



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Modellazione dell'effetto dei parametri di processo sulla
comparsa di difetti superficiali nello stampaggio a iniezione di
polipropilene
riciclato da post consumo**

Relatore: Prof. Giovanni Lucchetta

Laureanda: Carraro Claudia

Matricola: 2018690

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 IL POLIPROPILENE	1
1.2 IL RICICLO DI POLIMERI DA POST CONSUMO	5
1.2.1 IL RICICLO MECCANICO	9
1.2.2 IL RICICLO IN ITALIA	10
1.2.3 DEGRADAZIONE DEL MATERIALE RICICLATO	12
1.3 STAMPAGGIO A INIEZIONE	14
1.3.1 DIFETTI SUPERFICIALI	17
1.4 OBIETTIVO DELLO STUDIO	20
2. IL DIFETTO	21
2.1 DESCRIZIONE	21
2.2 OSSERVAZIONI E IPOTESI PRELIMINARI	22
2.3 PARAMETRI DI PROCESSO	26
3. METODI	29
3.1 DESIGN OF EXPERIMENTS	29
3.2 IMAGE PROCESSING	31
4. SET-UP SPERIMENTALE	38
4.1 FASE DI STAMPAGGIO	38
4.2 FASE DI ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI	42
5. SPERIMENTAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI	44
5.1 FASE 1: SCREENING	44
5.1.1 ANALISI DEI RISULTATI	47
5.2 FASE 2: MODELLAZIONE	52
5.2.1 ANALISI DEI RISULTATI	54
5.2.2 MODELLO DI REGRESSIONE	56

6. CONCLUSIONI	58
BIBLIOGRAFIA	61
INDICE FIGURE E TABELLE	65

SOMMARIO

Il presente studio si pone l'obiettivo di analizzare e modellare l'effetto dei parametri di processo dello stampaggio a iniezione sulla comparsa di difetti superficiali riscontrata nell'utilizzo di polipropilene riciclato da post consumo.

Si realizza una prima fase di screening attraverso la realizzazione di un primo piano sperimentale fattoriale in cui vengono presi in considerazione quattro parametri: la temperatura del fuso, il tempo di residenza del fuso nel cilindro di iniezione, la *Back Pressure* e la velocità di dosaggio della vite di plastificazione.

I provini stampati vengono successivamente fotografati e così processati utilizzando un algoritmo di analisi dell'immagine realizzato in linguaggio Python. Viene definito un indice che si propone di quantificare la presenza del difetto in una regione di interesse (ROI) identificata nel provino.

Si stabiliscono poi i parametri che influenzano maggiormente la comparsa del difetto attraverso l'analisi della varianza dei dati raccolti. Da questa analisi si evince che i parametri più influenti risultano la temperatura del fuso e il tempo di residenza, escludendo gli effetti della variazione della *Back Pressure* e della velocità di dosaggio che risultano quindi trascurabili.

Successivamente si elabora e si analizza un secondo piano fattoriale con lo scopo di approfondire e valutare quantitativamente l'influenza dei due parametri significativi.

Quest'ultima fase è volta alla realizzazione di un modello di regressione lineare per la previsione dell'entità del difetto superficiale atteso, considerando il set di parametri di processo significativi individuati a valle della prima fase sperimentale.

1. INTRODUZIONE

1.1 IL POLIPROPILENE

La plastica ha rivoluzionato la nostra società facendo ormai parte della vita quotidiana di ognuno. Il suo largo impiego è dovuto alla versatilità che la contraddistingue, grazie al buon rapporto tra proprietà meccaniche ed economicità, diventando di fatto negli anni il materiale più comunemente utilizzato nei più svariati campi di impiego.

In particolare, il polipropilene (PP) risulta essere uno dei materiali termoplastici più utilizzati al mondo, rappresentando il 19.3% del mercato mondiale della plastica.

[1]

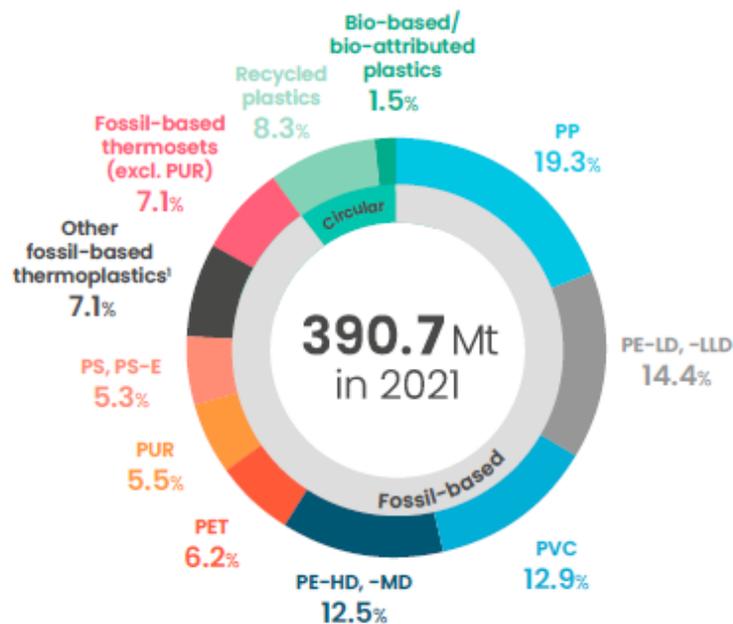


Figura 1: Distribuzione della produzione globale di plastica per tipologia (fonte: Plastics Europe)

Il mercato dell'industria manifatturiera europea dei prodotti in plastica dimostra una prevalenza della domanda di polipropilene rispetto a quella di altri termoplastici, caratterizzata inoltre da una tendenza in crescita, come evidenziato in Figura 2.

