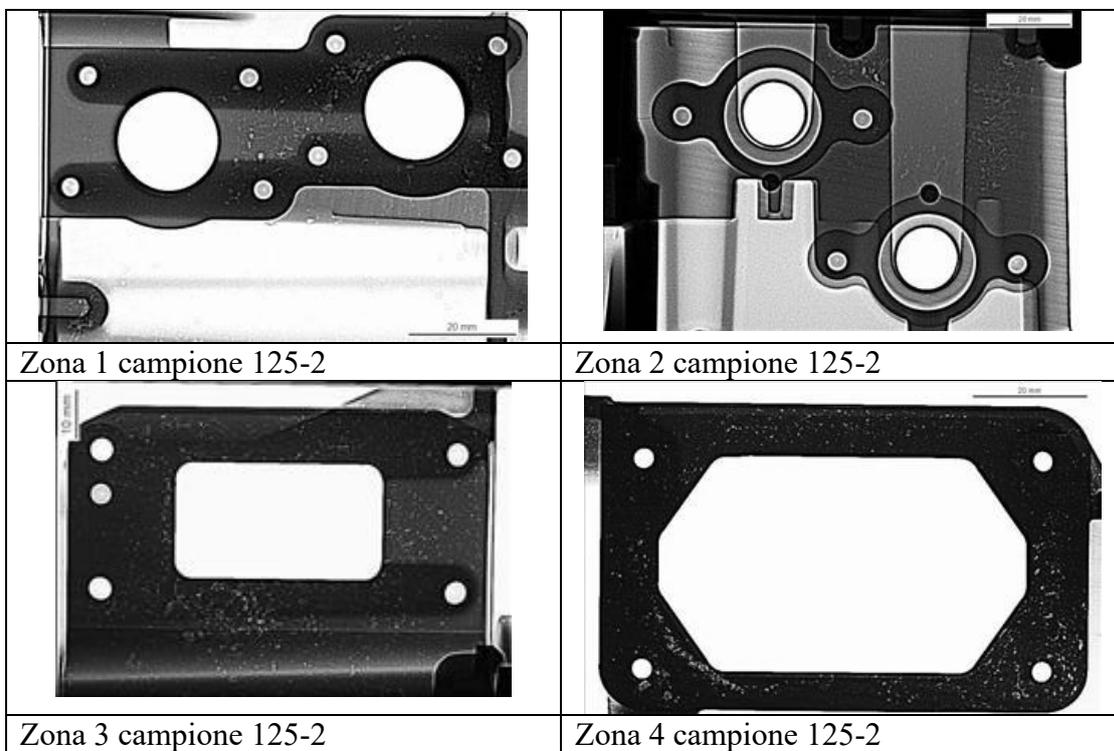


Figura A.6 – Acquisizioni radiografiche del campione 125-2.

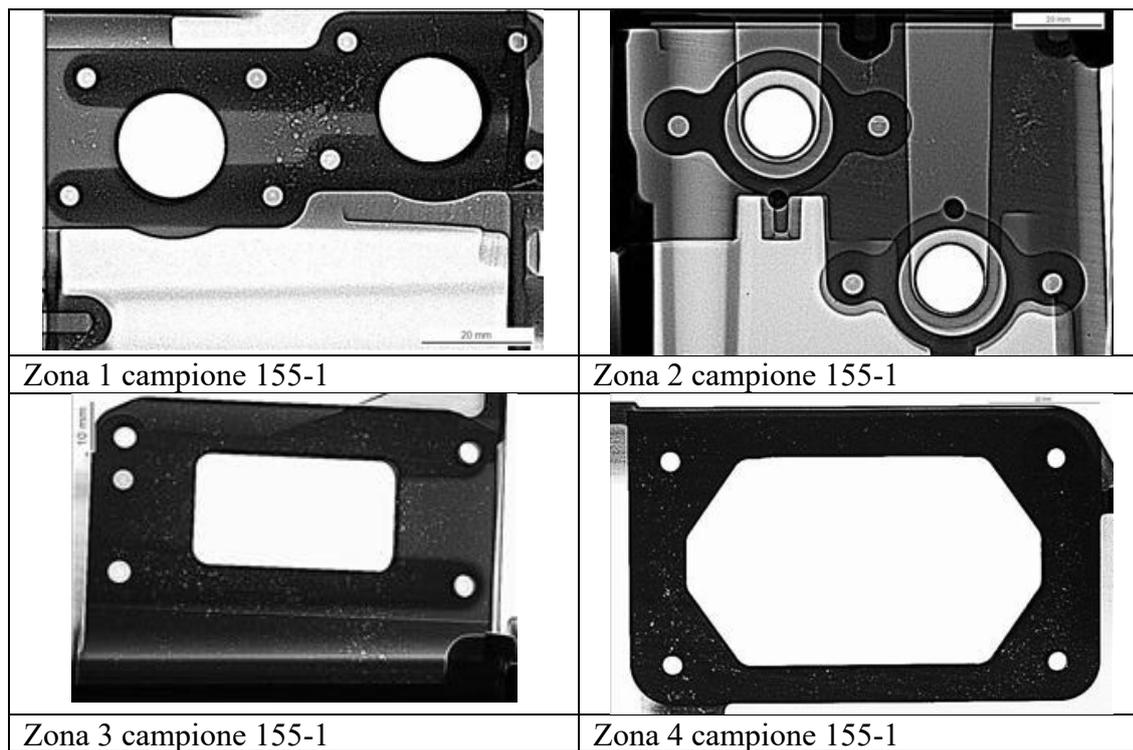


Figura A.7 – Acquisizioni radiografiche del campione 155-1.

