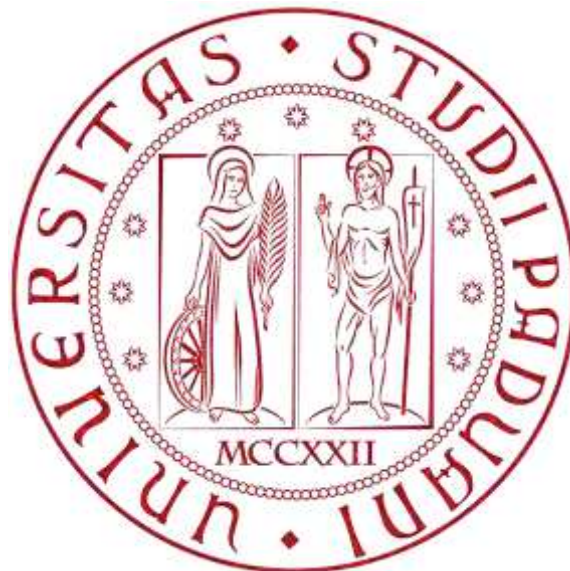


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

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



**TESI MAGISTRALE IN INGEGNERIA
DELL'INNOVAZIONE DEL PRODOTTO**

**Analisi qualitativa di getti in Alluminio Pressocolati e sviluppo di
correlazioni con i parametri di processo caratteristici.**

RELATORE: Prof. Franco Bonollo
CORELATORI: Ing. Giorgio Kral
Ing. Eleonora Battaglia

LAUREANDO: Andrea Brotto

Anno accademico: 2015-2016

INDICE:

SOMMARIO

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

- 1.1 Introduzione: il processo di HPDC.....
- 1.2 Il progetto EU MUSIC.....
- 1.3 Caratteristiche e parametri del processo di pressocolata (hpdc) e influenza sulla qualità finale.....
- 1.4 Influenza dei parametri di processo nella qualità del getto.....

CAPITOLO 2: IMPOSTAZIONE FASE SPERIMENTALE

- 2.1 Descrizione del componente da produrre.....
- 2.2 Design of experiment.....

CAPITOLO 3: MONITORAGGIO DEL PROCESSO

- 3.1 Analisi dati dei sensori.....
- 3.2 Analisi dei sensori nel pistone.....
- 3.3 Analisi dei sensori all'interno dello stampo.....

CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE NON DISTRUTTIVA

- 4.1 Ispezione visiva.....
- 4.2 Liquidi penetranti.....
- 4.3 Analisi ai raggi X.....

CAPITOLO 5: CARATTERIZZAZIONE MICROSTRUTTURALE

- 5.1 Analisi delle sezioni metallurgiche.....

CAPITOLO 6: CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

- 6.1 Prove a trazione.....
- 6.2 Prove a flessione.....

CAPITOLO 7: ANALISI CRITICA DEI DATI SPERIMENTALI

- 7.1 Prime correlazioni con i parametri di processo.....
- 7.2 Correlazione tra temperatura del forno e punteggio porosità.....
- 7.3 Correlazione tra pressione di intensificazione e punteggio porosità.....
- 7.4 Correlazione tra punto di switch e punteggio porosità.....
- 7.5 Correlazioni tra velocità di seconda fase e punteggio porosità.....
- 7.6 Rapporto tra pressione di terza fase e velocità di seconda fase contro il punteggio porosità.....
- 7.7 Rapporto tra temperatura del forno e pressione di terza fase contro il punteggio porosità.....
- 7.8 Correlazioni in due variabili del punteggio porosità.....
- 7.9 Correlazioni tra prove meccaniche e parametri di processo.....

- 7.10 Correlazioni in due variabili delle prove meccaniche.....
- 7.11 Correlazione tra percentuale di ossidi nella superficie di frattura e i parametri di processo utilizzati.....
- 7.12 Correlazione in due variabili della percentuale di ossidi.....

CAPITOLO 8: CONCLUSIONI

APPENDICE

SOMMARIO

L'obiettivo della tesi, inserita nel contesto del progetto europeo MUSIC (MULTI-layers control and cognitive System to drive metal and plastic production line for Injected Components), è quello di ricavare delle correlazioni chiare ed evidenti tra i parametri di processo utilizzati nel processo di pressocolata (HPDC), con la qualità finale del getto prodotto.

Il primo capitolo introduce e descrive le caratteristiche del processo produttivo in questione e chiarisce l'obiettivo dell'intero progetto.

In particolare si evidenziano quali sono i parametri chiave che possono influenzare maggiormente la qualità finale dei prodotti: temperatura del forno, posizione di switch tra velocità di prima e seconda fase, velocità di seconda fase e infine pressione di intensificazione.

Alla variazione di ogni parametro corrisponde una tipologia di difetti che si può riscontrare sia a livello estetico che metallurgico.

Nel secondo capitolo si definisce l'impostazione della parte sperimentale, in accordo con lavori e tesi precedentemente sviluppate nell'ambito dello stesso progetto, per garantire una certa continuità sia di metodo che di risultati.

Una serie di circa 250 getti è stata prodotta presso la fonderia RDS S.P.A. L'intero processo produttivo è stato monitorato grazie ad un innovativo sistema di sensori in grado di rilevare l'andamento di pressioni, temperature e velocità sia del pistone, sia di quanto avviene all'interno della cavità dello stampo. La temperatura dello stampo è stata monitorata e controllata grazie ad un sistema di termocamere e di lubrifica installato sulla pressa. Entrambi i dispositivi sono stati forniti da partner del progetto, Electronics e Motultech Baraldi rispettivamente.

Nel terzo capitolo viene descritta la modalità con cui i dati ottenuti dai sensori sono stati filtrati ed elaborati con l'uso di Excell e Matlab, per ricostruire gli andamenti delle curve di pressione e velocità del pistone, e l'andamento delle temperature all'interno dello stampo.

In oltre è stato verificato che i parametri registrati riscontrati dai sensori fossero coincidenti con quelli nominalmente impostati per ogni design.

Nel capitolo quattro sono descritte le analisi non distruttive eseguite sui campioni prodotti: all'inizio una semplice analisi visiva qualitativa a cui è stato associato un punteggio da 1 (migliore) a 4 (peggiore) sulla base dei difetti superficiali evidenziati, successivamente una più oggettiva analisi ai raggi X.

Il getto è stato suddiviso in 4 zone di analisi, e grazie al software per l'analisi d'immagine Leica QWIN è stata ricavata, a partire dalle immagini ai raggi X, la percentuale di porosità da gas intrappolato zona per zona.

Passando al capitolo cinque si è voluto analizzare nel dettaglio un ristretto numero di campioni prodotti ricavandone delle sezioni metallografiche in particolari posizioni.

Per alcuni campioni sono state rilevate inclusioni solide successivamente analizzate grazie ad un microscopio elettronico a scansione, per ricavarne l'esatta composizione chimica.

Nel sesto capitolo si passa ad una caratterizzazione di tipo meccanico, in cui sono stati ottenuti, in zone d'interesse, dei provini per prove a trazione e flessione.

I valori di tensione ultima a rottura (UTS) e allungamento percentuale (A%) sono stati rielaborati e confrontati con i valori nominali garantiti per la lega secondo normativa UNI EN 1706.

In particolare per ricavare il valore della tensione massima nella prova di flessione a tre punti è stato creato un modello col software di analisi agli elementi finiti ANSYS Workbench®, con l'obiettivo di ricostruire l'andamento delle tensioni di trazione e compressione nella sezione maggiormente sollecitata.

Per i provini a trazione invece si è ricavata l'immagine di tutta la superficie di frattura al SEM, sulla quale è stato eseguito un conteggio della percentuale di ossidi pellicolari e di porosità da gas riscontrate.

Nel settimo capitolo si esegue un'analisi critica dei risultati ottenuti, sviluppando correlazioni tra i dati ottenuti e i parametri di processo impostati.

Dall'analisi ai raggi X emerge quanto un aumento della pressione di intensificazione sia efficace nel ridurre le porosità da gas intrappolato, come pure un aumento della velocità di seconda fase, a patto di non avere switch point troppo ritardati per poter permettere al pistone di raggiungere la velocità nominalmente impostata.

È stata sfruttata una rappresentazione in grafici 3D delle correlazioni, essendoci più parametri variabili contemporaneamente, che evidenzia ancora più chiaramente l'efficacia della variazione di un parametro piuttosto che un altro.

Anche le temperature medio-basse del forno riducono la formazione di porosità, avendo un fronte fuso in avanzamento all'interno dello stampo che risulta più denso, con minor probabilità di formare moti turbolenti con conseguente inglobamento d'aria.

Dalle analisi microstrutturali emerge quanto sia importante monitorare la pulizia del bagno di lega, che deve essere opportunamente degasato e pulito, onde evitare di introdurre inclusioni solide a base di particelle pesanti che depositano sul fondo del forno di mantenimento.

Le caratteristiche meccaniche sono direttamente proporzionali alla presenza di ossidi e porosità, i primi in particolare sono più deleteri nella riduzione dell'allungamento percentuale, associati a basse velocità di seconda fase e switch point molto anticipati.

I risultati più evidenti e classificazioni qualitative e quantitative, sono state infine implementate in un modello con lo scopo di monitorare in linea temporale, durante la produzione, il livello qualitativo dei getti, prevedendo la qualità del getto in uscita.

1 INTRODUZIONE

1.1 IL PROCESSO DI PRESSOCOLATA (HPDC)

Il processo produttivo di colata in alta pressione delle leghe leggere (HPDC: High pressure die casting) oltre ad avere un'elevata produttività permette la creazione di getti con geometrie anche molto complesse, elevata accuratezza dimensionale e garantiscono un'ottima finitura superficiale, il che permette alle aziende un notevole risparmio in lavorazioni successive. Non stupisce il fatto che sempre più componenti vengano riprogettati per essere prodotti mediante questa tecnica, soprattutto nei settori in cui l'uso delle leghe leggere ha un impatto fondamentale per l'efficienza e la funzionalità del prodotto finito, basti pensare al settore automobilistico o aereospaziale.

Purtroppo è anche il processo di fonderia che presenta la maggior sensibilità alla formazione di difetti, sia interni che superficiali, se non costantemente monitorato e controllato, con conseguente ripercussione sulla qualità dei getti prodotti.

Se è vero che da un lato si ricerca un'elevata qualità del componente mantenendo un'alta produttività, è anche vero che il controllo qualitativo tuttora viene svolto solo alla fine del processo, ed è difficile con le tecniche attuali pensare di applicare tali controlli alla totalità dei getti prodotti. Basti pensare al difetto più comune dei componenti pressocolati, ossia la porosità da gas intrappolato che si forma localmente in punti critici, che essendo un difetto interno si nota solo tramite un'analisi ai raggi X a posteriori.

Pur essendo un processo ormai completamente automatizzato anche grazie all'uso di software di simulazione di processo, nella pratica aziendale l'ottimizzazione del setup è ancora incentrata sull'esperienza e l'abilità del personale tecnico. Infine il monitoraggio in linea dei parametri di processo è eseguito da sistemi di controllo individuali, ma che non sono tra loro interfacciati in modo tale da stimare la qualità finale del getto in tempo reale.

1.2 IL PROGETTO MUSIC

Il progetto di ricerca Europeo MUSIC (MULTi-layers control and cognitive System to drive metal and plastic production line for Injected Components) è nato per esaltare le peculiarità che rendono la pressocolata un processo competitivo, andando ad analizzare e risolvere quei problemi e contraddizioni che lo caratterizzano. Tale progetto ha in oltre l'obiettivo di implementare un sistema cognitivo per monitorare in maniera attiva durante la produzione in linea la qualità dei singoli getti prodotti, agendo in tempo reale sui parametri di processo in modo da diminuire la percentuale di scarti globali.

Tale sistema richiede però un controllo integrato trasversale di tutti i parametri chiave di processo, come la temperatura della lega o dello stampo in ogni sua porzione, la variazione di pressione durante la fase di iniezione e mantenimento o la velocità del pistone.

La rete cognitiva sarà quindi in grado di calcolare un indice di qualità dei prodotti non appena vengono estratti dallo stampo uno ad uno, basato sul set di misure effettuato sui parametri getto dopo getto.

Sarà in oltre possibile mantenere uno storico sulla totalità della produzione e settare una soglia percentuale di scarti regolata dalle esigenze del cliente in modo da minimizzare i costi.

L'intero progetto è frutto della collaborazione tra molti partners tra cui l'Università degli Studi di Padova (DTG: dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali), l'Università di Aalen (GTA) e aziende come RDS, Enginsoft, Electronics, Audi, MOTULTECH-Baraldi, ecc; che hanno messo a disposizione personale tecnico e strumentazione per eseguire prove e test.



Fino ad ora è stato preso come riferimento un getto non di normale produzione (“ferro di cavallo” fig.1), la cui geometria era studiata appositamente per generare il maggior numero di difetti al variare dei parametri di processo, in modo da generare un’alta variabilità qualitativa nell’arco di tutta la produzione rendendo più evidente la dipendenza tra difetti e parametri di processo.

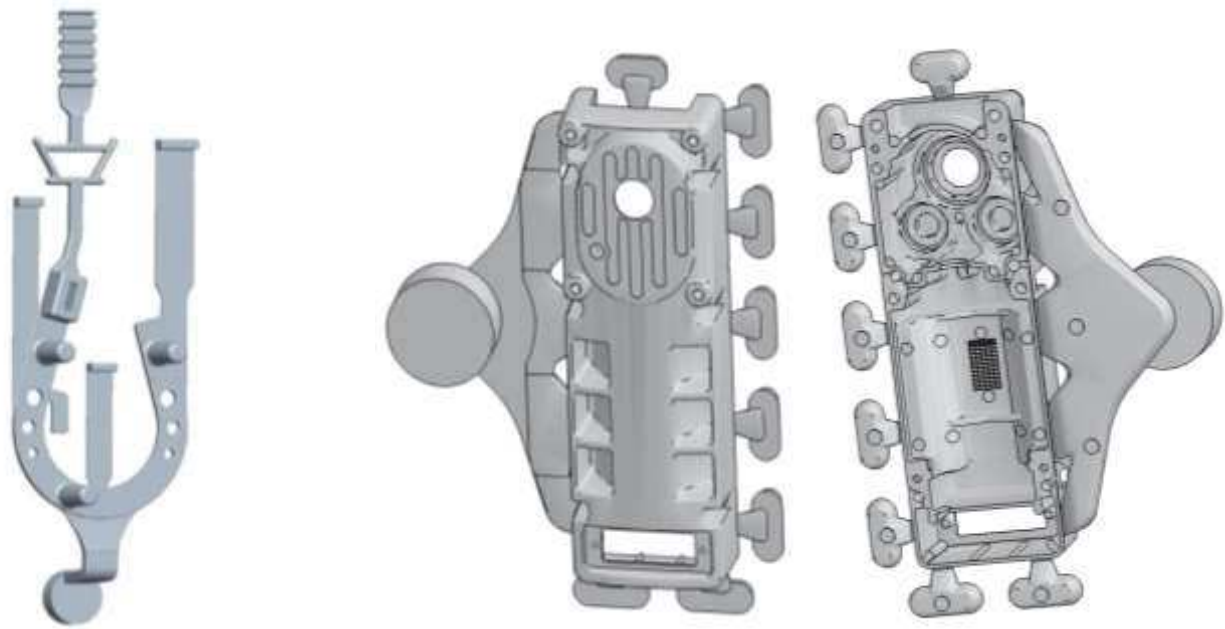


Figura 1: modello CAD del getto a ferro di cavallo (sinistra) e del getto RDS (destra)

L’obiettivo di questa tesi in particolare è quello di ricavare delle correlazioni tra le caratteristiche qualitative di un getto di normale produzione (“motor gear housing” figura 1) e i principali parametri di processo chiave. Tali correlazioni saranno poi confrontate con i risultati dei precedenti lavori e implementate nel sistema sopradescritto.

1.3 CARATTERISTICHE E PARAMETRI DEL PROCESSO DI PRESOCOLATA (HPDC) E INFLUENZA SULLA QUALITÀ FINALE

Nel processo di pressocolata in camera fredda la lega viene pescata da una siviera a temperatura controllata dopo il degasaggio, e versata all'interno della camera di iniezione. Il pistone inizia ad accelerare lentamente fino al raggiungimento della velocità di prima fase che si conclude quando il pistone chiude la luce dalla quale è stata immessa la lega.

Velocità troppo basse di prima fase creano un moto ondoso della lega nel cilindro, con un possibile ritorno d'onda dalla fine del cilindro, in più la lega cala di temperatura e inizia a raffreddarsi.

Per velocità troppo alte invece il fronte in avanzamento può sollevarsi e collassare su se stesso inglobando l'aria ancora racchiusa nel cilindro, con probabile formazione di porosità successive all'interno dello stampo.

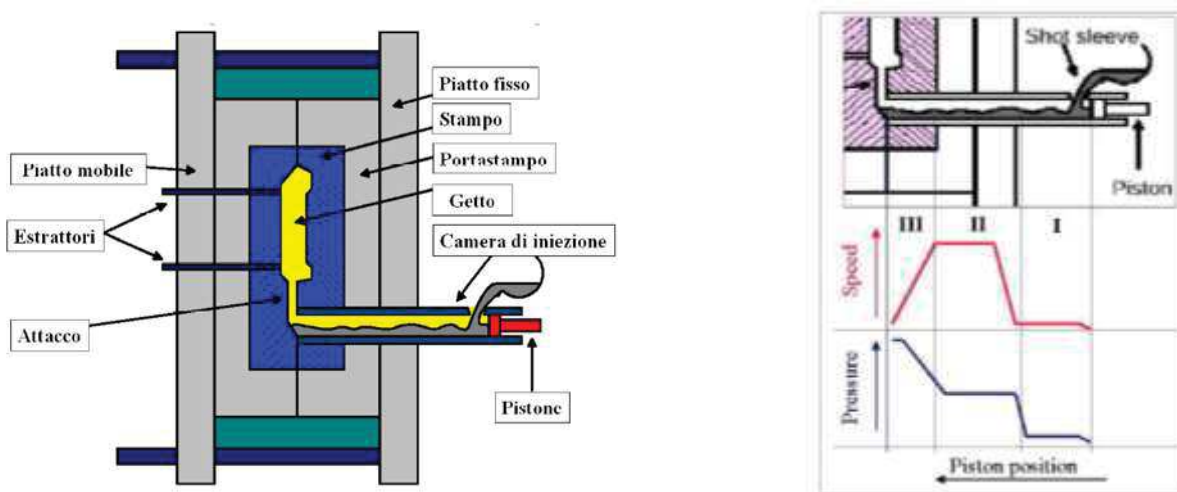


Figura 2: schema semplificato dei componenti di una pressa (sinistra), andamento di pressione e velocità nelle tre fasi (destra)

Una volta chiuso il gate di alimentazione del cilindro il pistone accelera bruscamente e raggiunge la velocità di seconda, la lega a questa velocità completa il riempimento dello stampo in pochi millisecondi, per evitare che la perdita di calore durante l'avanzamento faccia solidificare prematuramente porzioni del getto.

Una velocità di seconda fase troppo elevata può creare turbolenze localizzate nelle zone con geometrie complesse, con conseguente intrappolamento dell'aria che si trova ancora all'interno dello stampo.

Una bassa velocità di seconda fase corrisponde ad un fronte di avanzamento della lega più compatto.

L'istante in cui si passa dalla velocità di prima fase V_1 e seconda V_2 è detto switchpoint, misurato in millimetri di spostamento del pistone dalla posizione di riposo, è idealmente posizionato quando la lega (ancora alla velocità V_1) raggiunge l'ingresso dello stampo.

Uno switch troppo anticipato può causare turbolenza già nei gate di alimentazione dello stampo, mentre se è troppo ritardato la lega non riesce a raggiungere elevate V_2 avendo poco spazio per accelerare, di conseguenza può verificarsi una maggiore perdita di temperatura durante l'avanzamento.

Una volta completato il riempimento dello stampo il pistone non avanza ulteriormente ma applica una pressione cosiddetta di intensificazione o di terza fase per compattare la lega durante

la solidificazione, ciò previene la formazione di cavità da rititi e ha effetto sulla dimensione delle inclusioni gassose.

Maggiore è la pressione minore è la dimensione delle porosità, ma si avrà bisogno di maggiori forze di serraggio tra gli stampi e si aumenterà la probabilità di formare flash e bave sulla superficie di separazione, con conseguenti lavorazioni successive per eliminarli

In oltre l'aria fortemente compressa intrappolata all'interno del getto potrebbe creare delle tensioni interne anche di qualche decina di MPa, che inevitabilmente vanno ad alterare le caratteristiche meccaniche finali.

Una volta solidificatosi completamente gli stampi si aprono ed il pezzo viene estratto, pronto per essere sottoposto alle eventuali lavorazioni successive.

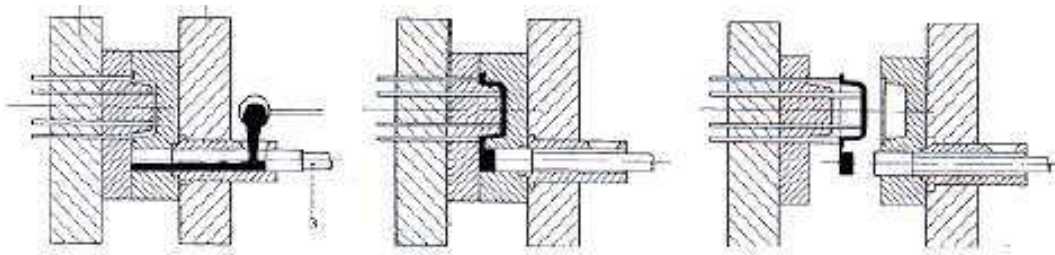


Figura 3: da sinistra: alimentazione del cilindro di iniezione, fase i iniezione, fase di estrazione

1.4 INFLUENZA DEI PARAMETRI DI PROCESSO NELLA QUALITÀ DEL GETTO:

Velocità di seconda fase: Terminata la prima fase in cui il pistone chiude il gate di alimentazione del cilindro, il pistone accelera rapidamente per iniettare tutta la lega fusa in ogni zona dello stampo prima che solidifichi nei punti critici.

Lunghi tempi di riempimento corrispondono a basse velocità di seconda fase, che permettono un più efficace sfiato dell'aria all'interno dello stampo con un fronte di avanzamento più compatto, e un più graduale salto termico della lega che riduce la metallizzazione superficiale tra pezzo e stampo.

Di contro c'è una maggior probabilità che si formino gocce fredde che trascinate dal fronte ancora fluido si concentrano nelle zone più distanti dagli attacchi di colata. Con bassi tempi di riempimento e velocità elevate si riducono le probabilità di formare gocce fredde, ma se la velocità è troppo elevata si rischia di avere un fronte di avanzamento più turbolento con conseguente intrappolamento di gas.

Switch point: la posizione di switch corrisponde al punto in cui il pistone accelera e passa da velocità di prima e seconda fase, la posizione minima è quella in cui il pistone ha appena chiuso il gate di alimentazione del cilindro di iniezione.

Se la seconda fase è troppo anticipata la lega rimane per più tempo ad una velocità elevata con maggior probabilità di intrappolare gas nel suo percorso. Al contrario con uno switch point ritardato c'è il rischio che la lega non abbia il tempo sufficiente per accelerare e raggiungere la velocità di seconda fase ideale con le conseguenze sopracitate.

Pressione di terza fase: ovvero il momento in cui il pistone applica e mantiene per qualche secondo la pressione di intensificazione sulla lega mentre questa solidifica.

Tale fase inizia quando la lega fusa ha già raggiunto ogni porzione dello stampo. La

pressione ha lo scopo di minimizzare la formazione di porosità dovuta a gas intrappolato, in oltre serve a comprimere e quindi a ridurre le dimensioni delle bolle intrappolate. Tale pressione deve essere mantenuta per un tempo sufficiente per evitare la formazione di cavità da ritiro.

2 IMPOSTAZIONE FASE SPERIMENTALE

2.1 DESCRIZIONE DEL COMPONENTE DA PRODURRE:

I pezzi sono stati prodotti presso la fonderia RDS S.p.A., azienda partner del progetto.

Il componente scelto per eseguire le prove è un alloggiamento per un motorino elettrico ed ingranaggi come mostrato in figura.

Il materiale usato dal produttore è una lega di alluminio EN AB-46100, in accordo con la normativa UNI EN 1706

La composizione chimica della lega usata da RDS (EN AC 46100) è la seguente:

Lega	Si(wt%)	Fe(wt%)	Mg(wt%)	Cu(wt%)	Mn(wt%)	Ti(wt%)	Sr(wt%)	Zn(wt%)
EN AB-46100	10.7	0.808	0.128	1.65	0.216	0.0723	<0.0001	1.44

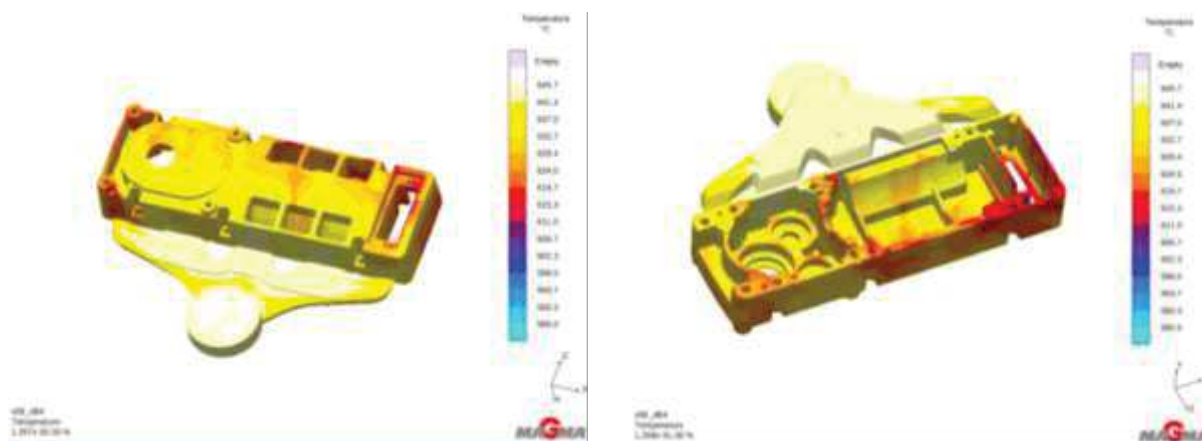


Figura 4: simulazioni preliminari eseguite con l'uso del software MAGMA®

Le proprietà meccaniche nominali della lega sono:

Yeld strenght	$R_{p0.2} = 140$ MPa
Tensile strenght	$R_m = 240$ MPa
Elongation break	$A\% = <1$

Non essendo un componente strutturale soggetto a carichi rilevanti (al massimo le forze che scaricano i cuscinetti sulle rispettive sedi), si concentrerà l'analisi soprattutto sui difetti di tipo estetico che si formeranno in produzione. Particolare attenzione deve essere posta sulla superficie superiore che, essendo in vista durante l'utilizzo, dovrà necessariamente presentare una totale assenza di imperfezioni.

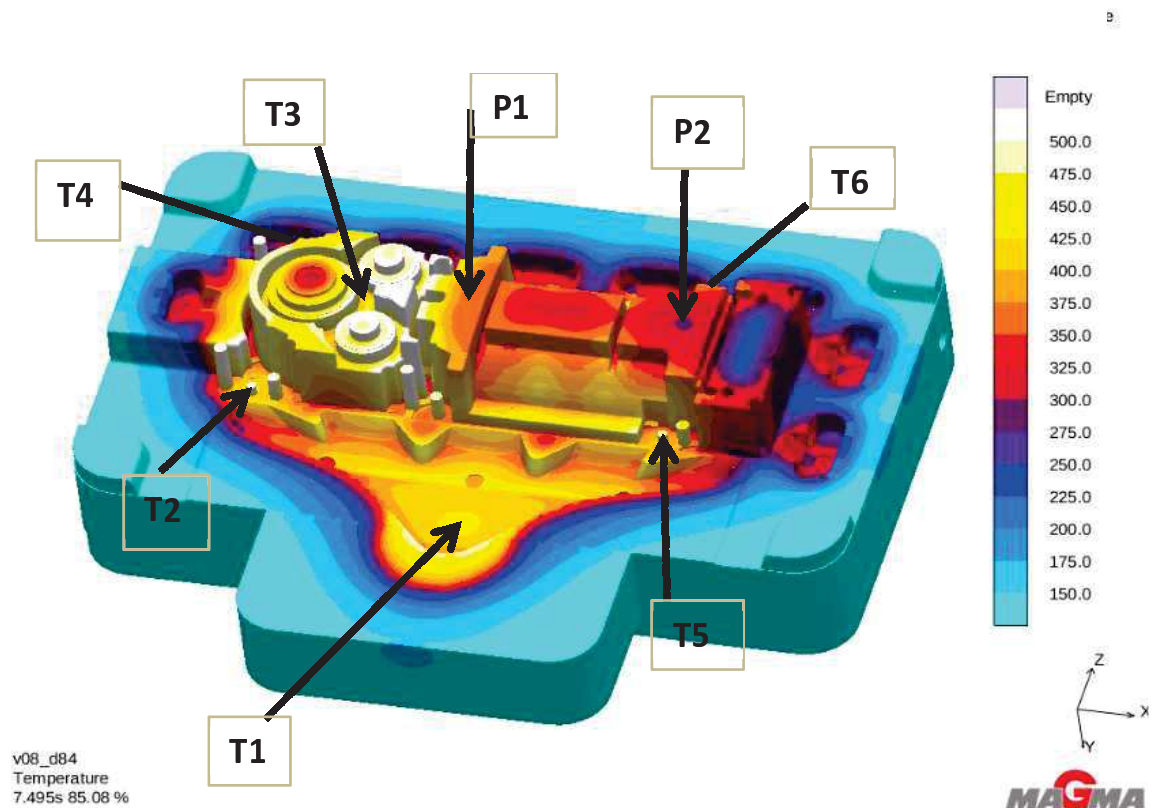
2.2 DESIGN OF EXPERIMENT:

A partire dalle simulazioni eseguite con il software MAGMA®, Enginsoft, azienda partner del progetto, ha definito un Design of Experiment (DOE) caratterizzato da 29 variazioni dei parametri di processo impostabili a bordo macchina, in modo da ottenere una serie di getti con gradi di qualità e tipi di difetti differenti. In tabella 1 è riportato in dettaglio il DOE.

ID	Design	T forno	Switch	V2	P3
		°C	mm	m/s	bar
3	Design 85	670	260	3.4	555
4	Design 22	670	227	3.8	794
5	Design 62	675	225	3.1	916
6	Design 71	675	249	3.4	505
7	Design 9	675	251	4.0	813
8	Design 112	675	228	2.5	639
9	Design 90	680	213	2.6	892
10	Design 25	680	243	2.1	531
11	Design 96	680	217	4.3	958
12	Design 53	680	253	3.0	803
13	Design 1	685	235	3.3	700
14	Design 120	685	212	3.0	602
15	Design 45	685	258	4.3	513
16	Design 84	685	235	2.1	855
17	Design 23	685	252	2.6	502
18	Design 80	690	216	3.7	505
19	Design 63	690	250	4.4	616
20	Design 8	690	226	2.8	513
21	Design 113	690	253	3.8	939
22	Design 91	695	238	3.8	592
23	Design 24	695	218	3.3	831
24	Design 97	695	242	3.1	658
25	Design 52	695	228	4.2	503
26	Design 28	700	224	2.4	606
27	Design 101	700	248	4.0	733

Tabella 1: parametri di processo relativi ad ogni design

Per monitorare i parametri di temperatura e pressione interni alla cavità dello stampo, sono stati installati nel semistampo mobile due sensori di pressione e cinque di temperatura, posizionati come in figura



Un sensore è stato montato sul pistone, in modo da ricavare le curve di spostamento e velocità dello stesso, ed infine un altro sensore è stato installato in modo da monitorare la pressione idraulica esercitata durante la fase di intensificazione.

Per ogni linea di DOE sono stati colati 7/8 componenti in maniera da valutare la ripetibilità del processo ed averne un numero statisticamente sufficiente per tutte le prove da eseguire successivamente.

Ogni getto prodotto è stato catalogato mediante un codice alfanumerico per facilitarne la distinzione, ed associato al rispettivo codice progressivo dei file di output dei sensori.

Dopo l'asportazione delle materozze i pezzi sono stati inviati presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (DTG) per le analisi in laboratorio.

3 MONITORAGGIO DEL PROCESSO

3.1 ANALISI DATI SENSORI

I sensori montati sullo stampo mobile (posizionati come in **Figura 5**) hanno l'obiettivo di monitorare l'andamento delle temperature locali (6 sensori totali T1,T2,T3,T4,T5,T6), le pressioni in prossimità della zona 2 in cui è stata valutata la % di porosità (2 sensori P1 e P2), infine posizione e pressione applicata dal pistone sulla lega in fase di iniezione.

Il comportamento del pistone di iniezione è stato monitorato mediante un sensore di pressione e uno di posizione, in modo da ricostruire l'andamento della curva di posizione nel tempo e la curva di intensificazione effettiva.

I dati grezzi sono stati opportunamente filtrati e rielaborati per ottenere i grafici di seguito riportati che mostrano l'andamento complessivo dei profili di temperatura e pressione monitorati.

Per un problema durante la prima fase di acquisizione i set di dati relativi ai DOE da A ad O sono stati ritenuti poco attendibili, quindi scartati onde evitare di compromettere le analisi successive. Si sono considerati validi quelli dal design M in poi.

3.2 ANALISI DEI SENSORI NEL PISTONE

Un parametro interessante ricavato dai dati forniti dai sensori montati sul pistone è l'area sottesa dalla curva di pressione dal momento in cui scatta la P3 di intensificazione fino al momento di solidificazione e quindi chiusura dei gate di alimentazione.

Tale area tiene conto non solo del valore massimo raggiunto dalla pressione di intensificazione, ma anche dell'intervallo temporale in cui risulta efficace l'effetto di mantenimento. Si fa riferimento ai dati relativi alla posizione del pistone istante per istante e alla pressione che esso applica alla lega nel cilindro di iniezione come nel grafico di figura 6.

Per eliminare i disturbi dovuti al transitorio iniziale si ipotizza che la terza fase inizi al tempo corrispondente ad una pressione pari al 20% della massima registrata, e termini dopo un Δt [ms] fornito dalle simulazioni di riempimento corrispondente al momento in cui solidifica l'ultima porzione ancora liquida in corrispondenza del gate.

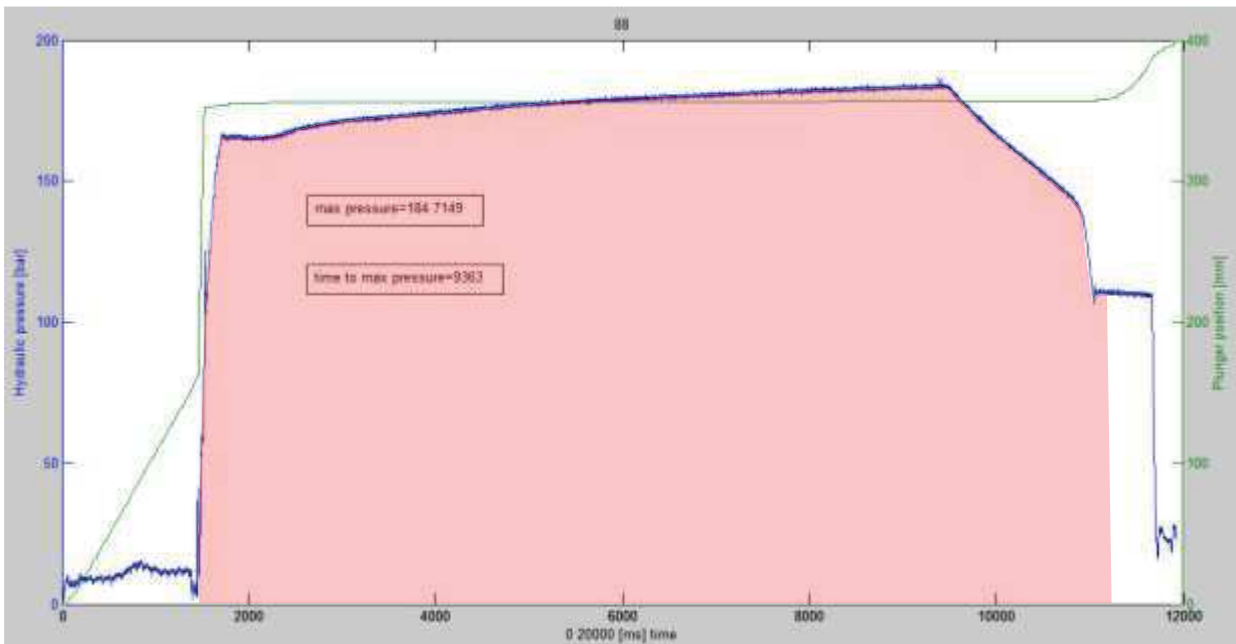


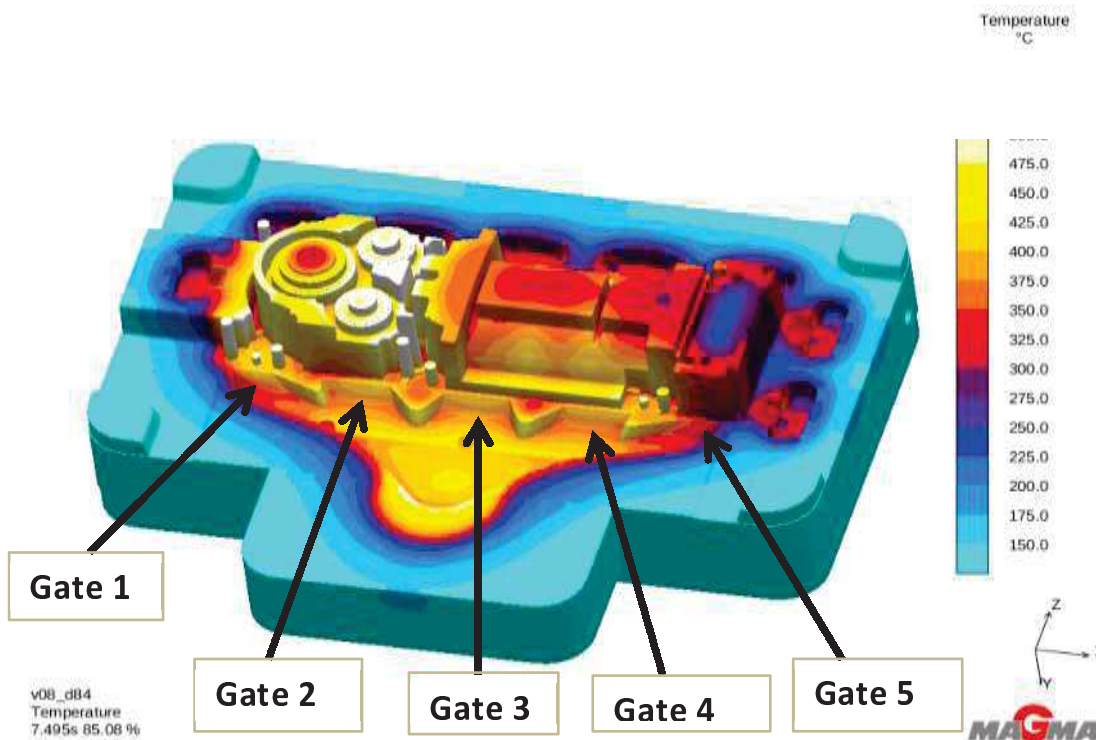
Figura 6: andamento della curva di posizione (in verde), della curva di pressione (in blu) e dell'area sottesa dalla curva di pressione (area in rosa)

Per l'elaborazione dei dati si è sfruttato uno Script Matlab con l'obiettivo di eliminare tutti i dati poco significativi e i NAN presenti nel foglio dei risultati, evidenziare la pressione di picco e individuare l'inizio della terza fase che si ipotizza inizi ad una certa percentuale di abbattimento rispetto alla pressione massima impostata di volta in volta. Si nota che l'andamento delle pressioni massime rilevate getto per getto ricalca quelle nominalmente impostate nel DOE a meno di un fattore 3.7, dovuto al sistema di moltiplicazione della pressione idraulica implementato nella macchina per contenere lo sforzo che applica il pistone sulla lega.