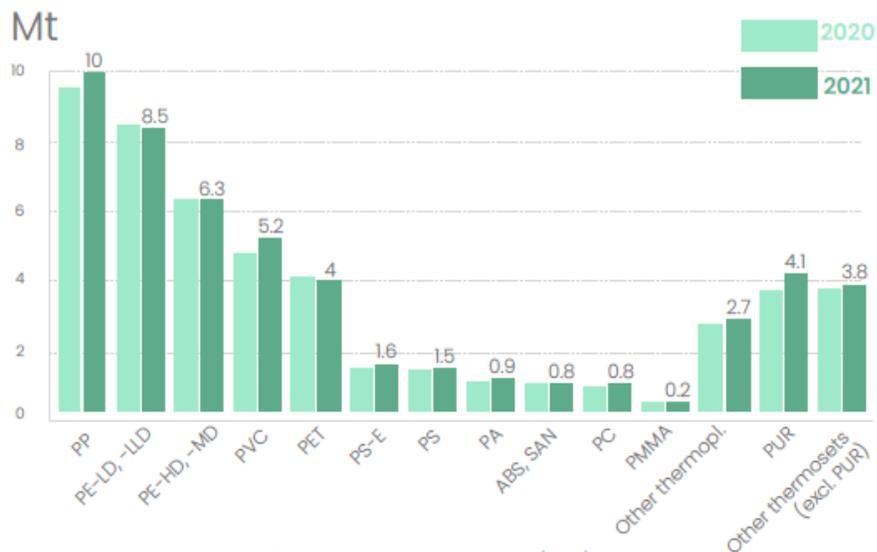
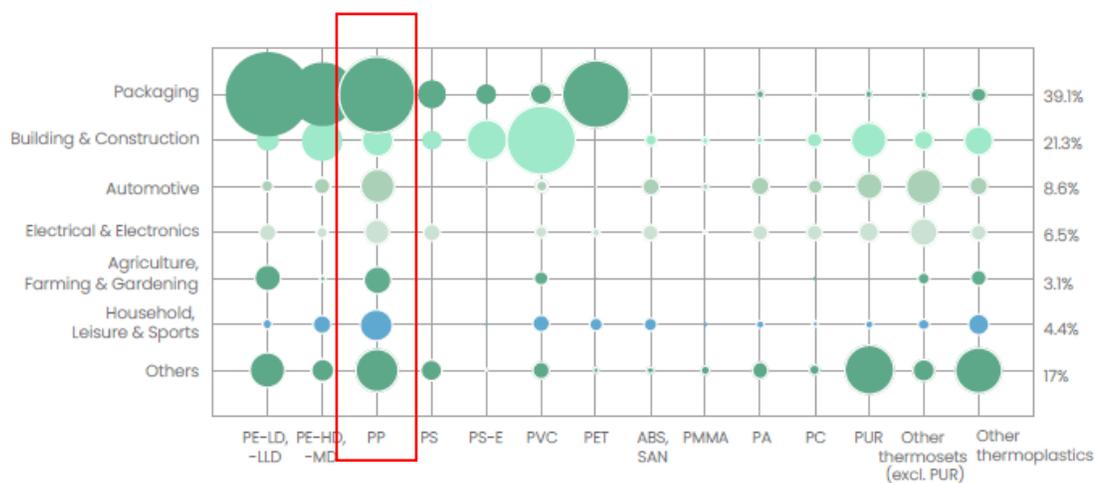


Figura 2: Domanda dei convertitori europei di plastica per tipologia di polimero (fonte: Plastics Europe)

Esso possiede buone proprietà meccaniche, in particolare in termine di duttilità e rigidità. È un polimero caratterizzato da un'ottima lavorabilità che lo rende particolarmente versatile e quindi utilizzabile nei più svariati campi d'applicazione. Data la sua versatilità e la sua economicità, viene spesso utilizzato per la produzione di prodotti con una vita utile breve, come ad esempio per articoli monouso e per il packaging alimentare come evidenziato in Figura 3.



Source: Conversio Market & Strategy GmbH based on the input of the Plastics Europe Market Research Group (PEMRG)
 The above data are rounded estimations.
 Demand data are built on estimations of quantities bought by European converters, including imports.
 Demand for recycled plastics and bio-based/bio-attributed plastics is not included. Polymers that are not used in the conversion of plastic parts and products (i.e., for textiles, adhesives, sealants, coatings, etc.) are not included.
 Numbers behind this graph are available upon request.
 Plastics - the Facts figures on PA only cover PA6 and PA66.

Figura 3: Domanda dei convertitori europei di materie plastiche per applicazione e tipologia

Il polipropilene, come appena descritto, è un polimero facilmente lavorabile e questa caratteristica lo rende adatto al riciclo. Infatti, possiede un'ottima stabilità termica quando sottoposto a numerosi cicli di riciclo. In Figura 4 viene rappresentata la variazione percentuale del MFI (Melt Flow Index) del polimero riprocessato rispetto al materiale vergine di partenza. Il MFI viene solitamente utilizzato come indicatore della fluidità e fornisce informazioni sulla stabilità delle proprietà termiche. Quest'ultime sono fondamentali per garantire una stabilità dei processi di lavorazione a cui è sottoposto il polimero, e di conseguenza garantire un'ottima efficienza della fase produttiva. Si nota come il PP mantenga sostanzialmente invariato il MFI per un numero elevato di processi, a differenza delle altre poliolefine che lo riducono drasticamente già dai primi cicli. [2]

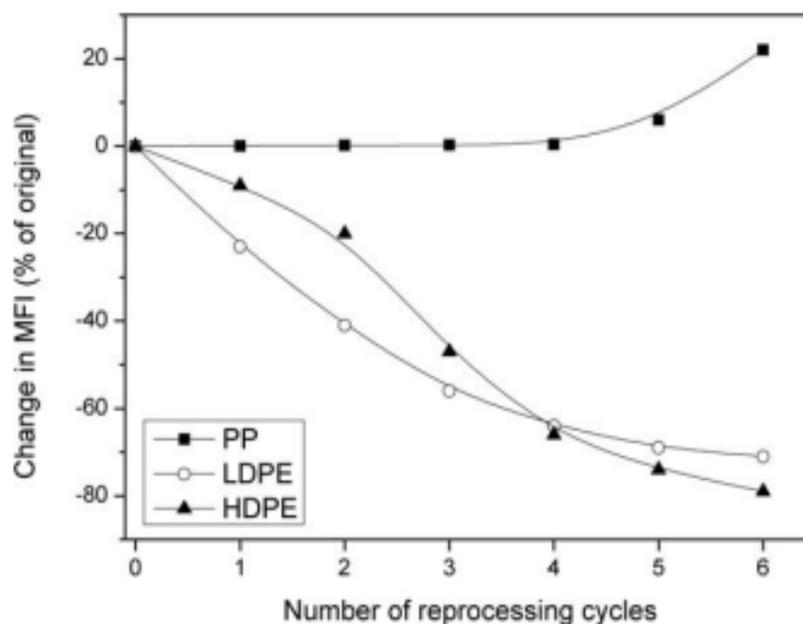


Figura 4: Variazione percentuale del MFI in funzione del numero di cicli di riprocesso

1.2 IL RICICLO DI POLIMERI DA POST CONSUMO

Il settore del packaging risulta essere in costante crescita e rappresenta l'impiego con maggior impatto sulla produzione globale di plastica, come evidenziato in Figura 5. [1] [3]