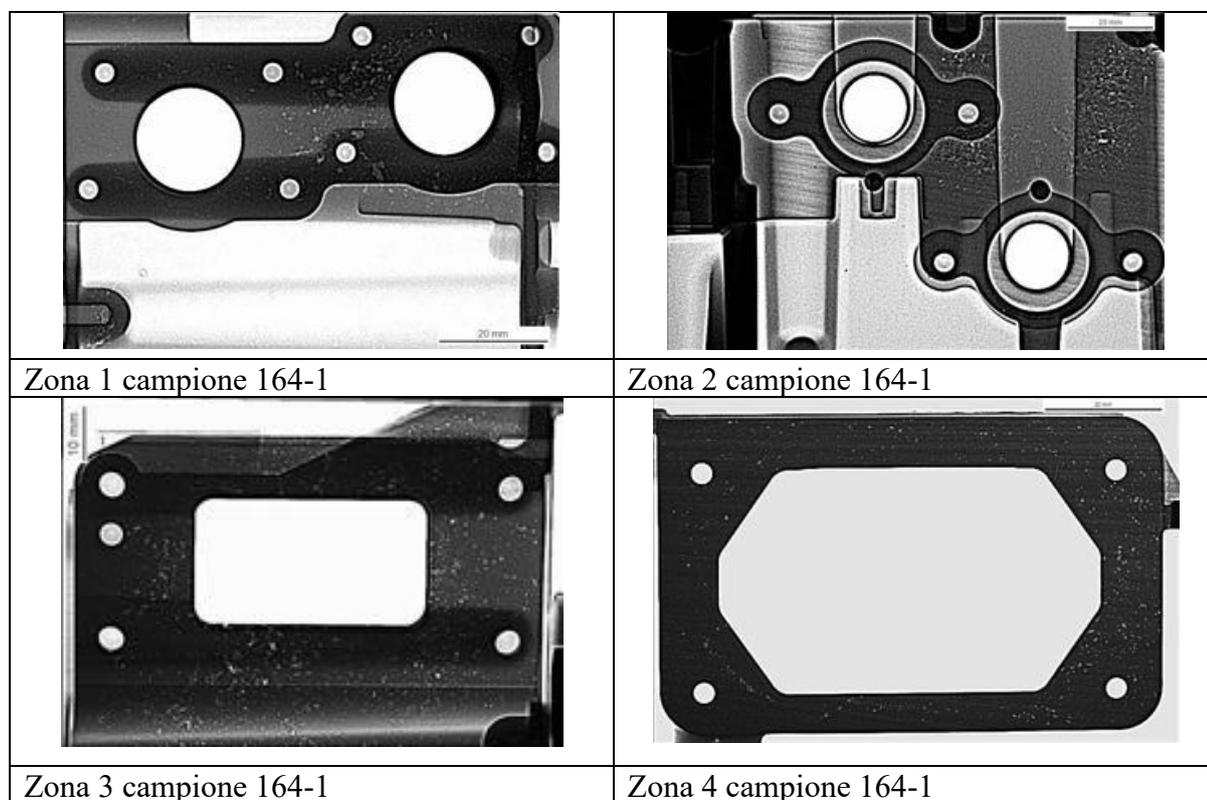


Figura A.8 – Acquisizioni radiografiche del campione 164-1.