Per quanto riguarda l'inizio della terza fase si è deciso di farlo scattare al tempo corrispondente ad una pressione di circa il 15-20% inferiore rispetto alla massime registrata su tutti i set di dati, per eliminare il disturbo iniziale.

L'istante di chiusura e solidificazione di ogni gate (5 in tutto), calcolato mediante le simulazioni in MAGMA®, è stato settato come istante di fine impaccamento.

Le posizioni dei vari canali di alimentazione sono riportate in Figura 7.



Si noti come il gate 3 in posizione centrale sia l'ultimo a solidificare poiché a diretto contatto con il canale di alimentazione principale, mentre i gate 1 e 5 sono i primi a solidificare poiché posizionati agli estremi lontani dal canale principale.

Sono riportati in tabella i valori delle aree sottese per alcuni getti dal design M fino all' AC (gli unici di cui si abbiano valori attendibili dei sensori).

Getto	Area	Area	Area	Area	Area
	sottesa_1 [ms*bar]	sottesa_2 [ms*bar]	sottesa_3 [ms*bar]	sottesa_4 [ms*bar]	sottesa_5 [ms*bar]
M-66	805000	1410000	1722500	1.37E+06	6.69E+05
M-67	814000	1420000	1728100	1.38E+06	6.78E+05
N-74	709000	1190000	1434200	1.17E+06	5.97E+05
N-75	705000	1180000	1430000	1.17E+06	5.94E+05
N-76	706000	1180000	1428200	1.17E+06	5.95E+05
O-88	581000	995000	1217600	9.79E+05	4.87E+05
O-89	440000	849000	1213600	8.34E+05	3.49E+05
O-90	578000	991000	1087800	9.76E+05	4.85E+05
P-101	969000	1670000	2031900	1.64E+06	8.09E+05
P-102	966000	1670000	2032200	1.64E+06	8.06E+05
P-103	967000	1670000	2031400	1.64E+06	8.07E+05
Q-116	585000	1020000	1275400	1.01E+06	4.87E+05

Q-117	582000	1020000	1274600	1.00E+06	4.84E+05
Q-118	591000	1030000	1282700	1.01E+06	4.92E+05
R-133	646000	1150000	1341600	1.12E+06	5.36E+05
R-134	641000	1150000	1342700	1.12E+06	5.31E+05
R-135	644000	1150000	1343500	1.12E+06	5.34E+05
S-143	754000	1410000	1607900	1.36E+06	6.19E+05
S-144	762000	1410000	1606500	1.37E+06	6.27E+05
T-152	608000	1050000	1288600	1.03E+06	5.07E+05
T-154	601000	1040000	1285200	1.02E+06	5.00E+05
U-165	794000	1540000	1985000	1.52E+06	6.21E+05
U-166	924000	1670000	2101400	1.65E+06	7.51E+05
U-167	1050000	1800000	2204700	1.78E+06	8.81E+05
V-174	704000	1260000	1504100	1.23E+06	5.82E+05
V-175	719000	1280000	1518200	1.25E+06	5.96E+05
V-176	705000	1260000	1517400	1.23E+06	5.81E+05
W-198	875000	1660000	2056800	1.62E+06	7.07E+05
W-199	1020000	1790000	2077100	1.76E+06	8.47E+05
W-200	994000	1770000	2073000	1.73E+06	8.25E+05
X-211	802000	1440000	1645400	1.41E+06	6.65E+05
X-212	796000	1440000	1647700	1.40E+06	6.59E+05
X-213	809000	1450000	1653700	1.42E+06	6.72E+05
Y-221	635000	1130000	1326100	1.11E+06	5.27E+05
Y-222	545000	1050000	1313100	1.02E+06	4.38E+05
Y-223	635000	1140000	1339100	1.11E+06	5.27E+05
Z-235	710000	1200000	1447000	1.18E+06	5.94E+05
Z-237	712000	1200000	1450100	1.19E+06	5.95E+05
Z-238	701000	1190000	1444700	1.18E+06	5.84E+05
AB-252	857000	1490000	1819600	1.47E+06	7.14E+05
AB-253	745000	1370000	1752000	1.35E+06	6.02E+05
AB-254	790000	1420000	1785100	1.40E+06	6.47E+05
AC-287	995000	1700000	2069900	1.73E+06	8.54E+05
AC-288	1030000	1730000	2087000	1.76E+06	8.84E+05
AC-289	1030000	1740000	2092600	1.77E+06	8.88E+05

Tabella2: calcolo delle aree sottese dalla curva di pressione in prossimità dei vari gate

Sono state diagrammate le % di porosità rilevate nelle zone 1 e 2 in relazione all'area sottesa dalla curva di pressione in relazione al tempo di chiusura dei gate in corrispondenza delle rispettive zone.

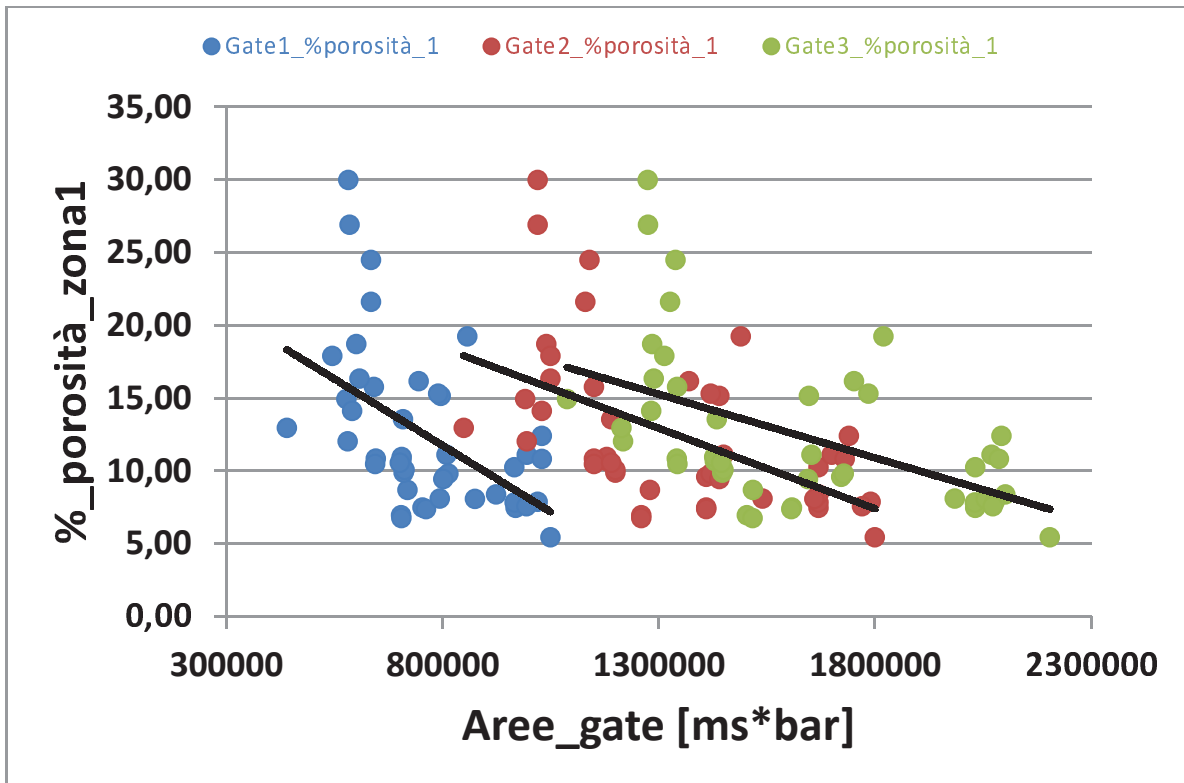


Figura 8: andamento della porosità all'aumentare dell'area sottesa dalla curva di pressione nei gate 1,2 e 3

Come percentuale di porosità nella zona 1 si fa riferimento ad un punteggio dato dalla somma dei tre valori nelle tre zone precedentemente esaminate (risultato della porosità percentuale della zona 1 centrale, più zona 1 sinistra e destra).

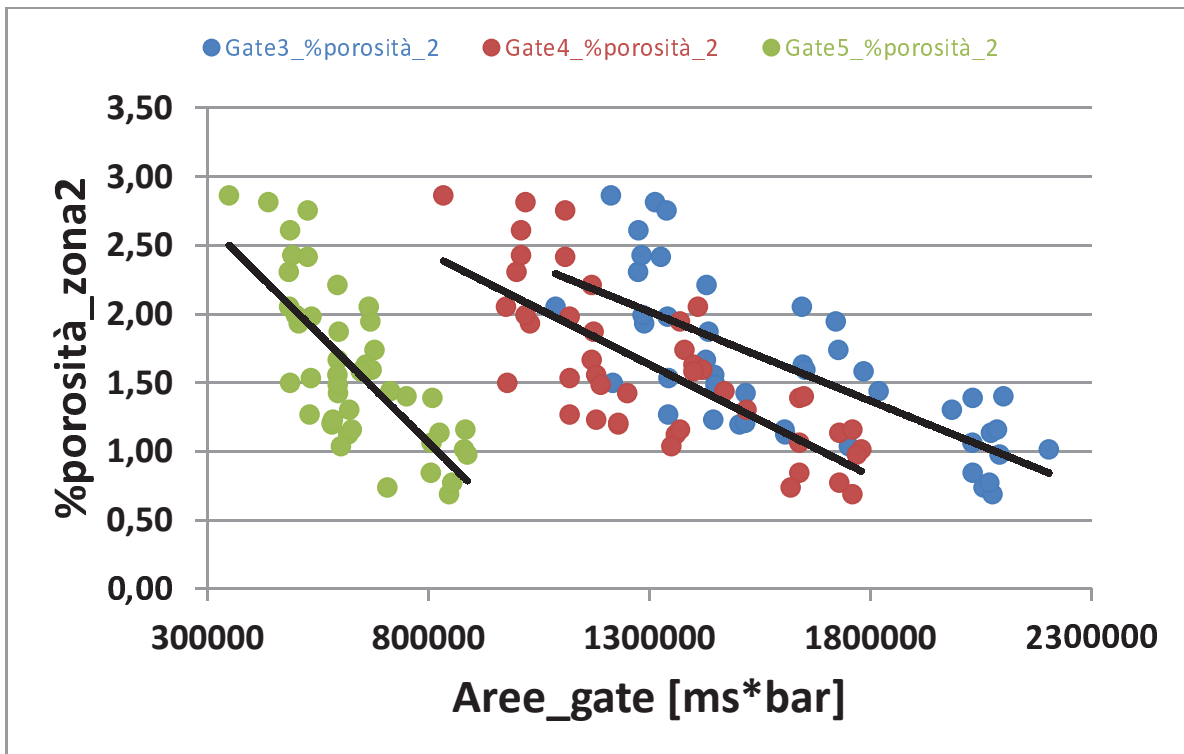


Figura 9: andamento della porosità all'aumentare dell'area sottesa dalla curva di pressione nei gate 3,4 e 5

Si nota l'evidente tendenza al ridursi della percentuale di porosità all'aumentare dell'area sottesa; nessuna tendenza risulta altrettanto evidente però se si correla solo la percentuale di porosità rispetto al tempo di chiusura del gate. In entrambi i grafici è stato inserito il gate 3 in quanto essendo in posizione centrale il suo effetto influenza la qualità sia della zona 1 che della zona 2.

Di seguito viene riportato lo Script Matlab con il quale sono stati elaborati i dati

```
X=data;
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,2)=[];
X(:,4)=[];
[r,c]=size(X);
index=1;
clc
while (index<=r) %tolgo le righe che hanno pressione idraulica minore di zero
if(X(index,3)<0)
    X(index,:)=[];
    index=index-1;
    r=r-1;
else
end

index=index+1;

end
index=1;
[r,c]=size(X);
while (index<=r) %tolgo righe con poszione pistone negativa
if(X(index,2)<0)
    X(index,:)=[];
    index=index-1;
    r=r-1;
else

end
    index=index+1;
end

timestart=X(1,1);
index=1;
[r,c]=size(X);
while (index<=r)
    X(index,1)=X(index,1)-timestart; %regolo scala dei tempi
    index=index+1;
end

index=2; %non server partire dall'inizio
```

```

[r,c]=size(X);
while (index<=r)
    if (X(index,2)>398)
        X(index,:)=[]; %canello le posizioni superiori a 399 mm
        index=index-1;
        r=r-1;

    else
    end
    A='NaN';
    B=num2str(X(index,3));
    if (strcmp(A,B)==1)
        X(index,:)=[];
        index=index-1;
        r=r-1;
    else
    end
    index=index+1;
end
% pulito i dati
%cerco il max di pressione, poi il tot per cento dell'abbattimento della
%pressione prima del massimo
[r,c]=size(X);
maxpressure=0;
maxtimepressure=0;
maxpositionpressure=0;
index=1;
while (index<r)
    if (X(index,3)>maxpressure)
        maxpressure=X(index,3);
        maxtimepressure=X(index,1);
        maxpositionpressure=X(index,2);

    else
    end
    index=index+1;
end

getto=input('inserisci il codice del getto:');
g1=num2str(getto);

%valore di partenza della pressione del pistone 90per cento max pressure
discriminante=input('Inserisci il valore % di abbattimento della pres max: ');
pressurestart=discriminante*maxpressure/100;
index=1;
while (X(index,3)<=pressurestart)
    index=index+1;

end

positionstart=X((index-1),2);
start_time=X((index-1),1);
start_index=index-1;
time_gate_closed=input('Inserisci il tempo di chiusura del canale: ');

%calcolo area

index=start_index;
area=0;
while (X(index,1)<time_gate_closed)

```

```

        area=area+(X((index+1),3)+X(index,3))*(X((index+1),1)-X(index,1))/2;
        index=index+1;
    end
    sla='max pressure= ';
    s1=num2str(maxpressure);
    s2a='time to max pressure= ';
    s2=num2str(maxtimepressure);
    s3=num2str(maxpositionpressure);

    colx=X(:,1);
    coly=X(:,3);
    posizione=X(:,2);
    [AX,H1,H2]=plotyy(colx,coly,colx,posizione);
    title(g1);
    %title('pressione vs tempo');
    xlabel('0 20000 [ms] time');
    %ylabel('0 200 [bar] - hydraulic pressure');
    set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Hydraulic pressure [bar]');
    set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Plunger position [mm]');
    dim=[.3 .4 .4 .3];
    dim1=[.3 .3 .4 .3];
    str=strcat(sla,s1);
    str1=strcat(s2a,s2);
    annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');
    annotation('textbox',dim1,'String',str1,'FitBoxToText','on');
    text(maxtimepressure,maxpressure,'X');

    disp('pressione massima= '); disp(maxpressure);
    disp('tempo in cui ho la pressione massima= '); disp(maxtimepressure);
    disp('start time= '); disp(start_time);
    disp('area sottesa= '); disp(area);

```

Per ricavare lo switch point reale e la velocità di seconda fase reale si sfrutta la curva di posizione del pistone, infatti derivando tale curva rispetto al tempo, si ottiene la velocità come limite del rapporto incrementale, in particolare si mostra l'andamento rilevato nel seguente grafico.

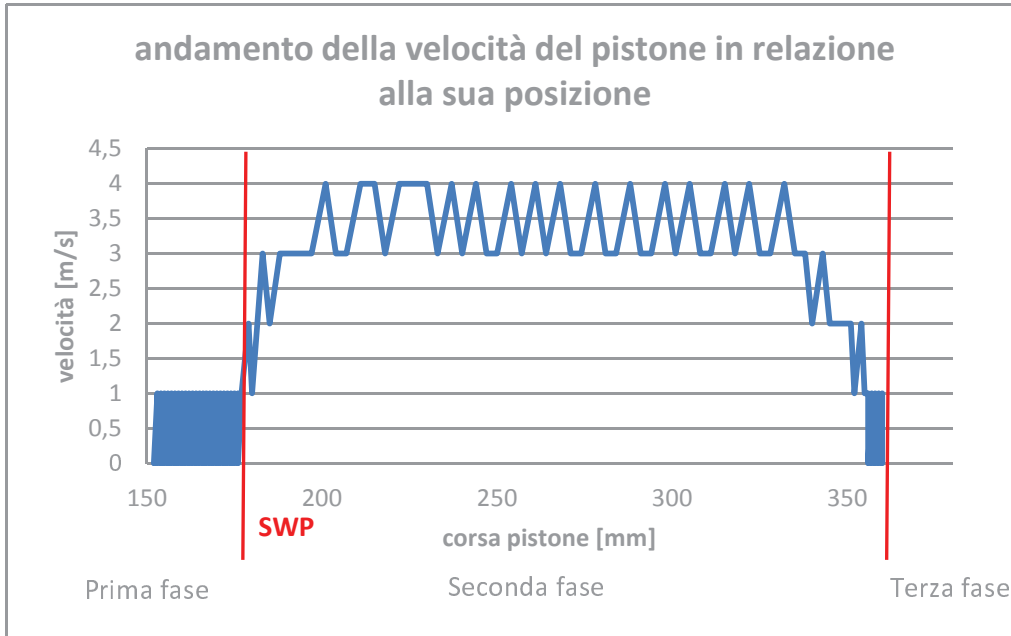


Figura 10: andamento della velocità di seconda fase rilevata all'aumentare della corsa del pistone, le linee verticali indicano l'inizio e la fine della seconda fase

Riferendosi alla Figura 10, lo switch point si ricava facilmente in quanto corrisponde alla posizione in cui rilevo una velocità diversa da quella di prima fase di circa 1 m/s; per ogni getto è stato valutato lo switch point effettivo che corrisponde allo switch point nominale impostato sulla macchina a meno di un fattore correttivo pari a 0.725, dovuto al posizionamento del sensore al momento dell'installazione in una sede non coincidente con quella dello zero macchina.

Dopo la posizione di switch point si nota la fase di accelerazione del pistone che raggiunge la velocità stabile tra 3 e 4 m/s fino a portarsi, a fine corsa, ad una velocità pari nuovamente a 0.

Purtroppo la risoluzione al millimetro del sensore di posizione non è sufficiente per ricavare valori di velocità corrispondenti al decimo di m/s, per cui applicando la derivata alla funzione di posizione si osservano velocità che non corrispondono a quelle impostate nominalmente nel DOE. In particolare tutte le velocità di seconda fase nominalmente superiori ai 4.0 m/s risultano in realtà minori, poiché vengono arrotondate all'intero inferiore, mentre quelle nominalmente minori di 3.0 m/s risultano incrementate fino al raggiungimento dell'intero superiore. Non potendo considerare tale dato attendibile a causa dell'elevata approssimazione si farà riferimento nei grafici successivi sempre alla velocità nominalmente impostata.

3.3 ANALISI DEI SENSORI INTERNI ALLO STAMPO:

I dati grezzi dei sensori posizionati come in Figura [5] sono stati ripuliti mediante una macro elaborata con Microsoft Excell, simile a quella impostata con Matlab, e successivamente si sono ricavate le curve corrispondenti degli andamenti di temperatura e pressione.

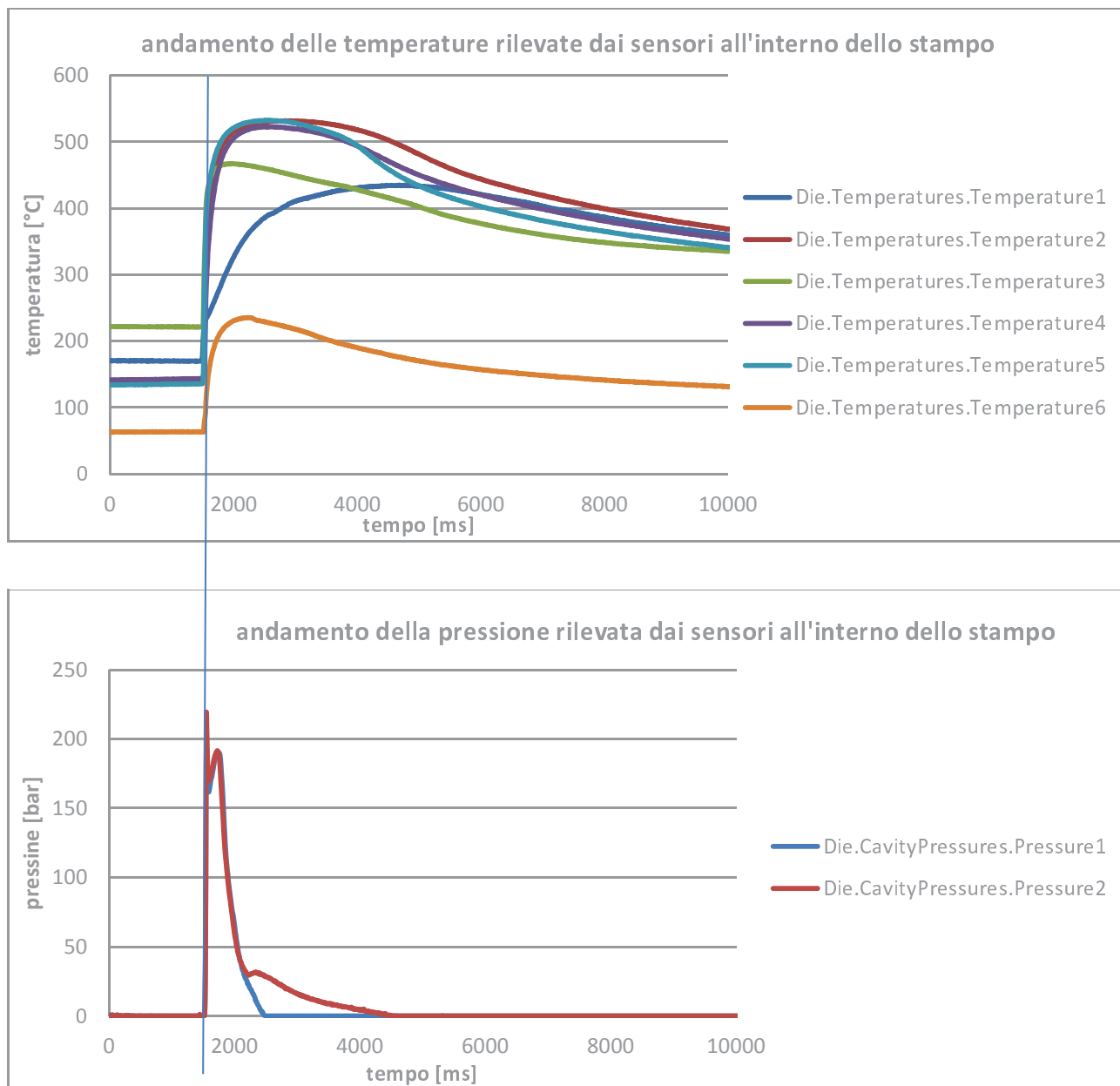


Figura 10: sopra: andamento della temperatura monitorata dai sensori montati nel controstampo durante la fase di iniezione e solidificazione, sotto: andamento della pressione rilevata dal sensore nello stesso arco di tempo

In figura 10 sono riportati gli andamenti delle curve di temperatura (sopra) e pressione (sotto) ricavate dall'elaborazione dei dati grezzi.

La variabilità in ingresso della temperatura del bagno, che andava dai 670°C ai 700°C, la si può osservare dai dati registrati dal sensore posto in prossimità degli attacchi di colata T1, che registravano, a meno di un fattore costante dovuto allo sbalzo termico, lo stesso andamento delle temperature nominali.

I sensori posizionati in zone più lontane dagli attacchi (come ad esempio il sensore T4 o T6) invece non risentono di questa variazione, infatti l'andamento delle curve di temperatura come pure le Tmax raggiunte sono le stesse per ogni getto prodotto.

In assenza di sistemi di termoregolazione dello stampo le variazioni di temperatura della lega per renderla più o meno fluida, con conseguenti effetti sulla qualità finale del getto, sono efficaci fintanto che il getto in questione è di piccole dimensioni, più è grande e complesso lo stampo maggiore sarà il percorso che effettuerà il fronte fuso fino a riempimento completo.

Durante il tragitto la lega subirà maggiori perdite di carico, come pure cali di temperatura, tanto che nelle zone più distanti dagli attacchi di colata si rischia di perdere l'effetto che si cerca di ottenere variando il parametro in ingresso.

Interessante è il confronto tra le curve di temperatura e pressione misurate su getti prodotti con parametri di processo talvolta molto diversi tra loro, di seguito sono riportati alcuni esempi.

Design	T forno	Switch	V2	P3	DOE
	°C	mm	m/s	bar	
Design 45	685	258	4.3	513	O
Design 84	685	235	2.1	855	P

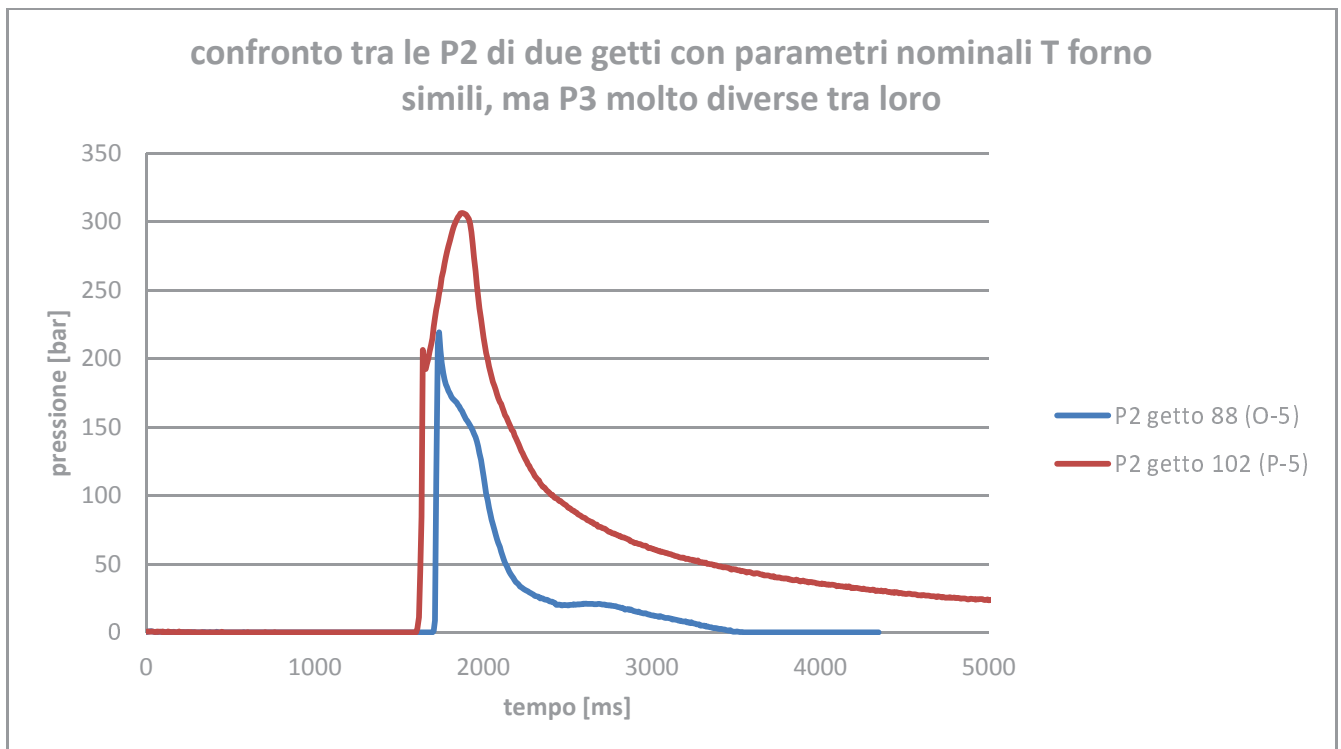
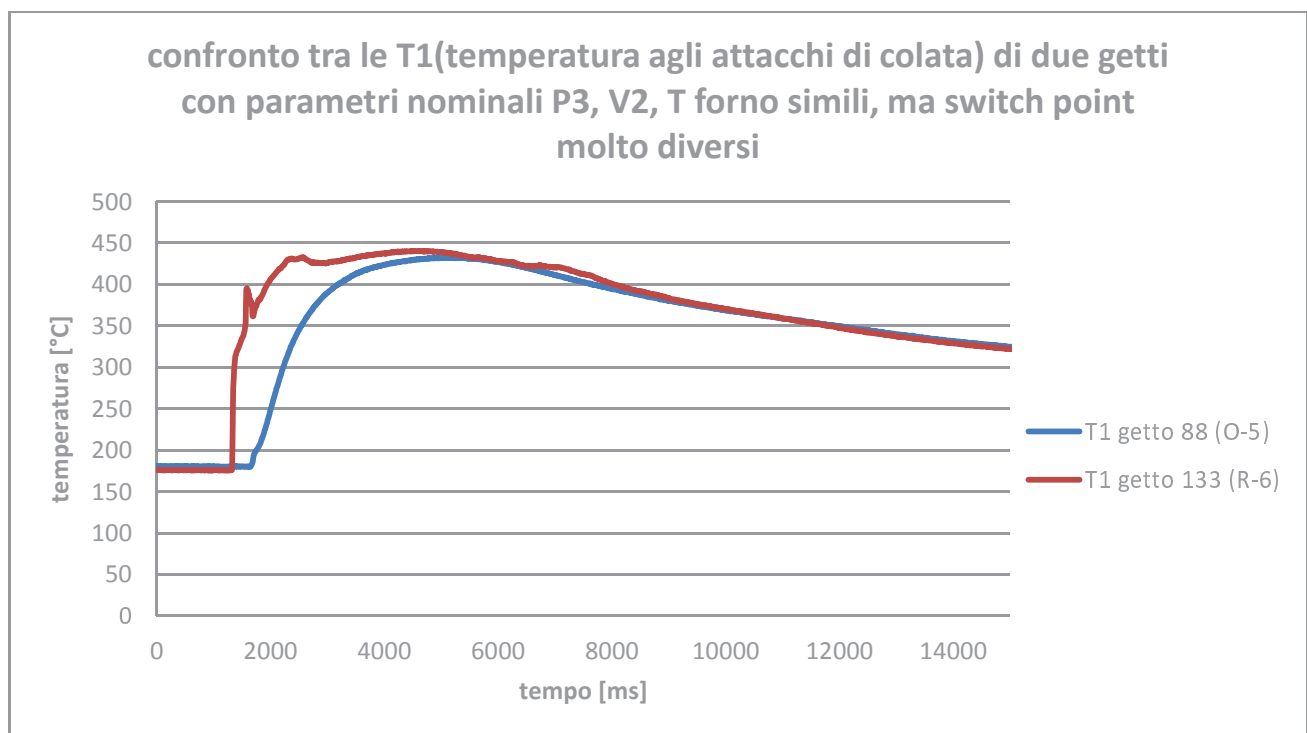


Figura 11: confronto tra curve di pressione misurate dal sensore P2

L'area sottesa dalla curva di pressione relativa al getto 88 (O-5) è nettamente superiore a quella del getto 102 (P-5), sia per effetto dello switch point leggermente anticipato che per la pressione di intensificazione maggiore, il che rende più efficace l'impaccamento e migliora la qualità finale andando a limitare le dimensioni delle porosità da gas intrappolato.

Si noti che per effetto delle perdite di carico dovute alla geometria dello stampo e alle velocità di avanzamento differenti, la pressione massima non raggiunge localmente

Design	T forno	Switch	V2	P3	DOE
	°C	mm	m/s	bar	
Design 45	685	258	4.3	513	O
Design 80	690	216	3.7	505	R



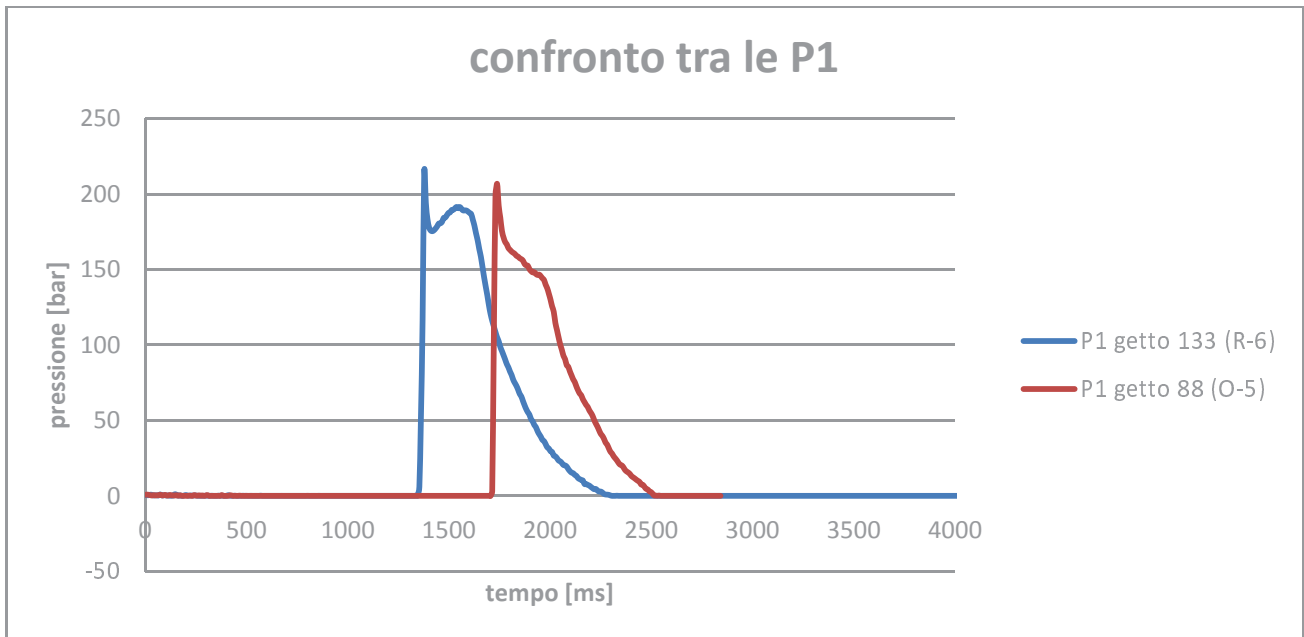


Figura 12: confronto tra curve di temperatura (sopra) e pressione(sotto) misurate dai sensori

Nel caso dei getti 88 (O-5) e 133 (R-6) si può notare come i profili di pressione e le aree sottese dalle curve siano le medesime, con la sola differenza di uno switch point molto anticipato per il getto 133 (R-6).

Se si osserva invece l'andamento delle temperature si può notare come la lega mantenga per un tempo maggiore un'elevata temperatura, rimanendo fluida per più tempo prima di raffreddarsi e solidificare. Un maggior tempo di solidificazione implica che l'impaccamento riesce ad agire sulla lega ancora fluida per un periodo maggiore, risultando ancora più efficace.

Ciò trova conferma osservando la porosità percentuale rilevata per il design R nella zona 2, confrontata con quella del design O nella medesima zona, rispettivamente pari a 1.59% e 2.14% .

Di seguito è riportata una tabella che riassume i valori massimi calcolati dai sensori P1 e P2, tali valori risultano attendibili per i design da M in poi, in quanto un problema nell'acquisizione ha reso inservibili i dati precedenti.

Per quanto riguarda tali dati, si fa riferimento al valore della massima pressione di intensificazione raggiunta localmente nella zona 2, in quanto direttamente correlabile alla porosità calcolata tramite analisi ai raggi X (vedi capitolo 4) e alle caratteristiche meccaniche ricavate dalle prove di trazione (vedi capitolo 6).

Di seguito si evidenziano nello specifico i risultati dei soli getti per i quali si sono poi effettuate le prove meccaniche:

p1 bar	p2 bar	getto
204.55	230.1062	M6
243.7309	253.1168	M7
233.1339	237.6755	N5
237.3727	239.1894	N6
258.5667	273.0997	O5
253.1168	267.0443	O6

248.878	267.6499	O7
191.8056	197.7097	Q4
186.5071	190.7459	Q7
197.1041	204.6734	Q8
260.9889	272.797	S5
245.2448	257.3556	S6
251.7039	265.9342	S7
233.1339	244.6392	U4
264.9249	260.9889	U5
334.2596	296.7159	U6
324.2681	290.6605	W5
324.2681	282.7884	W6
252.6459	265.3623	Y4
268.5582	283.0912	Y5
230.409	240.4004	Y6
356.3619	308.524	AC5
278.8524	273.7053	AC6
188.32	206.49	AD6
188.3238	206.4901	AD7
186.2044	206.4901	AD8

Tabella 3: valori misurati dai sensori di pressione P1 e P2 per i soli getti per i uali sono state eseguite le prove meccaniche

Per effetto della geometria del componente, essendo i sensori posizionati nel centro del pezzo in prossimità di una zona piana sottile, il picco di pressione massima non potrà coincidere ovviamente con la pressione massima nominale di intensificazione P3, ma risulterà inferiore per via delle perdite di carico subite dalla lega fusa durante l'avanzamento.