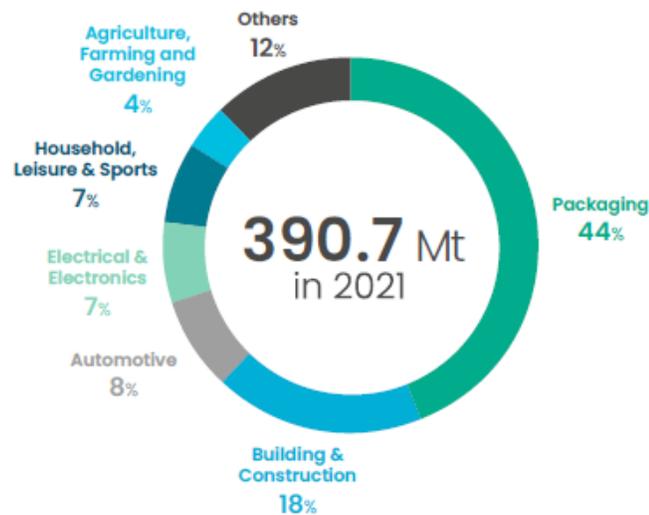


Figura 5: Distribuzione dell'utilizzo globale di plastica per applicazione (fonte: Plastics Europe)

La pandemia da Covid-19 del 2020 ha dato una notevole spinta a questo settore, promuovendo imballaggi in grado di assicurare una *shelf life* più lunga dei prodotti alimentari, riducendo la necessità di uscire di casa per acquistare tali beni e quindi diminuendo il rischio di contagio. [4][5]

La crescita del mercato della produzione di prodotti *disposable* però ha portato conseguenze negative dal punto di vista ambientale. Le problematiche sono legate in modo particolare allo smaltimento a fine vita.

Per questo motivo il settore industriale si concentra sempre più sull'ottimizzazione dei sistemi di riciclo delle materie plastiche, in particolare quelle provenienti dai rifiuti urbani da post consumo.

L'obiettivo è quello di convergere verso un'economia di tipo circolare, dando una seconda vita ai rifiuti e promuovendo così l'impiego di polimeri riciclati in alternativa o in combinata a quelli vergini. [6][7]

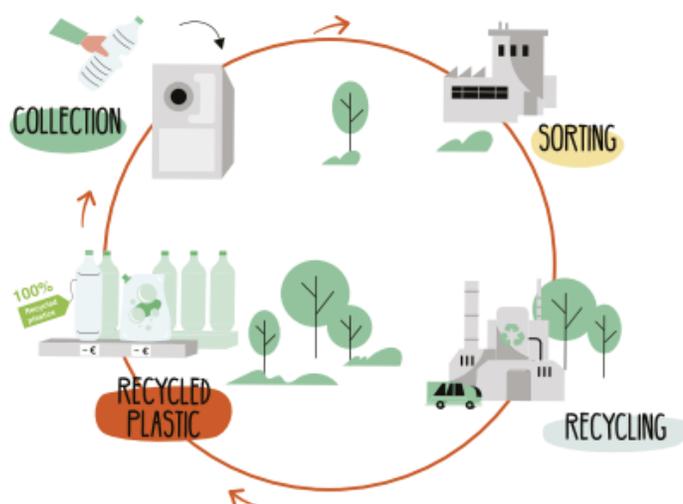


Figura 6: Schema dell'economia circolare per i rifiuti plastici

In Figura 7 si evidenzia come l'utilizzo di materie plastiche da post consumo sia caratterizzato da una tendenza in crescita. [1]

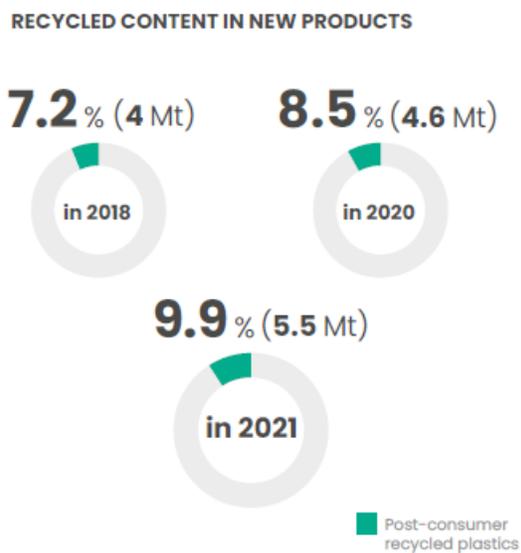


Figura 7: Contenuto di plastica riciclata da post consumo nei nuovi prodotti

Questo fa sì che le tecnologie adottate per la separazione e il riciclo siano sempre più avanzate e in costante ottimizzazione.

La limitazione principale del riciclo da post consumo è il grado di purezza del riciclato ottenuto che si riesce a raggiungere a monte del processo di riciclo. Infatti, il riciclato da post consumo deriva, come già sottolineato, da rifiuti urbani. Un problema è dunque costituito dalle diverse tipologie di plastica presenti, dalla loro relativa separazione e dalla degradazione e contaminazione che subisce il prodotto durante la sua vita utile. Questi fattori influiscono negativamente sulla stabilità delle proprietà meccaniche e tecnologiche del riciclato.

La costanza delle proprietà del materiale da post consumo è fondamentale affinché il successivo processo di produzione possa essere il più efficiente possibile, evitando continui aggiustamenti a carico dell'operatore e la conseguente produzione di scarti e di ulteriori consumi energetici.

1.2.1 IL RICICLO MECCANICO

La modalità più diffusa per il riciclo di polimeri termoplastici da post consumo è quella meccanica. [6]

È il processo che trasforma i rifiuti plastici, provenienti dalla raccolta urbana, in granuli o scaglie da utilizzare per la realizzazione di nuovi prodotti, senza modificare la struttura chimica del materiale di partenza.

Il processo si divide principalmente nelle fasi di raccolta, selezione, macinazione, lavaggio, essiccazione, estrusione e granulazione. In alcuni casi si procede ad una fase di separazione del polimero base da eventuali additivi presenti nei prodotti raccolti.

L'altra modalità di riciclo è quella chimica, che prevede la depolimerizzazione o la degradazione termica del materiale di partenza per la produzione di nuovi polimeri o altre sostanze sintetiche. Tale modalità è però meno diffusa a livello industriale.

La qualità del materiale ottenuto dipende fortemente dalla qualità del processo di riciclo. In particolare, è importante prestare attenzione alla fase di selezione, cercando di separare opportunamente le varie tipologie di polimeri, con lo scopo di ottenere un materiale più puro possibile e con caratteristiche fisiche e tecnologiche costanti. Per questo motivo spesso è prevista una seconda fase di selezione a valle della fase di lavaggio, per garantire la purezza del materiale ottenuto.

Anche la fase di lavaggio detiene un ruolo importante. Le impurezze presenti nelle plastiche derivate dai rifiuti urbani tendono a degradarsi termicamente durante il successivo processo di produzione, producendo dei gas disciolti nel fuso che possono causare difetti nel prodotto finito.