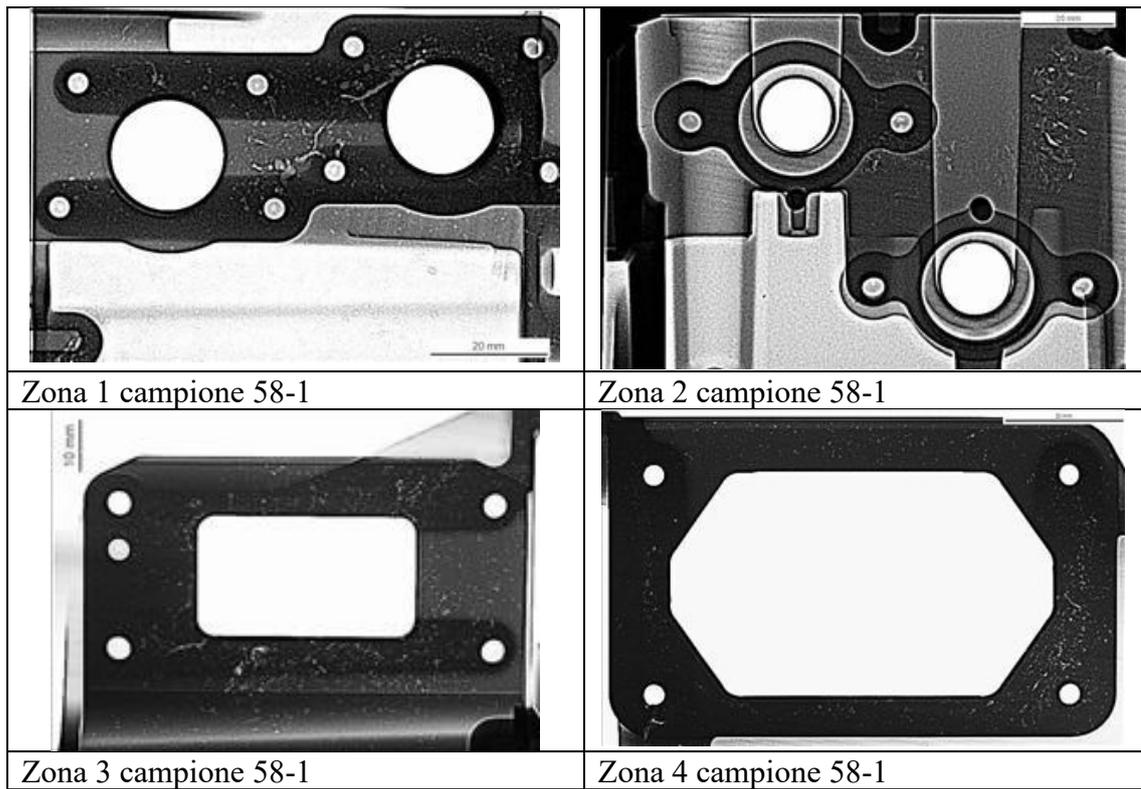


Figura A.9 – Acquisizioni radiografiche del campione 58-1.

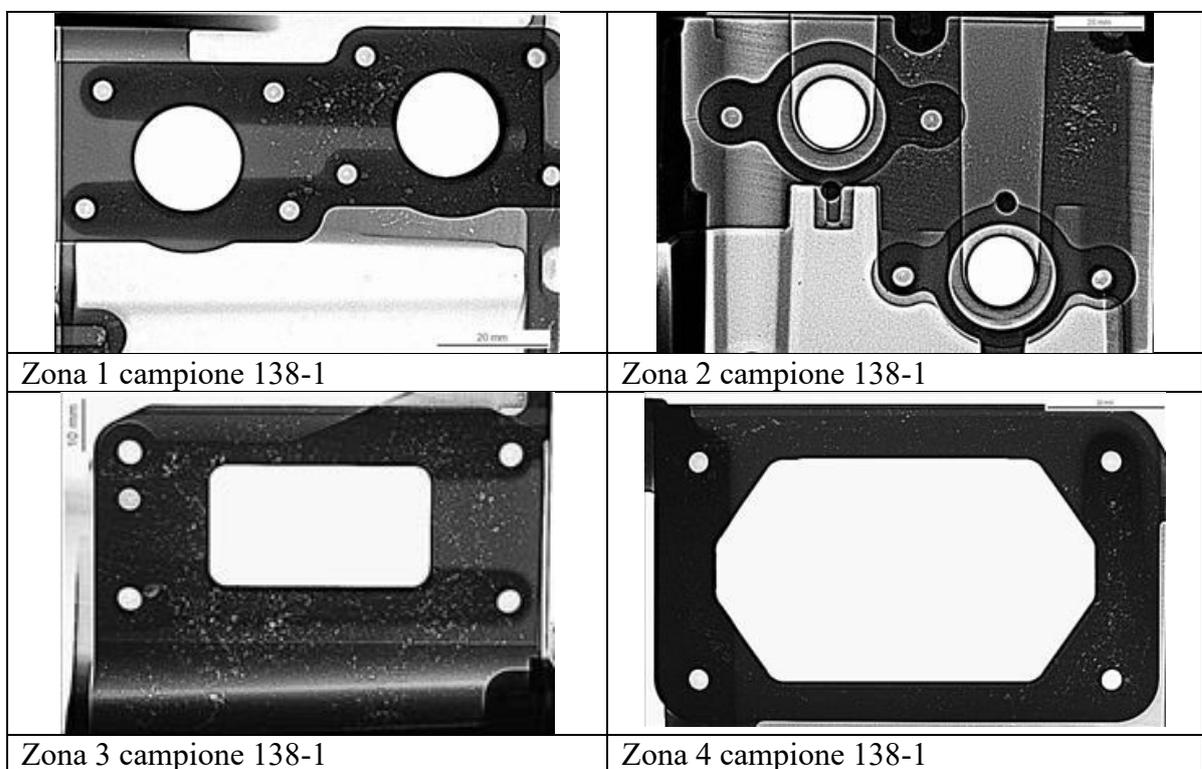


Figura A.10 – Acquisizioni radiografiche del campione 138-1.