4 CARATTERIZZAZIONE NON DISTRUTTIVA

4.1 ISPEZIONE VISIVA:

l'ispezione visiva è stata condotta associando ad ogni getto una scheda con le sei viste dello stesso dove indicare eventuali difetti superficiale. Ad ognuno inoltre è stato associato un punteggio da 1 a 4: 1 nel caso di un pezzo privo di difetti superficiali, 4 per pezzi da scartare perché criccati, incompleti o con presenza di blister superficiali.

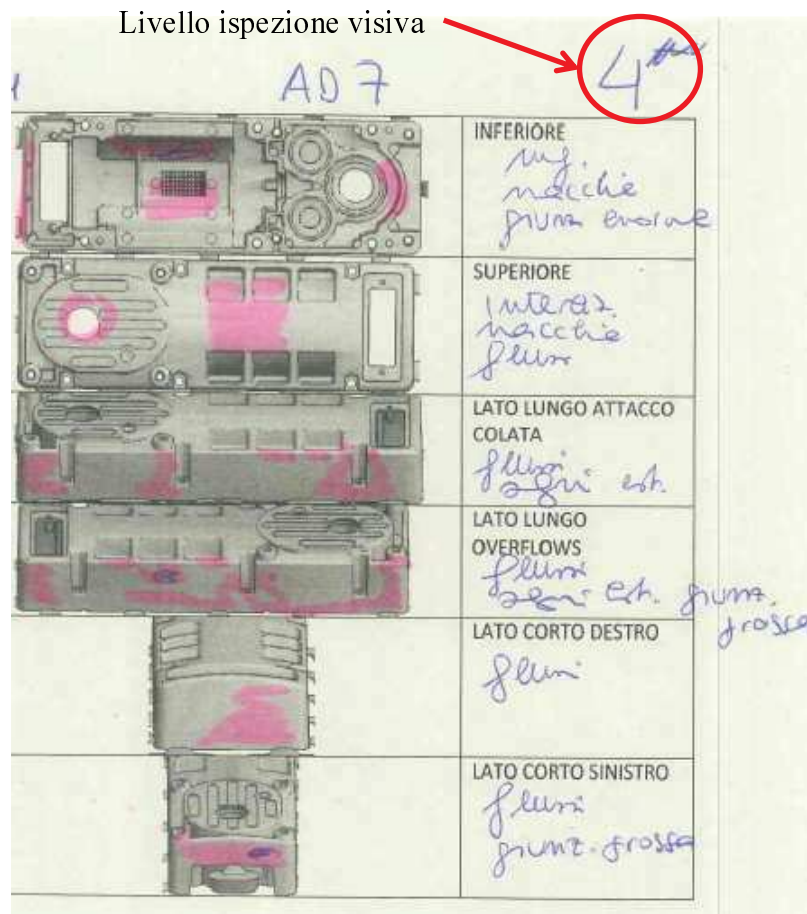


Figura 13: esempio di scheda per la valutazione dei difetti superficiali dell'ispezione visiva

Di fatto nessun getto si è riscontrato completamente esente da difetti superficiali, per cui a nessuno è stato attribuito un punteggio pari a 1; come pure non è stato evidenziato nessun getto incompleto o con evidentissimi difetti che ricondurrebbero ad uno scarto immediato.

Tipologie e gravità dei difetti superficiali sono elencati di seguito:

Getto incompleto: quando in certe zone del getto si nota la mancanza di materiale dovuta al mancato riempimento dello stampo da parte della lega.

Basse temperature del flusso e alte viscosità fanno sì che in certi punti il fronte possa solidificarsi prima di riempire completamente lo stampo.

È la forma di difetto superficiale più grave in quanto pregiudica anche le caratteristiche meccaniche funzionali del componente oltre che quelle estetiche.



Figura 14: esempio di mancato completamento del getto RDS

Blister: sono imperfezioni superficiali dovuti a gas intrappolato che si forma subito sotto la superficie del pezzo. Il gas ad alta pressione può deformare plasticamente il materiale superficiale formando dei piccoli rigonfiamenti superficiali simili a bollicine.

È più facile che si formino nel caso in cui il pezzo sia estratto dallo stampo ancora in fase di solidificazione o ad alte temperature; possono formarsi anche durante trattamenti termici.

Se la superficie del pezzo viene sottoposta a trattamenti di sabbiatura pre verniciatura può verificarsi il distaccamento di materiale in corrispondenza del blister.



Figura 15: esempio di blister superficiali

Giunzioni e vortici: superficialmente si nota l'andamento turbolento a vortici del flusso fuso solidificatosi in superficie.

Il fronte del flusso presolidificato, talvolta ricoperto da pelli di ossido, si scontra con un altro flusso più caldo e fluido che lo avvolge creando una discontinuità metallurgica visibile superficialmente, soprattutto negli spessori piani sottili.

Nei casi più critici se il flusso più freddo crea un vortice su se stesso, si possono formare delle zone di mancato riempimento o giunti che pregiudicano la qualità superficiale.



Figura 16: esempio di giunzioni a freddo superficiali e flussi turbolenti

Gocce fredde: all'ispezione visiva si nota una disomogeneità superficiale di forma arrotondata, circondata da giunti freddi e pelli di ossido.

La goccia si forma quando della lega solidifica istantaneamente a contatto con lo stampo e viene avvolta dal flusso più caldo che solidifica attorno ad essa separata da una pellicola di ossido.

Generalmente di piccole dimensioni determinano una disomogeneità microstrutturale, generalmente con grana più fina della regione circostante.

Bava: se la pressione di serraggio degli stampi non è sufficiente per contrastare quella della lega parte di essa può insinuarsi lungo la superficie di divisione di questi, solidificandosi al di fuori della geometria nominalmente indicata del pezzo.

Talvolta può essere il segnale di uno stampo troppo usurato

4.2 LIQUIDI PENETRANTI

La tecnica dei liquidi penetranti, assieme all'ispezione visiva, è uno dei controlli non distruttivi più diffusi nelle piccole-medie aziende in quanto relativamente economico e facile da eseguire, con lo svantaggio che richiedendo molto tempo per l'esecuzione, può essere applicato solamente ad un numero limitato di getti, non all'intera produzione.

Nell'ambito del lavoro svolto, è stata eseguita su quattro pezzi per provare l'efficacia o meno dell'ispezione visiva, poiché il liquido tracciante riesce ad evidenziare difetti come cricche o porosità superficiali che, se situate in zone poco accessibili, rischiano di passare inosservate. Sono stati selezionati tre getti con valutazione 4 da ispezione visiva, ossia da scartare data l'elevata presenza di difettosità, ed un getto con valutazione 2.

Sia nel caso dei getti con più difettosità che in quello dei getti migliori, i liquidi penetranti mostrano gli stessi difetti riscontrati nell'ispezione visiva, come descritto nella scheda corrispondente. Per questo motivo si è ritenuto non necessario proseguire con questo tipo di controllo qualitativo

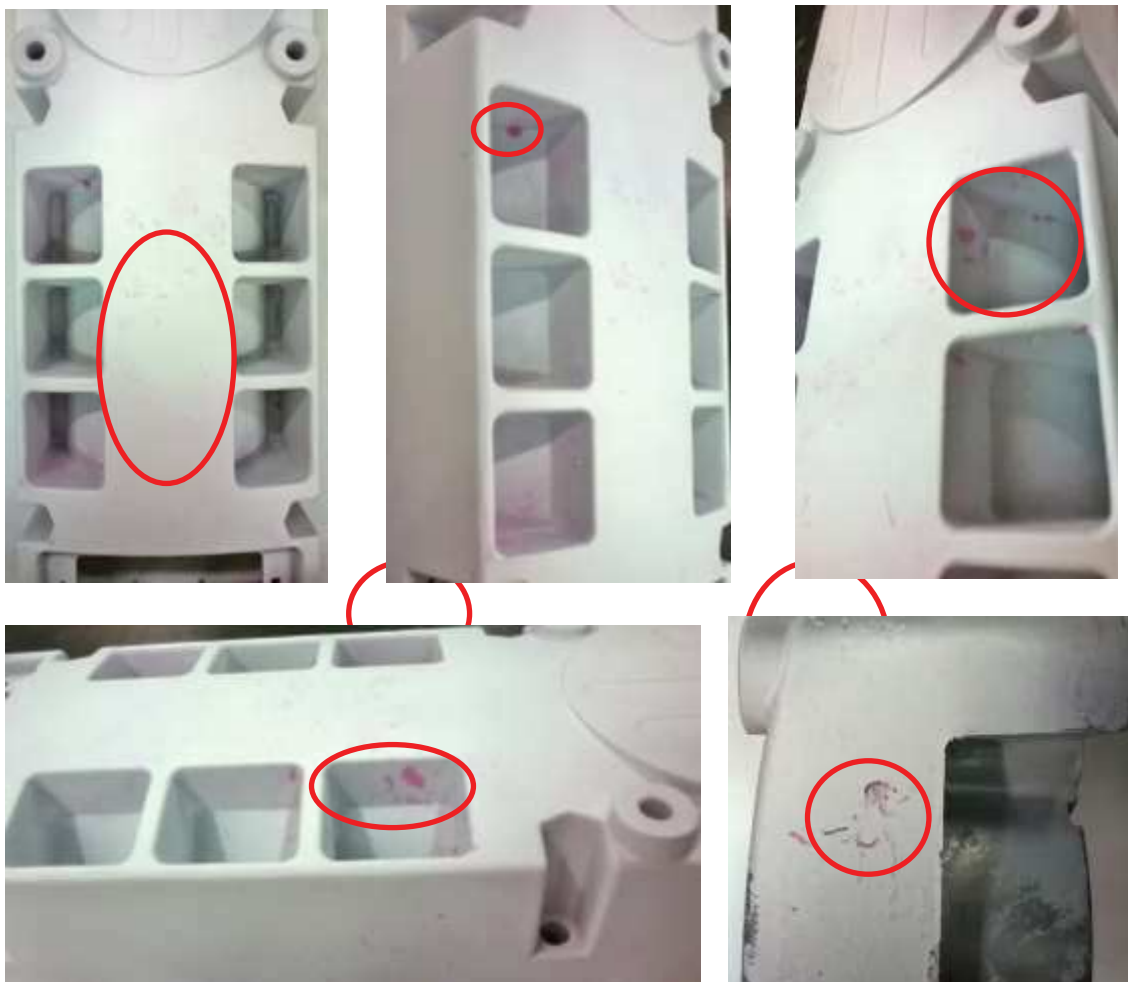


Figura 17: risultato dell'ispezione ai liquidi penetranti, dettagli di difetti superficiali

4.3 ANALISI AI RAGGI X

Per un componente che non ha una rilevante funzione strutturale ma principalmente estetica i controlli visivi potrebbero bastare, ma l'obiettivo è analizzare la qualità del getto anche dal punto di vista dei difetti interni che ad occhio nudo non si riescono a rilevare.

Tramite un controllo ai raggi X si vuole valutare la percentuale di porosità presente all'interno del componente, spesso dovuta a gas intrappolato all'interno del getto stesso, difetto molto comune in getti pressocolati che talvolta può compromettere significativamente le caratteristiche meccanico strutturali del componente.

Si vuole stimare anche la posizione delle zone con la maggiore concentrazione di porosità sulle quali verranno fatti dei conteggi più accurati.

Sono state eseguite delle radiografie su pezzi campione come di seguito illustrato:

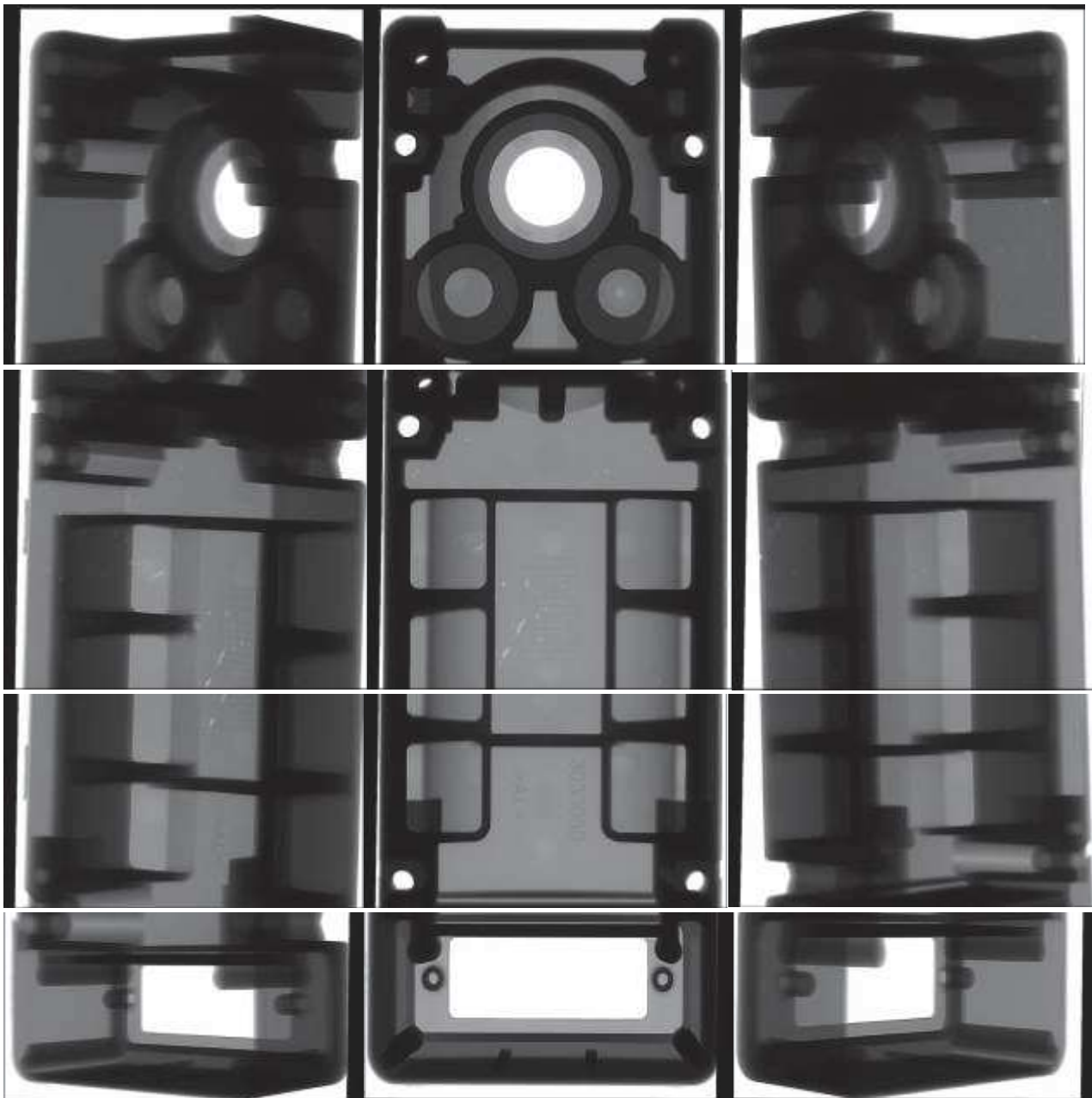


Figura 18: acquisizioni preliminari ai raggi X del getto RDS

Il pezzo è stato idealmente suddiviso in 4 zone come mostrato in figura.

La zona 4 risultava quasi priva di porosità per ognuno dei getti scansionati quindi di scarso interesse per l'analisi.

Data la presenza di molti raccordi e spessori variabili risultava troppo difficoltoso eseguire un conteggio delle porosità sulle zone laterali lasciando il pezzo integro, per cui sono state selezionate le sole zone piane frontali. In particolare di seguito vengono riportati i parametri di acquisizione utilizzati e la varie zone analizzate:

Parametri di acquisizione:

Zona 1 DX, zona 1 SX: macrofocus, filtro 1, contrasto e luminosità, EDF, mod acquisizione 249ms
voltage 103KV, amperaggio 0.6mA

Zona 1 centrale: macrofocus, filtro 1, contrasto e luminosità, EDF, mod acquisizione 249ms
voltage 103KV, amperaggio 1.8mA

Zona 2: macrofocus, filtro 1, contrasto e luminosità, EDF, mod acquisizione 249ms
voltage 103KV, amperaggio 0.6mA

tutte le immagini sono state in seguito ridimensionate portandole a 2000 pixels in larghezza e altezza automatica

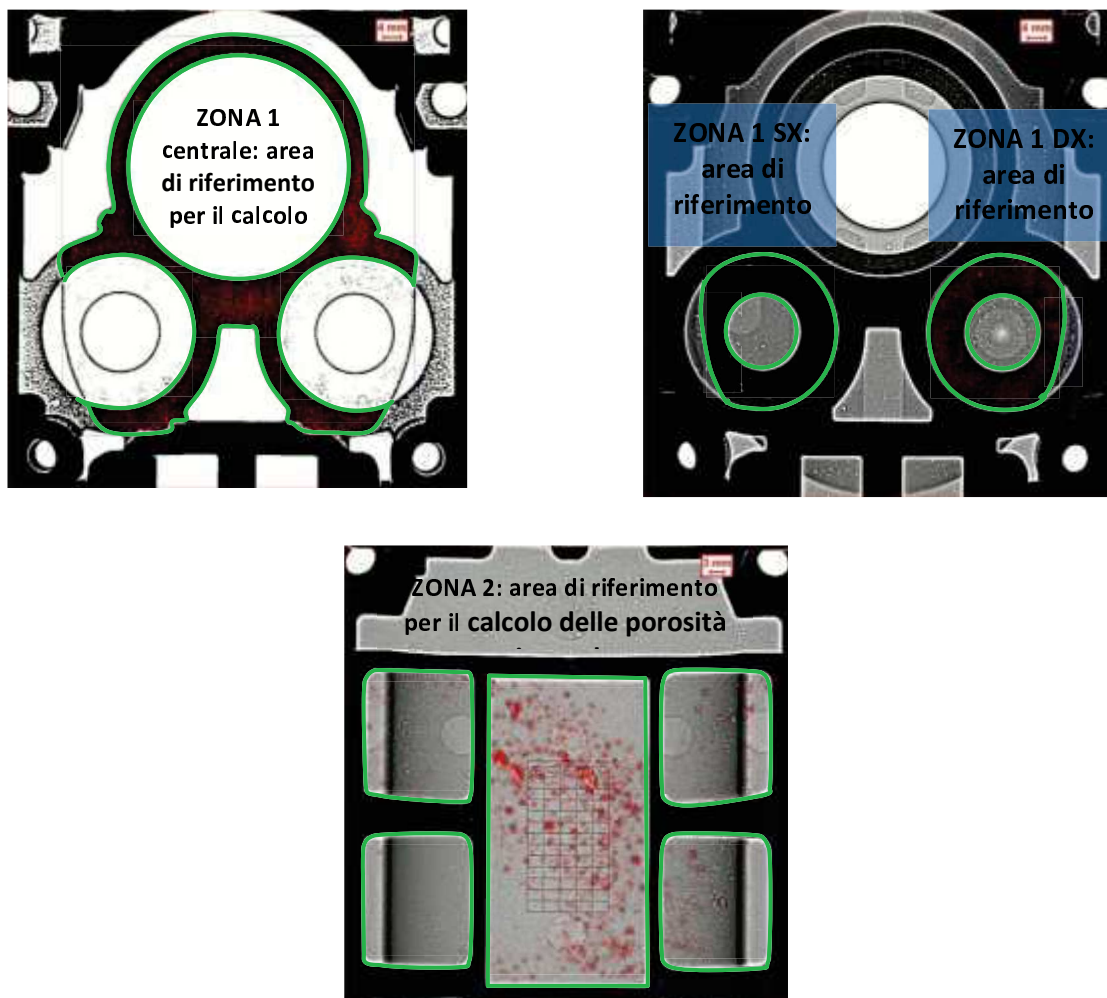


Figura 19: dettaglio delle zone analizzate ai raggi X, in verde l'area netta di analisi

Per ogni linea di DOE sono stati scelti 3 getti per le analisi ai raggi X in modo da poter definire statisticamente un livello medio di porosità per ogni design. Le immagini acquisite sono state poi elaborate tramite il software di analisi d'immagine Leica QWIN. Tale software valuta l'area % selezionata in riferimento ad un frame di misura rettangolare di dimensioni prefissate, ma per valutare la % delle sole zone evidenziate si ricorre al rapporto dimensionale tra queste e le dimensioni del frame, così da ottenere un valore più accurato.

ZONA 1 CENTRALE:

zona in esame = 25,4% dell'area totale del frame rettangolare
dimensioni frame: 1700X1530 pixels

ZONA 1 dx: (come zona 1 sx)

zona in esame = 54.06% dell'area totale del frame rettangolare
dimensioni frame: 640x640 pixels

ZONA 2:

zona in esame = 82.8% dell'area del frame rettangolare
dimensioni frame: 1390x1830 pixels

Di seguito sono riportati i parametri di analisi d'immagine utilizzati nel software Leica QWIN.

- Zona 1 DX, zona 1 SX:** contrasto 61.
 livello di bianco 40.
 dimensioni del frame di misura larghezza=640 pixels, altezza=640 pixels.
 la scala di riferimento è stata calibrata di volta in volta in relazione al diametro del foro centrale (1pixel≈53.3μm).
 area di interesse corrispondente al 54.06% dell'area di misura
- Zona 1 centrale:** contrasto 110.
 livello di bianco 40.
 dimensioni del frame di misura larghezza=1530 pixels, altezza=1700 pixels.
 la scala di riferimento è stata calibrata di volta in volta in relazione al diametro del foro centrale (1pixel≈53.3μm).
 area di interesse corrispondente al 25,4% dell'area di misura.
- Zona 2:** contrasto 61.
 livello di bianco 230.
 dimensioni del frame di misura larghezza=1830 pixels, altezza=1390 pixels.
 la scala di riferimento è stata calibrata di volta in volta in relazione alla larghezza della parte centrale (1pixel≈48.5μm).
 area di interesse corrispondente al 82.8% dell'area di misura.

Oltre alla percentuale di porosità calcolata getto per getto sono stati determinati i seguenti parametri: l'area della singola porosità (μm^2), la lunghezza massima (μm), il perimetro (μm), la rotondità, la posizione espressa in coordinate X,Y del centroide, il diametro equivalente (μm) e il rapporto tra le dimensioni (aspect ratio).

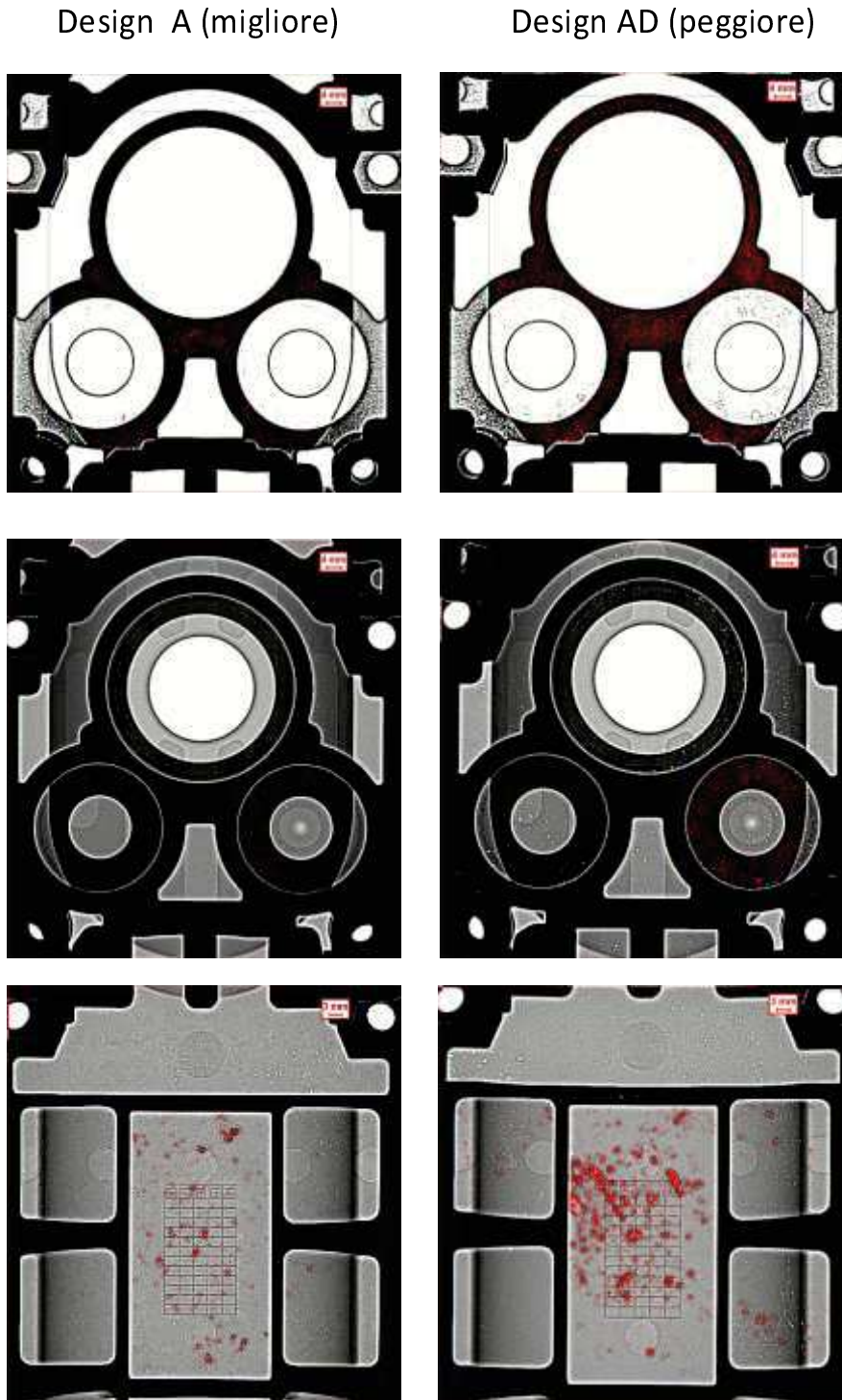


Figura 20: confronto qualitativo tra le porosità rilevate nel getto RDS migliore e peggiore, in rosso sono evidenziate le porosità

A titolo di esempio sono state riportate le analisi eseguite sui getti che riportavano rispettivamente la percentuale di porosità media minima (design A) e massima (design AD), evidenziate in rosso nella foto.

Ad ogni getto è stato attribuito un punteggio dato dalla somma delle percentuali di porosità calcolate nelle quattro zone selezionate (colonna in rosso in Tabella 4). La media per ogni design è stata indicata in verde per i getti migliori, giallo per quelli intermedi, rosso scuro per i peggiori secondo la distinzione:

punteggio:		Livello isp visiva
buono:	da 6 a 13	2
medio:	da 13 a 20	3
Peggior-scarto:	da 20 a 27	4

Per le analisi successive si farà riferimento alla media tra i valori ottenuti per ogni design come da tabella seguente:

DESIGN	zona 1 dx	zona 1 sx	zona 1 centrale	zona 2	punteggio
A	1.22	0.83	3.43	0.86	6.34
B	1.68	0.81	3.98	1.04	7.51
C	1.91	1.52	5.91	1.56	10.89
D	1.54	1.15	4.53	1.58	8.79
E	1.78	0.94	3.94	1.07	7.73
F	3.76	3.07	8.43	2.77	18.02
G	2.22	1.28	5.28	1.22	9.99
H	4.22	3.13	7.72	1.56	16.62
I	2.70	1.63	6.77	0.85	11.95
J	3.22	2.52	6.85	1.21	13.79
K	1.42	1.24	4.88	1.04	8.58
L	1.91	1.39	5.16	1.22	9.67
M	2.81	1.78	5.91	1.84	12.33
N	3.00	2.22	6.50	1.92	13.63
O	3.31	1.79	8.19	2.14	15.43
P	1.81	1.59	5.08	1.10	9.58
Q	7.08	5.22	11.34	2.45	26.09
R	2.89	2.31	7.17	1.59	13.96
S	1.42	0.91	4.76	1.26	8.35
T	5.07	3.29	8.35	1.97	18.68
U	1.83	1.24	4.25	1.24	8.57
V	1.57	1.09	4.76	1.28	8.71
W	2.02	1.24	4.57	0.86	8.68
X	2.65	2.37	6.89	1.76	13.67
Y	4.98	4.35	12.01	2.66	23.99
Z	2.63	1.70	5.83	1.43	11.58
AB	4.27	2.81	9.80	1.35	18.24
AC	3.03	1.89	6.50	0.97	12.38
AD	6.77	4.98	12.20	3.38	27.33

Tabella 4: risultati dell'analisi ai raggi X sul calcolo della porosità percentuale per ogni design

Dai dati si nota una percentuale di porosità leggermente maggiore nel lato destro (lato attacchi di colata) rispetto al lato sinistro. Si è deciso quindi di scegliere 18 getti appartenenti a sei design differenti per vedere se in altre zone non considerate fin ora si notava la stessa tendenza.

In particolare nelle zone piane laterali adiacenti alle zone 1 destra e sinistra, ossia rispettivamente quella collegata agli attacchi di colata 1 e 2 e quella opposta.

Di seguito sono riportati i parametri utilizzati al momento dell'ispezione visiva per le zone laterali:

Zona laterale: microfocus, filtro 1, contrasto e luminosità, EDF, mod acquisizione 999ms
 acquisizione 79.8KV, 1.0mA
 Ridimensionamento a 2000 pixels in larghezza, altezza automatica
 livello di bianco 100
 dimensioni del frame di misura larghezza=1050 pixels, altezza=1830 pixels
 1pixel≈24μm

A titolo di confronto sono mostrate le differenze tra getto migliore A3 e peggiore AD8

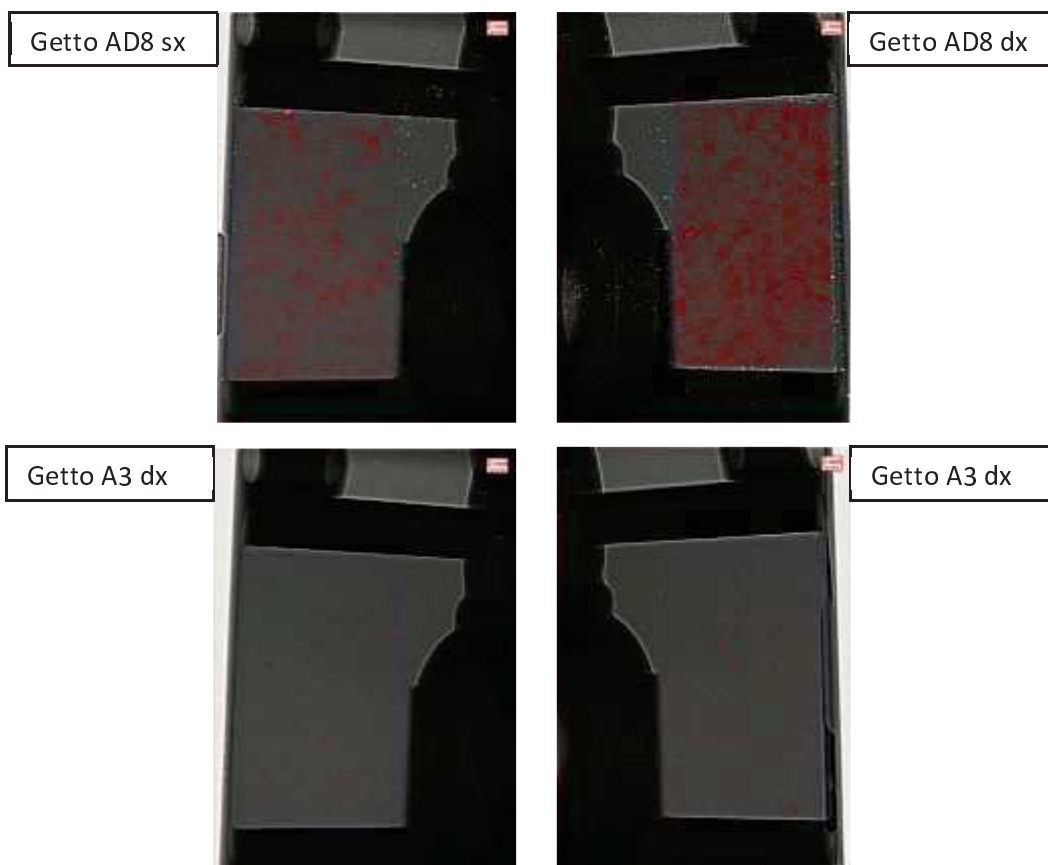


Figura 21: confronto qualitativo tra le porosità rilevate nelle pareti piane laterali adiacenti alla zona 1 tra getto migliore e peggiore

zona sinistra			zona destra		
	% porosità			% porosità	
A0	0.4		A0	1.22	
A2	0.35	media 0.33	A2	0.62	media 0.86
A3	0.23		A3	0.74	
C1	1.52		C1	2.58	
C2	1.09	media 1.65	C2	3.38	media 3.30
C4	2.34		C4	3.95	
K5	0.46		K5	1.31	
K6	0.63	media 0.54	K6	0.78	media 1.28
K7	0.53		K7	1.76	
Q2	2.58		Q2	6.36	
Q4	5.88	media 3.56	Q4	11.53	media 8.33
Q8	2.22		Q8	7.09	
Y4	1.83		Y4	3.89	
Y5	2.88	media 3.00	Y5	6.65	media 6.21
Y6	4.3		Y6	8.08	
AD6	4.76		AD6	10.96	
AD7	4.35	media 5.02	AD7	10.92	media 11.88
AD8	5.94		AD8	13.77	

Tabella 5: risultati dell'analisi ai raggi X sul calcolo della porosità percentuale nelle proiezioni delle zone piane laterali

Sono state scansionate ai raggi X anche le zone massive in corrispondenza delle borchie laterali, ma per via degli spessori molto differenti tra loro, e la presenza di ampi raggi di raccordo, non è stato possibile definire dei parametri ottimali per analizzarle con il software di analisi d'immagine Leica Qwin.

Di seguito si mostra un esempio delle immagini acquisite

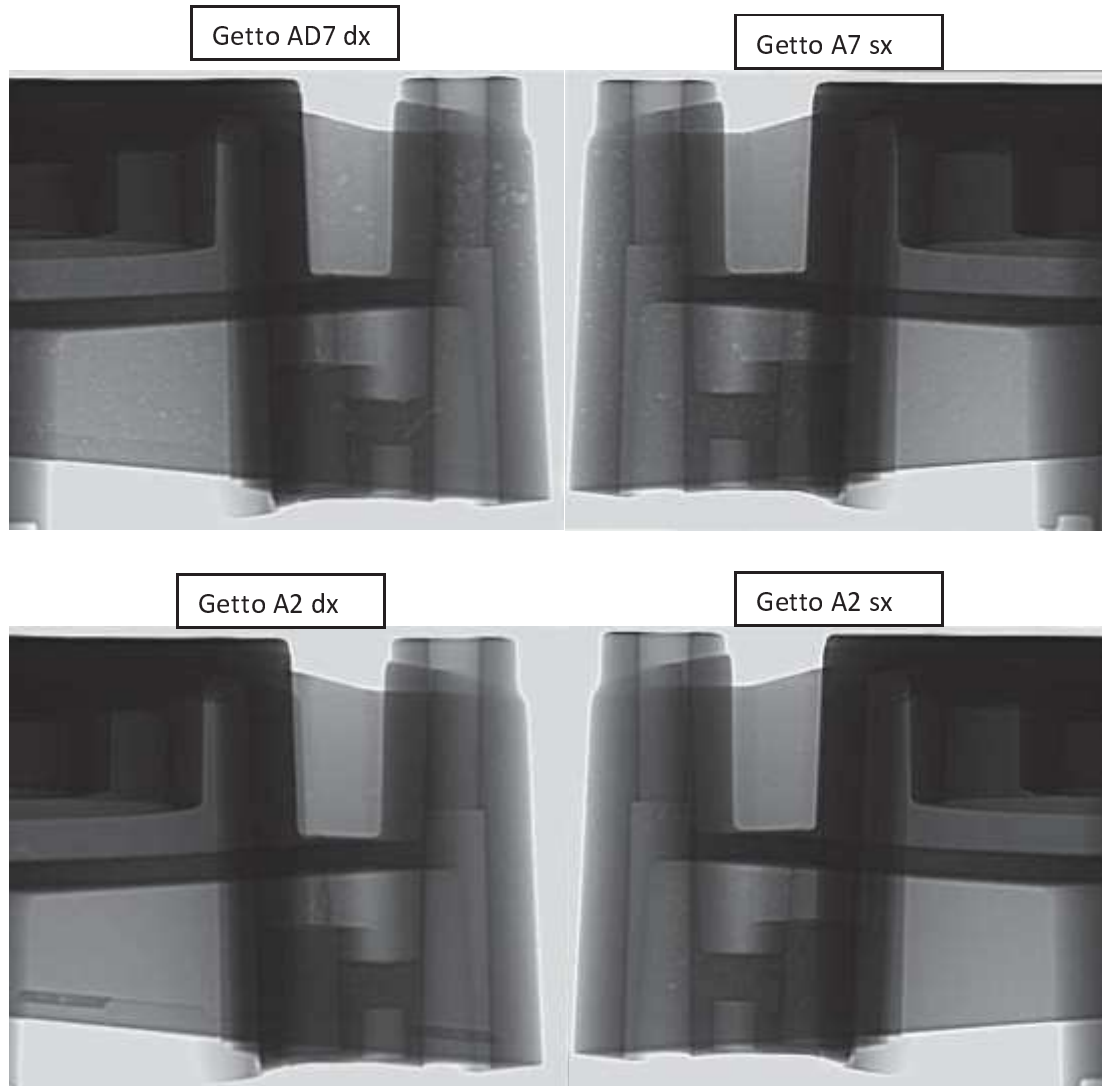


Figura 22: confronto qualitativo tra le porosità distribuite nelle zone massive d'interesse,

5 CARATTERIZZAZIONE MICROSTRUTTURALE

5.1 ANALISI DELLE SEZIONI METALLURGICHE

Vista la difficoltà nell'analizzare le zone più massive ai raggi X sono state eseguite delle sezioni metallografiche in corrispondenza della zona centrale e quelle laterali.