1.2.2 IL RICICLO IN ITALIA

In Italia il riciclo degli imballaggi in plastica dai rifiuti urbani è affidato a COREPLA, ovvero il Consorzio Nazionale per la Raccolta, il Riciclo e il Recupero degli Imballaggi in Plastica. Il consorzio, coordinato con il CONAI (Consorzio Nazionale Imballaggi), opera nell'ambito del sistema di gestione dei rifiuti di imballaggio assicurando il ritiro degli imballaggi in plastica, il riciclo e il recupero. In primo luogo, supporta i Comuni italiani nello sviluppo di adeguati sistemi di raccolta differenziata per favorire l'efficienza del successivo processo di riciclo meccanico, con lo scopo di raggiungere gli obiettivi di riciclo e recupero previsti dalla direttiva europea 94/62 CE. Tali obiettivi fanno riferimento all'efficienza, efficacia, economicità e trasparenza del processo stesso. In secondo luogo, si propone di sensibilizzare i cittadini alla corretta pratica della raccolta differenziata e di promuovere interventi per la riduzione dell'impatto ambientale degli imballaggi in plastica, a partire dalla prevenzione. [8]

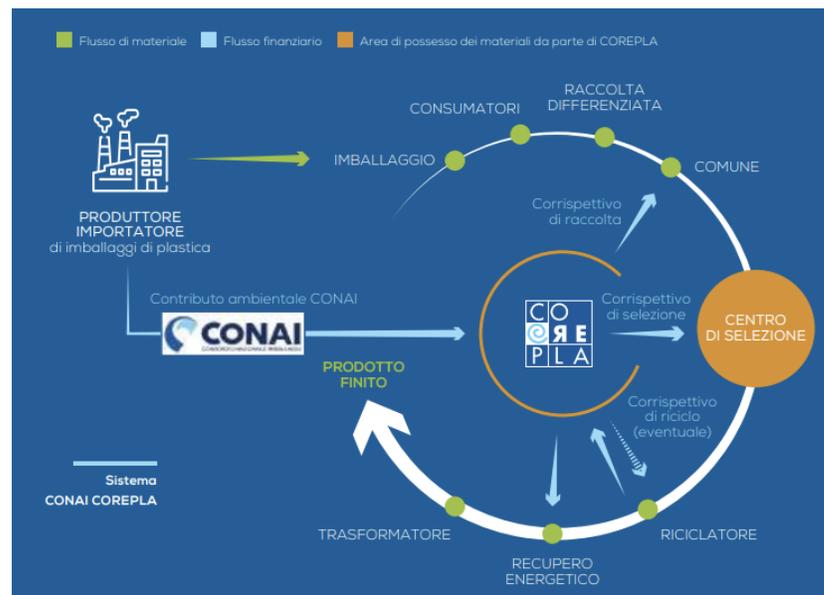


Figura 8: Sistema CONAI-COREPLA per la gestione dei rifiuti plastici

La raccolta dati del consorzio ha dimostrato che nel suolo italiano il recupero degli imballaggi in plastica, non solo evita il loro abbandono nell'ambiente, ma contribuisce al risparmio energetico e alla riduzione delle emissioni. Infatti, il riciclo di tali materiali permette di risparmiare sulle materie prime vergini necessarie per la produzione dei nuovi prodotti in plastica. Dai dati raccolti, nel 2021 si registra un risparmio di 520 000 tonnellate di materia prima vergine risparmiata. In più il processo di riciclo richiede meno dispendio energetico di quello per la produzione della materia prima vergine, generando un risparmio energetico nello stesso anno di 10.867 GWh, pari al 2,5% della produzione annua di energia primaria in Italia. Le emissioni di CO₂ evitate grazie al riciclo sono di 879 000 tonnellate, pari alle emissioni prodotte da 1017 voli andata e ritorno da Roma a Tokyo.[8]

1.2.3 DEGRADAZIONE DEL MATERIALE RICICLATO

Il materiale riciclato subisce inevitabilmente una degradazione durante il processo di recupero. Infatti, in molte delle operazioni di riciclo e riutilizzo, il materiale è soggetto a ripetuti cicli di riscaldamento e tensioni, che ne compromettono le proprietà. [9]

In [2] si illustra uno studio della degradazione del polipropilene riciclato (rPP) sottoposto a più operazioni di estrusione, concludendo che il polimero subisce una riduzione considerevole della tensione e della deformazione a rottura e dell'energia necessaria alla rottura; mentre le proprietà per le piccole deformazioni, quali tensione e modulo di snervamento, risultano poco influenzate.

Anche la storia di invecchiamento del polimero durante la vita utile del prodotto influenza la qualità del corrispettivo materiale riciclato. Infatti, il polimero viene esposto ad una serie di fenomeni termici e meccanici durante il processo di produzione, trasporto, conservazione e utilizzo che ne alterano le caratteristiche di partenza. Questo implica che il materiale risulta già parzialmente compromesso a monte del processo di riciclo. In particolare, in [10] si studiano gli effetti di tali fenomeni sulle proprietà termiche del rPP. Si registra una degradazione termica del materiale riciclato ad opera delle radiazioni UV a cui è stato sottoposto il materiale prima di subire il processo di riciclo meccanico. Sotto l'influenza di tale esposizione, le catene polimeriche incorrono in una scissione che crea dei difetti strutturali. Questi ultimi si riflettono sull'entalpia di fusione del materiale che cresce al crescere del tempo di esposizione e sul MFI che risulta più elevato rispetto a quello del corrispettivo materiale vergine.

Un'altra causa della degradazione del materiale polimerico da post consumo è la contaminazione a cui esso incorre a monte del processo di riciclo, durante l'utilizzo del prodotto e durante la fase di raccolta urbana. La contaminazione può riguardare svariate sostanze organiche e inorganiche con cui il materiale viene a contatto. [11]

Nel settore del packaging alimentare, per esempio, i contaminanti possono essere sporco o residui di cibo, additivi o colla proveniente dalle etichette, residui di inchiostro o coloranti utilizzati per l'estetica del prodotto finito.

Studi dimostrano che la contaminazione influenza la struttura molecolare del polipropilene a valle del processo di riciclo. In particolare, il materiale incorre in una diminuzione della massa molare rispetto al materiale vergine corrispondente, con una conseguente diminuzione della viscosità. [12][13]

La variabilità delle proprietà del propilene riciclato da post consumo derivante da queste degradazioni e contaminazioni, può riflettersi sulla qualità dei prodotti finiti. Per questo motivo, attualmente, l'rPP viene utilizzato principalmente per applicazioni a bassissimo valore aggiunto oppure miscelato in piccole percentuali al PP vergine. [13]

1.3 STAMPAGGIO A INIEZIONE

Lo stampaggio a iniezione è una delle principali tecnologie di lavorazioni del PP, così per la maggior parte dei polimeri termoplastici. È caratterizzata da bassi costi, alta efficienza e buona precisione, che la rendono particolarmente adatta per la produzione industriale di massa.