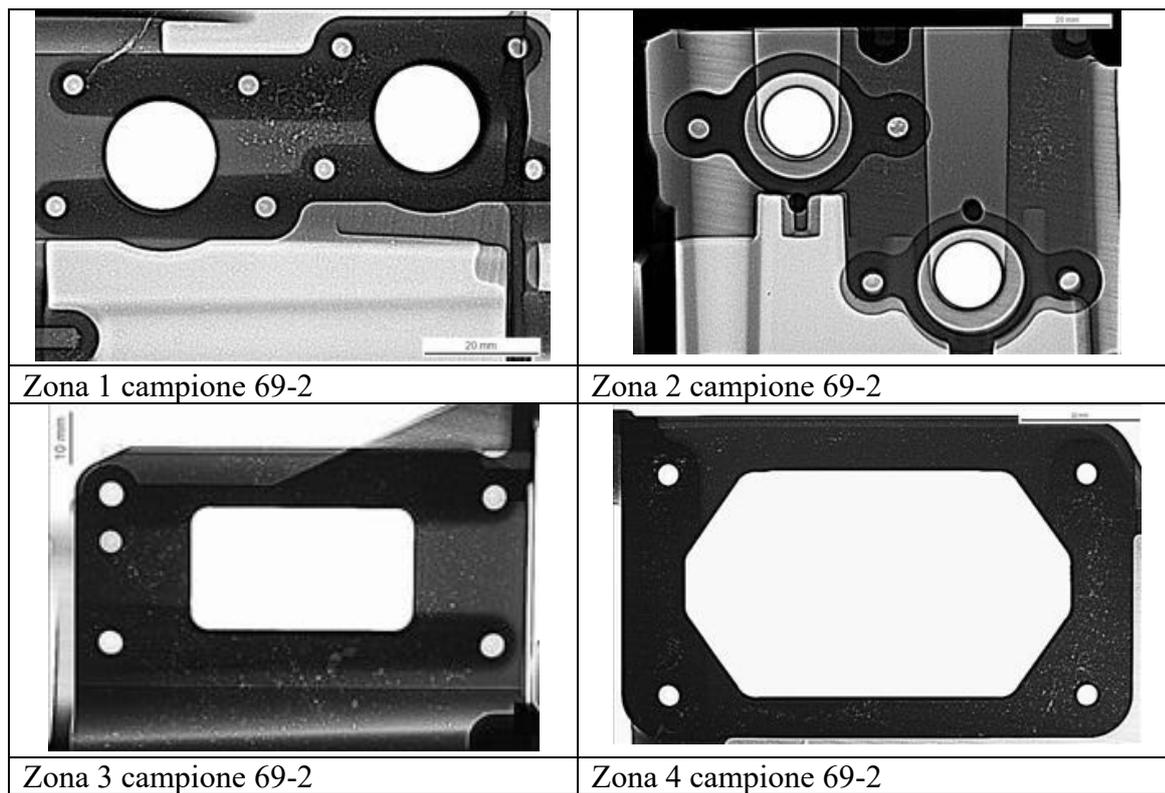


Figura A.11 – Acquisizioni radiografiche del campione 69-2.

APPENDICE B

Codice campione (-1)	Design	Porosità ZONA 1	Porosità ZONA 2	Porosità ZONA 3	Porosità ZONA 4	PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4
29	12	2	1	2	2	2	1	1	1
30	12	2	1	2	2	2	2	2	1
31	12	2	2	2	2	1	1	1	1
32	10	2	1	2	2	1	1	1	1
33	10	2	1	2	2	1	1	1	1
34	10	3	1	2	2	1	2	1	1
35	50	2	2	2	2	2	3	1	1
36	50	1	1	2	2	1	2	1	1
37*	50	2	1	2	2	1	1	1	1
37	46	1	1	2	2	2	2	1	1
38	46	1	1	2	2	1	2	2	1
39	46	1	1	2	2	1	1	1	1
40	46	1	1	3	2	2	1	1	1
41	4	3	1	3	2	1	1	4	1
42	4	3	1	2	2	1	2	2	1
43	4	4	2	5	3	1	4	5	1
44*	4	2	1	4	2	1	1	1	1
44	4	3	2	5	3	1	3	1	1
45	2	1	1	2	2	1	1	1	1
46*	2	2	2	2	2	1	1	1	1
46	40	1	1	2	2	2	1	1	1
47	40	1	1	2	2	1	1	1	1
48	52	2	2	2	2	2	1	2	1
49	52	3	1	2	2	2	1	3	1
50	26	3	2	3	2	1	1	1	1
51	26	2	1	2	2	1	1	1	1
52	48	2	1	2	2	2	1	2	1
53	48	2	2	3	2	1	1	1	1
54	28	1	1	2	1	1	2	1	1
55	28	1	1	2	1	1	2	1	1
56	28	2	1	2	1	1	2	1	1
57	44	3	2	3	3	2	2	1	1
58	44	3	2	2	2	1	1	1	1
59	42	2	1	2	2	1	2	1	1
60	42	2	1	2	2	2	3	1	1
61	24	2	1	2	2	1	2	1	1
62	24	2	1	1	2	1	3	1	1
63	54	2	1	1	1	2	1	1	1
64	54	2	1	2	2	1	1	1	1
65	30	2	1	3	2	1	1	1	1
66	30	2	2	2	2	1	1	1	1
67	30	2	2	3	2	1	2	4	1
68	30	2	1	3	2	2	1	1	1
69	17	2	2	2	2	1	1	1	1
70*	17	2	2	2	1	1	1	1	1
70	57	2	1	2	2	1	1	1	1
71	57	2	1	2	2	2	3	1	1
72	57	2	2	2	2	1	1	1	1
73	23	1	1	2	2	1	1	1	1
74	23	1	1	1	2	1	2	1	1
75	37	2	1	2	2	1	1	1	1
76	37	2	1	1	2	1	1	1	1
77	37	2	1	2	2	1	2	1	1
78*	35	2	2	2	2	1	1	1	1
78	35	2	1	1	2	1	1	1	1
79	19	2	1	1	2	1	1	1	1
80	19	2	1	2	2	1	2	1	1
81	21	2	1	2	2	1	1	1	1
82	21	2	1	1	1	1	1	1	1
83	59	2	1	1	2	1	1	1	1
84	59	2	1	2	1	1	1	1	1
85	39	2	1	2	1	1	1	1	1
86	39	2	1	3	2	1	1	2	1
87	39	2	1	3	2	1	1	2	1
88	11	2	1	2	2	1	1	1	1
89	11	2	1	2	2	1	1	1	1
90	9	2	1	1	1	1	1	1	1
91	9	2	2	1	2	1	1	1	1
92	33	2	2	1	2	1	1	1	1
93*	33	1	1	1	2	1	1	1	1
93	3	2	1	2	2	1	1	4	1
94	3	2	1	1	2	1	1	1	1
95	1	2	2	1	2	1	1	1	1
96	1	2	1	2	2	1	1	1	1