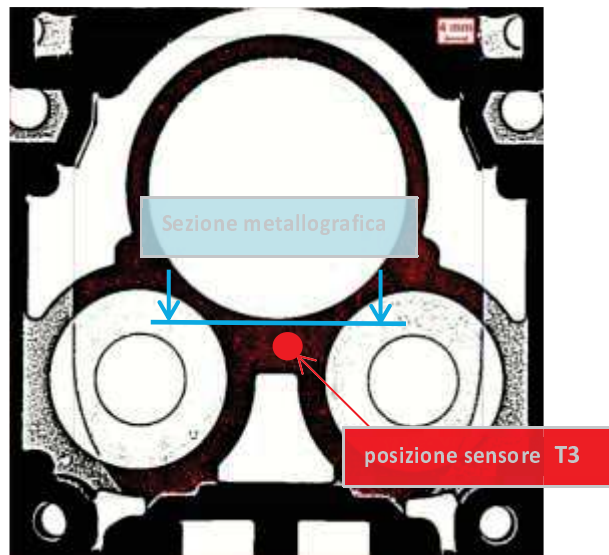
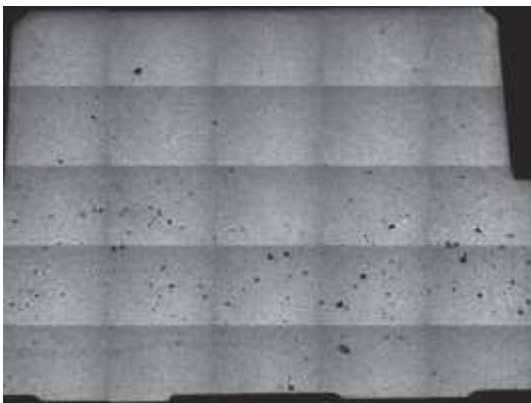


Figura 23: posizione in cui sono state ricavate le sezioni metallografiche nella zona centrale

Design A



Design AD

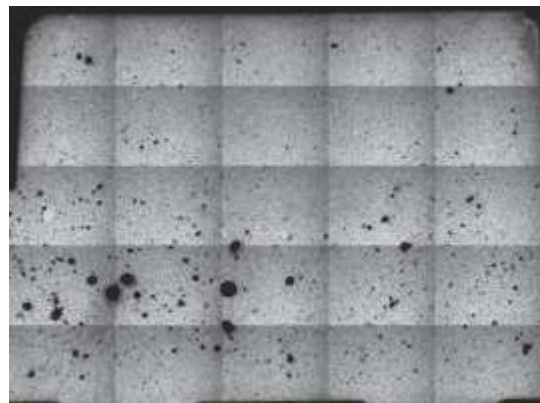


Figura 24: confronto qualitativo tra le porosità osservate nella sezione metallografica migliore e peggiore

Sono state fatte delle micrografie sui campioni A7, C4, K7, Q4, Y6, AD8 poi analizzati al microscopio ottico e con il software Leica Qwin.

Come mostrato dai mosaici in figura 24 la sostanziale differenza tra i diversi design ancora una volta riguarda la porosità da gas intrappolato; non sono evidenti macrosegregazioni silicee o discontinuità macroscopiche nella matrice tra i diversi campioni analizzati.

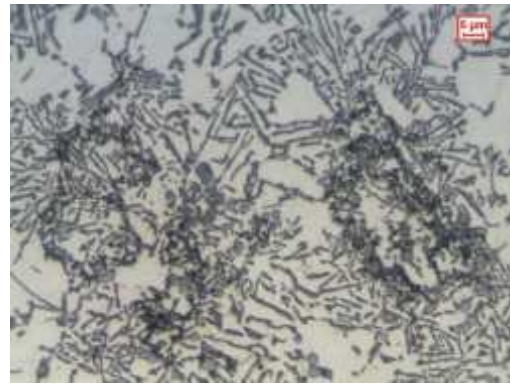
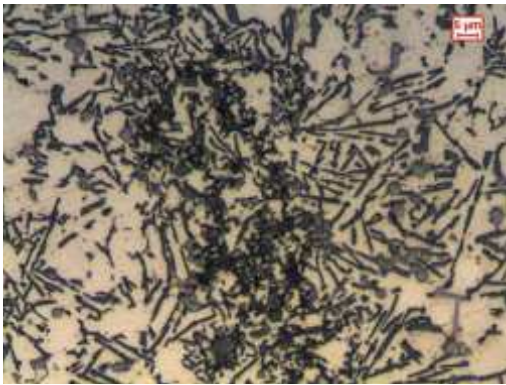
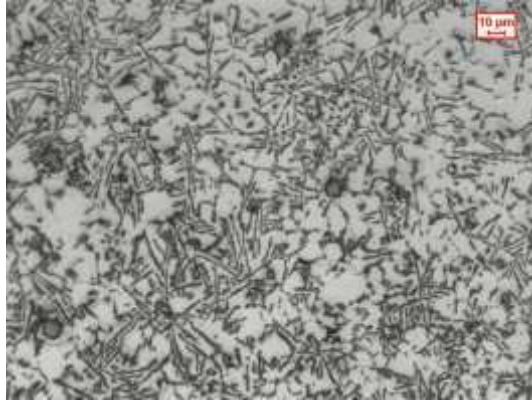


Figura 25: micrografia del getto A7 zona centrale (in alto), micrografia del getto Q4 zona centrale (in basso a sinistra), micrografia del getto AD8 zona centrale (in basso a destra):
dettagli di ossidi pellicolari e inclusioni

Nei design Q e AD erano maggiormente presenti film di ossido come in figura, distribuiti su tutta la sezione analizzata, che fungevano da agente nucleante per fasi intermetalliche e composti ferro-cromo-manganese (sludge).



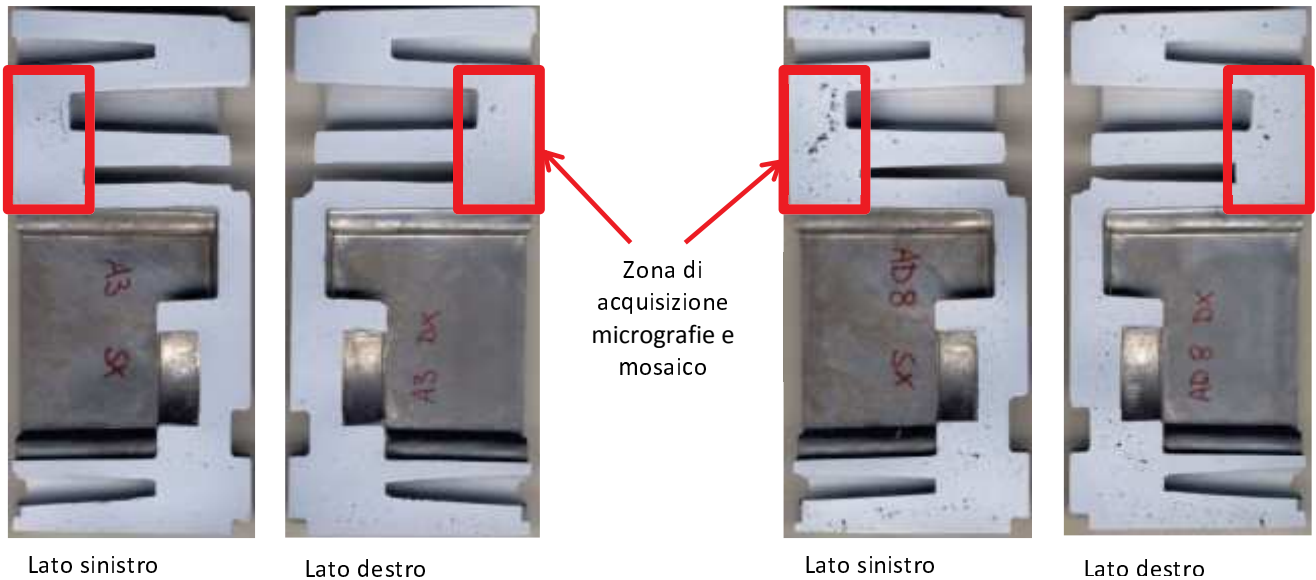
Figura 26: micrografia del getto Q4 zona centrale: dettaglio di inclusioni nella matrice provenienti da gocce di lega presolidificate in camera d'iniezione

In particolare nel getto Q4 si sono riscontrate delle discontinuità microstrutturali nella matrice, dovute alla presenza di porzioni presolidificate in camera d'iniezione che sono state trascinate dal fronte fuso fino all'interno dello stampo (cold flakes).

Altre micrografie sono state effettuate nella zona delle borchie superiori e nelle zone laterali.

GETTO A3 (migliore)

GETTO AD8 (peggiore)



GETTO A3 (migliore)

GETTO AD8 (peggiore)

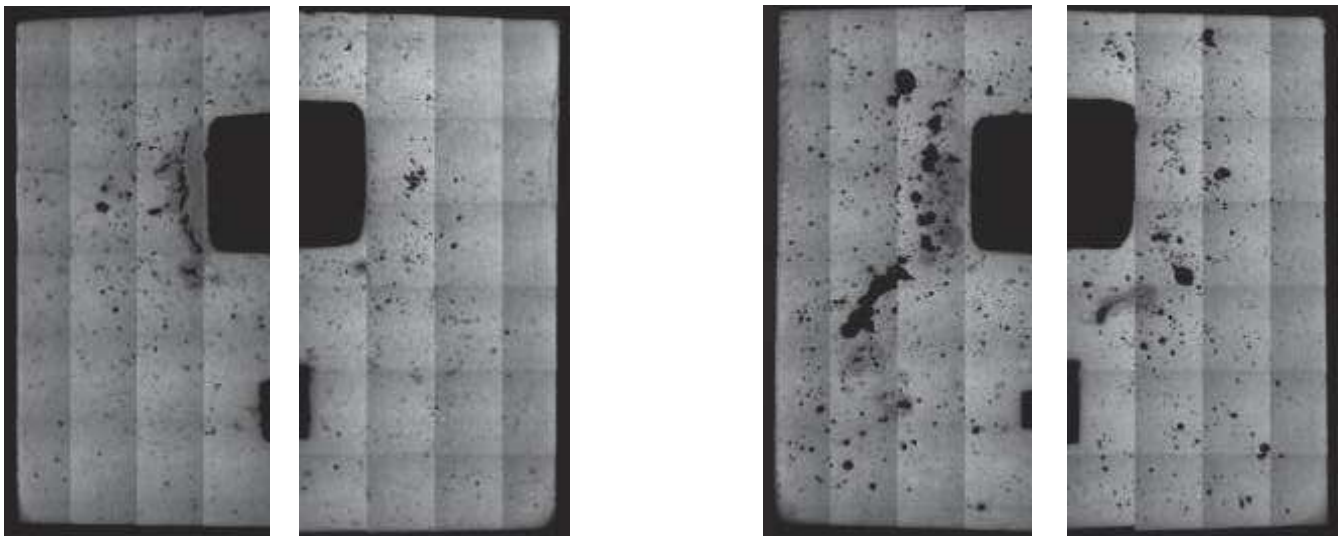


Figura 27: sezioni delle zone massive laterali (in alto) e dettaglio micrografico delle porzioni evidenziate (in basso)

Nelle porzioni laterali delle zone massive, soprattutto nel lato sinistro opposto agli attacchi di colata, sono state trovate inclusioni come in figura quasi esclusivamente nel design AD.

Tali inclusioni sono state successivamente analizzate con il microscopio elettronico a scansione SEM per ricavarne l'esatta composizione chimica.

Esempio di inclusioni solide rilevate al microscopio ottico.

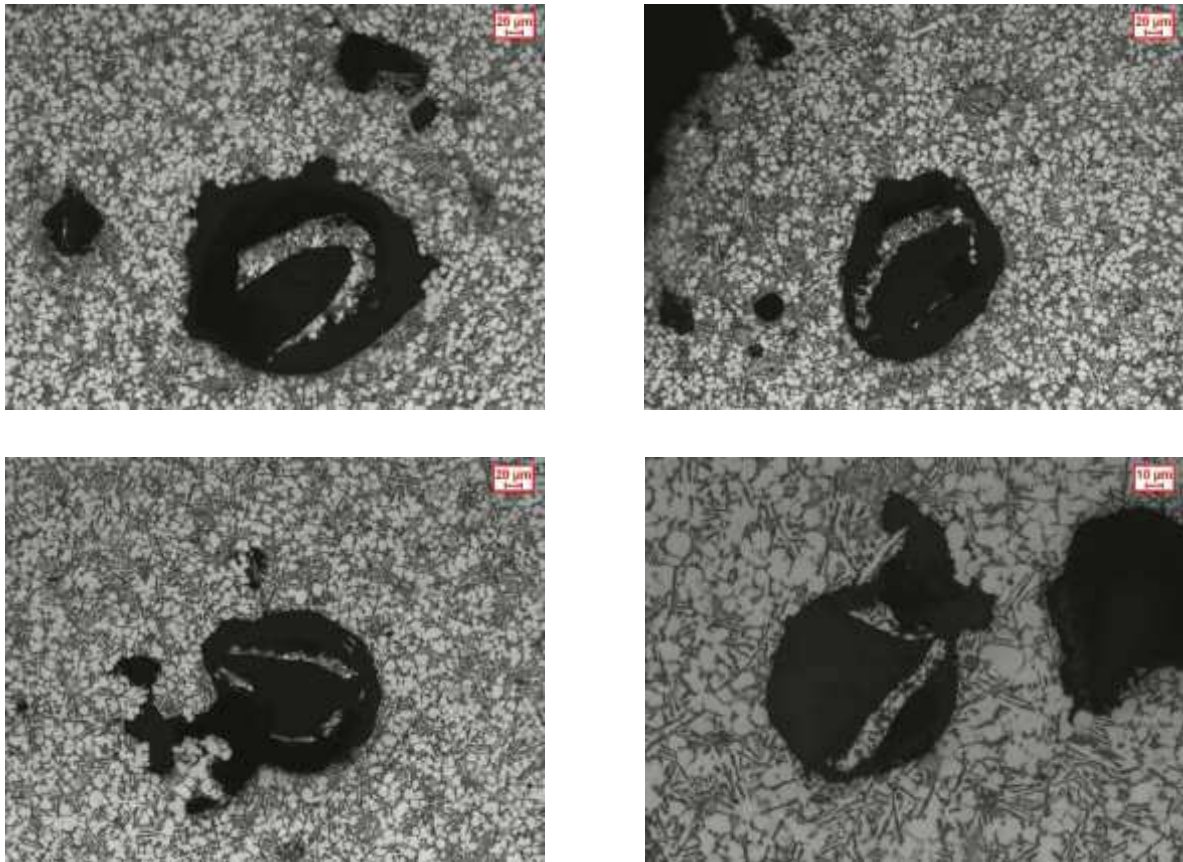


Figura 28: esempio di inclusioni solide riscontrate nelle sezioni metallografiche di alcuni getti

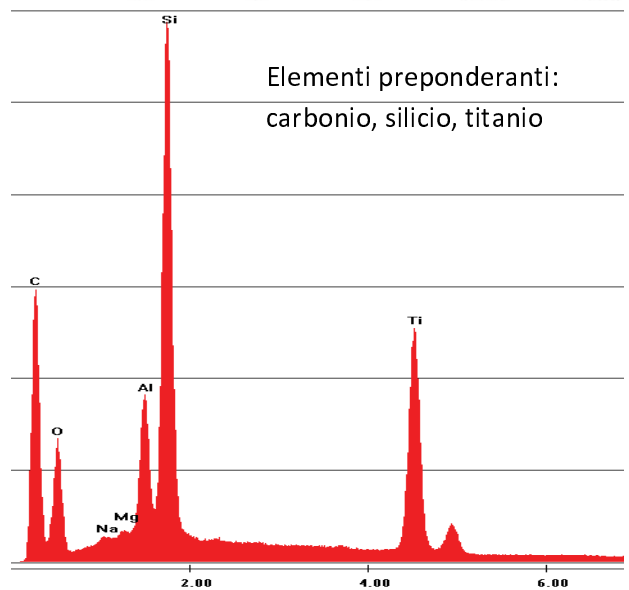
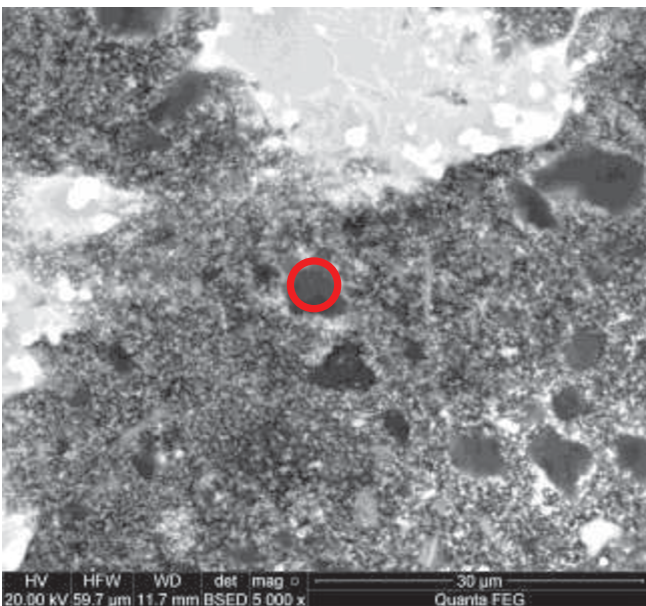
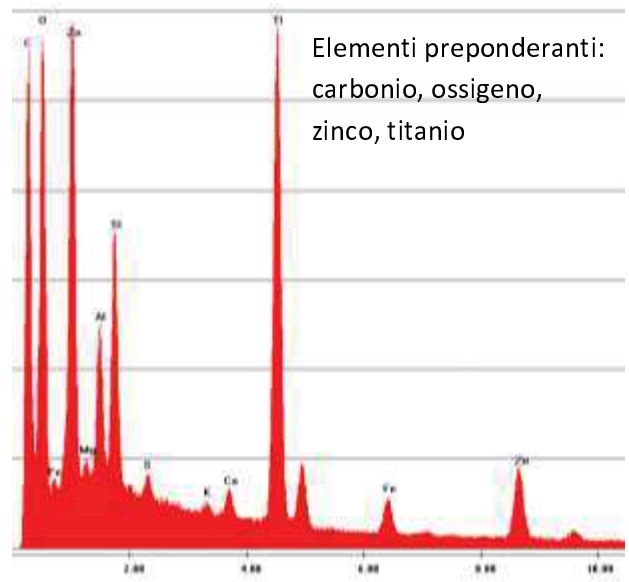
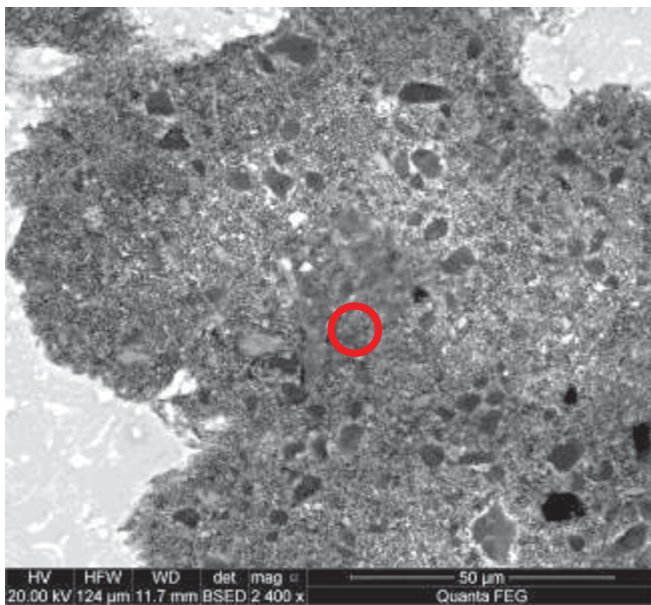
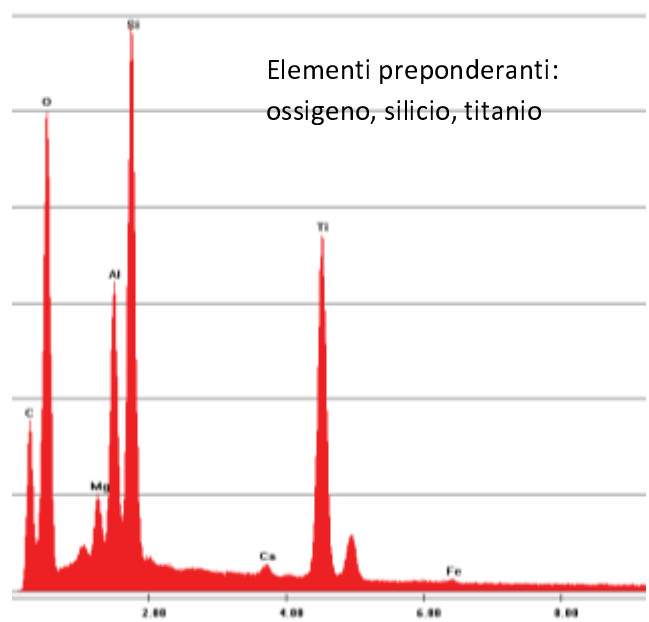
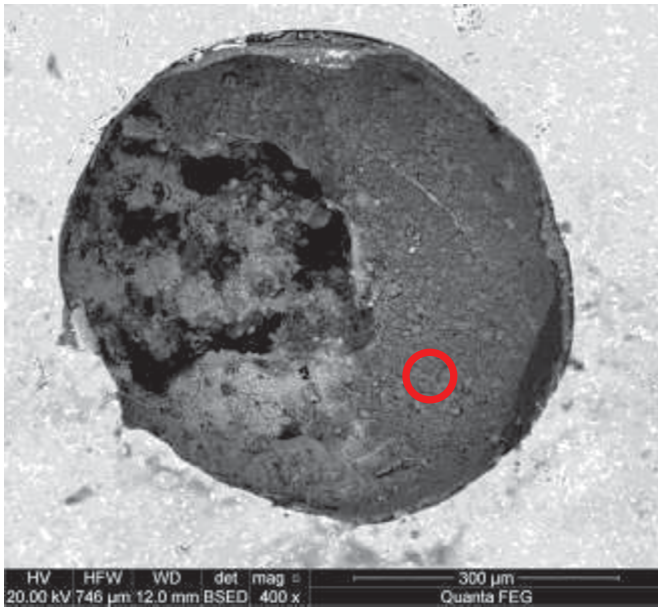


Figura 29: analisi al SEM delle inclusioni evidenziate con la corrispondente composizione chimica

Altri dettagli di porosità da ritiro ed inclusioni analizzate tramite il microscopio elettronico a scansione

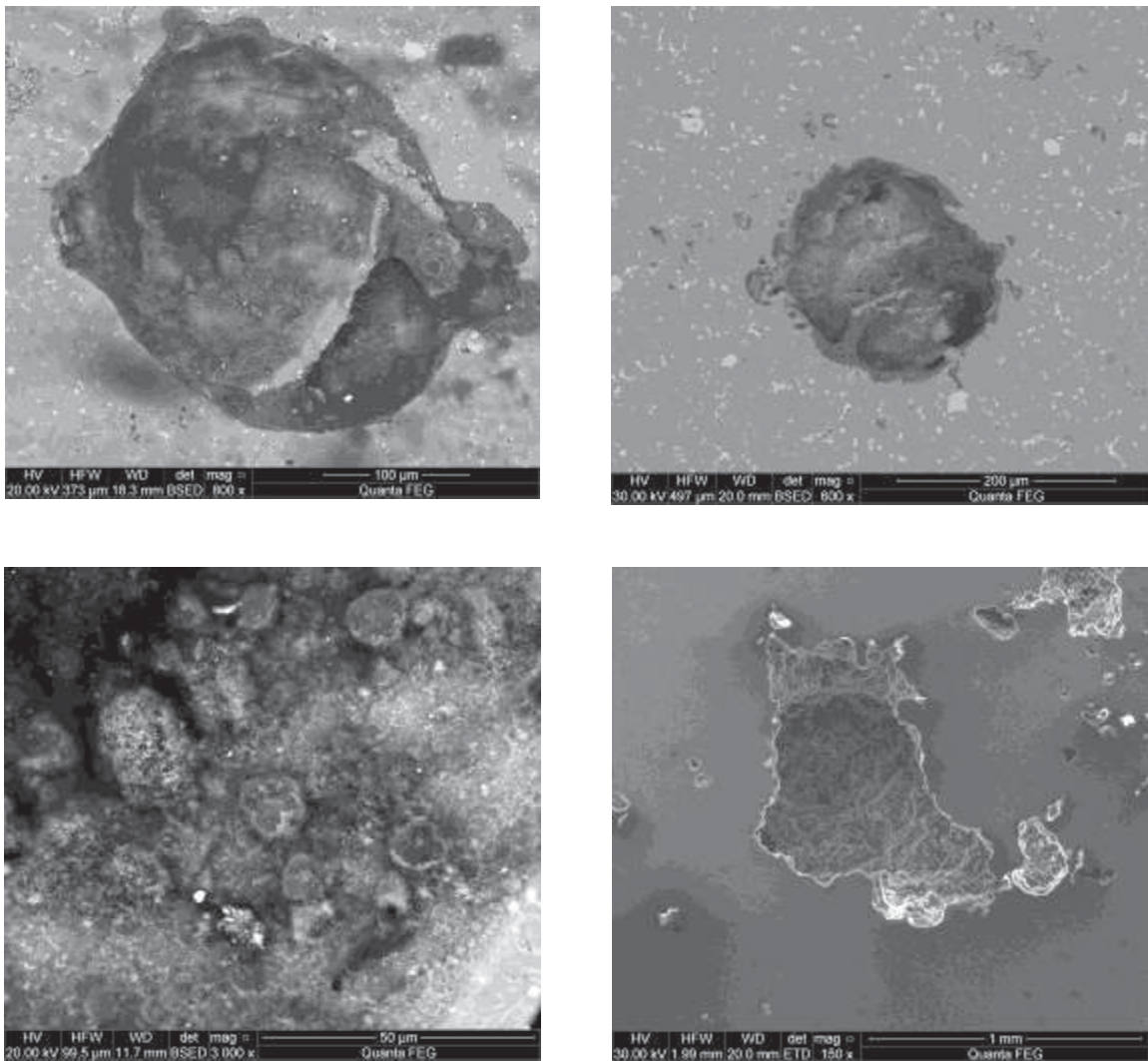


Figura 30: dettagli osservati al SEM dei più comuni difetti riscontrati a livello micrografico

Nelle superfici delle porosità da gas intrappolato si può notare la presenza di pellicole di ossido che le rivestono quasi interamente, con alte concentrazioni di ossigeno e silicio.

Nelle inclusioni massive invece si sono rilevate alte percentuali di carbonio, zinco e titanio, il che conferma che la loro formazione è avvenuta già all'interno del bagno da cui è pescata la lega. Elementi più densi dell'alluminio, come i composti di titanio, elemento chimico che generalmente, viene usato come affinante, aggregandosi tra loro all'interno del bagno tendono col passare del tempo a precipitare sul fondo del forno di mantenimento; il che può essere uno svantaggio in quanto negli ultimi getti prodotti, in cui viene pescata la lega quasi dal fondo del forno, presenteranno concentrazioni più elevate di tali composti massivi.

Nel caso particolare della lega EN AC 46100 utilizzata non era stato introdotto il titanio come agente affinante, il che conferma che l'elevata presenza delle inclusioni riscontrate, ed in particolare del titanio, è una conseguenza della scarsa pulizia del bagno nelle fasi finali di produzione, parametro di cui bisogna tenere in considerazione.

6 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Pur non essendo un componente strutturale che richiede determinate proprietà meccanico-strutturali, si è deciso di effettuare delle prove meccaniche per confrontare i risultati ottenuti con i valori nominali della lega usata. in modo da cercare eventuali correlazioni con i difetti fin ora riscontrati. Vista la geometria del componente poco favorevole alla lavorazione meccanica per la realizzazione di campioni per test, si è riusciti a ricavare dei provini per prove di trazione solo in prossimità della zona 2. della quale però sono note oltre che la porosità localizzata anche i valori delle pressioni date di sensori P1 e P2.

Nelle zone piane laterali del getto sono stati ricavati dei provini rettangolari per prove di flessione a tre punti.

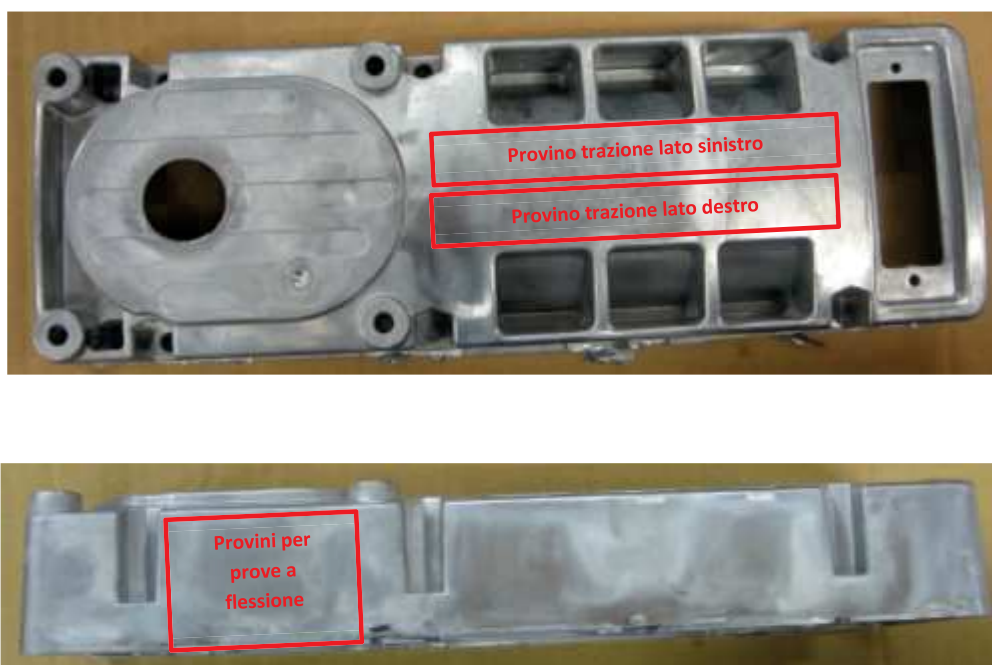


Figura 31: porzione del getto RDS in cui sono stati ricavati i provini di trazione (sopra) e flessione a tre punti (sotto)

6.1 PROVE A TRAZIONE

Le dimensioni del tratto utile sono state scelte in modo tale da comprendere il maggior volume di materiale possibile della zona di studio ed includere così il più alto numero di difetti presenti.

Non sono state rispettate dunque le specifiche normative in quanto non si era interessati a caratterizzare la lega dal punto di vista meccanico. ma si puntava maggiormente a confrontare tra loro i risultati ottenuti tra i vari design per ricavarne delle correlazioni con i parametri di processo utilizzati.

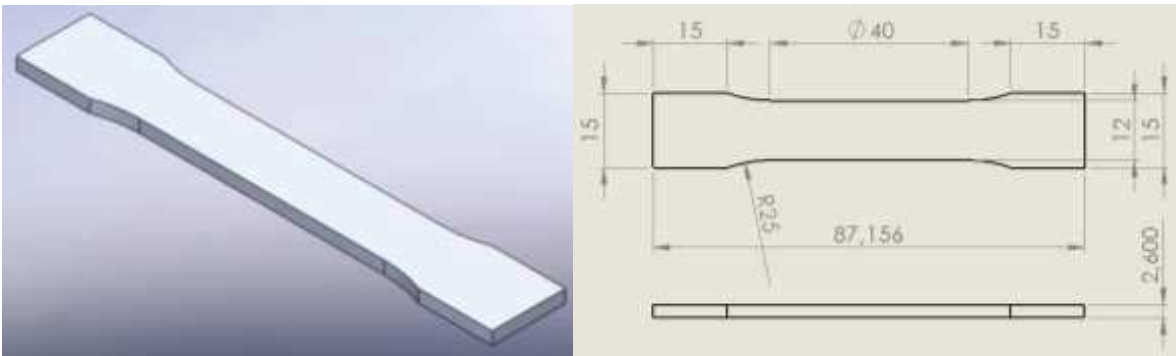


Figura 32: modello CAD e dimensioni del provino utilizzato per le prove a trazione

Di seguito sono riportate come esempio le curve sforzo deformazione ottenute per i getti A3 e AD8, migliore e peggiore rispettivamente. Come mostrato in Fig.33, è mantenuta la suddivisione lato destro e sinistro che, anche se se poco rilevante ai fini delle correlazioni, permette un più facile riferimento alle acquisizioni eseguite ai raggi X nella medesima zona.

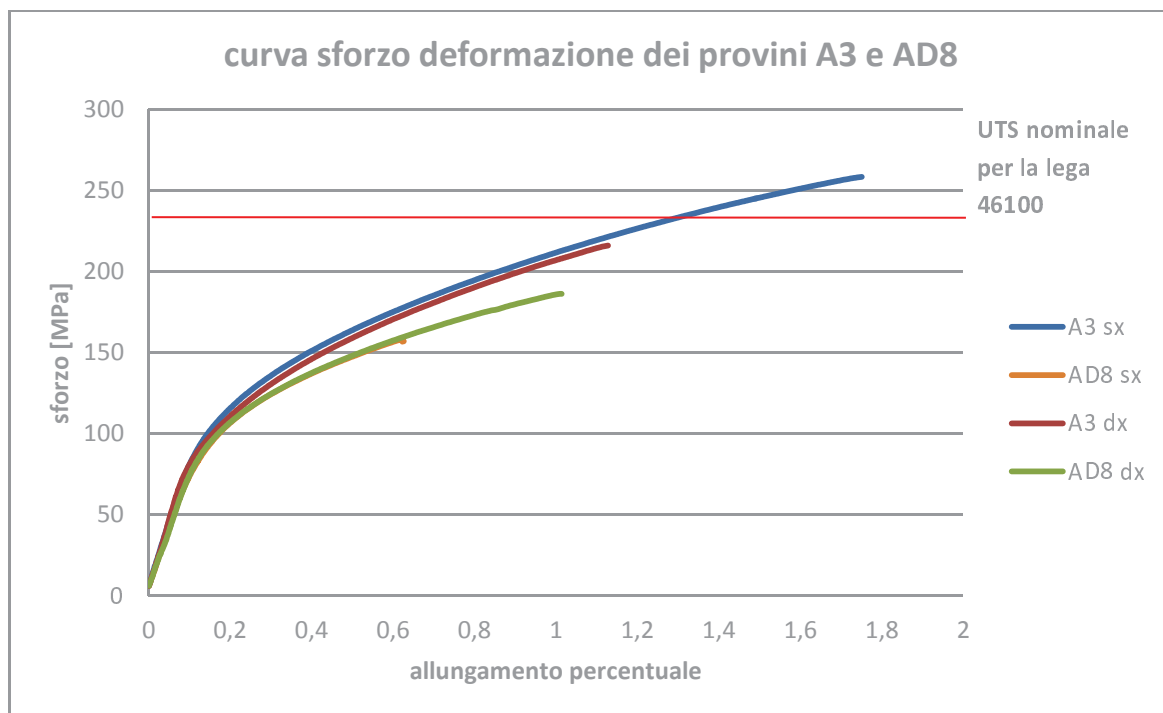


Figura 33: risultato delle prove a trazione: curva sforzo-deformazione

Il tratto elastico è simile per tutti i provini analizzati. ciò che cambia sensibilmente è la tensione ultima a rottura (UTS) e il rispettivo allungamento percentuale.

Come riportato nella normativa EN1706, il valore di UTS per la lega EN AB 46100 è di 240 MPa con un allungamento percentuale minore dell'1%. I test effettuati nell'ambito del lavoro qui presentato, in rari casi presentano una tensione a rottura pari all'UTS nominale della lega corrispondente.

Il più delle volte mostrano carichi anche di 80-90 MPa inferiori. Dall'analisi delle superfici di frattura mediante uno stereoscopio si può chiaramente capire a cosa sia dovuta la grande variabilità tra i risultati ottenuti.

La presenza più o meno evidente di porosità da gas intrappolato e ossidi pellicolari non fa che aumentare la discontinuità della matrice metallica e riduce localmente la sezione utile del provino provocandone il cedimento anticipato.