Le fasi principali del processo si dividono in:

- **Plastificazione e dosaggio:** in questa fase il materiale, sotto forma di pellet, viene caricato all'interno dell'unità di iniezione attraverso una tramoggia. La vite d'iniezione, con un movimento combinato di rotazione e arretramento, dosa il materiale necessario e procede alla plastificazione. Quest'ultima consiste nella fusione del materiale che, scorrendo tra la vite in rotazione e il cilindro di iniezione opportunamente riscaldato, si fonde ad opera delle forze a cui è sottoposto. Il materiale fuso quindi si accumula in testa alla vite, pronto per la fase successiva.
- **Iniezione:** il materiale accumulato, viene iniettato sotto la spinta della vite d'iniezione attraverso un ugello verso la cavità stampo.
- **Impaccamento e raffreddamento:** il fuso si distribuisce e riempie completamente la cavità. In questa fase viene mantenuto in pressione fino a che il materiale non si solidifica e il gate d'iniezione non viene così chiuso, impedendo alla vite di esercitare ancora pressione all'interno dello stampo. Questa fase permette di compensare eventuali ritiri dovuti al raffreddamento che il materiale subisce una volta arrivato all'interno della cavità. Ora il materiale rimane all'interno dello stampo per la quantità di tempo necessaria per raffreddare il materiale, fino a che il pezzo non risulta pronto per l'estrazione.
- **Apertura stampo ed estrazione:** in questa fase lo stampo viene aperto in modo tale da garantire l'estrazione del pezzo, attraverso l'ausilio di opportuni estrattori posti nello stampo.

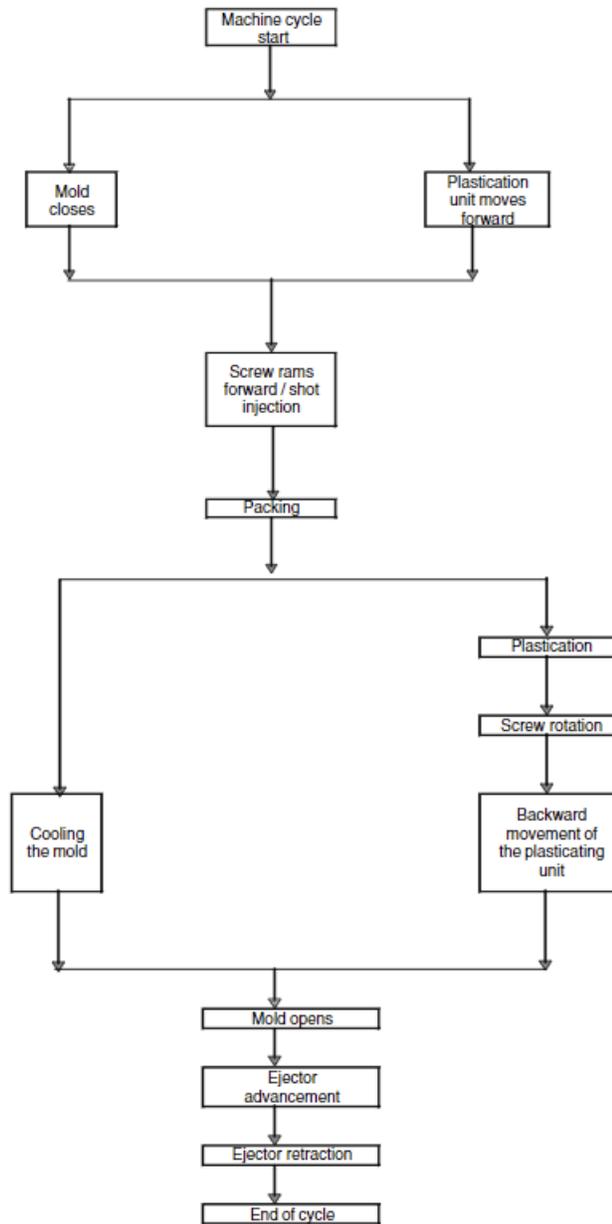


Figura 9: Ciclo dello stampaggio a iniezione

Tale processo risulta altamente robusto e automatizzato. A livello industriale i cicli di produzione sono in continuo e la capacità produttiva risulta estremamente elevata. Per mantenere elevata l'efficienza di tale processo e la qualità dei prodotti finiti, quindi, è importante che le proprietà del materiale risultino stabili ad ogni ciclo in modo da garantirne la ripetibilità.

Questo è in contrasto con le caratteristiche precedentemente descritte del materiale riciclato da post consumo, che risultano invece intrinseche di variabilità e instabilità, a seguito delle degradazioni e delle contaminazioni a cui il materiale riciclato è sottoposto durante la sua vita utile e il processo di riciclo.

Per questo, con l'avanzare dell'economia di tipo circolare, risulta sempre più importante e cruciale capire la correlazione tra le proprietà del materiale riciclato, parametri di processo e la qualità del prodotto finito, con l'obiettivo di ridurre l'impatto della variabilità delle proprietà del riciclato da post consumo sulla stabilità del processo e garantire quindi l'efficienza e la qualità tipiche dello stampaggio a iniezione.

1.3.1 DIFETTI SUPERFICIALI

Lo stampaggio a iniezione è una tecnologia ampiamente utilizzata per la produzione industriale di massa. Quest'ultima è sempre più orientata a soddisfare i requisiti estetici del consumatore, che assumono sempre più un ruolo cruciale nel mercato. L'estetica del prodotto, infatti, governa la percezione della qualità del pezzo anche quando questa non ha impatto sulla funzionalità del prodotto stesso. Di conseguenza il miglioramento delle qualità superficiali è diventato una delle principali aree di ricerca e sviluppo di questo processo. [14]

I principali difetti superficiali tipici dello stampaggio a iniezione si presentano sotto forma di:

- A. Bava: piccole sbavature a bordo pezzo causate dall'eccesso di materiale che fuoriesce dal piano di ripartizione dello stampo
- B. Linee di giunzione: linee visibili sulla superficie causate dall'incontro di più flussi di materiale fuso che scorrono all'interno dello stampo, senza diffondersi perfettamente.
- C. *Tiger stripes*: strisce o bande sottili e scure visibili sul pezzo causate da un'instabilità del flusso del fuso all'interno dello stampo
- D. Ritiro: deformazione o depressione della superficie del pezzo a causa della contrazione del materiale plastico durante la fase di raffreddamento o della presenza di tensioni residue
- E. *Jetting*: segno evidente del getto di materiale fuso causato da un'iniezione troppo veloce all'interno dello stampo
- F. Porosità: piccoli punti o bolle dovuti all'incorporazione di aria o gas disciolti nel fuso
- G. Macchie: imperfezioni superficiali causati da contaminazioni nel materiale o sporramento della cavità dello stampo