Tabella B.1 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 1 con lubrificazione a 7,5 s.

Codice campione (-1)	Design	Porosità ZONA 1	Porosità ZONA 2	Porosità ZONA 3	Porosità ZONA 4	PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4
113	16	3	2	3	2	1	1	1	1
114	16	2	1	3	2	1	1	2	1
115	14	2	1	1	2	1	1	2	1
116	14	1	1	2	2	1	1	1	1
117	14	1	1	2	1	1	2	1	1
118	8	2	1	2	2	1	2	1	1
119	8	2	1	4	2	1	2	1	1
120	6	1	1	2	2	1	1	1	1
121	6	1	1	2	1	1	3	1	1
122	36	2	2	2	2	1	2	2	1
123	36	2	1	2	2	2	2	1	1
124	22	2	1	2	2	1	2	2	1
125	22	2	1	3	2	2	2	1	1
126	56	1	1	3	2	1	2	1	1
127*	56	2	2	3	1	1	2	1	1
127	56	2	1	2	2	1	2	1	1
128	56	2	1	2	2	1	1	1	1
129	56	1	1	2	2	1	2	1	1
130	18	2	1	3	2	1	1	1	1
131	18	2	1	3	2	1	1	1	1
132	18	2	1	2	2	1	1	1	1
133	18	2	1	3	2	1	1	1	1
134	34	2	1	3	2	1	1	1	1
135	34	2	2	2	2	1	1	2	1
136	34	2	2	3	2	1	1	3	1
137	38	1	2	2	1	1	1	1	1
138	38	2	2	3	1	1	2	1	1
139*	58	2	2	2	2	1	1	1	1
139	58	3	1	4	3	2	2	3	1
140	58	2	2	3	2	2	1	2	1
141	58	3	1	2	2	1	1	4	1
142	58	3	1	3	2	1	1	4	1
143	20	2	1	2	1	2	1	1	1
144	20	2	1	2	2	1	2	1	1
145	20	2	1	2	2	1	1	1	1
146	47	2	1	2	1	1	2	1	1
147	47	2	1	2	1	1	3	1	1
148	47	2	1	2	2	1	2	1	1
149	60	1	2	2	1	2	1	1	1
150	60	2	1	2	2	1	2	1	1
151	60	2	2	3	1	1	1	2	1
152	60	2	1	4	2	1	1	1	1
153	51	2	1	2	1	1	1	1	1
154	51	2	1	2	2	1	1	1	1
155	51	2	1	2	1	1	1	1	1
156	32	2	1	1	1	2	1	1	1
157	32	1	1	3	1	1	2	1	1
158	32	1	2	2	2	1	1	1	1
159	27	2	2	2	2	1	2	1	1
160	27	2	2	2	2	2	1	1	1
161	27	3	2	3	2	1	2	1	1
162	53	1	1	2	1	1	1	1	1
163	53	2	2	3	1	1	1	1	1
164	41	2	2	3	2	1	1	2	1
165	41	2	1	2	2	1	1	1	1
166	45	2	2	2	2	1	1	1	1
167	45	2	2	2	2	1	2	1	1
168	29	1	1	3	2	1	1	1	1
169	29	1	2	2	2	1	2	1	1
170	49	3	2	3	1	1	1	1	1
171	49	3	2	3	1	1	1	2	1
172	55	2	1	2	1	1	1	1	1
173	55	2	2	2	2	1	1	1	1
174	25	2	2	1	1	1	1	1	1
175	25	1	2	1	1	1	1	1	1
176	43	2	2	1	1	1	1	1	1
177	43	1	2	2	1	2	1	1	1
178	31	2	2	2	1	2	1	1	1
179	31	2	2	2	2	1	2	1	1
180	15	1	2	1	2	1	1	3	1
181	15	1	1	1	2	1	2	1	1
182	13	1	1	2	1	1	1	1	1
183	13	1	2	1	1	1	1	1	1
184	7	2	2	2	2	1	1	1	1
185	7	2	2	2	2	1	1	1	1
186	5	2	2	2	1	1	1	1	1
187	5	2	2	2	1	1	1	1	1

Tabella B.2 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 1 con lubrificazione a 5 s.