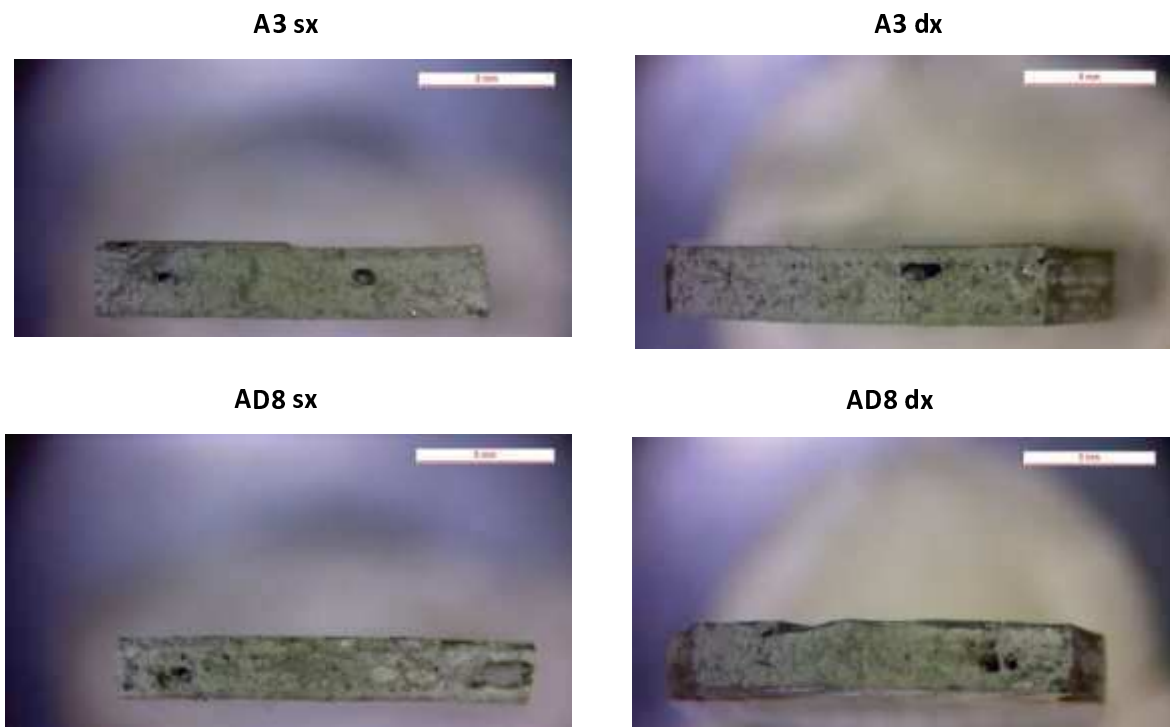


Figura 34: immagini delle superfici di frattura dei provini a trazione acquisite con uno stereoscopio ottico

Come prima cosa sono stati analizzati i getti ottenuti tramite parametri di processo il più possibile agli antipodi, successivamente si è deciso di eseguire le prove meccaniche anche su getti di design intermedi in modo da riuscire ad evidenziare eventuali correlazioni come nel caso dell'analisi della porosità. Si è mantenuta la distinzione tra provino destro e sinistro anche se adiacenti tra loro in modo da poter ricondurre i risultati meccanici ottenuti alla distribuzione di difetti osservata ai raggi X.

Le superfici di frattura sono state in seguito analizzate con il microscopio elettronico a scansione per andare a ricavare, tramite il software per l'analisi di immagine Leica QWIN, la percentuale di ossidi presente sulla superficie.

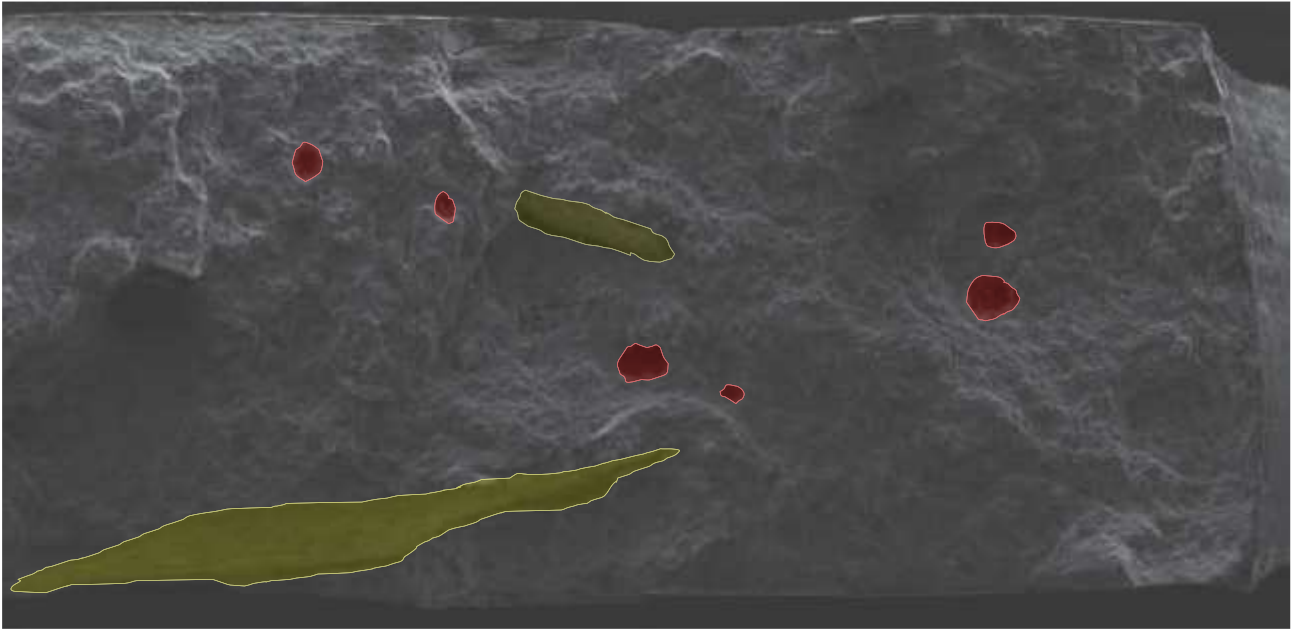


Figura 35: immagine di una porzione della superficie di frattura di un provino rotto a trazione.
In giallo sono evidenziate le pelli di ossido, in rosso le porosità da gas intrappolato

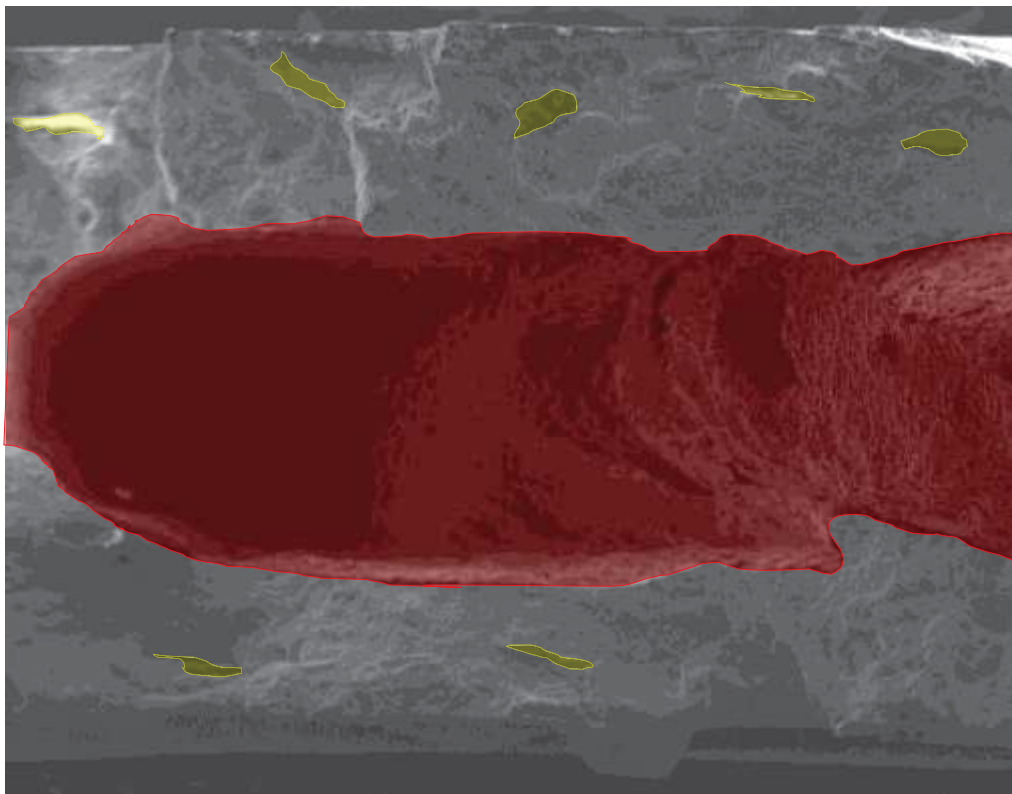


Figura 36: immagine di una porzione della superficie di frattura di un provino rotto a trazione.
In giallo sono evidenziate le pelli di ossido, in rosso le porosità da gas intrappolato

I risultati ottenuti sono espressi in tabella:

Nome	UTS Mpa	ε%	% porosità	% ossidi	T forno °C	Switch mm	V2 m/s	P3 bar
U4 DX	198,1	0,826	7,76	2,42	690	253	3,8	939
U5 DX	198,9	0,723	16,17	1,40	690	253	3,8	939
U6 DX	204,5	0,845	0,28	3,46	690	253	3,8	939
O5 DX	203,7	0,899	0,92	1,19	685	258	4,3	513
O6 DX	190,0	0,672	2,68	0,77	685	258	4,3	513
O7 DX	199,4	0,891	9,96	0,42	685	258	4,3	513
S5 DX	192,2	0,773	2,26	1,23	690	250	4,4	616
S6 DX	213,6	1,037	3,20	0,74	690	250	4,4	616
S7 DX	221,7	1,032	1,19	0,94	690	250	4,4	616
Y4 DX	196,8	1,031	2,03	1,68	695	228	4,2	503
Y5 DX	193,3	0,989	2,53	1,91	695	228	4,2	503
Y6 DX	173,3	0,808	2,31	2,15	695	228	4,2	503
Q4 DX	140,9	0,704	28,50	5,16	685	252	2,6	502
Q7 DX	170,0	0,517	11,32	4,91	685	252	2,6	502
Q8 DX	184,9	0,728	0,52	6,40	685	252	2,6	502
AD7 DX	184,3	0,632	10,47	2,94	700	246	3,6	510
AD8 DX	186,1	0,764	0,61	5,54	700	246	3,6	510
N5 DX	178,7	0,586	3,70	7,71	685	212	3,0	602
N6 DX	167,8	0,613	16,59	2,84	685	212	3,0	602
W5 DX	177,5	0,695	3,58	1,26	695	218	3,3	831
W6 DX	166,6	0,510	2,77	7,43	695	218	3,3	831
AC5 DX	168	0,499	2,39	14,91	700	222	2,7	878
AC6 DX	198,8	0,826	0,96	8,86	700	222	2,7	878
M6 DX	179,6	0,717	2,99	11,28	685	235	3,3	700
M7 DX	209,5	0,850	10,19	1,83	685	235	3,3	700
U4 SX	197,8	0,794	2,34	5,09	690	253	3,8	939
U5 XS	217,5	1,029	8,41	2,51	690	253	3,8	939
U6 XS	235,5	1,035	0,38	4,37	690	253	3,8	939
O5 SX	234,6	1,126	0,57	0,74	685	258	4,3	513
O6 SX	188,0	0,671	4,36	8,74	685	258	4,3	513
O7 SX	204,8	0,943	2,42	0,98	685	258	4,3	513
S5 SX	216,8	1,031	0,40	4,54	690	250	4,4	616
S6 SX	234,6	1,425	1,47	1,67	690	250	4,4	616
S7 SX	186,8	0,656	0,93	1,06	690	250	4,4	616
Y4 SX	200,3	1,041	5,69	1,17	695	228	4,2	503
Y5 SX	163,3	0,721	3,21	1,08	695	228	4,2	503
Y6 SX	216,3	1,303	2,32	3,41	695	228	4,2	503
Q4 SX	173,2	0,523	1,36	7,03	685	252	2,6	502
Q7 SX	203,4	0,982	4,95	0,73	685	252	2,6	502
Q8 SX	164,5	0,488	12,02	1,50	685	252	2,6	502
AD6 SX	179,8	0,615	2,73	3,92	700	246	3,6	510
AD7 SX	158,1	0,502	26,80	2,43	700	246	3,6	510

AD8 SX	158,1	0,412	2,85	3,95	700	246	3,6	510
N5 SX	215,2	1,006	5,90	6,61	685	212	3,0	602
N6 SX	187,5	0,297	1,60	12,34	685	212	3,0	602
W5 SX	176,3	0,645	13,73	1,45	695	218	3,3	831
W6 SX	196,1	0,845	5,52	4,24	695	218	3,3	831
AC5 SX	154,9	0,395	10,10	4,62	700	222	2,7	878
AC6 SX	200,5	0,715	9,58	2,18	700	222	2,7	878
M6 SX	196,7	0,691	2,12	5,79	685	235	3,3	700
M7 SX	188,3	0,675	4,07	4,39	685	235	3,3	700

Tabella 6: risultati delle prove meccaniche, conteggio di ossidi e porosità nella superficie di frattura e parametri caratteristici di processo

6.2 PROVE A FLESSIONE:

Per le prove di flessione a tre punti sono stati usati dei provini piani rettangolari con la seguente geometria:

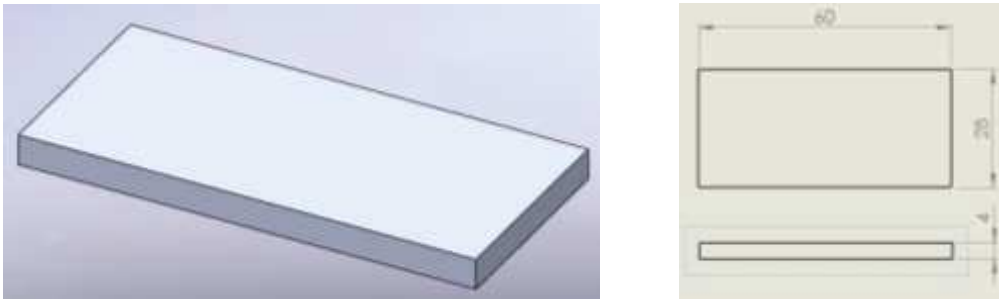


Figura 37: modello CAD del provino per la prova a flessione a tre punti (sinistra), dimensioni nominali del provino (destra)

Parametri di prova:
diametro del punzone= 5mm
diametro degli appoggi = 5.2mm
luce tra gli appoggi= 32mm

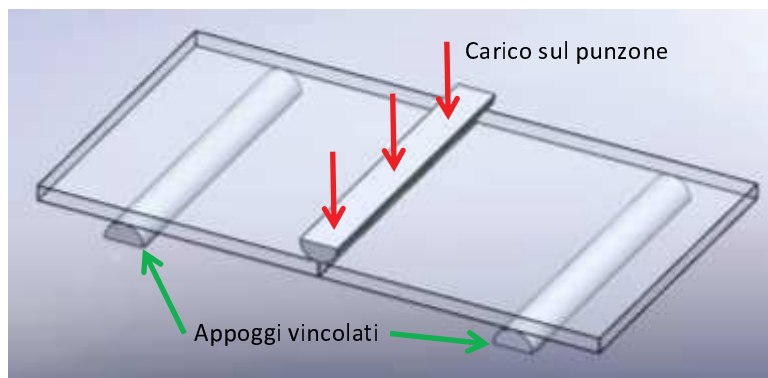


Figura 38: modello CAD dell'assieme di provino, punzone e appoggi

A differenza delle prove di trazione in cui tutta la sezione resistente è soggetta allo stesso carico secondo la relazione $\sigma=F/A$, nel caso della flessione a tre punti si ottiene una distribuzione delle tensioni cosiddetta "a farfalla" sulla sezione, in cui un lato del provino è soggetto ad una σ di compressione e il lato opposto a trazione. Tale prova quindi sollecita maggiormente una piccola porzione di materiale vicino alla superficie. per cui ai fini della resistenza ultima a rottura difetti come ossidi pellicolari avranno un peso maggiore rispetto alle porosità da gas intrappolato.

La formula di Navier per ricavare la tensione massima sulla faccia in trazione è applicabile in campo lineare elastico, mentre in questo caso è necessario tener conto anche del comportamento plastico del materiale. Si fa dunque riferimento ad una simulazione agli elementi finiti per ricavare la tensione del materiale nota la forza applicata in kN e l'abbassamento della traversa in mm.

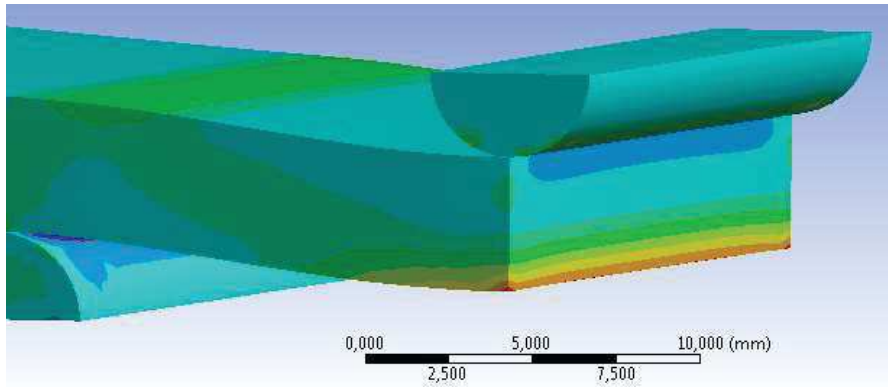


Figura 39: modello FEM della distribuzione delle tensioni dell'assieme nella sezione più sollecitata

Si noti che la porzione in blu, a contatto con il punzone, è soggetta a compressione, mentre il lato opposto è trazionato secondo la distribuzione di Navier.

Di seguito sono riportati graficamente i risultati ottenuti riferiti al getto migliore A3 e peggiore AD8.

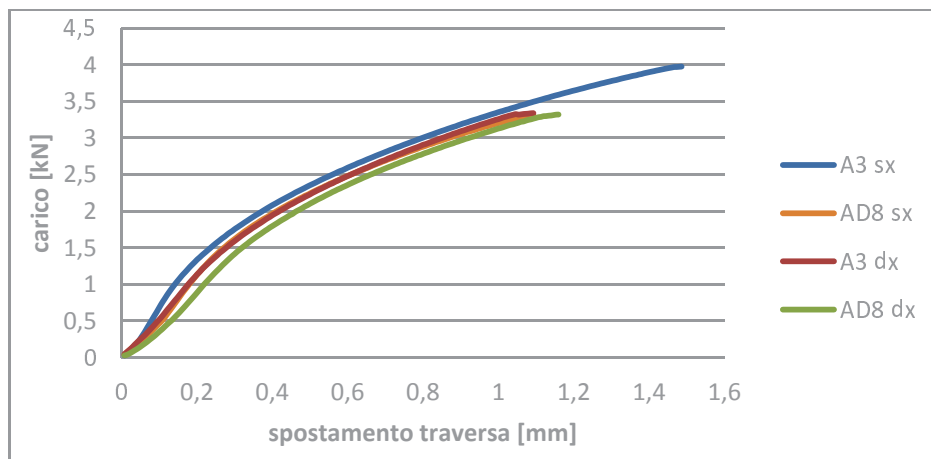


Figura 40: andamento della curva "carico-abbassamento della traversa" per i provini di riferimento

In tabella 7 sono riportati i risultati delle prove a flessione ottenuti per tutti i provini analizzati, con i corrispondenti parametri di processo.

Codice Provino	Displacement mm	Force N	EQ_STRESS Mpa	A%	T forno °C	Switch mm	V2 m/s	P3 bar
A3_DX	1,093	3339	209,6	0,43	670	237	4,3	902
A3_SX	1,486	3975	234,0	0,78	670	237	4,3	902
C4_DX	1,293	3511	223,4	0,61	670	260	3,4	555
C4_SX	1,626	3890	238,6	0,86	670	260	3,4	555
K7_DX	1,526	3914	233,1	0,76	680	217	4,3	958
K7_SX	1,700	4124	242,5	0,93	680	217	4,3	958
M6_DX	1,701	3899	242,5	0,93	685	235	3,3	700
M6_SX	1,526	3860	233,1	0,76	685	235	3,3	700
M7_DX	1,566	3775	235,9	0,81	685	235	3,3	700
M7_SX	1,433	3836	231,1	0,73	685	235	3,3	700
N5_DX	1,373	3646	228,1	0,68	685	212	3,0	602
N5_SX	1,079	3367	207,8	0,40	685	212	3,0	602
O6_DX	1,532	3683	233,1	0,76	685	258	4,3	513
O6_SX	1,232	3539	218,5	0,54	685	258	4,3	513
Q4_DX	1,273	3585	221,8	0,59	685	252	2,6	502
Q4_SX	1,579	3929	235,9	0,81	685	252	2,6	502
Q7_DX	1,146	3200	213,3	0,47	685	252	2,6	502
Q7_SX	1,186	3303	215,1	0,50	685	252	2,6	502
S6_DX	1,400	3664	229,6	0,71	690	250	4,4	616
S6_SX	1,839	4122	249,9	1,07	690	250	4,4	616
U4_DX	1,526	3870	233,1	0,76	690	253	3,8	939
U4_SX	1,720	4124	243,8	0,95	690	253	3,8	939
W5_DX	1,620	3814	238,6	0,86	695	218	3,3	831
W5_SX	1,579	3783	235,9	0,81	695	218	3,3	831
Y4_DX	1,659	3797	239,9	0,88	695	228	4,2	503
Y4_SX	1,573	3860	235,9	0,81	695	228	4,2	503
Y6_DX	1,493	3611	229,7	0,76	695	228	4,2	503
Y6_SX	1,220	3390	218,5	0,54	695	228	4,2	503
Y7_DX	1,546	3817	234,5	0,79	695	228	4,2	503
Y7_SX	1,533	3728	233,1	0,76	695	228	4,2	503
AD6_DX	1,713	3716	243,8	0,95	700	246	3,6	510
AD6_SX	1,453	3164	232,5	0,75	700	246	3,6	510
AD8_DX	1,159	3319	213,3	0,47	700	246	3,6	510
AD8_SX	1,093	3310	209,6	0,43	700	246	3,6	510

Tabella 7: risultati delle prove di flessione a tre punti con i relativi parametri caratteristici di processo

7 ANALISI CRITICA DEI DATI

7.1 PRIME CORRELAZIONI CON I PARAMETRI NOMINALI DI PROCESSO

In questo capitolo sono presentate le relazioni ricavate che legano i parametri di processo impostati con i risultati ottenuti dall'analisi qualitativa dei getti.

Inizialmente si farà riferimento al parametro di porosità percentuale rilevata nelle varie zone, considerando la totalità dei getti esaminati, successivamente per le correlazioni con le prove meccaniche e il conteggio degli ossidi, si considereranno solo i getti dal design M in poi, in quanto quelle precedenti non sarebbero correlabili con i dati relativi alla sensoristica a causa di un malfunzionamento del sistema di acquisizione.

I colori verde giallo e rosso nei grafici successivi corrispondono rispettivamente al livello 2,3 e 4 dell'ispezione visiva, così da poter notare eventuali tendenze non solo a livello di concentrazioni di porosità ma anche di qualità superficiale.

7.2 CORRELAZIONE TRA TEMPERATURA DEL FORNO E POROSITA' (RX)

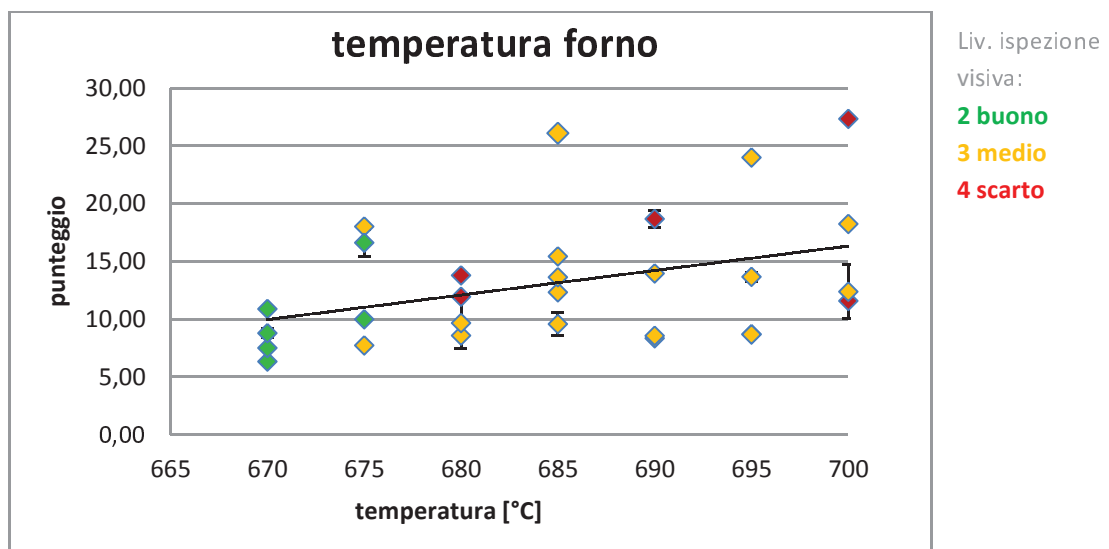


Figura 41: correlazione porosità (RX)-temperatura del forno-ispezione visiva

Nel grafico di Fig. 41 sono rappresentati i risultati dei 29 design in termini di porosità da RX (somma delle percentuali di porosità rilevate nelle quattro zone) e temperatura del bagno, ognuno inteso come media dei 3 valori ricavati ed espressi con la corrispettiva deviazione standard.

Si può chiaramente notare un andamento crescente della porosità rilevata all'aumentare della temperatura del forno. Inoltre i getti con livello 2 di ispezione visiva (getti migliori-evidenziati in verde) sono relativi alle più basse temperature impostate.

Una spiegazione a tale tendenza può essere attribuibile al fatto che la lega più calda risulta anche più fluida, e ciò può portare ad un aumento della turbolenza localizzata, con conseguente aumento della quantità di gas intrappolato.

7.3 CORRELAZIONE TRA PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE E POROSITA' (RX)

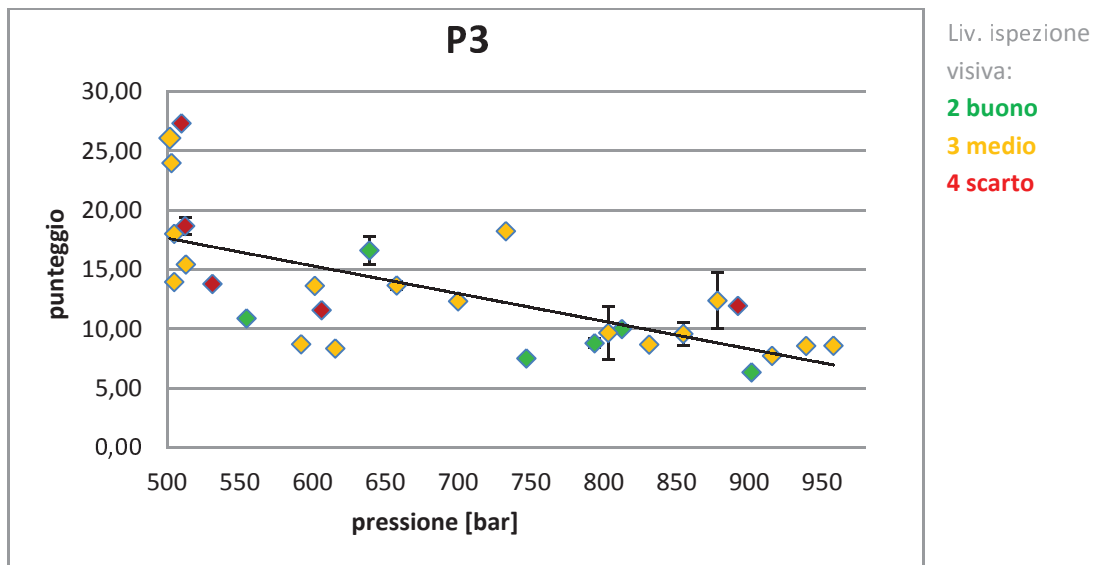


Figura 42: correlazione porosità (RX)-pressione di intensificazione-ispezione visiva

Il grafico dimostra che all'aumentare della pressione di intensificazione si rileva una diminuzione della porosità percentuale rilevata tramite ispezione radiografica, mentre questo non sembra avere ripercussioni sulla qualità superficiale dei getti, come evidente dalla distribuzione dei colori tra i vari punti.

Tale risultato è in accordo con le relazioni evidenziate tra area sottesa dalla curva di pressione rispetto alla porosità percentuale, presentata nel capitolo 3.2.

7.4 CORRELAZIONE TRA PUNTO DI SWITCH E POROSITA' (RX)

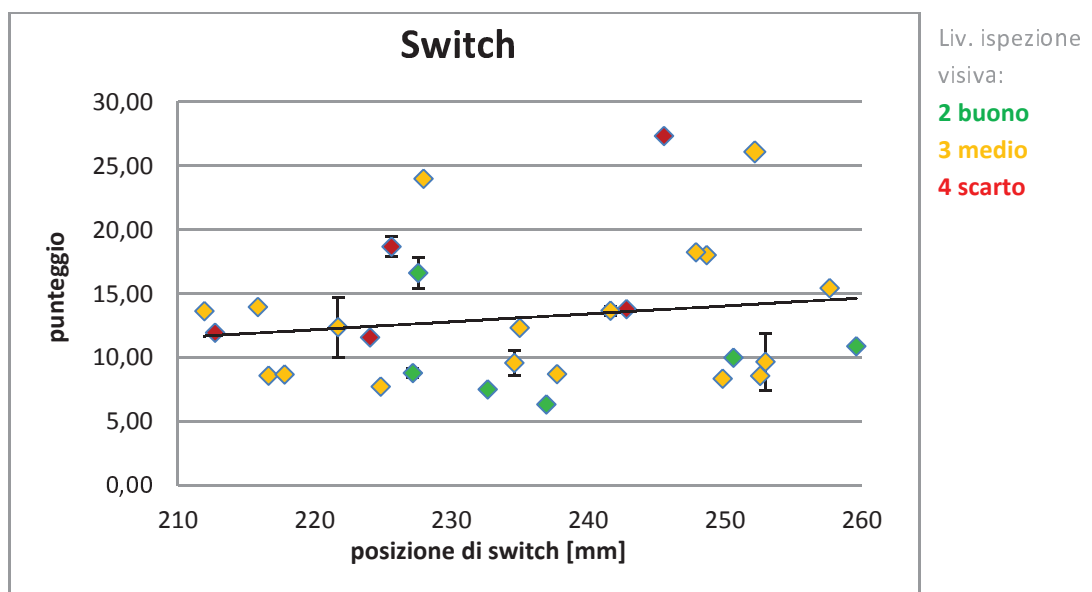


Figura 43: correlazione punteggio-switch point-ispezione visiva

Vista l'elevata dispersione dei risultati non si nota nessuna tendenza evidente, ne dal punto di vista dell'ispezione visiva ne sul punteggio delle porosità.

7.5 CORRELAZIONE TRA VELOCITA' DI SECONDA FASE E POROSITA' (RX)

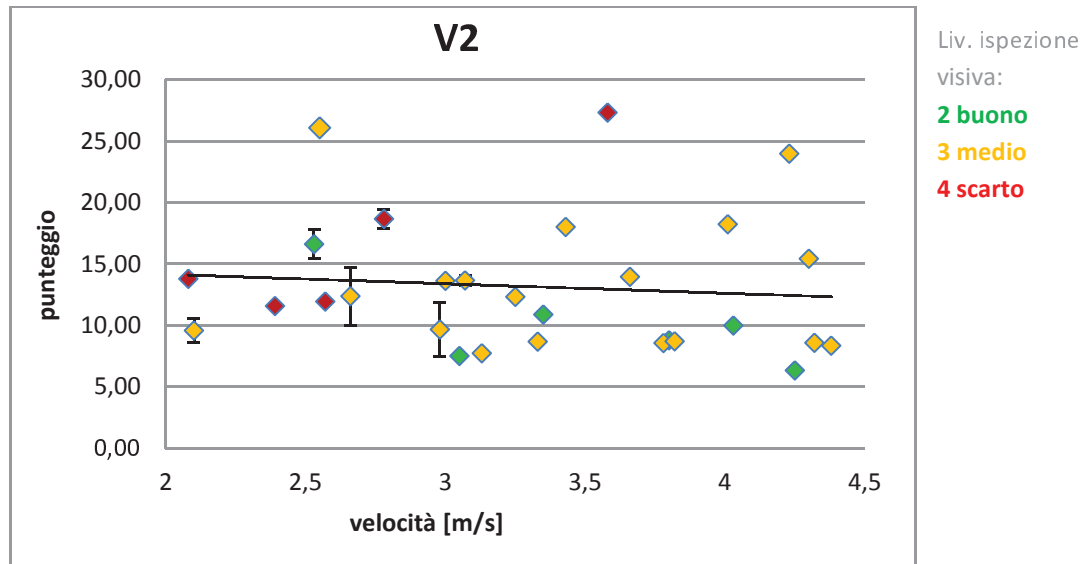


Figura 44: correlazione punteggio-velocità di seconda fase-ispezione visiva

Per la velocità di seconda fase non si nota un'evidente tendenza dei risultati. Tuttavia è evidente il fatto che getti qualitativamente peggiori da ispezione visiva, abbiano tendenzialmente basse velocità di seconda fase (eccetto un caso isolato), in accordo con [2] .

Poiché nelle analisi si è tenuto conto di un solo parametro di processo per volta, mentre nella pratica tutti variavano contemporaneamente design dopo design, si è pensato di sfruttare i rapporti tra questi in modo da ottenere delle correlazioni più significative.

7.6 CORRELAZIONE TRA PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE - VELOCITÀ DI SECONDA FASE – POROSITÀ (RX)

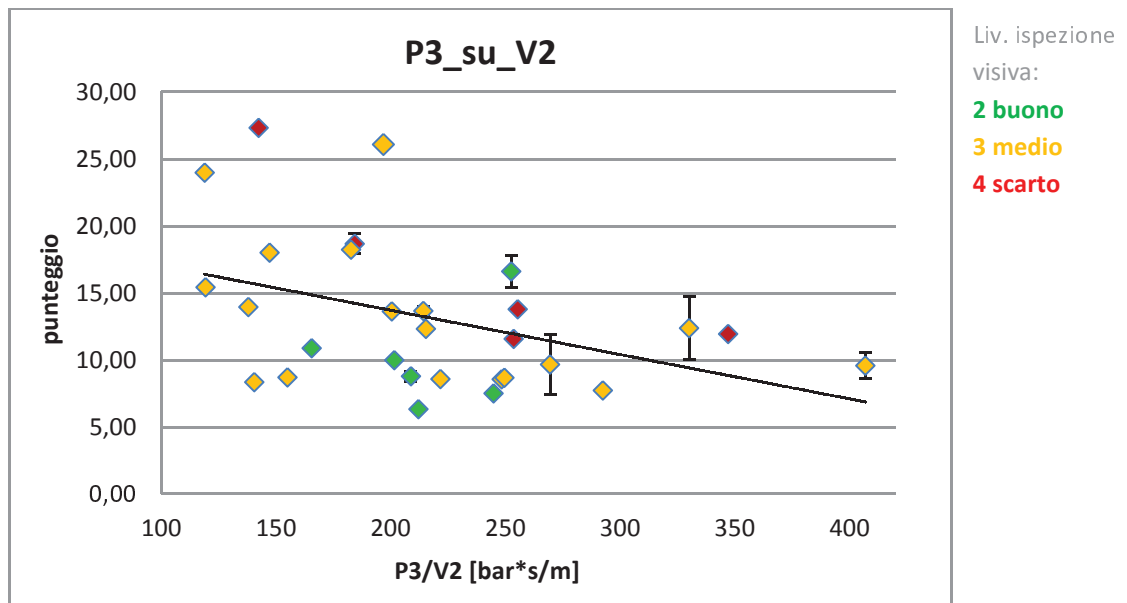


Figura 45: correlazione porosità (RX) - P3/V2-ispezione visiva

I getti con un buon livello qualitativo superficiale si concentrano nella zona con valori medi del rapporto P3/V2. Si nota viceversa la percentuale di porosità va diminuendo al prevalere della pressione di intensificazione rispetto alla velocità, e che a pressioni basse e velocità elevate corrispondono, al contrario, getti più scadenti.

7.7 CORRELAZIONE TRA TEMPERATURA DEL FORNO - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE – POROSITÀ (RX)

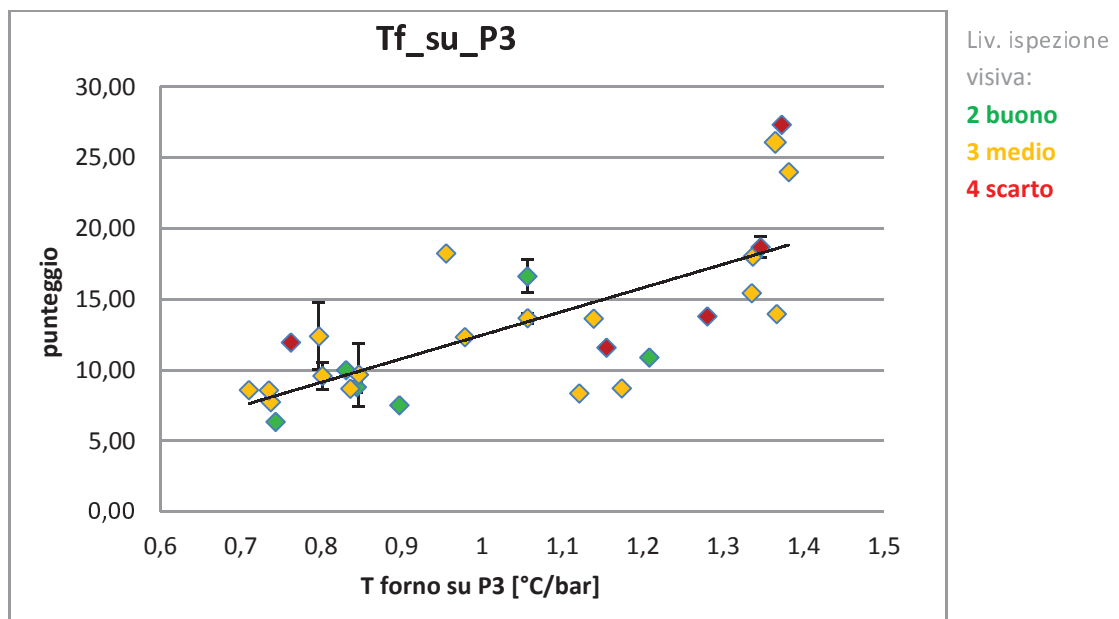


Figura 46: correlazione porosità (RX) - Tf/P3-ispezione visiva

L'andamento di Fig.46 riconferma quanto detto in precedenza, cioè che a temperature elevate del bagno di alluminio e basse pressioni corrisponda una peggior qualità del getto in termini di porosità rilevata da ispezione radiografica.

Non si notano tendenze nella distribuzione dei getti con buoni livelli di ispezione visiva rispetto ai getti peggiori.

La variazione di questi due parametri è molto più incidente nella qualità rispetto alla posizione di switch o la velocità di seconda fase.