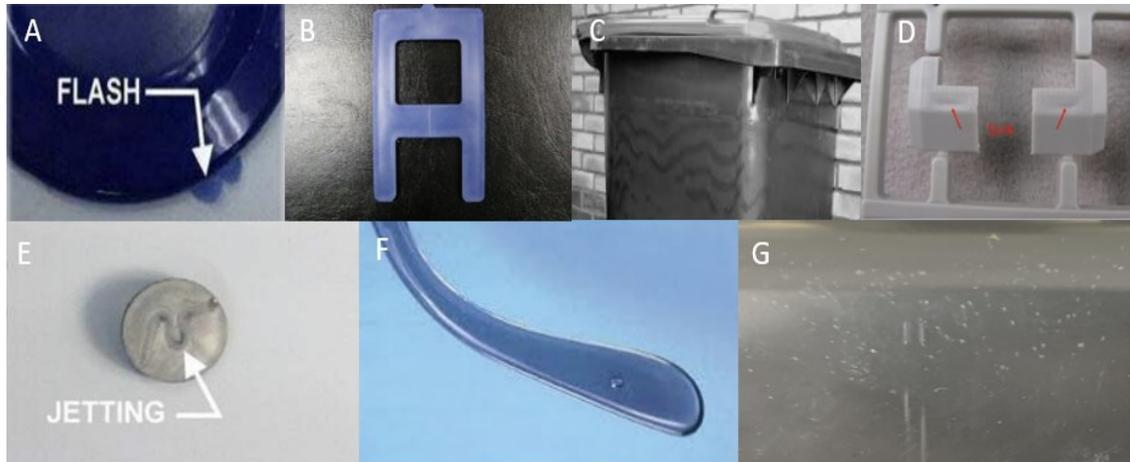


Figura 10: Difetti superficiali tipici dello stampaggio a iniezione: A) Bava, B) Linee di giunzione, C) Tiger stripes, D) Ritiro, E) Jetting, F) Porosità, G) Macchie

In particolare, quest'ultimo risulta rilevante nel caso di stampaggio a iniezione di materiale riciclato da post consumo. Infatti, come descritto in precedenza, esso presenta spesso contaminazioni che, alle elevate temperature tipiche del processo, possono reagire termicamente dando luogo a segni superficiali sul pezzo.

Esistono in letteratura diversi metodi per l'analisi dei difetti superficiali. In [14] si presentano le diverse metodologie disponibili per la determinazione della qualità superficiale del pezzo sulla base dell'aspetto visivo, delle proprietà ottiche, della texture o topografia e della morfologia della superficie. In particolare, le analisi visive si basano sulla valutazione delle immagini che rappresentano la superficie dei pezzi stampati o la loro immagine riflessa. Tale metodologia risulta sempre più utilizzata grazie allo sviluppo e alla facile accessibilità a strumenti di analisi delle immagini, quali software e librerie open-source di algoritmi di programmazione. Un esempio è OpenCv (Open Source Computer Vision Library), una libreria di codici utilizzabili in numerosi ambienti di programmazione, ad esempio in Python. [15]

Molti fattori influenzano la qualità superficiale, tra cui le proprietà del materiale, il design dello stampo e i parametri di processo utilizzati. Di conseguenza essa è caratterizzata da un ampio range di varianti sul prodotto stampato, più di qualsiasi altro fattore di qualità. [16] Per cui risulta complicato prevenirla o prevederla con esattezza.

Questi strumenti di analisi risultano fondamentali per intervenire su tale problematica. Infatti, affiancando l'analisi alla sperimentazione, è possibile creare metodologie di controllo e di previsione sempre più affidabili da integrare nel processo stesso, con lo scopo di garantirne l'efficienza.

Per esempio, un tipico approccio è quello di raccogliere campioni di dati attraverso la sperimentazione, andando parallelamente a monitorare le variabili di processo e la qualità superficiale del prodotto che ne consegue, utilizzando le procedure di analisi più appropriate al difetto in esame. Successivamente si realizza un fitting dei dati ottenuti con il fine ultimo di giungere ad un algoritmo di approssimazione sufficientemente accurato. [17]

Proprio tale combinazione tra sperimentazione ed analisi verrà adottata anche nel seguente studio, come verrà illustrato nei capitoli successivi.

1.4 OBIETTIVO DELLO STUDIO

Analizzato lo scenario attuale e lo stato dell'arte, si procede a illustrare nello specifico il contesto e l'obiettivo dello studio in esame.

Da delle osservazioni qualitative svolte in laboratorio su alcuni pezzi stampati con polipropilene riciclato da post consumo, viene individuato un difetto superficiale ricorrente su alcuni dei pezzi prodotti. Individuato il fenomeno, segue una fase sperimentale volta a identificare la relazione tra il difetto e i parametri del processo di stampaggio a iniezione.

Si mira alla realizzazione di un modello di regressione lineare che permetta di correlare la presenza e l'intensità del fenomeno in esame ai parametri di processo su cui si ha il controllo.

Tale modello ha il fine ultimo di fornire uno strumento di controllo o di prevenzione sulla comparsa del difetto, che sia in grado di garantire una buona qualità del prodotto finito agendo sui parametri che governano il processo di produzione.

2. IL DIFETTO

2.1 DESCRIZIONE

Il difetto che si prende in esame consiste in una alterazione dell'estetica superficiale del pezzo stampato con polipropilene riciclato da post-consumo.

Esso è caratterizzato da una serie di tracce di colore chiaro che si presentano sulla superficie del provino a partire dal punto di iniezione e propagandosi poi lungo il pezzo. La propagazione del difetto segue il flusso del materiale all'interno dello stampo, risultando più intenso in prossimità del punto d'iniezione e andando via via a sbiadirsi verso l'estremità opposta.



Figura 11: Come si presenta il difetto sul provino

2.2 OSSERVAZIONI E IPOTESI PRELIMINARI

Per la conformazione a “sfiammatura” delle tracce superficiali, si può in prima approssimazione dedurre che il difetto possa essere strettamente legato anche al materiale impiegato, oltre che al processo stesso. In particolare, i segni superficiali suggeriscono una possibile degradazione del materiale. Le tracce bianche potrebbero essere intese quindi come il risultato di una degradazione chimica.

Per questo motivo quindi si procede con un’analisi DSC (Differential Scanning Calorimetry) del materiale. Questa tecnica permette di analizzare il comportamento e le proprietà del materiale alle diverse temperature a cui è sottoposto nelle diverse fasi del processo di stampaggio a iniezione. [18][19]

L’output dell’analisi è un grafico che mostra la potenza specifica assorbita o rilasciata da un campione in funzione della variazione di temperatura a cui è sottoposto.