Codice campione (-2)	Design	Porosità ZONA 1	Porosità ZONA 2	Porosità ZONA 3	Porosità ZONA 4	PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4
4	72	4	2	5	4	1	3	2	1
5	72	3	2	3	3	1	2	3	1
6	72	3	2	3	2	1	2	3	1
7	72	3	2	3	2	2	2	4	1
8*	70	2	1	3	2	1	1	1	1
8	70	1	1	2	2	1	1	1	1
9	70	2	2	2	2	1	2	1	1
10	70	2	1	3	2	1	2	1	1
11*	70	2	1	2	2	1	2	1	1
11	70	1	1	2	2	1	1	1	1
12	110	2	2	2	3	1	1	2	1
13	110	2	2	2	3	1	2	2	1
14	110	2	1	3	2	1	2	2	1
15*	106	2	1	3	2	1	1	1	1
15**	106	2	1	3	2	1	1	1	1
15	106	2	1	2	2	1	1	3	1
16	106	2	1	3	3	1	1	1	1
17	106	2	1	3	2	1	2	3	1
18	64	2	1	3	3	2	1	5	1
19	64	3	1	3	3	2	1	2	1
20	64	2	1	3	2	1	2	3	1
21	62	2	1	2	2	1	3	5	1
22	62	1	1	2	2	1	2	1	1
23	62	2	1	2	2	1	1	1	1
24	100	2	1	2	2	1	1	1	1
25	100	2	1	2	2	1	2	1	1
26	100	2	1	2	2	1	1	1	1
27	112	2	1	2	2	1	1	1	1
28	112	3	1	4	3	1	1	1	1
29	112	3	1	2	2	1	1	3	1
30	112	2	1	3	2	1	1	3	1
31	86	2	2	3	2	1	1	1	1
32	86	2	1	2	2	2	1	2	1
33	86	2	1	2	2	1	1	1	1
34	108	2	1	3	2	1	1	1	1
35	108	3	2	2	2	1	1	1	1
36	108	2	2	2	2	1	1	2	1
37	88	2	1	1	2	1	1	1	1
38	88	2	2	2	2	1	1	1	1
39	88	2	2	2	2	1	1	1	1
40	104	2	1	4	2	1	1	1	1
41	104	3	1	4	2	1	1	3	1
42	102	2	2	4	2	1	1	1	1
43	102	2	1	2	2	2	1	3	1
44	84	2	1	4	2	1	1	2	1
45	84	2	2	2	3	1	1	1	1
46	114	2	1	2	2	1	2	1	1
47	114	2	1	2	2	1	1	1	1
48	90	3	2	3	2	1	1	1	1
49	90	3	2	3	2	2	3	2	1
50	77	2	2	3	2	2	1	1	1
51	77	2	1	2	2	1	1	1	1
52	117	2	2	3	2	1	1	1	1
53	117	2	2	2	2	1	2	1	1
54	83	2	1	2	2	1	1	1	1
55	83	2	1	2	2	1	1	1	1
56	97	2	1	2	2	1	1	1	1
57	97	2	1	1	1	1	1	1	1
58	95	2	1	2	2	1	2	1	1
59	95	2	2	3	2	1	1	1	1
60*	79	2	1	3	2	1	1	2	1
60	79	2	1	2	2	1	1	1	1
61	81	2	2	3	2	1	2	1	1
62	81	3	1	3	2	1	1	1	1
63	119	2	2	2	2	1	1	1	1
64	119	2	1	2	2	1	1	1	1
65	99	3	2	4	3	1	2	3	1
66	99	2	1	3	2	1	1	1	1
67	71	2	1	3	2	1	1	2	1
68	71	2	2	2	2	1	1	1	1
69	69	2	1	2	2	1	1	1	1
70	69	2	1	2	2	1	1	1	1
71	93	2	1	2	2	1	1	2	1
72	93	2	1	2	2	1	1	2	1
73	63	2	1	3	3	1	1	3	1
74	63	2	2	3	2	1	1	3	1
75	61	2	2	2	1	1	1	1	1
76	61	2	1	1	1	1	1	1	1

Tabella B.3 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 2 con lubrificazione a 7,5 s.