La pressione di intensificazione risulta essere dunque il parametro dominante, la cui variabilità comporta una netta distinzione qualitativa dei componenti prodotti in termini di porosità, tuttavia variando tale parametro assieme agli altri parametri principali (T forno, V2, switch point) non si riesce a quantificare chiaramente il peso di ognuno.

7.8 CORRELAZIONI IN DUE VARIABILI DELLA POROSITA' (RX)

Poiché i parametri in ingresso che variano in contemporanea sono quattro, risulta difficile osservare delle correlazioni tra una misura effettuata ed uno solo di questi parametri in un grafico 2D, in quanto la relazione che si instaura è influenzata dalla variabilità degli altri 3 parametri non espressi.

È quindi più utile, in certi casi, sfruttare una visualizzazione delle tendenze e correlazioni in un grafico 3D, che permetta di considerare un dato in uscita misurato con i due parametri di processo più significativi in entrata. Così facendo si riesce a pesare l'effetto di una seconda variabile significativa anche se la lettura del grafico può risultare meno intuitiva a colpo d'occhio.

Facendo riferimento al solo parametro in output di porosità percentuale si schematizza la relazione tra quest'ultima e due dati in input tra i quattro parametri fondamentali di processo; tale schema non tiene conto del valore di ispezione visiva.

Mediante il surface fitting tool di Matlab® si cerca la curva cubica di best fitting tra i risultati ottenuti in termini di porosità (RX): la schematizzazione è la vista dall'alto del grafico 3D in cui sull'asse Z c'è sempre il valore della porosità calcolata. I "colori caldi" corrispondono ai punteggi maggiori in valore assoluto, corrispondenti quindi ai getti con maggior grado di porosità, i "colori freddi" sono relativi ai punteggi più bassi, ossia i getti migliori.

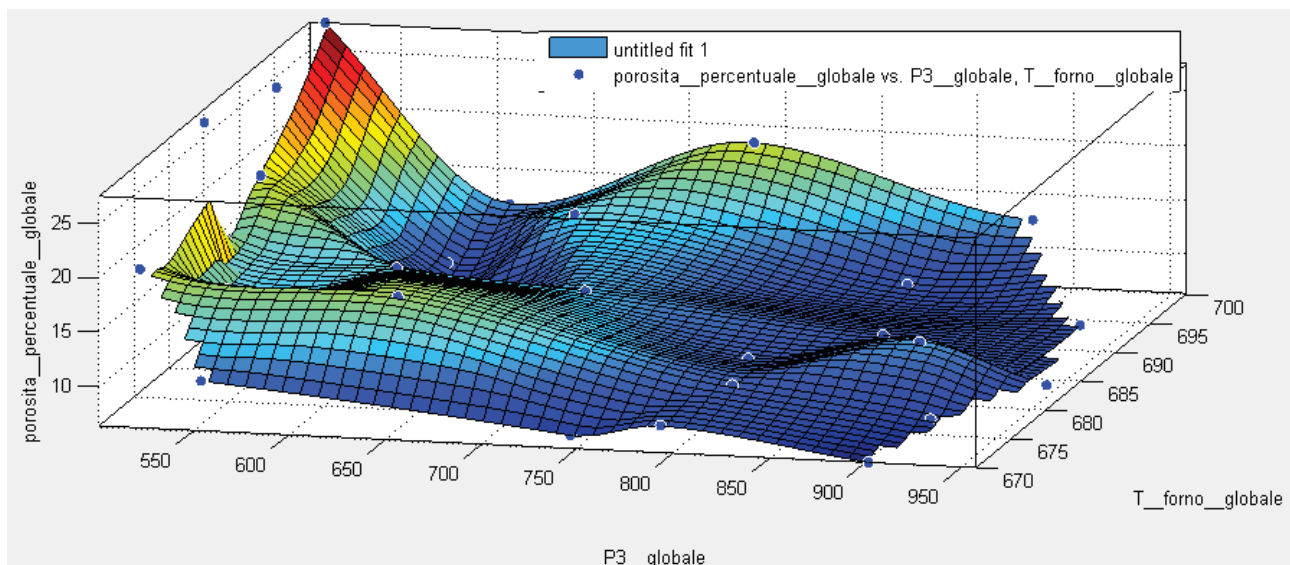


Figura 47: visualizzazione 3D della correlazione porosità (RX)-pressione di intensificazione-temperatura del forno

Per comodità si farà sempre riferimento alla vista superiore del grafico 3D, con assi X ed Y relative a parametri di processo di volta in volta specificati.

7.8.1 CORRELAZIONE POROSITA' (RX) - TEMPERATURA DEL FORNO - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

La curva di Fig. 48 riporta la tendenza, in termini di porosità da ispezione radiografica, dei 29 design prodotti al variare della temperatura in °C del forno (T_forno_globale) e pressione di intensificazione (P3_globale).

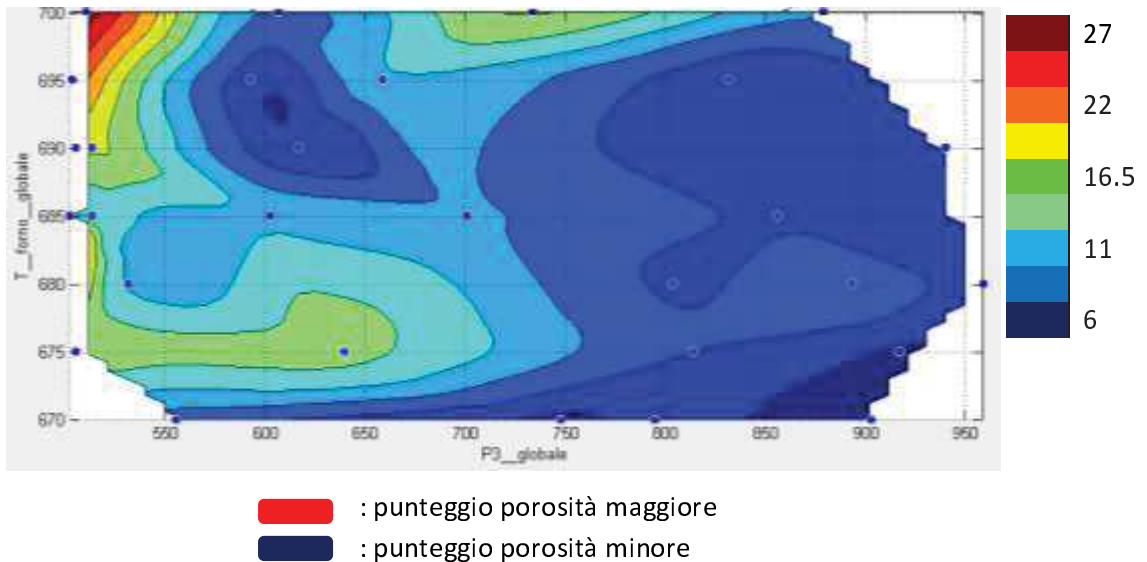


Figura 48: correlazione porosità(RX) - pressione di intensificazione - temperatura del forno

Le frecce nella figura mostrano la tendenza per cui a getti migliori corrispondono alte pressioni di intensificazione e le più basse temperature del bagno; in accordo con quanto precedentemente riportato. Si noti che la variabilità della pressione appare ancora una volta più incidente rispetto alla temperatura.

7.8.2 CORRELAZIONE POROSITA' (RX) - VELOCITA' DI SECONDA FASE - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

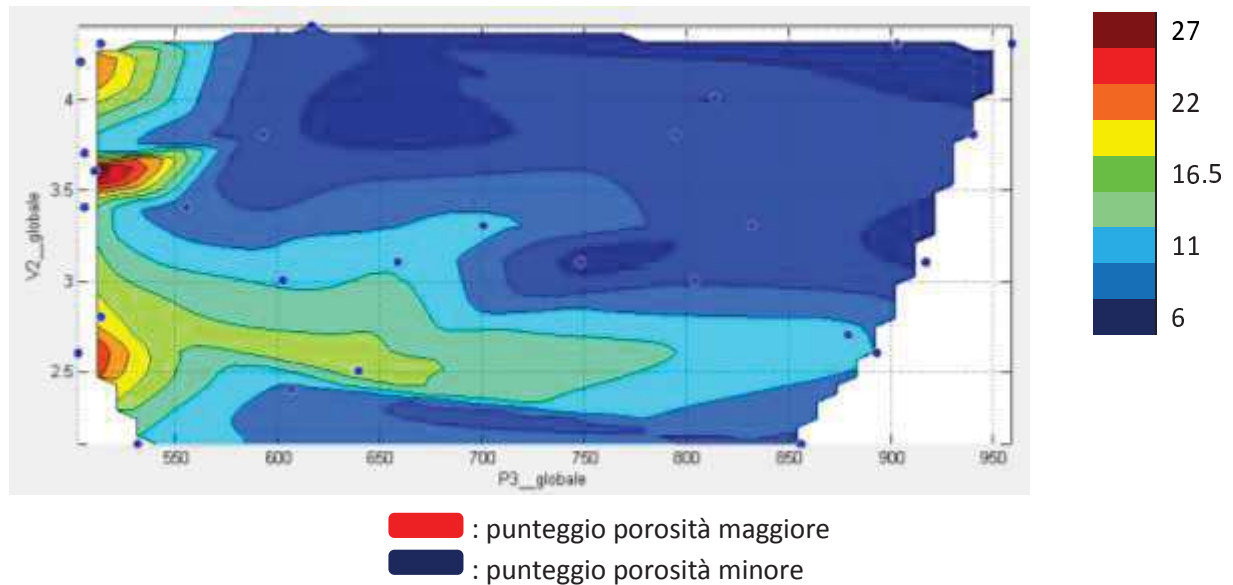
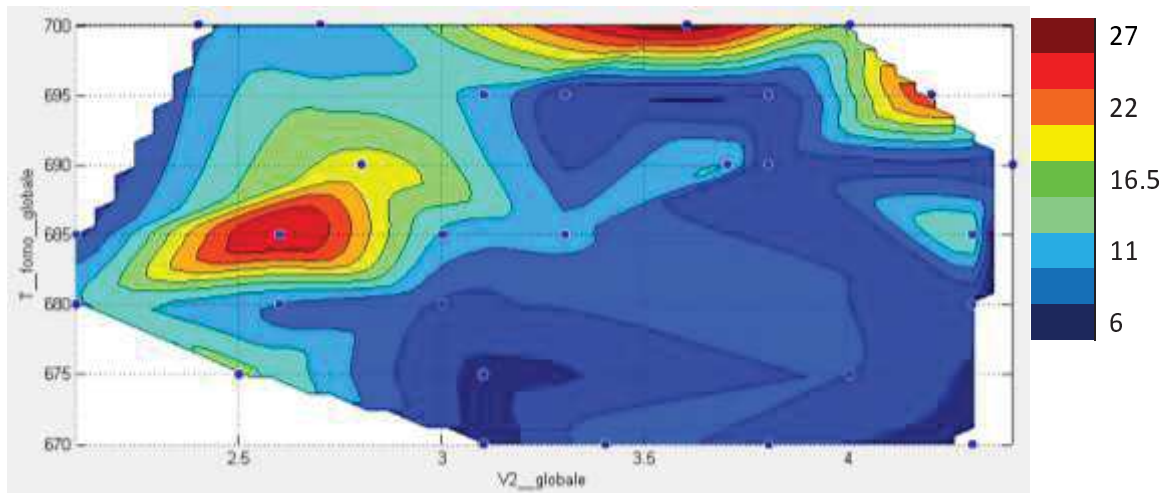


Figura 49: correlazione porosità (RX) - pressione di intensificazione - velocità di seconda fase

Correlando pressione di intensificazione P3 e la velocità di seconda fase si può osservare che i getti migliori sono prodotti per V2 oltre i 3 m/s per pressioni medio-alte oltre i 600 bar.

Per pressioni inferiori ai 600 bar invece l'influenza della velocità sembra calare, infatti si hanno getti con elevata porosità sia per V2 basse, che medie, che elevate.

7.8.3 CORRELAZIONE TRA POROSITA' (RX) - VELOCITA' DI SECONDA FASE - TEMPERATURA DEL FORNO



■ : punteggio porosità maggiore
■ : punteggio porosità minore

Figura 50: correlazione porosità (RX) - velocità di seconda fase - temperatura del forno

La curva in rosso mostra che i getti con minori porosità sono caratterizzati da velocità tendenzialmente maggiori di 3 m/s e temperature medio basse inferiori ai 690°C

Sono state esposte solamente le combinazioni di parametri che presentavano una evidente correlazione con i risultati in output presi in esame, in particolare il dato riguardante lo switch point sembra essere influente in quanto una sua variazione anche significativa non mostra una netta tendenza con l'aumentare o il diminuire delle porosità da gas intrappolato.

7.9 CORRELAZIONI TRA PROVE MECCANICHE E PARAMETRI DI PROCESO:

Di seguito vengono riportati i risultati e le correlazioni ottenuti tramite le prove meccaniche di trazione sui 51 provini appartenenti ai design da M ad AD; poiché ogni dato non è il risultato di una media di valori, a differenza dei grafici precedenti, non è segnata la deviazione standard relativa. Non si sfrutta in questo caso un riferimento cromatico relativo al grado di ispezione visiva in quanto tutti i provini analizzati appartengono a sole due classi (classe 3 e 4) troppo poche per evidenziare tendenze certe.

A titolo di confronto sono stati diagrammati i risultati in termini di UTS - A% dei getti con caratteristiche migliori e peggiori, con i relativi parametri di processo utilizzati.

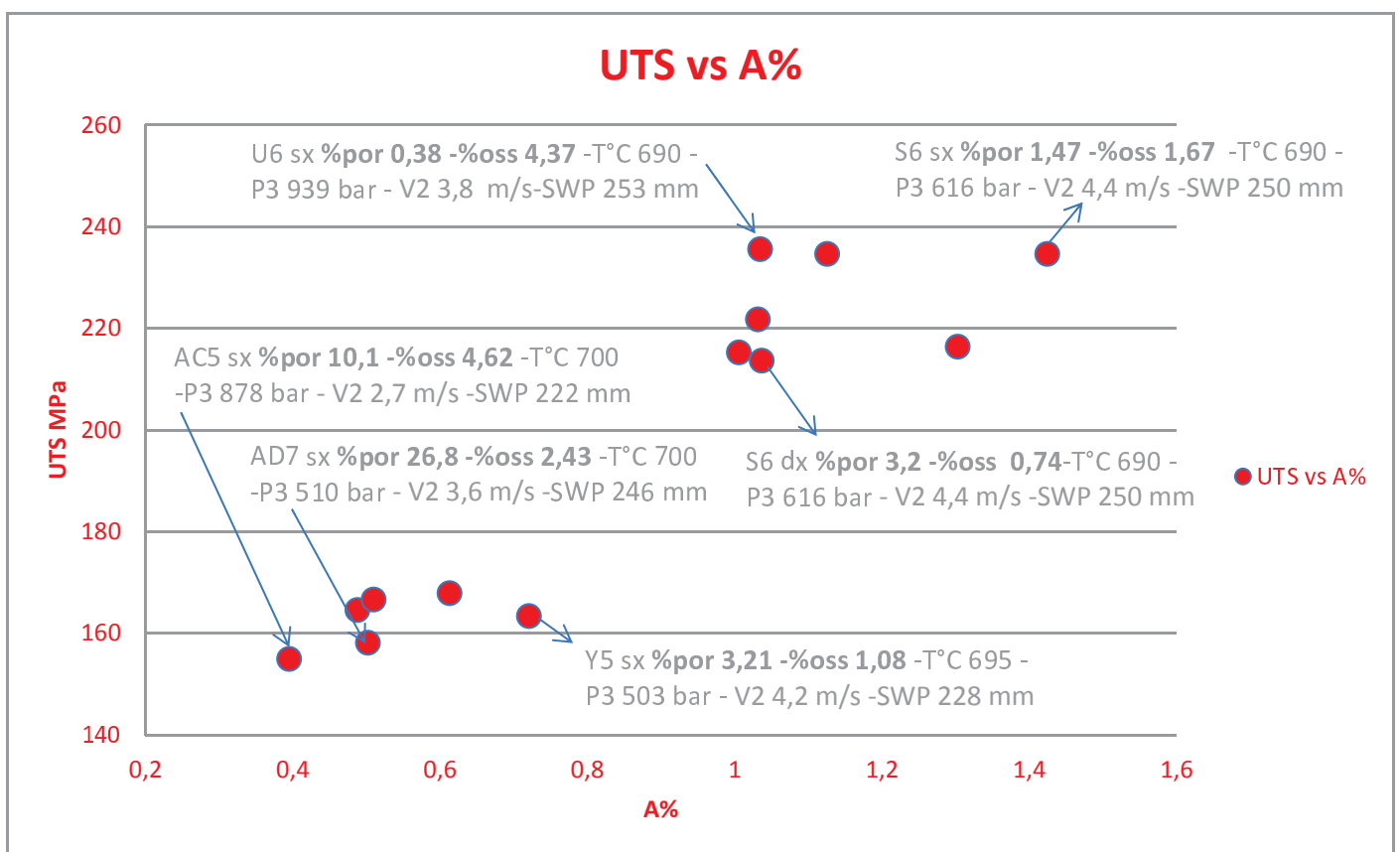


Figura 51: correlazione tra UTS e A% per i provini con le caratteristiche meccaniche migliori (in alto a destra) e peggiori (in basso a sinistra) ed i relativi parametri caratteristici di processo.

7.9.1 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A TRAZIONE) - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

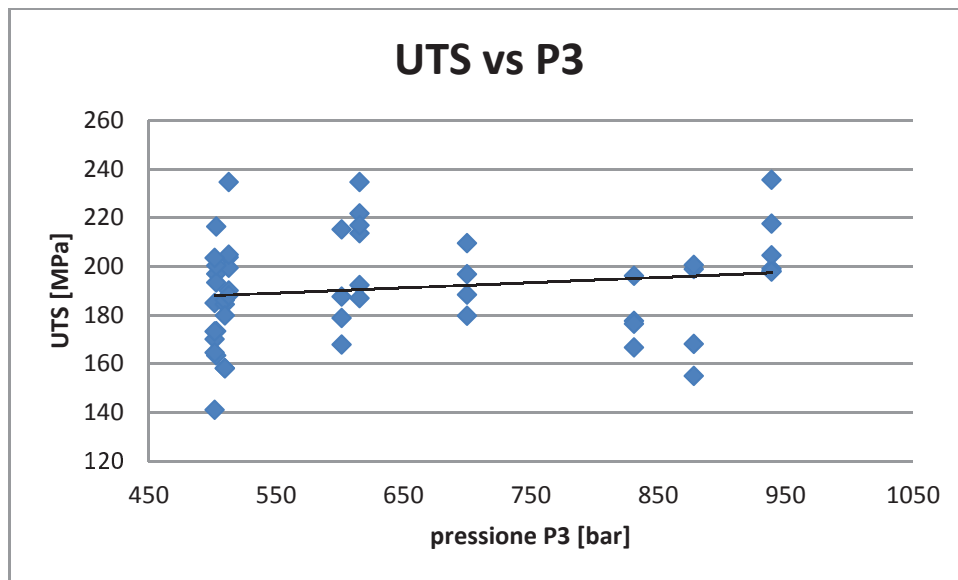


Figura 52: correlazione UTS-pressione di intensificazione

Diagrammando l'andamento della resistenza ultima a trazione in funzione della pressione di intensificazione ci si aspetterebbe un andamento crescente più marcato, vista la forte correlazione evidenziata in precedenza tra P3 e porosità. Una porosità da gas intrappolato all'interno della sezione utile del provino crea una riduzione della sezione utile stessa che dovrebbe portare ad una prematura rottura il campione. Se inoltre all'aumentare della pressione di intensificazione è dimostrato che riduco le dimensioni delle cavità, dovrei osservare un netto miglioramento delle caratteristiche meccaniche andando a mitigare la riduzione della sezione utile, mentre osservo dal grafico di Fig. 52 un'elevata dispersione dei risultati.

Una spiegazione a tale fenomeno si può attribuire al fatto che l'UTS è influenzata anche da altri fattori come ad esempio la posizione stessa della porosità: una porosità interna al provino è meno critica di una che è posizionata sul bordo, in quanto questa tenderà a comportarsi come un intaglio laterale sollecitato a modo 1, che secondo la teoria di Irwin e Federson produce un campo di tensioni più critico.

Nel nostro caso, poiché i provini a trazione sono stati ottenuti da lavorazione meccanica, la posizione della porosità è divenuta una variabile influente. Se viceversa il provino non avesse richiesto lavorazione meccanica, la porosità si sarebbe concentrata nella zona più interna dello stesso, come tipicamente avviene nei getti pressocolati.

In secondo luogo la presenza di ossidi sulla superficie di frattura può influenzare anch'essa la tensione di rottura, in quanto per effetto della loro forma tendono a concentrare fortemente le tensioni, ed in oltre se posizionati parallelamente alla superficie di frattura si comportano come vere e proprie micro-cricche già innescate.

La formazione di tali ossidi, a differenza delle porosità, non è riconducibile alla pressione di intensificazione applicata poiché questa agisce solo per eliminare i ritiri e comprimere le porosità. Infine, gli ossidi sono difficilmente evidenziabili tramite ispezione radiografica, sia per le loro dimensioni molto ridotte, sia per la loro densità molto prossima a quella della lega circostante;

tutto ciò chiarisce come sia possibile che getti apparentemente accettabili sia per la pressione di intensificazione applicata durante la produzione sia per il livello qualitativo evidenziato a seguito dell'ispezione radiografica, cedano prematuramente.

7.9.2 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A TRAZIONE) - ALLUNGAMENTO PERCENTUALE - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

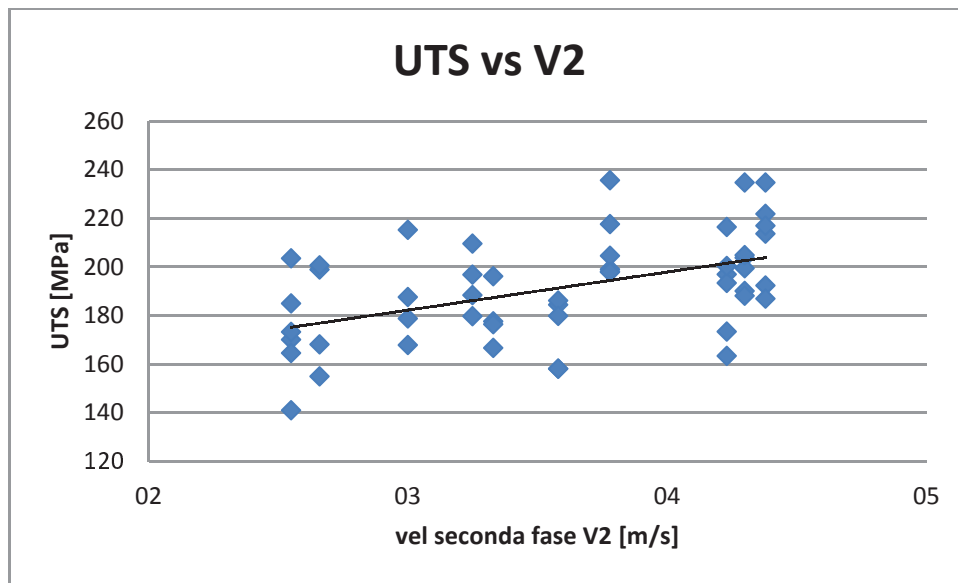


Figura 53: correlazione UTS - velocità di seconda fase

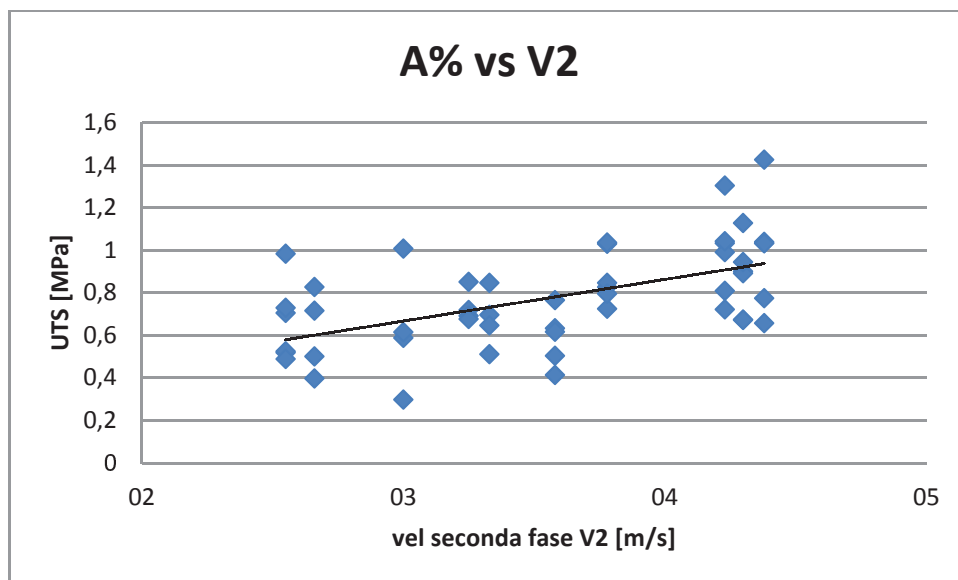


Figura 54: correlazione A% - velocità di seconda fase

Si nota una certa correlazione tra l'incremento di UTS come pure l'allungamento percentuale a rottura e l'aumento della velocità di seconda fase. Non si notano tuttavia variazioni di tendenza evidenti oltre la soglia dei 3m/s come si era visto nelle analisi precedenti.

7.9.3 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A TRAZIONE) - TEMPERATURA DEL FORNO

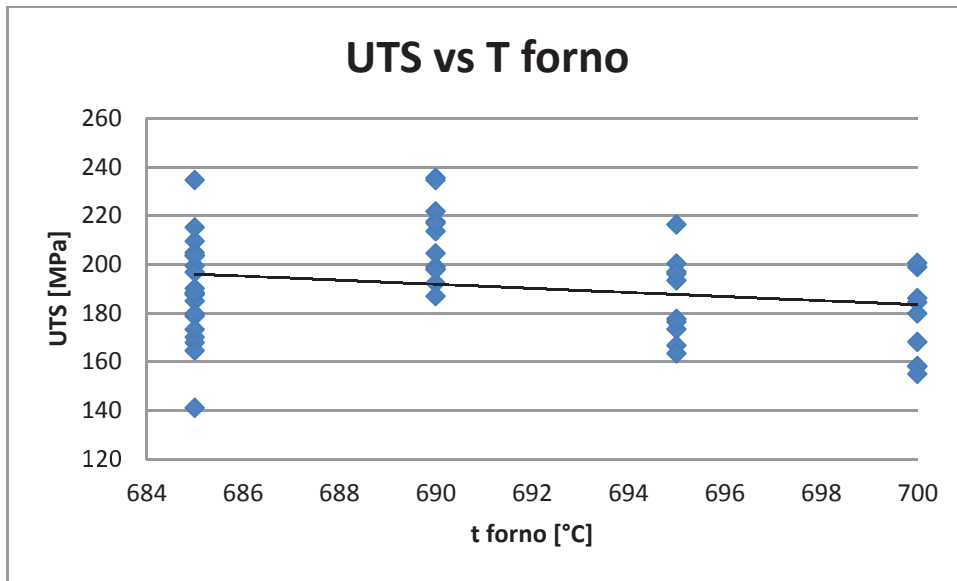


Figura 55: correlazione carico di picco - temperatura del forno

Nonostante la grande dispersione di risultati relativi ai 685°C si può osservare un leggero decremento di UTS all'aumentare della temperatura del forno, parallelamente ad un aumento della porosità percentuale, come mostravano i grafici precedenti.

Per quanto riguarda le prove di flessione a tre punti si sfruttano a titolo di confronto le stesse correlazioni utilizzate per le prove a trazione, dalle quali si ottiene:

7.9.4 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A FLESSIONE) - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

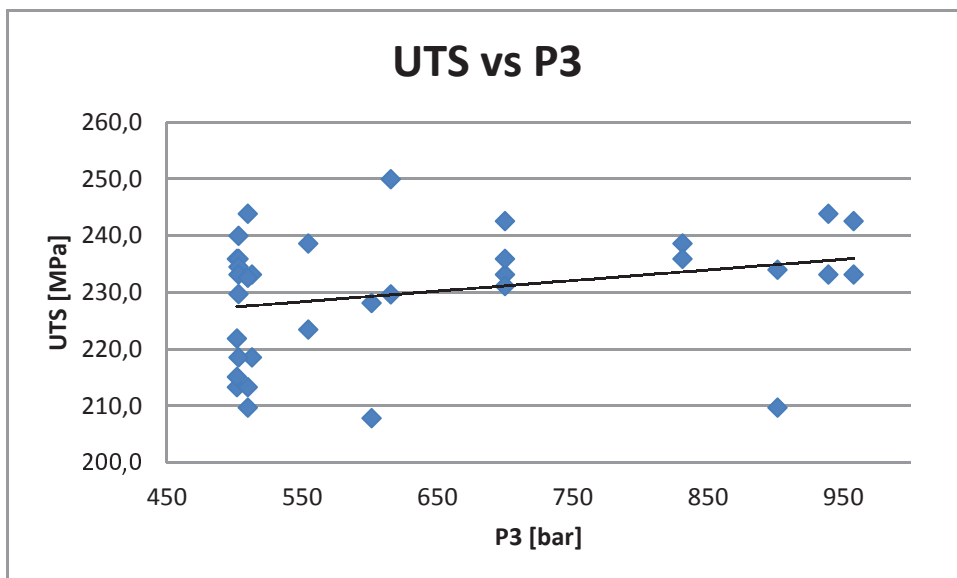


Figura 56: correlazione carico di picco - pressione di intensificazione

Nonostante si disponga di meno dati rispetto alle prove a trazione (34 provini a flessione contro i 51 a trazione) l'andamento del carico di picco all'aumentare della pressione di intensificazione rispecchia quello della Fig. [52].

Di fatto un provino caricato a flessione è sollecitato su una porzione di materiale molto minore rispetto al provino a trazione; infatti durante una prova a flessione a tre punti è solo la porzione superficiale di sezione che è soggetta a tensioni e deformazioni elevate, al contrario della porzione interna [4],[7].

7.9.5 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A FLESSIONE) - ALLUNGAMENTO PERCENTUALE - PRESSIONE DI INTENSIFICAZIONE

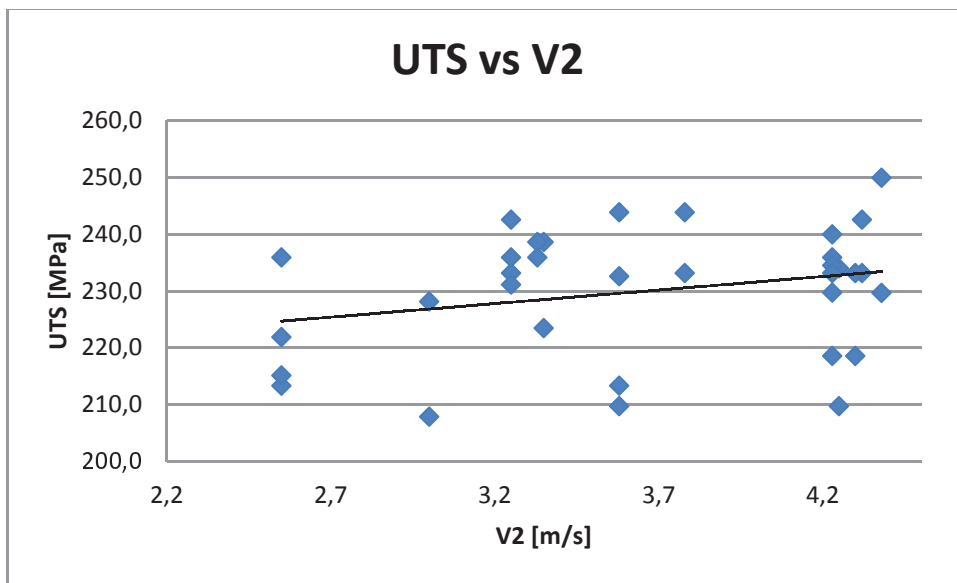


Figura 57: correlazione carico di picco - velocità di seconda fase

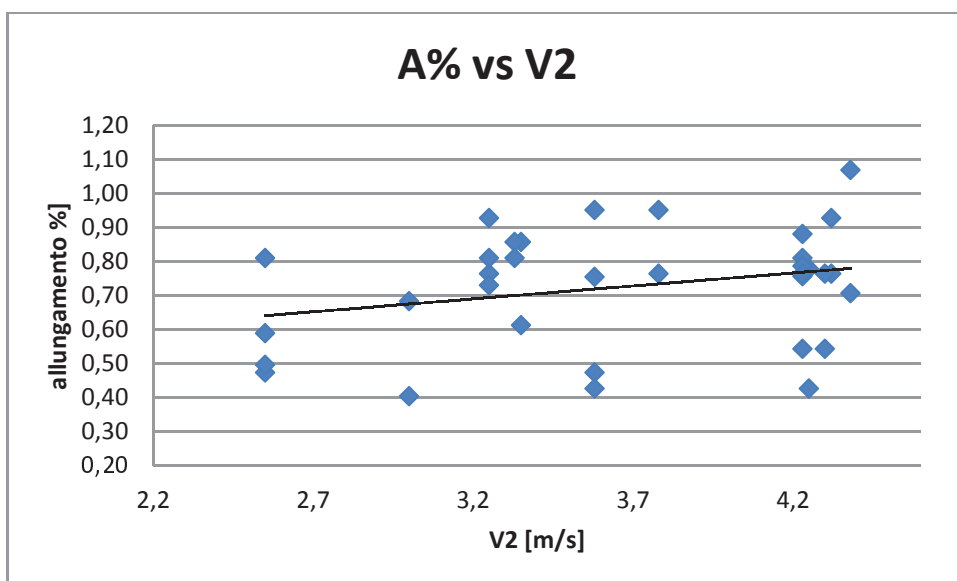


Figura 58: correlazione A% - velocità di seconda fase

Sia il carico di picco che l'allungamento percentuale sono influenzati positivamente dall'aumento della velocità di seconda fase, con una tendenza simile a quella rilevata per i provini a trazione. Purtroppo la dispersione dei dati è elevata, quindi non si può confermare a pieno titolo il risultato precedentemente ottenuto.

7.9.6 CORRELAZIONE UTS (PROVINI A FLESSIONE) - TEMPERATURA DEL FORNO

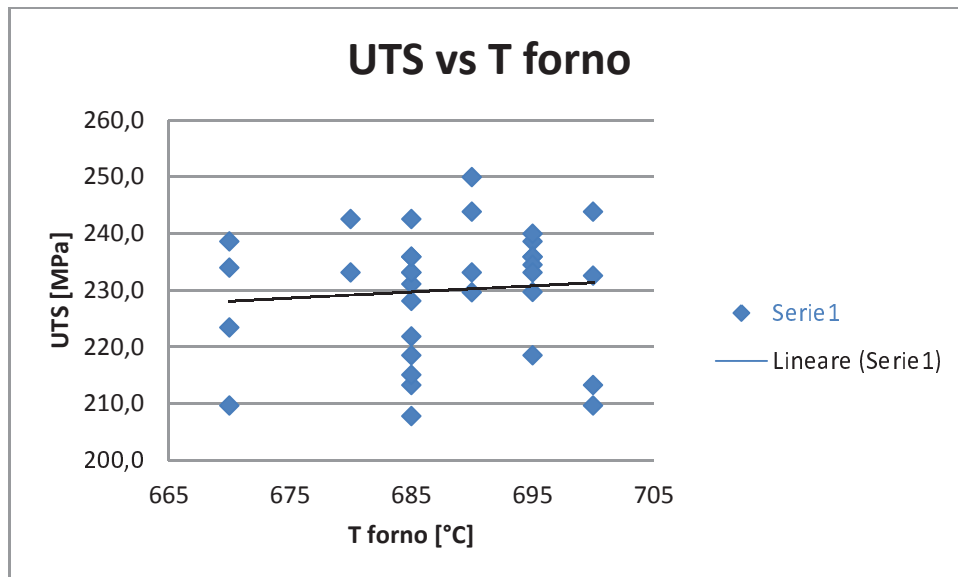


Figura 59: correlazione UTS-temperatura del forno

Il dato relativo alla correlazione con la temperatura del forno mostra un andamento discordante con quanto rilevato nelle prove a trazione, nelle quali si notava un decremento del carico di picco all'aumentare della temperatura del forno.

In questo caso la tendenza è crescente, ma la dispersione dei dati è tale da non consentire, come nel caso precedente, la conferma del tale risultato.

7.10 CORRELAZIONI IN DUE VARIABILI DELLE PROVE MECCANICHE

Analogamente a quanto fatto in precedenza, si sfruttano rappresentazioni 3D dei risultati per poter correlare più dati in entrata rispetto ad una sola variabile dipendente in uscita, di seguito si farà riferimento all' UTS delle prove a trazione.

7.10.1 CORRELAZIONE UTS - TEMPERATURA DEL FORNO - PRESIONE DI INTENSIFICAZIONE

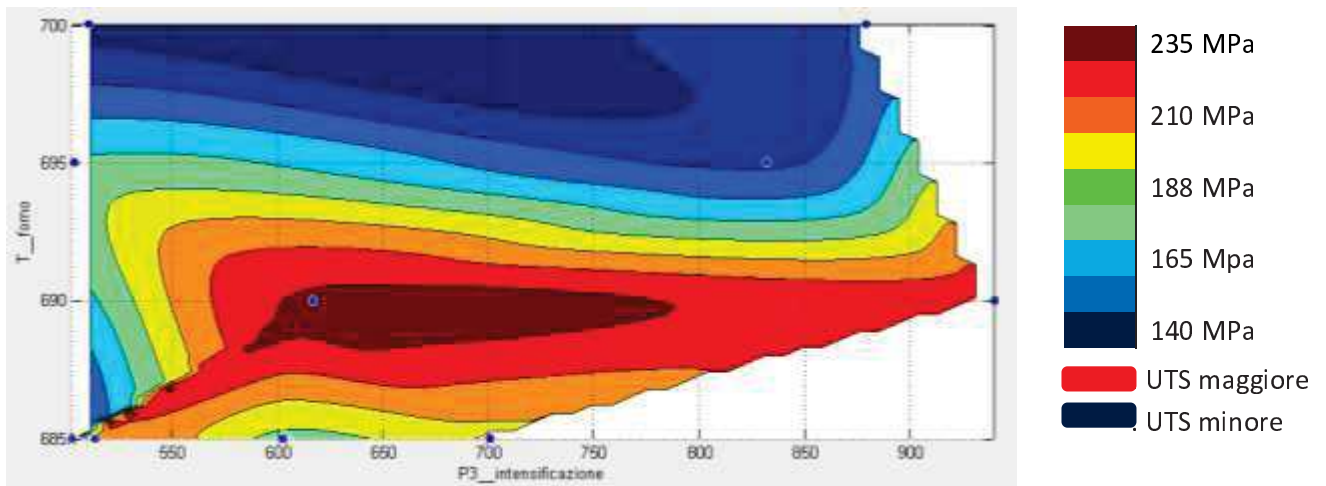


Figura 60: correlazione UTS-temperatura del forno-presione di intensificazione

Si può osservare come valori tendenzialmente migliori di UTS siano, ancora una volta, relativi a temperature medio basse e pressioni superiori ai 600 bar.