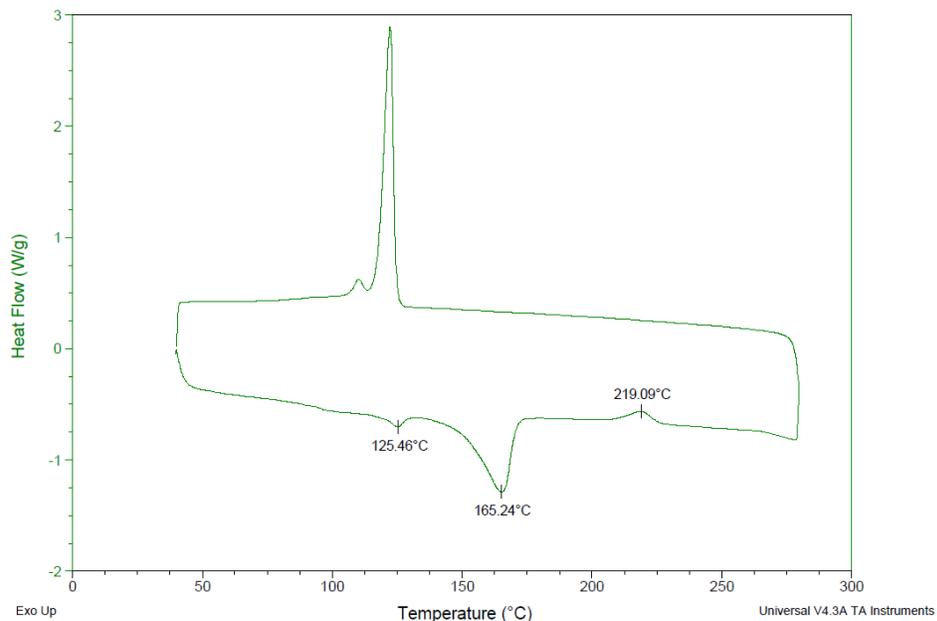


Figura 12: Curva DSC del materiale

Il grafico ottenuto mostra nella fase di riscaldamento (porzione inferiore della curva) due picchi endotermici alle temperature di 125,46°C e 165,24°C. Questi punti sono in corrispondenza dei punti di fusione di polietilene e polipropilene rispettivamente. Si deduce che il materiale utilizzato non è un polipropilene puro ma presenta una piccola frazione di polietilene. Questo fatto è legato alla modalità tipica di separazione dei materiali in fase di riciclo. Infatti, la modalità spesso utilizzata per separazione dei rifiuti non permette spesso una distinzione efficiente di materiali con una densità simile come il polietilene e il polipropilene.

Nella fase di riscaldamento poi è presente un anomalo picco esotermico ad una temperatura di 219,09°C. Solitamente questo in fase di riscaldamento indica una reazione chimica in atto. Si può supporre che tale reazione sia legata alla presenza di impurità organiche tipiche dei rifiuti che reagiscono ad elevate temperature, rilasciando, come prodotti della reazione, dei gas che si disciolgono nel materiale. Questo è in accordo con l'ipotesi fatta in precedenza, in cui si collega il difetto ad una reazione chimica nel materiale. I gas prodotti dalla reazione che coinvolgono le impurità organiche sottoposte a elevate temperature, si disciolgono nel materiale creando delle tracce superficiali in fase di espansione del fuso in cavità.

In questo studio non si mira ad approfondire e analizzare in dettaglio la natura del difetto, ma la correlazione di quest'ultimo con i parametri che definiscono il processo produttivo. Per questo motivo queste deduzioni non verranno ulteriormente approfondite e indagate, ma esse vengono utilizzate solo come punto di partenza per le osservazioni successive. Infatti, dalle conclusioni raggiunte a valle di quest'analisi del materiale è possibile dedurre che il difetto è strettamente legato al materiale e al processo che esso subisce in fase di stampaggio, in particolare ai parametri legati alla temperatura a cui è sottoposto il materiale nelle varie fasi del ciclo produttivo. È importante quindi incentrare lo studio e le successive osservazioni sui parametri con cui viene processato il materiale, con l'obiettivo di quantificare l'influenza che essi hanno sul fenomeno in esame.

Inizialmente, quindi, si effettuano diverse stampate di prova in cui vengono variati in modo significativo i parametri di processo su cui si ha il controllo, ovvero quelli impostabili nell'interfaccia della pressa ad iniezione. Tali prove dimostrano che la comparsa del difetto dipende fortemente dai parametri utilizzati per la realizzazione del pezzo stampato. Infatti, si nota che esso si manifesta solo in determinate condizioni di processo.

Si osserva in particolare che il difetto compare evidente nelle stampate in cui si utilizzano elevate temperature del fuso e nei provini elaborati dopo un certo periodo di fermo della pressa.

In aggiunta alle osservazioni dirette sui pezzi stampati, si pone l'attenzione sull'articolo del "Polymer International" [20]. In questo articolo gli autori si propongono di correlare la degradazione del PET per la formazione di acetaldeide con i parametri di stampaggio. Questo studio risulta rilevante anche nel caso in esame in questa relazione in quanto, dalle osservazioni e dalle analisi precedenti, si è visto come il difetto dipende fortemente dai parametri di processo e potrebbe essere correlato ad una degradazione del materiale.

Nell'articolo i fattori presi in considerazione per lo studio sono la temperatura del fuso, il tempo di residenza misurato in termini di tempo di raffreddamento e altri parametri strettamente correlati ad essi. Infatti, si considerano anche Back Pressure e velocità di rotazione della vite in fase di dosaggio. La prima è legata principalmente al tempo di residenza in quanto più risulta elevata la Back Pressure, più il polimero viene dosato lentamente e di conseguenza aumenta il tempo di residenza nel cilindro di iniezione.

Una elevata velocità di rotazione in fase di dosaggio invece, oltre ad abbassare il tempo di dosaggio e di conseguenza il tempo di residenza del polimero, aumenta lo *shear rate* a cui è sottoposto il materiale in fase di plastificazione e di conseguenza aumenta la temperatura per effetto dello *shear heating*.

Definiti i parametri d'interesse, lo studio dimostra che quelli che più influenzano la degradazione risultano essere la temperatura del fuso, con un raddoppio di concentrazione di acetaldeide su un incremento di 10°C di temperatura, e il tempo di residenza, con un incremento significativo di concentrazione di acetaldeide pari a 7 ppm/min. Gli altri due parametri invece risultano avere un'influenza meno significativa.

2.3 PARAMETRI DI PROCESSO

Dalle osservazioni e dai risultati dello studio analogo sopra descritti, si propongono quattro parametri di processo su cui centrare lo studio: temperatura del fuso, tempo di residenza, velocità di dosaggio e Back Pressure.

Con il parametro temperatura del fuso si intende la temperatura del polimero impostata nella camera calda posta a monte della cavità dello stampo e misurata tramite una termocoppia. È controllabile tramite delle resistenze che scaldano la camera alla temperatura desiderata. Il materiale raggiunge la camera calda dopo essere stato sottoposto ad una rampa ascendente di temperatura all'interno del cilindro d'iniezione, con la parte più fredda in corrispondenza della tramoggia e la parte più calda in corrispondenza dell'ugello di iniezione. Il cilindro infatti è suddiviso in zone dotate di resistenze che permettono la regolazione e il controllo della temperatura.

La regolazione della temperatura del fuso è l'aspetto che viene considerato il "collo di bottiglia" nella regolazione dei parametri di processo. Infatti, la regolazione delle temperature non è immediata, possiede una certa inerzia. Quest'ultima fa sì che, quando si modifica la temperatura, sia necessario attendere un certo tempo per il raggiungimento del target fissato. Tanto più l'incremento o il decremento è elevato, tanto più è il tempo necessario per raggiungere il target.