Codice campione (-2)	Design	Porosità ZONA 1	Porosità ZONA 2	Porosità ZONA 3	Porosità ZONA 4	PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4
99	76	2	1	2	2	1	1	1	1
100	76	2	2	2	2	3	3	1	1
101	76	2	2	2	2	1	2	1	1
102*	74	2	1	2	2	1	1	1	1
102	74	1	1	1	1	2	1	1	1
103	74	1	1	1	1	1	1	1	1
104	68	2	2	3	2	2	1	3	1
105	68	2	2	3	2	2	1	2	1
106	68	3	1	2	2	1	1	3	1
107	66	2	2	1	2	1	1	1	1
108	66	1	1	1	2	1	1	1	1
109	66	2	1	2	2	1	2	1	1
110	96	2	1	2	2	1	1	2	1
111	96	1	1	2	1	1	1	1	1
112	96	2	1	2	1	1	1	1	1
113	82	2	1	2	2	1	1	1	1
114	82	2	1	2	2	1	1	1	1
115	116	2	1	1	2	1	2	2	1
116	116	1	1	1	1	1	1	1	1
117	78	2	2	1	1	1	2	1	1
118	78	1	1	2	2	1	1	1	1
119	78	1	1	1	1	1	1	2	1
120	94	2	1	4	2	1	2	1	1
121	94	3	1	2	1	1	1	4	1
122	98	2	1	2	1	1	1	1	1
123	98	2	2	2	1	1	1	1	1
124	118	2	1	2	1	1	1	1	1
125	118	2	1	2	3	1	1	1	1
126	80	1	1	1	2	1	1	1	1
127	80	1	1	2	2	1	2	1	1
128	107	2	1	2	1	1	1	1	1
129	107	1	1	1	2	2	1	1	1
130	120	2	2	1	2	1	1	2	1
131*	120	2	2	2	2	1	1	1	1
131	111	2	1	1	1	1	2	1	1
132	111	2	1	2	2	1	1	1	1
133	92	1	1	1	1	1	1	1	1
134	87	2	1	2	2	1	1	4	1
135	87	2	1	2	2	1	1	2	1
136	87	2	2	3	2	1	1	1	1
137	113	2	1	2	2	1	1	1	1
138	113	1	2	2	1	1	1	1	1
139	113	2	2	2	2	1	1	1	1
140	113	2	1	2	1	1	1	1	1
141	101	2	1	2	2	1	1	2	1
142	101	2	1	3	2	1	1	4	1
143	105	2	1	2	1	1	1	1	1
144	105	2	1	2	1	1	1	1	1
145	89	1	1	2	2	1	1	1	1
146	89	1	2	2	2	1	1	1	1
147	109	1	2	2	2	1	1	1	1
148	109	2	2	3	2	2	1	3	1
149	115	1	1	1	1	1	1	1	1
150	115	1	1	1	1	1	1	1	1
151	85	1	1	1	2	1	1	1	1
152	85	1	1	1	1	1	1	1	1
153	103	1	1	1	1	1	1	1	1
154	103	1	2	2	2	1	1	1	1
155*	91	2	1	3	2	1	1	2	1
155	91	2	2	5	3	1	1	2	1
156	91	2	2	2	2	1	1	1	1
157	91	2	2	1	2	1	1	1	1
158	91	2	2	1	3	1	1	1	1
159	75	2	2	2	2	1	1	1	1
160	75	2	1	2	2	1	1	1	1
161	75	2	1	2	2	1	1	1	1
162	75	2	2	2	2	1	1	1	1
163	75	2	2	2	2	1	1	1	1
164	73	1	1	1	1	1	1	1	1
165	73	1	1	1	1	1	1	1	1
166	73	1	1	1	1	1	1	1	1
167	73	1	2	1	2	1	1	1	1
168	67	1	2	2	2	1	1	3	1
169	67	2	2	2	2	1	1	4	1
170	67	2	2	3	2	2	1	1	1
171	67	2	2	2	3	1	1	1	1
172	65	1	1	1	2	1	1	1	1
173	65	1	2	1	1	1	1	1	1
174	65	1	2	2	1	1	1	1	1
175	65	1	2	2	1	1	1	1	1
189	113	2	1	2	2	1	1	1	1
190	113	2	1	2	1	1	1	1	1
191	113	2	2	1	2	1	1	1	1
192	113	2	1	2	1	1	1	1	1
193	113	2	2	1	2	1	1	2	1
194	113	2	2	2	1	1	1	1	1
195	113	2	2	1	2	1	1	1	1
196	113	2	1	1	1	2	1	1	1
197	113	2	2	1	1	1	1	1	1
198	113	1	1	2	2	1	1	1	1
199	113	1	2	1	2	1	2	1	1
200	113	2	1	2	1	1	1	1	1
201	113	2	2	2	1	1	1	1	1

Tabella B.4 – Valutazioni delle porosità e dei pin per i campioni del giorno 2 con lubrificazione a 5 s.