7.10.2 CORRELAZIONE UTS - VELOCITA' DI SECONDA FASE - PRESIONE DI INTENSIFICAZIONE

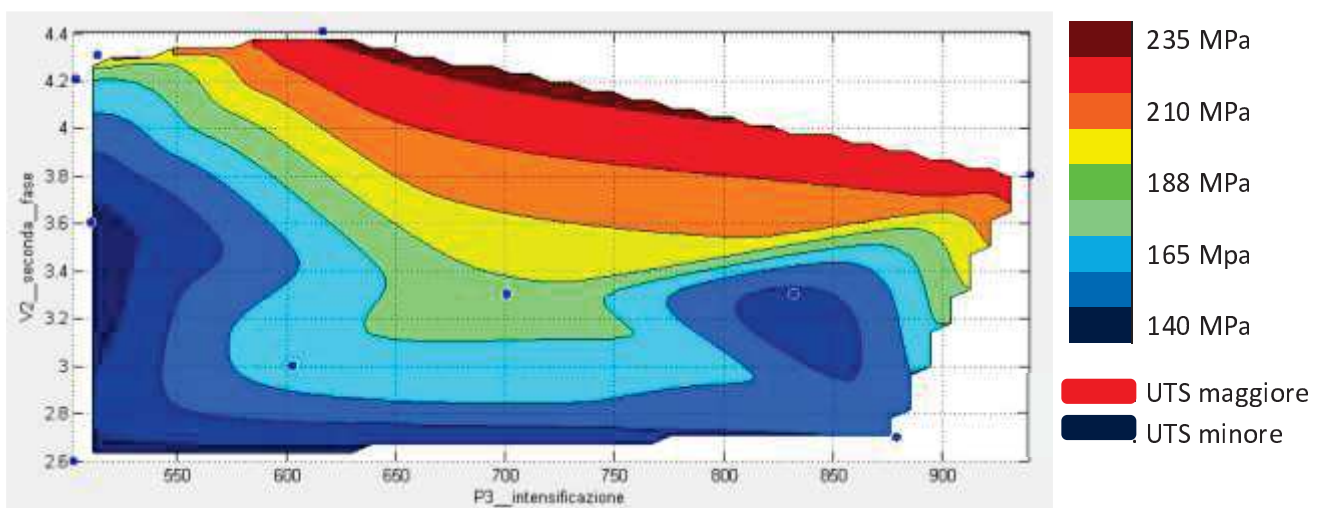


Figura 61: correlazione UTS-velocità di seconda fase-presione di intensificazione

Il limite inferiore di 600 bar per l'intensificazione si nota anche in questo caso, in oltre si ritrova anche per l'UTS il limite inferiore della velocità di seconda fase di 3.2 m/s, oltre il quale si hanno le migliori caratteristiche meccaniche.

7.10.3 CORRELAZIONE UTS - VELOCITA' DI SECONDA FASE - SWITCH POINT

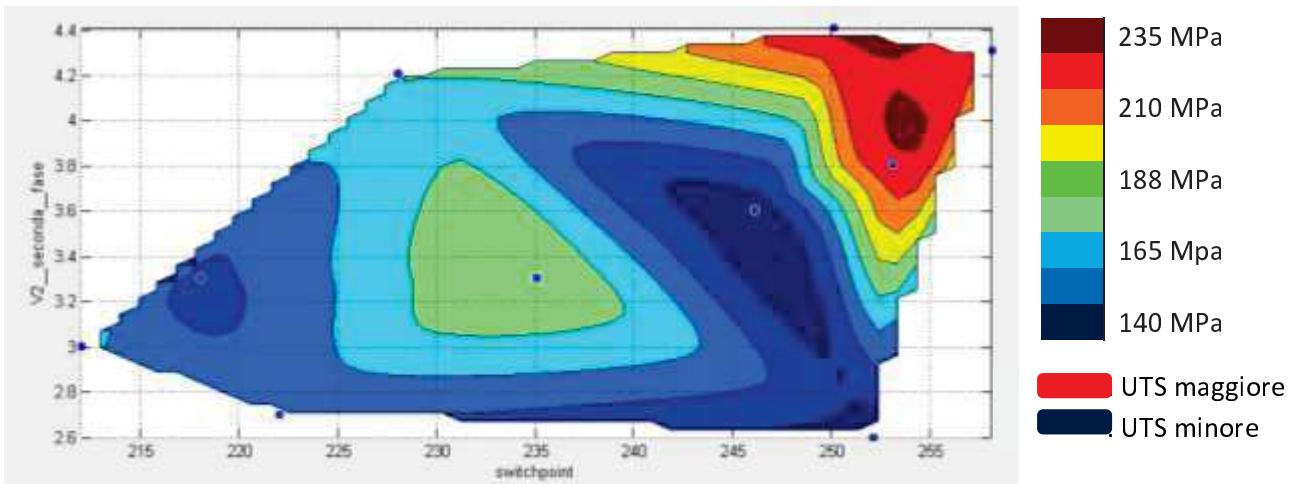


Figura 62: correlazione UTS-velocità di seconda fase-switch point

Dal grafico risulta molto più marcato l'effetto di switch point ritardati rispetto ai design in cui era anche fortemente anticipato, in accoppiata con velocità di seconda fase comunque elevate oltre i 3.2 m/s

7.10.4 CORRELAZIONE UTS - VELOCITA' DI SECONDA FASE - AREA SOTTESA DALLA CURVA DI PRESIONE AL GATE 3 E 4

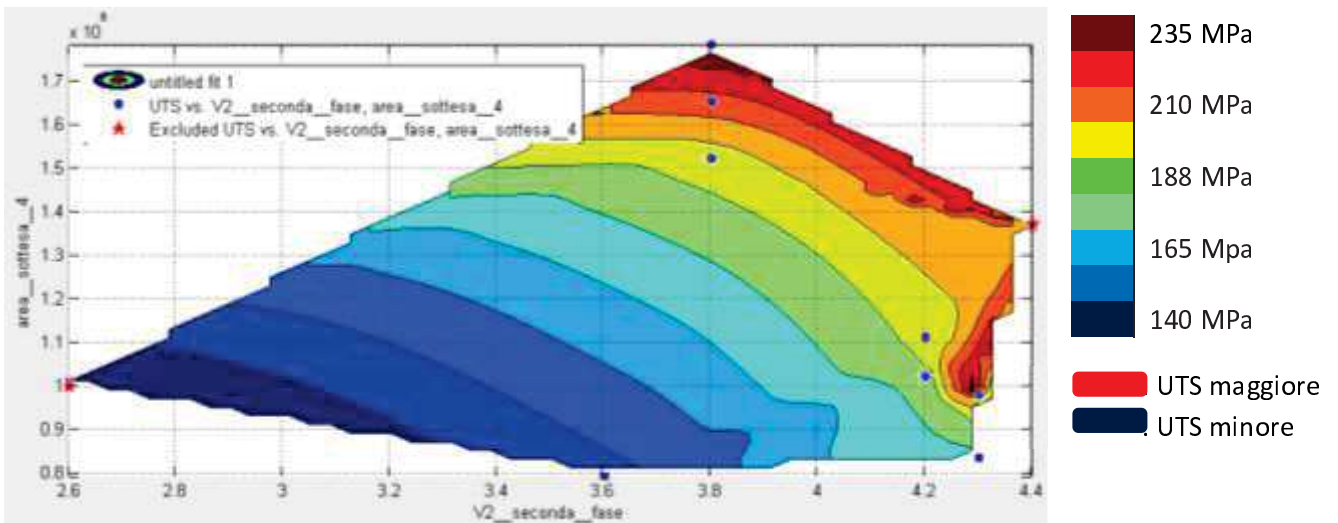


Figura 63: correlazione UTS-velocità di seconda fase-area sottesa dalla curva di pressione

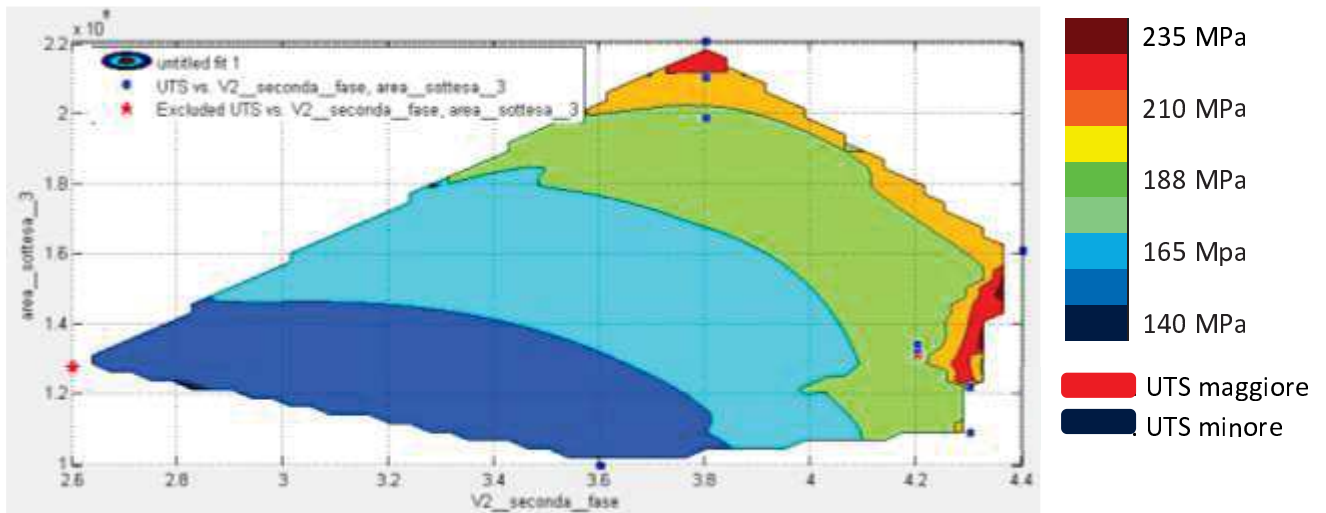


Figura 64: correlazione UTS-velocità di seconda fase-area sottesa dalla curva di pressione

Per riuscire a ricostruire delle curve di interpolazione evitando singolarità con il Surface Fitting Tool di Matlab, si sono dovuti escludere in entrambe le analisi alcuni dei 51 dati a disposizione. In entrambi i grafici i risultati esclusi sono evidenziati con una stella rossa in corrispondenza delle relative coordinate UTS, area_sottesa_3, V2_seconda_fase.

Sono stati presi in considerazione solamente i gate numero 3 e numero 4 in quanto immediatamente adiacenti alla Zona 2 dalla quale sono stati ricavati i provini a trazione.

In entrambi i casi si può osservare come i più elevati valori di UTS siano relativi a velocità di seconda fase oltre i 4.2 m/s ed aree di circa $1.4 \cdot 10^6$ ms*bar, o in alternativa velocità più contenute ma aree molto più elevate oltre i $2.0 \cdot 10^6$ ms*bar.

7.11 CORRELAZIONI TRA PERCENTUALE DI OSSIDI NELLA SUPERFICIE DI FRATTURA E PARAMETRI DI PROCESSO

Si vogliono ora osservare le relazioni che intercorrono tra i parametri di processo impostati e la percentuale di ossidi pellicolari rilevata nella superficie di frattura, calcolati come spiegato nel capitolo precedente.

7.11.1 CORRELAZIONE PERCENTUALE DI OSSIDI - SWITCH POINT

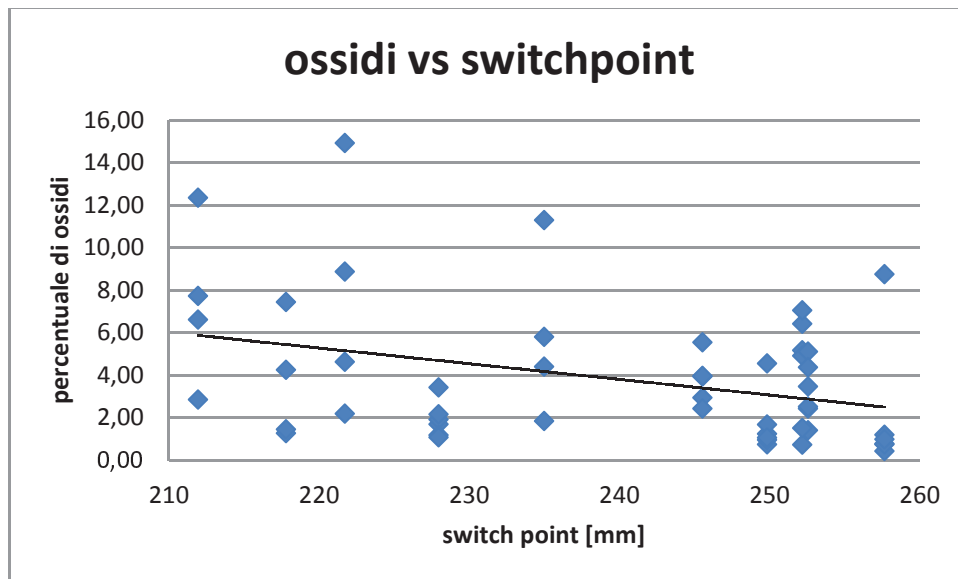


Figura 65: correlazione percentuale di ossidi-switch point

Il grafico evidenzia una leggera tendenza (in quanto affetta da un'elevata dispersione) a diminuire della percentuale di ossidi rilevata sulla superficie di frattura in relazione a switch point ritardati.

7.11.2 CORRELAZIONE PERCENTUALE DI OSSIDI - VELOCITA' DI SECONDA FASE

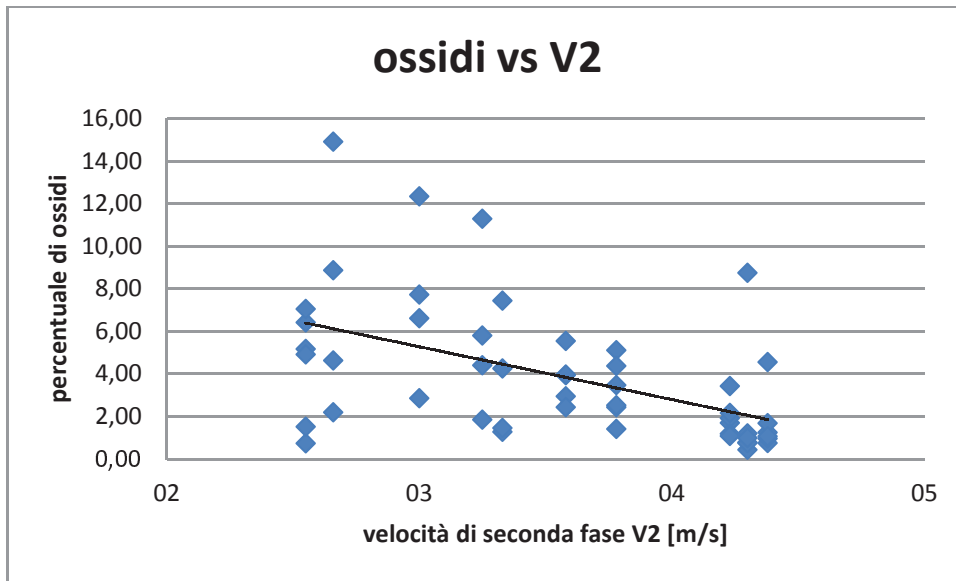


Figura 66: correlazione percentuale di ossidi-velocità di seconda fase

Anche in questo caso la dispersione dei risultati risulta elevata, ma si riesce comunque a notare una tendenza leggermente più marcata rispetto a quella osservata per lo switch point.

A differenza dalle analisi precedentemente svolte per porosità e UTS nelle quali la soglia dei 3 m/s portava chiari miglioramenti nella qualità complessiva, non si notano in questo caso particolari valori della V2 oltre ai quali si ha una evidente riduzione della presenza di ossidi.

Le correlazioni effettuate con gli altri parametri di processo e con le aree sottese dalle curve di pressione non evidenziano andamenti particolari, in oltre sono affette da una più elevata dispersione dei risultati, tanto che è possibile affermare che la presenza o meno di ossidi pellicolari è indipendente sia dalla pressione di intensificazione che dalla temperatura del forno.

7.12 CORRELAZIONI IN DUE VARIABILI DELLA PERCENTUALE DI OSSIDI

7.12.1 CORRELAZIONE PERCENTUALE DI OSSIDI - SWITCH POINT - VELOCITA' DI SECONDA FASE

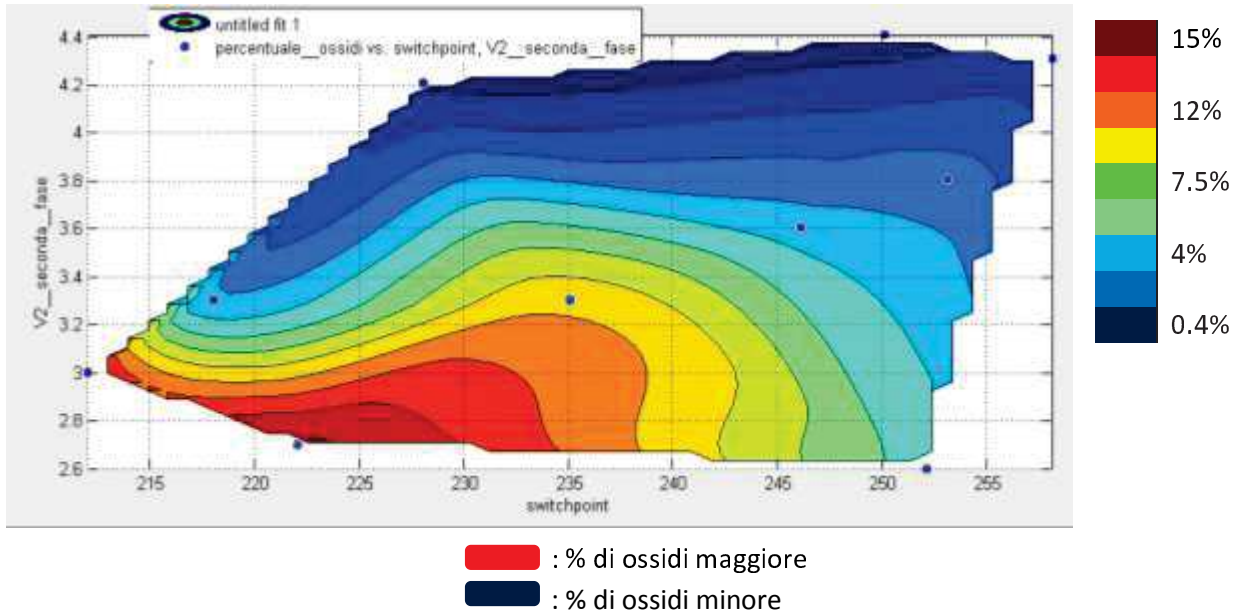


Figura 67: correlazione percentuale di ossidi-velocità di seconda fase-switch point

Sfruttando la rappresentazione tridimensionale dei risultati relativamente ai due parametri più significativi è confermata la tendenza ricavata precedentemente.

Combinazioni di basse velocità di seconda fase, unite a switch point anticipati favorisce la formazione di ossidi pellicolari già all'interno dei canali di alimentazione, che il fronte fuso trasporta all'interno della cavità dello stampo.

Confrontando il dato ottenuto sulla percentuale di ossidi nella superficie di frattura e la porosità percentuale nella stessa zona, si vuole evidenziare la relazione che intercorre prima con i valori ottenuti per UTS e poi con l'A%.

Dal grafico si nota quanto i valori di UTS siano influenzati negativamente dall'aumento di entrambe le percentuali, in particolare entrambe le linee di tendenza sono decrescenti e con la stessa angolazione.

Si può dunque affermare che all'aumento della % di entrambi l'effetto di decremento della resistenza ultima a rottura è il medesimo.

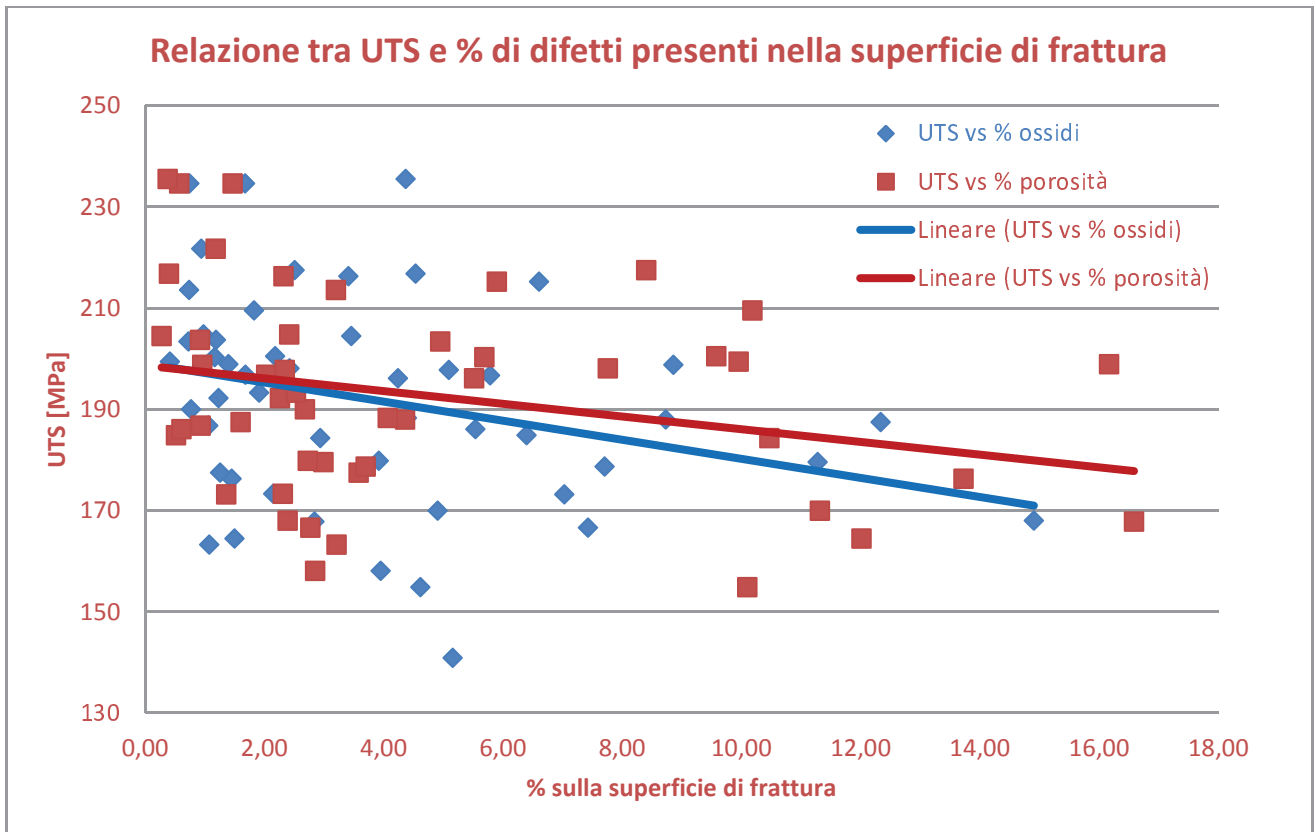


Figura 68: correlazione UTS-%di difetti presenti sulla superficie di frattura

Diverso è il comportamento se si vanno a diagrammare i risultati dell'A%. Dal grafico sotto riportato si nota invece quanto l'aumento percentuale della presenza di ossidi pellicolari abbia un effetto leggermente più marcato sulla riduzione dell'allungamento percentuale rispetto all'aumento delle porosità. La linea di tendenza relativa alla presenza di ossidi ha un coefficiente angolare negativo circa due volte superiore in modulo rispetto a quello della linea di tendenza relativa alle porosità.

La presenza di ossidi dunque è più critica rispetto alla presenza di porosità se si cerca di ottenere una lega con elevato allungamento percentuale, o comunque quanto più vicino all' A% nominale, mentre ai fini della resistenza ultima a rottura l'effetto di riduzione è equivalente.

In Fig. [70] è riportato l'andamento di UTS in funzione dell'indice di difetto, parametro che è dato dalla somma tra percentuale di ossidi e porosità calcolate nella superficie di frattura, che dà un'indicazione globale della qualità del provino analizzato.

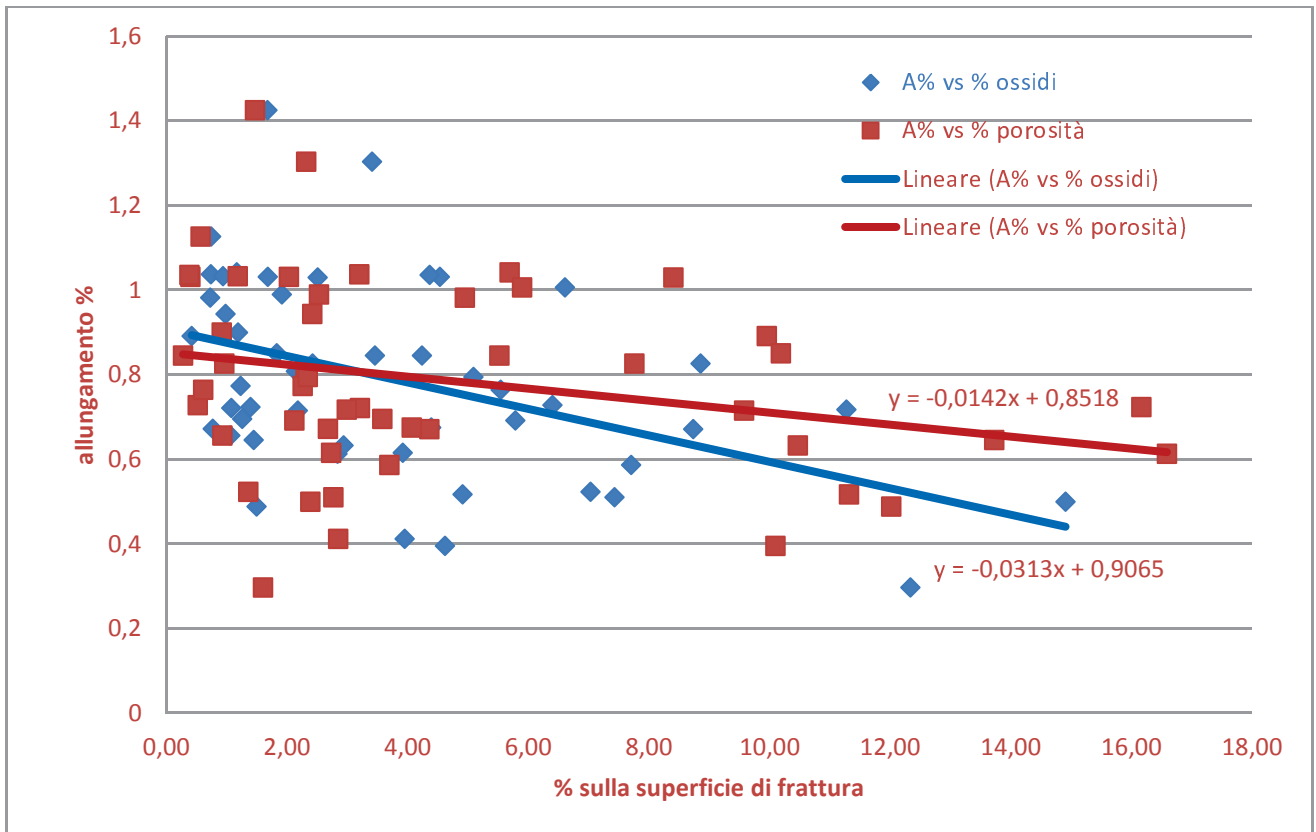


Figura 69: correlazione A%-di difetti presenti sulla superficie di frattura

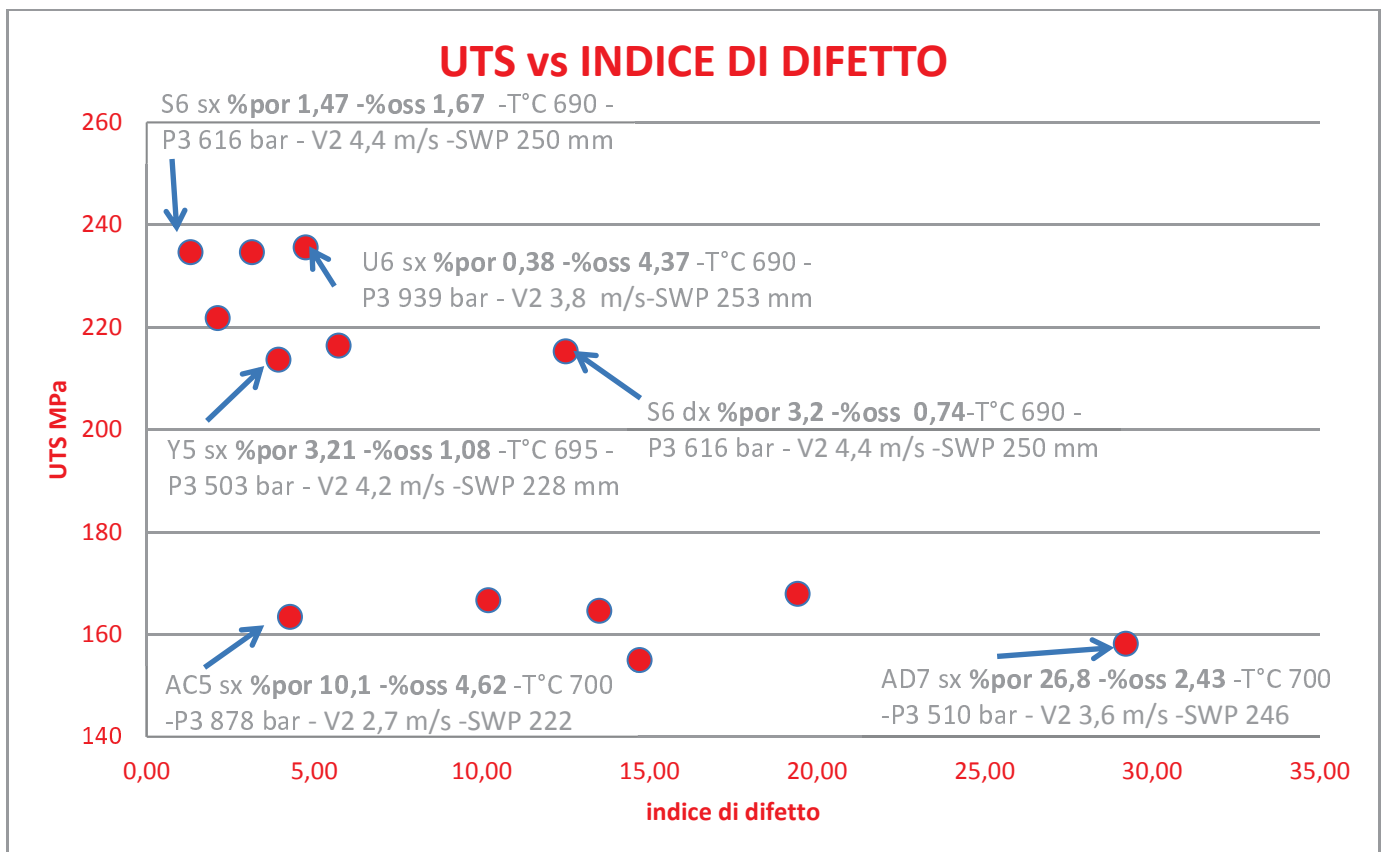


Figura 70: correlazione UTS-indice di difetto

Nota il valore assoluto dell'indice di difetto di ogni provino, è stata calcolata la quota parte di ossidi che compone tale indice, fornendo una percentuale che mostra quanto tale indice sia dovuto alla presenza di ossidi o di porosità.

Di seguito è riportato un esempio per il calcolo (I.D. sta per Indice di Difetto).

Nome	UTS MPa	ε%	porosità	% ossidi	I.D.	%
U6 DX	204,5	0,845	0,28	3,46	3,73	7,395982
N6 SX	187,5	0,297	1,60	12,34	13,94	11,47776
N5 SX	215,2	1,006	5,90	6,61	12,51	47,16227
Q4 DX	140,9	0,704	28,50	5,16	33,66	84,67412
O7 DX	199,4	0,891	9,96	0,42	10,37	95,97475

L'indice di difetto del provino U6 DX è composto per il 7.3% dalla presenza di porosità, quindi i difetti predominanti (e di conseguenza la causa più probabile di cedimento) in tale provino sono attribuibili alla presenza di ossidi.

Viceversa nel provino O7 DX la quantità di ossidi rilevata era molto minore della quantità di porosità nella stessa zona, quindi il suo cedimento sarà probabilmente dovuto alla presenza delle porosità da gas intrappolato.

Lo stesso ragionamento è stato fatto per tutti i provini, e sono stati suddivisi in tre classi:

VERDE: provini con maggior quantità di ossidi rispetto alle porosità ($\text{porosità}/\text{I.D.} < 0.33$)

GIALLO: provini in cui la quantità di ossidi è confrontabile con la quantità di porosità ($0.33 < \text{porosità}/\text{I.D.} < 0.66$)

ROSSO: provini in cui prevale la presenza di porosità ($0.66 < \text{porosità}/\text{I.D.}$)

Sulla totalità dei provini analizzati 15 appartenevano alla classe verde, 15 alla gialla e 21 alla rossa, come sintetizzato nell'istogramma seguente.

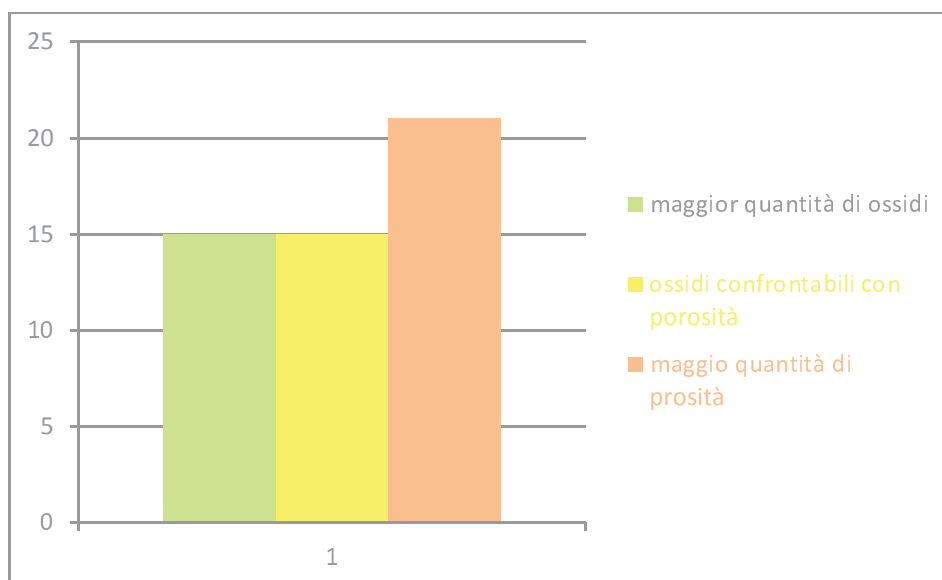


Figura 71: istogramma che indica il numero di provini appartenenti alla classe VERDE, GIALLA o ROSSA

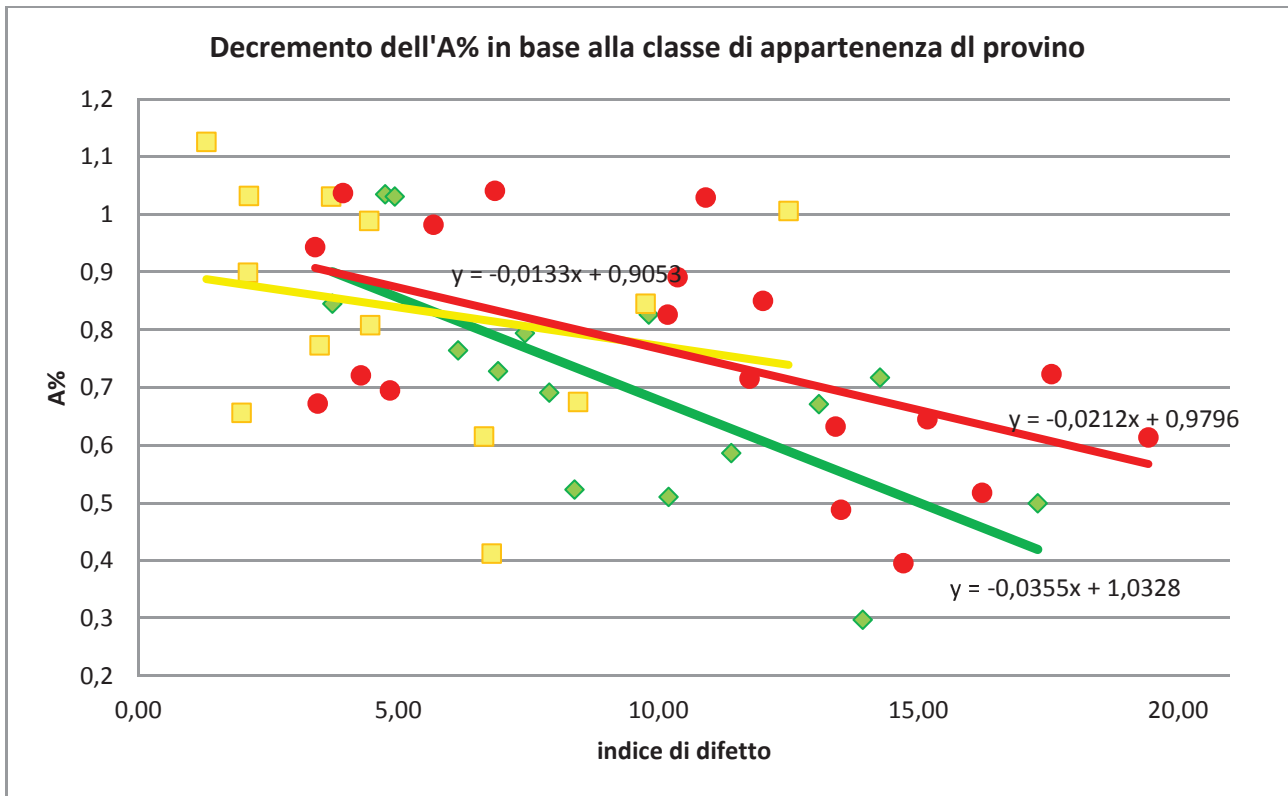


Figura 72: correlazione tra A% e indice di difetto per le classi VERDE, GIALLA e ROSSA

Dal grafico si nota come la linea di tendenza della classe rossa (provini il cui cedimento è dominato dalla presenza di porosità) sia più piatta rispetto alle altre due classi.