Design	T forno [°C]	Spray [s]	V1 [m/s]	C1 [mm]	VM [m/s]
1	675	7,5	0,25	480	6,2
2	675	7,5	0,25	400	6,2
3	675	7,5	0,25	480	4,8
4	675	7,5	0,25	400	4,8
5	675	5	0,25	480	6,2
6	675	5	0,25	400	6,2
7	675	5	0,25	480	4,8
8	675	5	0,25	400	4,8
9	675	7,5	0,1	480	6,2
10	675	7,5	0,1	400	6,2
11	675	7,5	0,1	480	4,8
12	675	7,5	0,1	400	4,8
13	675	5	0,1	480	6,2
14	675	5	0,1	400	6,2
15	675	5	0,1	480	4,8
16	675	5	0,1	400	4,8
17	675	7,5	0,2	440	5,5
18	675	5	0,15	420	6,2
19	675	7,5	0,2	460	5,5
20	675	5	0,2	430	5,5
21	675	7,5	0,1	470	4,8
22	675	5	0,25	410	5,5
23	675	7,5	0,15	450	6,2
24	675	7,5	0,2	430	5,5
25	675	5	0,1	470	6,2
26	675	7,5	0,2	410	5,5
27	675	5	0,15	450	4,8
28	675	7,5	0,15	420	6,2
29	675	5	0,2	460	5,5
30	675	7,5	0,15	440	4,8
31	675	5	0,25	470	5,5
32	675	5	0,25	440	6,2
33	675	7,5	0,15	480	5,5
34	675	5	0,2	420	4,8
35	675	7,5	0,1	460	5,5
36	675	5	0,15	410	5,5
37	675	7,5	0,25	450	6,2
38	675	5	0,15	430	5,5
39	675	7,5	0,2	470	4,8
40	675	7,5	0,15	410	5,5
41	675	5	0,2	450	4,8
42	675	7,5	0,1	430	5,5
43	675	5	0,2	470	6,2
44	675	7,5	0,25	420	4,8
45	675	5	0,15	460	5,5
46	675	7,5	0,2	400	6,2
47	675	5	0,1	440	5,5
48	675	7,5	0,15	420	5,5
49	675	5	0,25	460	4,8
50	675	7,5	0,15	400	5,5
51	675	5	0,2	440	6,2
52	675	7,5	0,2	410	4,8
53	675	5	0,15	450	5,5
54	675	7,5	0,2	430	6,2
55	675	5	0,1	470	5,5
56	675	5	0,25	410	6,2
57	675	7,5	0,15	450	5,5
58	675	5	0,2	430	4,8
59	675	7,5	0,15	470	5,5
60	675	5	0,15	440	5,5

Tabella B.5 – Designs di parametri impiegati nel primo giorno della campionatura.

Design	T forno [°C]	Spray [s]	V1 [m/s]	C1 [mm]	VM [m/s]
61	705	7,5	0,25	480	6,2
62	705	7,5	0,25	400	6,2
63	705	7,5	0,25	480	4,8
64	705	7,5	0,25	400	4,8
65	705	5	0,25	480	6,2
66	705	5	0,25	400	6,2
67	705	5	0,25	480	4,8
68	705	5	0,25	400	4,8
69	705	7,5	0,1	480	6,2
70	705	7,5	0,1	400	6,2
71	705	7,5	0,1	480	4,8
72	705	7,5	0,1	400	4,8
73	705	5	0,1	480	6,2
74	705	5	0,1	400	6,2
75	705	5	0,1	480	4,8
76	705	5	0,1	400	4,8
77	705	7,5	0,2	440	5,5
78	705	5	0,15	420	6,2
79	705	7,5	0,2	460	5,5
80	705	5	0,2	430	5,5
81	705	7,5	0,1	470	4,8
82	705	5	0,25	410	5,5
83	705	7,5	0,15	450	6,2
84	705	7,5	0,2	430	5,5
85	705	5	0,1	470	6,2
86	705	7,5	0,2	410	5,5
87	705	5	0,15	450	4,8
88	705	7,5	0,15	420	6,2
89	705	5	0,2	460	5,5
90	705	7,5	0,15	440	4,8
91	705	5	0,25	470	5,5
92	705	5	0,25	440	6,2
93	705	7,5	0,15	480	5,5
94	705	5	0,2	420	4,8
95	705	7,5	0,1	460	5,5
96	705	5	0,15	410	5,5
97	705	7,5	0,25	450	6,2
98	705	5	0,15	430	5,5
99	705	7,5	0,2	470	4,8
100	705	7,5	0,15	410	5,5
101	705	5	0,2	450	4,8
102	705	7,5	0,1	430	5,5
103	705	5	0,2	470	6,2
104	705	7,5	0,25	420	4,8
105	705	5	0,15	460	5,5
106	705	7,5	0,2	400	6,2
107	705	5	0,1	440	5,5
108	705	7,5	0,15	420	5,5
109	705	5	0,25	460	4,8
110	705	7,5	0,15	400	5,5
111	705	5	0,2	440	6,2
112	705	7,5	0,2	410	4,8
113	705	5	0,15	450	5,5
114	705	7,5	0,2	430	6,2
115	705	5	0,1	470	5,5
116	705	5	0,25	410	6,2
117	705	7,5	0,15	450	5,5
118	705	5	0,2	430	4,8
119	705	7,5	0,15	470	5,5
120	705	5	0,15	440	5,5

Tabella B.6 – Designs di parametri impiegati nel secondo giorno della campionatura.