In accordo con i dati precedentemente ricavati si nota che il decremento dell'A% è più drastico in quei provini in cui l'indice di difetto è dominato dalla presenza di ossidi.

Sfruttando una rappresentazione tridimensionale, in cui la soglia di accettabilità per l'allungamento percentuale è data dalle aree verdi del grafico, si riportano lungo gli assi orizzontali e verticali i valori limite della percentuale di porosità e di ossidi ammissibili rispettivamente affinché l'A% rimanga entro valori mediamente accettabili.

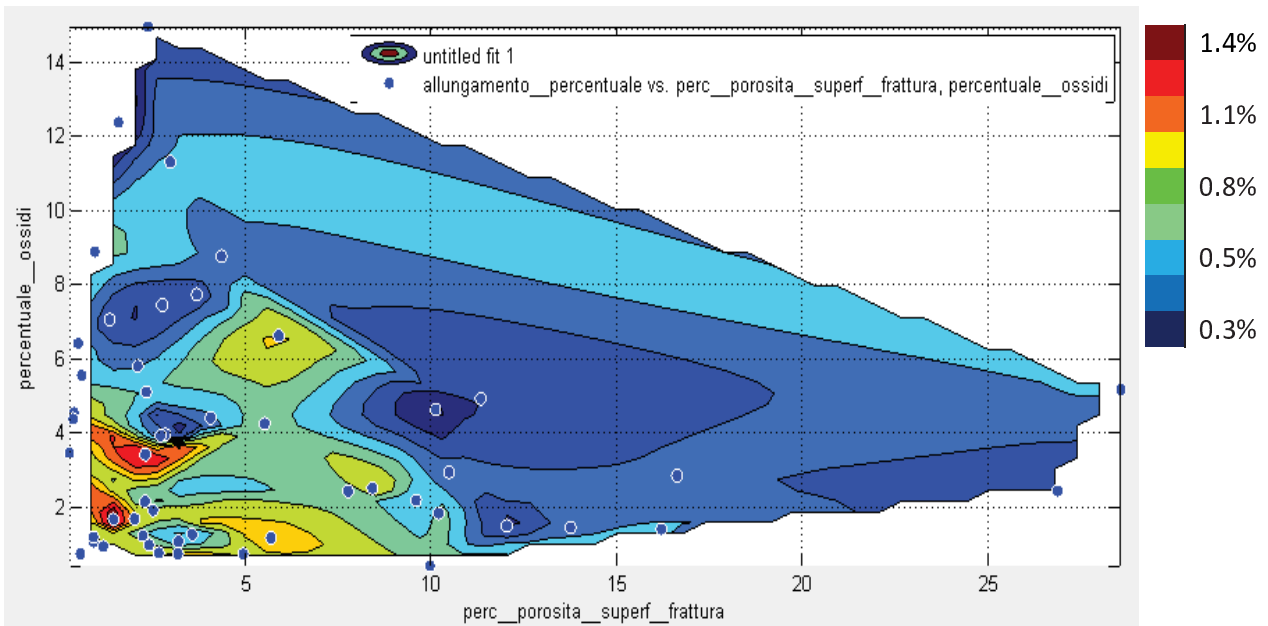


Figura 73: correlazione tra A%- percentuale di ossidi-percentuale di porosità sulla superficie di frattura

In particolare la soglia ammissibile di ossidi si aggira attorno al 5-6%, mentre quella di porosità può arrivare anche al 10%.

Con lo stesso grafico in cui si analizza l'andamento dell'UTS, è possibile notare che le soglie di accettabilità per ossidi e porosità si aggirano entrambe intorno al 10%, a dimostrare il fatto che entrambe le tipologie di difetti hanno lo stesso effetto ai fini del decremento della resistenza ultima a rottura in provini a trazione.

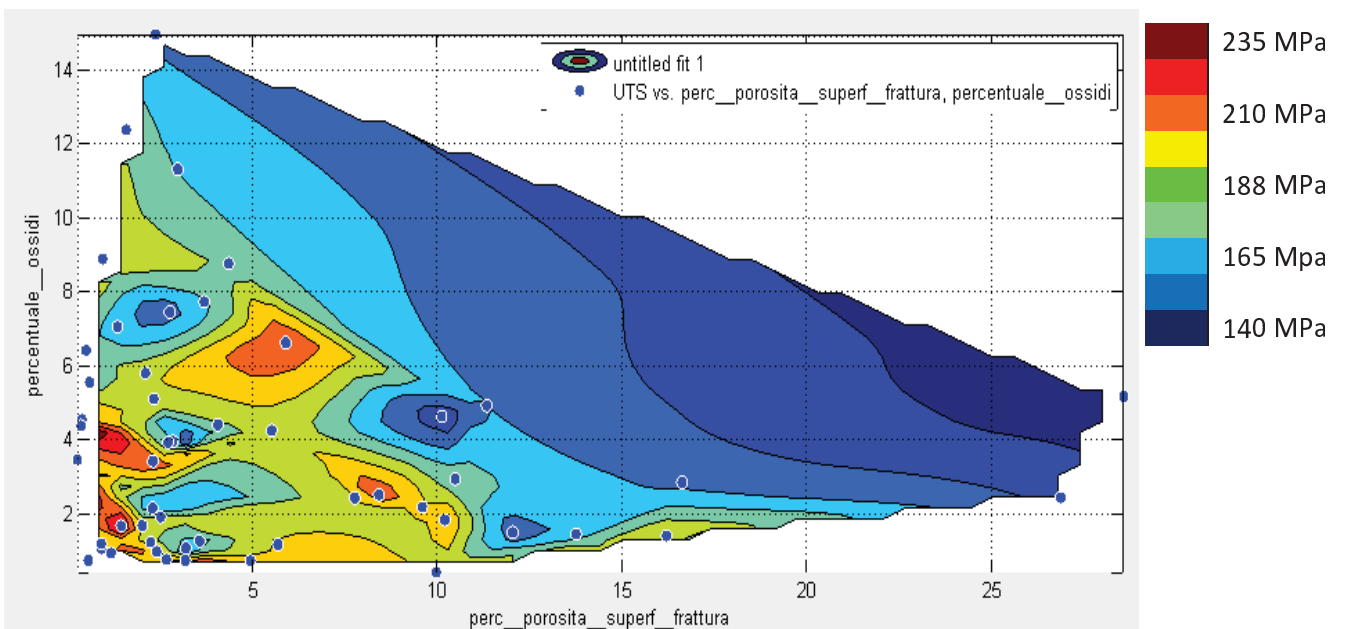


Figura 74: correlazione tra UTS-percentuale di ossidi-percentuale di porosità sulla superficie di

7 CONCLUSIONI

7.1 RIEPILOGO DEI DATI E CONSIDERAZIONI FINALI

Le correlazioni ottenute finora hanno evidenziato quali tra i parametri di processo caratteristici hanno maggior influenza sulle caratteristiche qualitative dei getti pressocolati.

Dall'ispezione visiva si nota che tendenzialmente si generano minori difetti superficiali per basse temperature del forno (Fig.41), inferiori o uguali a 675°C; la lega infatti risultando meno fluida presenta una minor tendenza a generare moti turbolenti durante l'avanzamento. La pressione di intensificazione come pure la velocità di seconda fase e lo switch point sembrano ininfluenti nella formazione di difetti superficiali.

Per quanto riguarda la presenza di porosità da gas intrappolato, essendo una delle tipologie di difetti interni più critiche nei getti pressocolati, si punta molto l'attenzione sulla fase di intensificazione. Maggiore è la pressione a cui viene mantenuta la lega durante la terza fase (P3) minore è la probabilità che si generino porosità interne, o per lo meno si riesce a contenerne le dimensioni (Fig.42,48)

In secondo luogo anche il valore della velocità di seconda fase incide sulla qualità estetica dei getti e sulla formazione di porosità (Fig.44,50). Dalle correlazioni si nota che soglia minima ideale della V_2 è di circa 3 m/s (come già notato in altri elaborati [2],[3]), oltre la quale si ha un basso valore di porosità nelle zone analizzate del getto. Velocità di seconda fase eccessivamente alte però, assieme a temperature alte del forno, favoriscono lo sviluppo di moti turbolenti dovuti all'eccessiva fluidità della lega, con un conseguente aumento della porosità riscontrata.

Per quanto riguarda le prove meccaniche effettuate si nota che sono direttamente proporzionali non solo alla presenza di porosità, ma anche di ossidi pellicolari, la cui formazione è anch'essa strettamente legata ai parametri di processo utilizzati.

Tendenzialmente si riesce a limitare la formazione di ossidi aumentando la velocità di seconda fase e mantenendo switch point medio alti (Fig.65,66). Irrilevante risulta la pressione di intensificazione sulla loro formazione, mentre apparentemente poco influente risulta la temperatura della lega nel forno.

Ai fini dell'incremento delle caratteristiche meccaniche in termini di UTS e allungamento percentuale, dall'analisi dell'area che tiene conto sia della pressione di terza fase che del tempo in cui questa viene applicata, si nota che a provini più resistenti corrispondono aree maggiori (Fig-63,64). Dunque anche il tempo in cui il pistone applica la pressione alla lega influisce sulla resistenza complessiva: con tempi di intensificazione troppo brevi si rischia di interrompere la spinta del pistone quando ancora la lega deve solidificare nei punti più critici dello stampo, e non si riesce a contenere le dimensioni delle porosità.

Gli altri parametri con sui si notano le migliori caratteristiche meccaniche dei getti sono velocità di seconda fase elevate (almeno superiori a 3.4 m/s) e switch point molto ritardati, come conseguenza anche della minor probabilità di sviluppare i difetti sopracitati.

Ricapitolando quanto svolto fin ora è doveroso fare delle considerazioni sui metodi e sull'impostazione dell'intera fase sperimentale. In primis nella definizione del Design of Experiment spesso i quattro parametri chiave sono stati fatti variare in contemporanea (ad eccezione della temperatura del forno che aveva un andamento "a gradini" di 5°C, rimanendo costante ogni 5-6 design). Questo rende difficoltoso capire in modo chiaro l'effetto della variazione di ciascun parametro sulla qualità finale del getto, impedendo di cogliere chiaramente quale dei parametri variati sia significativamente incidente.

Un tale approccio avrebbe portato alla formulazione di un enorme numero di combinazioni e design differenti (con un numero di getti prodotti di conseguenza estremamente elevato, volendone avere un quantitativo statisticamente significativo per ogni combinazione), per cui la soluzione adottata risulta un compromesso tra praticità sperimentale ed accuratezza statistica.

Le analisi microstrutturali hanno evidenziato che la presenza di difetti (inclusioni solide) nelle zone massive centrali e laterali del getto, sono probabilmente provenienti dal bagno di lega fusa (Fig.28). Un fattore influente risulta dunque la qualità e pulizia del bagno stesso e del sistema di alimentazione dello stampo. E' emersa chiaramente l'importanza della corretta preparazione e pulizia del bagno fuso onde evitare che difetti non strettamente legati ai parametri di processo impostati vadano a compromettere la qualità finale del getto. Tale condizione non potendo essere monitorata con i sensori qui utilizzati, non può essere implementata nel modello predittivo.

In conclusione è stato possibile elaborare un modello matematico basato sulle correlazioni ricavate, in grado di prevedere la qualità finale del getto che si sta producendo in tempo reale, a patto di limitare le influenze esterne aleatorie e riuscire a monitorare in maniera efficace e precisa ciò che avviene all'interno dello stampo durante ogni fase del processo.

APPENDICE

APPENDICE A: TIPOLOGIE E DESCRIZIONE DEI SENSORI UTILIZZATI [1]

Un attento ed accurato monitoraggio dei parametri di processo è indispensabile per ottenere uno standard qualitativo dei getti prodotti quanto più uniforme possibile, soprattutto nel processo di pressocolata in cui ci sono moltissime variabili aleatorie che incidono sul comportamento della lega durante il riempimento.

È di uso comune nel processo di HPDC monitorare la pressione idraulica, la velocità del pistone e la corsa del pistone; per il progetto MUSIC sono state monitorate anche la temperatura della superficie dello stampo e la pressione del metallo in fase di riempimento.

Sensori all'interno dello stampo che monitorano il riempimento utilizzati nell'ambito del lavoro svolto:

- Metal front pressure sensor: misura la pressione sulla superficie dello stampo durante l'intera fase di riempimento e solidificazione. Misura una pressione fino a 2000 bar in una zona localizzata dello stampo, basato su un sensore al quarzo (membraneless pressure sensor).

Life time: 30.000-40.000 cicli

MAX pressure: 2000 bar

MAX operating temperature: 300°C

Risoluzione: 1 bar

Frequenza di campionamento: 1 ms



- Metal front temperature sensor: misura la temperatura del fuso sulla superficie dello stampo durante tutto il riempimento e solidificazione. Basato su un sensore a termocoppia al Ni-Cr, può essere sfruttato per monitorare l'andamento della temperatura in punti critici dello stampo. Misurando la temperatura prima del riempimento, durante e dopo, fornisce anche un effettivo valore del salto termico a cui è sottoposto lo stampo. È usato anche per monitorare la solidificazioni in prossimità di spessori sottili che solidificano anticipatamente. Nel posizionamento si deve considerare anche la resistenza termica dello spessore dello stampo dietro il quale è posizionato.

Front temperature operating range: 0-700°C

Sensor temperature operating range: 0-300°C

Elevata accuratezza e ripetibilità di misura, life time elevato

Risoluzione: 1°C

Tempo di reazione: 15-25 ms



- Metal front contact sensor: produce un segnale digitalizzato quando entra in contatto con il flusso fuso. È sfruttato per valutare in tempo reale la posizione del fronte fuso in avanzamento, con un tempo di risposta di circa 80 μ s. Può essere usato come switch per l'inizio della seconda fase. In caso di errato posizionamento può essere attivato anticipatamente dalle gocce di metallo fuso dovute al tipo di deflusso spray in porione particolarmente turbolente caratterizzate da alte velocità locali.
- Hydraulic pressure sensor: misura la pressione idraulica applicata al circuito idraulico responsabile dell'avanzamento del pistone, risoluzione di 1 bar.
- Position sensor: monitora la posizione del pistone durante il suo avanzamento, con risoluzione di 1mm e frequenza di campionamento di 1 ms.

Per ogni dettagli specifico sulle caratteristiche dei sensori si fa riferimento al sito www.electronics-gmbh.com

APPENDICE B: DATI COMPLESSIVI SULLE ANALISI AI RAGGI X

Di seguito sono riportati tutti i risultati ottenuti dall'analisi non distruttiva eseguita ai raggi X getto per getto.

Per le immagini relative alle porosità riscontrate nelle varie zone si fa riferimento ai file allegati in "RX">"A macro" (e così via)>"ritagliate"

GETTO	1 DX	1 SX	1 centro	2	somma	dev st punteggi	LIV.ISP.VISIVA	media isp visiva
A-5	0,81	0,72	3,70	0,58	4,51		4	
A-6	1,09	1,04	3,50	0,58	4,60		2	
A-7	1,78	0,72	3,11	0,95	4,89		2	
Media A	1,22	0,83	3,43	0,86	4,65	0,155		2,7
B-5	2,11	1,04	4,53	1,15	6,64		2	
B-6	1,15	0,76	3,35	1,27	4,49		3	
B-7	1,78	0,65	4,09	0,70	5,87		2	
Media B	1,68	0,81	3,98	1,04	5,66	0,741		2,3
C-5	1,39	1,35	6,06	1,01	7,45		3	
C-6	1,92	1,07	5,00	1,40	6,92		3	
C-7	2,39	2,13	6,65	2,26	9,04		4	
Media C	1,91	1,52	5,91	1,56	7,81	1,062		3,3
D-5	1,72	1,52	4,53	1,94	6,25		3,5	
D-6	1,42	0,80	4,09	1,46	5,52		2	
D-7	1,44	1,15	4,96	1,33	6,40		3	
Media D	1,54	1,15	4,53	1,58	6,06	0,446		2,8
E-1	1,42	1,11	3,90	1,16	5,32		2	
E-6	1,92	0,78	3,74	0,60	5,66		3	
E-7	1,96	0,92	4,17	1,46	6,13		4	
Media E	1,78	0,94	3,94	1,07	5,71	0,258		3
F-4	3,70	2,65	8,54	3,27	12,24		3	
F-5	3,92	3,68	8,50	2,14	12,43		3	
F-7	3,63	2,87	8,19	2,89	11,81		3	
Media F	3,76	3,07	8,43	2,77	12,18	0,307		3
G-5	3,31	1,55	6,77	1,05	10,08		2	
G-7	1,55	0,96	4,06	1,79	5,61		3	
G-8	1,78	1,33	4,96	0,83	6,74		3,5	
Media G	2,22	1,28	5,28	1,22	7,50	0,949		2,8
H-5	5,81	4,61	8,82	2,05	14,63		3	
H-7	2,98	2,52	7,48	1,17	10,46		2	
H-8	3,88	2,28	6,89	1,45	10,77		3	
Media H	4,22	3,13	7,72	1,56	11,93	0,776		2,7
I-5	2,09	1,17	4,33	0,91	6,42		4	
I-6	2,31	1,20	9,65	1,10	11,96		4	
I-7	3,68	2,52	6,30	0,54	9,98		4	
Media I	2,70	1,63	6,77	0,85	9,47	1,313		4
J-4	2,33	1,91	5,12	1,10	7,45		4	

J-5	3,68	2,98	6,02	1,01	9,70		4	
J-6	3,63	2,66	9,45	1,52	13,07		4	
Media J	3,22	2,52	6,85	1,21	10,07	1,849		4
K-7	1,04	1,09	4,09	1,34	5,13		3,5	
K-8	1,39	1,13	5,79	1,09	7,17		4	
K-9	1,85	1,50	4,72	0,69	6,57		3,5	
Media K	1,42	1,24	4,88	1,04	6,31	0,444		3,7
L-6	1,48	1,07	4,33	1,40	5,81		3	
L-7	1,92	1,09	5,83	1,32	7,75		4	
L-8	2,31	2,02	5,31	0,93	7,63		3	
Media L	1,91	1,39	5,16	1,22	7,06	0,366		3,3
M-6	3,66	2,29	6,14	1,82	9,80		3,5	
M-7	2,44	1,66	5,47	1,94	7,91		4	
M-8	2,35	1,35	6,10	1,74	8,45		4	
Media M	2,81	1,78	5,91	1,84	8,72	0,409		3,8
N-4	3,22	3,16	7,17	1,87	10,38			
N-5	2,46	2,09	6,10	2,21	8,56		3	
N-6	3,29	1,42	6,22	1,67	9,51		3	
Media N	3,00	2,22	6,50	1,92	9,49	0,542		3
O-5	2,77	1,72	7,52	1,50	10,29		3,5	
O-6	3,22	1,98	7,76	2,86	10,97		3,5	
O-7	3,92	1,70	9,29	2,05	13,21		4	
Media O	3,31	1,79	8,19	2,14	11,50	1,170		3,7
P-4	1,46	1,26	4,72	1,39	6,19		3	
P-5	2,05	2,16	6,02	0,85	8,08		3	
P-6	1,94	1,35	4,53	1,06	6,47		3	
Media P	1,81	1,59	5,08	1,10	6,89	0,833		3
Q-6	8,18	7,07	11,65	2,61	19,83		4	
Q-7	9,16	6,12	14,69	2,31	23,84		4	
Q-8	3,92	2,48	7,72	2,43	11,64		3	
Media Q	7,08	5,22	11,34	2,45	18,42	6,114		3,7
R-6	2,63	2,07	6,14	1,98	8,77		4	
R-7	3,83	2,94	8,98	1,27	12,81		3,5	
R-8	2,18	1,94	6,34	1,53	8,52		4	
Media R	2,89	2,31	7,17	1,59	10,05	2,171		3,8
S-5	1,42	0,87	4,13	1,12	5,56		4	
S-6	1,37	0,98	5,12	1,16	6,49		3	
S-7	1,48	0,89	5,00	1,50	6,48		3	
Media S	1,42	0,91	4,76	1,26	6,19	0,170		3,3
T-5	5,48	2,39	8,46	1,93	13,94		4	
T-6	0,00	0,00	6,73	0,00	0,00		4	
T-7	4,66	4,20	9,84	1,99	14,50		4	
Media T	5,07	3,29	8,35	1,97	13,41	0,770		4
U-4	1,83	1,22	5,04	1,30	6,87		3	
U-5	2,18	1,07	5,12	1,40	7,30		3,5	
U-6	1,46	1,41	2,56	1,01	4,02		3,5	
Media U	1,83	1,24	4,25	1,24	6,08	1,658		3,3

V-3	1,24	0,98	4,72	1,20	5,96		3
V-4	2,15	1,33	5,20	1,43	7,34		3
V-6	1,35	0,98	4,41	1,21	5,76		4
Media V	1,57	1,09	4,76	1,28	6,34	0,801	3,3
W-4	2,15	1,20	4,72	0,74	6,87		3,5
W-5	2,03	1,18	4,65	0,69	6,68		4
W-6	1,87	1,33	4,37	1,14	6,24		3,5
Media W	2,02	1,24	4,57	0,86	6,58	0,232	3,7
X-5	2,11	1,57	5,75	2,05	7,86		3,5
X-6	3,64	2,76	8,74	1,63	12,38		3,5
X-7	2,16	2,76	6,18	1,59	8,35		3,5
Media X	2,65	2,37	6,89	1,76	9,53	2,075	3,5
Y-5	4,75	4,16	12,68	2,42	17,43		3
Y-6	3,76	3,57	10,55	2,81	14,31		3
Y-7	6,40	5,29	12,80	2,75	19,20		3
Media Y	4,98	4,35	12,01	2,66	16,98	2,448	3
Z-4	3,00	1,13	5,75	1,56	8,74		4
Z-6	2,40	1,65	6,02	1,49	8,43		4
Z-7	2,48	2,33	5,75	1,23	8,23		4
Media Z	2,63	1,70	5,83	1,43	8,45	0,124	4
AB-6	5,51	3,20	10,51	1,44	16,02		3,5
AB-7	3,79	2,66	9,69	1,04	13,48		4
AB-8	3,51	2,57	9,21	1,58	12,73		4
Media AB	4,27	2,81	9,80	1,35	14,08	0,675	3,83
AC-4	2,98	1,78	6,34	0,77	9,32		3,5
AC-5	2,61	1,66	6,54	1,16	9,14		3,5
AC-6	3,51	2,22	6,65	0,98	10,17		3,5
Media AC	3,03	1,89	6,50	0,97	9,53	0,517	3,5
AD-5	7,34	4,90	12,64	3,80	19,98		4
AD-7	7,71	4,00	12,64	3,39	20,35		4
AD-8	5,27	6,05	10,98	2,95	16,26		4
Media AD	6,77	4,98	12,20	3,38	18,97	2,083	4

APPENDICE C: DATI COMPLESSIVI SULLE PROVE DI TRAZIONE

Di seguito sono espressi i risultati ottenuti dalle prove di trazione in termini di UTS e A%, in relazione alla % di porosità e la % di ossidi rilevata nella superficie di frattura, il livello di ispezione visiva corrispondente e la pressione localmente misurata dai sensori posizionati a destra e sinistra della zona 2 (pressioni P1 e P2); infine i parametri di processo caratteristici corrispondenti. Per ulteriori risultati e per gli andamenti delle curve sforzo deformazione si fa riferimento ai file allegati nella cartella denominata "prove meccaniche".

Per le immagini relative alle superfici di frattura si fa riferimento ai file allegati nella cartella "foto e acquisizioni varie">"stereoscopio superfici di frattura" e "superfici_frattura_trazione_SEM".

Nome getto	UTS MPa	€%	%porosità	% ossidi	ISPEZ VISIVA	Pressione misurata dai sensori		T forno °C	Switch mm	V2 m/s	P3 bar
						p1 bar	p2 bar				
U4 DX	198,1	0,826	7,76	2,42	3,0	233,1	244,6	690	253	3,8	939
U5 DX	198,9	0,723	16,17	1,40	3,5	264,9	261,0	690	253	3,8	939
U6 DX	204,5	0,845	0,28	3,46	3,5	334,3	296,7	690	253	3,8	939
O5 DX	203,7	0,899	0,92	1,19	3,5	258,6	273,1	685	258	4,3	513
O6 DX	190,0	0,672	2,68	0,77	3,5	253,1	267,0	685	258	4,3	513
O7 DX	199,4	0,891	9,96	0,42	4,0	248,9	267,6	685	258	4,3	513
S5 DX	192,2	0,773	2,26	1,23	4,0	261,0	272,8	690	250	4,4	616
S6 DX	213,6	1,037	3,20	0,74	3,0	245,2	257,4	690	250	4,4	616
S7 DX	221,7	1,032	1,19	0,94	3,0	251,7	265,9	690	250	4,4	616
Y4 DX	196,8	1,031	2,03	1,68	3,0	252,6	265,4	695	228	4,2	503
Y5 DX	193,3	0,989	2,53	1,91	3,0	268,6	283,1	695	228	4,2	503
Y6 DX	173,3	0,808	2,31	2,15	3,0	230,4	240,4	695	228	4,2	503
Q4 DX	140,9	0,704	28,50	5,16	4,0	191,8	197,7	685	252	2,6	502
Q7 DX	170,0	0,517	11,32	4,91	4,0	186,5	190,7	685	252	2,6	502
Q8 DX	184,9	0,728	0,52	6,40	3,0	197,1	204,7	685	252	2,6	502
AD7 DX	184,3	0,632	10,47	2,94	4,0	188,3	206,5	700	246	3,6	510
AD8 DX	186,1	0,764	0,61	5,54	4,0	186,2	206,5	700	246	3,6	510
N5 DX	178,7	0,586	3,70	7,71	3,0	233,1	237,6	685	212	3,0	602
N6 DX	167,8	0,613	16,59	2,84	3,0	237,3	239,1	685	212	3,0	602
W5 DX	177,5	0,695	3,58	1,26	4,0	324,2	290,6	695	218	3,3	831
W6 DX	166,6	0,510	2,77	7,43	3,5	324,2	282,7	695	218	3,3	831
AC5 DX	168	0,499	2,39	14,91	3,5	356,3	308,5	700	222	2,7	878
AC6 DX	198,8	0,826	0,96	8,86	3,5	278,8	273,7	700	222	2,7	878
M6 DX	179,6	0,717	2,99	11,28	4,0	204,5	230,1	685	235	3,3	700
M7 DX	209,5	0,850	10,19	1,83	4,0	243,7	253,1	685	235	3,3	700
U4 SX	197,8	0,794	2,34	5,09	3,0	233,1	244,6	690	253	3,8	939
U5 XS	217,5	1,029	8,41	2,51	3,5	264,9	260,9	690	253	3,8	939

U6 XS	235,5	1,035	0,38	4,37	3,5	334,2	296,7	690	253	3,8	939
O5 SX	234,6	1,126	0,57	0,74	3,5	258,5	273,1	685	258	4,3	513
O6 SX	188,0	0,671	4,36	8,74	3,5	253,1	267,0	685	258	4,3	513
O7 SX	204,8	0,943	2,42	0,98	4,0	248,8	267,6	685	258	4,3	513
S5 SX	216,8	1,031	0,40	4,54	4,0	260,9	272,8	690	250	4,4	616
S6 SX	234,6	1,425	1,47	1,67	3,0	245,2	257,3	690	250	4,4	616
S7 SX	186,8	0,656	0,93	1,06	3,0	251,7	265,9	690	250	4,4	616
Y4 SX	200,3	1,041	5,69	1,17	3,0	252,6	265,3	695	228	4,2	503
Y5 SX	163,3	0,721	3,21	1,08	3,0	268,5	283,0	695	228	4,2	503
Y6 SX	216,3	1,303	2,32	3,41	3,0	230,4	240,4	695	228	4,2	503
Q4 SX	173,2	0,523	1,36	7,03	4,0	191,8	197,7	685	252	2,6	502
Q7 SX	203,4	0,982	4,95	0,73	4,0	186,5	190,7	685	252	2,6	502
Q8 SX	164,5	0,488	12,02	1,50	3,0	197,1	204,6	685	252	2,6	502
AD6 SX	179,8	0,615	2,73	3,92	4,0	188,3	206,4	700	246	3,6	510
AD7 SX	158,1	0,502	26,80	2,43	4,0	186,2	206,4	700	246	3,6	510
AD8 SX	158,1	0,412	2,85	3,95	4,0	187,2	206,4	700	246	3,6	510
N5 SX	215,2	1,006	5,90	6,61	3,0	233,1	237,6	685	212	3,0	602
N6 SX	187,5	0,297	1,60	12,34	3,0	237,3	239,1	685	212	3,0	602
W5 SX	176,3	0,645	13,73	1,45	4,0	324,2	290,6	695	218	3,3	831
W6 SX	196,1	0,845	5,52	4,24	3,5	324,2	282,7	695	218	3,3	831
AC5 SX	154,9	0,395	10,10	4,62	3,5	356,3	308,5	700	222	2,7	878
AC6 SX	200,5	0,715	9,58	2,18	3,5	278,8	273,7	700	222	2,7	878
M6 SX	196,7	0,691	2,12	5,79	4,0	204,5	230,1	685	235	3,3	700
M7 SX	188,3	0,675	4,07	4,39	4,0	243,7	253,1	685	235	3,3	700

APPENDICE D: MAPPA DEI FILE ALLEGATI

Di seguito è riportato un elenco per la navigazione tra i file del DVD allegato, contenente i dati e le acquisizioni ottenute durante tutto l'arco del progetto, divisi in cartelle e sottocartelle con una breve descrizione del contenuto, in modo da facilitare la ricerca di tutti i dati e le immagini che per motivi di spazio non sono state inserite in questo elaborato.

- **% porosità flessione** (fogli excell con la % di porosità rilevata nelle prime prove di flessione)
- **Articoli e materiale vario**
- **Dati sensori DOE analizzati**
 - Dati grezzi sensori RDS (fogli dei dati sensori dall' M all' AD)
 - Fogli excell dei dati sensori dei soli 52 getti di cui si sono calcolate le % porosità
 - Risultati sensori RDS foglio complessivo con le macro applicate
- **Foto e acquisizioni varie**
 - Foto getti RDS appena prodotti
 - Cartelle da H0 H1 H2.....Y5 Y6 con fotografie semplici dei getti
 - Foto inclusioni RDS SEM
 - 14ottobre2015 acquisizioni varie delle porosità e inclusioni
 - Foto inclusioni_SEM (semplici micrografie per evidenziare i difetti da analizzare al SEM)
 - Foto liquidi penetranti
 - MACROGRAFIE zone laterali
 - Foto delle sezioni verniciate di bianco
 - Fogli excell delle porosità sulle sezioni analizzate col QWIN
 - MICROGRAFIE zone centrali
 - A7 AD8 C4 K7 Q4 Y6 (micrografie varie con microstruttura e difetti)
 - Foglio excell col confronto tra i mosaici
 - MICROGRAFIE zone laterali
 - A3 AD8 C4 K7 Q4 Y6 destra e sinistra (micrografie varie con microstruttura e difetti)
 - Mosaico eutettico (micrografie dei provini a flessione sezionati nella zona prossima alla superficie di frattura per osservare la distribuzione dell'eutettico sullo spessore)
 - RX foto prime prove solo J ed S (prima prova)
 - RX macrofocus sezioni laterali dx sx (delle sezioni verniciate di bianco)
 - RX zone laterali ridimensionate A C Y Q K AD
 - Foto e fogli excell delle pareti laterali della zona 1 prima che vengano tagliate per i provini a flessione)
 - Fogli excell con il calcolo delle porosità
 - RX zone massive A C Y Q K AD (foto non ridimensionate delle borchie laterali zona 1)
 - Spettri Sem delle inclusioni

- 14ottobre2015 (immagini degli spettri ottenuti al SEM delle inclusioni)
 - Stereoscopio superfici di frattura
 - Stereoscopio trazione 2.12 (immagini jpg superf di frattura dei provini AC5 AC6 M6 M7 N5 N6 W5 W6) dx e sx
 - Stereoscopio trazione 9-11 (immagini jpg superf di frattura dei provini AD6 AD7 O5 O6 O7 Q7 Q8 S5 S6 S7 U4 U5 U6 Y4 Y5) dx e sx
 - Stereoscopio trazione A C K Q Y AD primi provini (jpg A3 AD8 C4 K7 Q4 Y6) dx e sx
 - Superfici_frattura_flessione SEM (immagini aquisite al SEM con i rispettivi mosaici) K7 e Q4 sx e dx
 - Superfici_frattura_trazione SEM
 - SEM sup frattura trazione2-12 ultimi provini (AC5 AC6 M6 M7 N5 N6 W5 W6)
 - Superf di frattura AD8 K7 Q4 Y6 con i relativi riepiloghi excell
 - Isp visiva DOE A-AD
- **Modelli 3d solid works**
- **Prove meccaniche**
 - Flessione 2.12
 - Flessione 2 dic dati grezzi AD6 M6 M7 N5 O6 Q7 S6 U4 W5 Y4 Y7 più resoconti
 - Flessione 2 dicembre (copia della precedente)
 - Flessione rielaborata primi campioni (A3 AD8 C4 K7 Q4 dx e sx più resoconti)
 - Prove flessione primi campioni (dati grezzi A3 AD8 C4 K7 Q4 Y6 e resoconti dx e sx)
 - Prove trazione primi campioni (dati grezzi A3 AD8 C4 K7 Q4 Y6 più resoconti dx e sx)
 - Trazione 9.11
 - Destra (dati grezzi AD7 O5 O6 O7 Q7 Q8 S5 S6 S7 U4 U5 U6 Y4 Y5 più resoconti)
 - Sinistra (dati grezzi AD7 O5 O6 O7 Q7 Q8 S5 S6 S7 U4 U5 U6 Y4 Y5 più resoconti)
 - Trazione_flessione 2.12
 - Trazione (dati grezzi AC5 AC6 M6 M7 N5 N6 N6-bis W5 W6 dx e sx più resoconti)
 - Trazione 2 dic come sopra ma con due fogli excell di confronto
 - Trazione rielaborata A3 AD8 C4 K7 Q4 Y6 per disegnare le curve sforzo deformazione
 - Fogli excell dei complessivi
- **RX**
 - Cartelle per ogni design da A fino ad AD
 - Immagini grezze da RX
 - Immagini ritagliate e modificate con XnView

- Immagini rielaborate al QWIN e foglio excell con i dati ricavati e % porosità
 - RX11.12 immagini RX grezze dei getti prodotti a novembre
 - RX 11.12 ridimensionate con l'analisi di 5 getti di prova
 - **Simulazioni MAGMA**
 - Movies design 80
 - Movies design 84
 - **Superfici di frattura e conteggio ossidi complessivo**
 - Immagini e foglio excell complessivo dei getti AD6 AD7 AD8 O5 O6 O7 Q7 Q8 S5 S6 S7 U4 U5 U6 Y4 Y5 Y6 Q4 K7
 - Workspace Matlab® nominati in ordine cronologico per data
 - Composizione chimica Al music RDS
 - Aree_%porosità
 - Conteggio ossidi e porosità RDS 5 febbraio
 - %oss %por a confronto

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Bonollo, N. Gramegna, "The MUSIC guide to key-parameters in High Pressure Die Casting", Assomet Servizi Srl, Enginsoft SpA
- [2] E. Battaglia, "Correlations between process parameters and defects in Aluminum alloy diecastings", Tesi magistrale svolta presso l'Università degli Studi di Padova (DTG), Luglio 2014
- [3] I. Tonello, "Correlations between process parameters and mechanical properties in Aluminium alloy diecastings" Tesi magistrale svolta presso l'Università degli Studi di Padova (DTG), Marzo 2015
- [4] C.H.Caceres, B.I.Selling, "Casting defects and the tensile properties of an Al-Si-Mg alloy", CRC for Alloy and Solidification Tecnology, The University of Queensland, Australia.
- [5] William G. Walkington, "Troubleshooting guide, die casting defects", NADCA Northamerican die casting association
- [6] M. Winkler, L.Kallien, T.Feyertag, "Correlation between process parameters and quality characteristics in alluminium high pressure die casting", NADCA, Die casting congress & exposition 2015
- [7] G.Timelli, "Constitutive and stochastic models to predict the effect of casting defects on the mechanical properties of High Pressure Die Cast AlSi9Cu3(Fe) alloys", Metallurgical Science and Technology, DTG, università degli studi di Padova
- [8] C.H.Caceres, "On the effect of macroporosity on the Tensile properties of the al-7%si-0.4%mg Casting alloy", Cooperative Research Center for Alloy and Solidification Technology (CAST), Department of Mining and Metallurgical Engineering, The University of Queensland, Australia
- [9] Guida Leica QWIN, www.leica-mycrosistems.com
- [10] www.MTS.com
- [11] www.electronics-gmbh.com
- [12] www.baraldi.com