Di conseguenza, per una miglior efficienza della fase di sperimentazione, si avrà l'accortezza di eseguire le stampate con un ordine ascendente di temperature, evitando la randomizzazione dei punti sperimentali.

Il tempo di residenza del fuso è il tempo di permanenza del polimero all'interno del cilindro calcolato da quando termina il dosaggio a prima dell'iniezione in cavità. In un processo produttivo ideale, questo parametro è considerato nullo a meno del tempo di apertura, estrazione del pezzo e chiusura dello stampo, in quanto in una produzione in serie i cicli di produzione avvengono consecutivamente senza soste. In situazioni reali però spesso si presentano i cosiddetti "tempi morti" in cui la produzione si interrompe e avviene un fermo macchina. Ad esempio, è possibile che i cicli produttivi si interrompano per anomalie, malfunzionamento, cambio dello stampo e molte altre variabili appartenenti all'operatore che gestisce la pressa. Il polimero quindi, dosato immediatamente dopo la precedente iniezione, permane all'interno del cilindro ad elevate temperature e di conseguenza tende a degradarsi. È possibile impostare in fase di sperimentazione ai fini dello studio un tempo di residenza non nullo andando ad attivare un'impostazione della pressa che permette di ritardare di un tempo definito l'iniezione del polimero in cavità in seguito al suo dosaggio nel cilindro.

Per velocità di dosaggio si intende la velocità di rotazione della vite nel momento in cui, subito dopo l'iniezione e l'impaccamento, arretra per dosare la quantità di polimero da rendere disponibile per l'iniezione successiva.

Per Back Pressure si intende la pressione esercitata sul polimero fuso dalla vite all'interno del cilindro di iniezione nella fase di dosaggio. Può essere intesa anche come la pressione di resistenza che il polimero impone sulla vite. Infatti, il materiale in fase di dosaggio si accumula nella zona in prossimità dell'ugello di iniezione, creando gradualmente una pressione che tende a spingere indietro la vite. La pressione esercitata all'estremità opposta della vite serve per evitare un ritiro troppo repentino della vite stessa nella fase di dosaggio.

Definiti i parametri d'interesse per lo studio, si illustrano le metodologie impiegate per l'esecuzione delle prove sperimentali e l'analisi dei provini ottenuti.

3. METODI

In questo capitolo si descrivono le metodologie e gli strumenti utilizzati durante la fase sperimentale e quella di analisi della correlazione tra i parametri del processo di stampaggio e la comparsa dei difetti superficiali.

Per la fase sperimentale si è seguito un approccio diviso in due fasi: una prima fase di screening ha avuto lo scopo di identificare i fattori più rilevanti per la comparsa dei difetti, mentre in un secondo momento l'effetto di tali fattori è stato studiato più nel dettaglio fino ad ottenere un modello di regressione che legasse tali variabili all'entità dei difetti di stampaggio. Entrambe le fasi sperimentali sono state pianificate utilizzando il metodo del Design of Experiments (DOE).

3.1 DESIGN OF EXPERIMENTS

In primo luogo, si esegue un'analisi dei parametri di processo identificati nelle fasi preliminari dello studio per individuare quelli che risultano avere un'influenza significativa sul fenomeno in analisi. A questo scopo si pianifica la fase di sperimentazione utilizzando un piano fattoriale completo con il metodo Design Of Experiments (DOE).

Individuati i k fattori di cui si vuole esaminare l'effetto, si determina per ogni parametro coinvolto un campo di variabilità ragionevole in relazione al processo esaminato, individuando un valore massimo e un valore minimo. Si scelgono successivamente n livelli all'interno dell'intervallo considerato. Nel piano fattoriale completo si investigano tutte le possibili combinazioni tra gli n valori dei parametri coinvolti, quindi si individuano n^k punti sperimentali. Per ciascuno di essi si identifica un numero minimo di prove da eseguire per tenere conto della variabilità sperimentale del processo nelle successive analisi statistiche.

Nella Figura 13 viene visualizzato lo schema dei punti sperimentali di un esempio di piano fattoriale completo per 3 fattori (A, B, C) e 2 livelli.

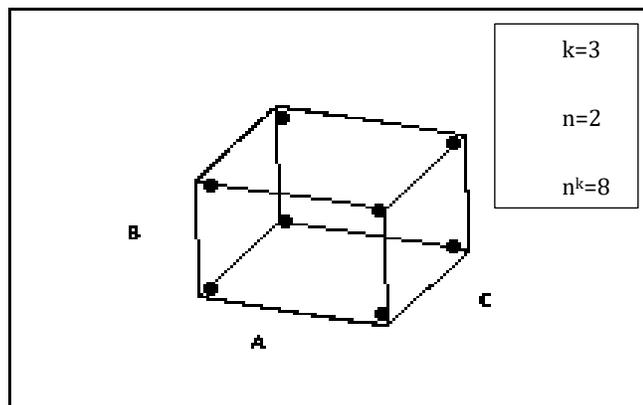


Figura 13: Schema piano fattoriale completo, k: numero fattori, n: numero livelli

Nel caso in esame, si effettua un primo piano fattoriale di screening in cui si considerano tutti i fattori che potrebbero risultare significativi, individuati nelle fasi preliminari. L'obiettivo è quello di individuare quali di questi risultano effettivamente influenti e significativi sulla risposta.

Successivamente si imposta un secondo piano fattoriale in cui si considerano i soli parametri influenti, con l'obiettivo di quantificare l'effetto di tali parametri e della loro interazione sulla risposta tramite lo sviluppo di un modello di regressione.

3.2 IMAGE PROCESSING

Ad ogni fase sperimentale, segue una fase di analisi dei provini stampati. Per analizzare l'influenza di ciascun parametro sulla comparsa del difetto, è necessario quantificare il fenomeno, ossia identificare una grandezza che permetta di descrivere non solo la presenza o l'assenza del difetto ma anche di apprezzarne l'intensità.

Per fare ciò si è deciso di utilizzare tecniche di image processing.

È stato quindi sviluppato un algoritmo mediante il linguaggio di programmazione Python, utilizzando in particolare le funzioni fornite dalle librerie OpenCV e NumPy.

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) è una libreria open-source che permette di analizzare e manipolare le immagini. Consente di effettuare operazioni di base come il caricamento, salvataggio e modifica dei colori o di applicare filtri, fino a eseguire operazioni più avanzate come rilevamento di oggetti.

L'utilizzo di OpenCv è spesso affiancato alla libreria NumPy (Numerical Python). Infatti le immagini possono essere considerate come array multidimensionali di pixels. Gli array possono rappresentare immagini bidimensionali (in scala di grigi) o tridimensionali (a colori con canali RGB). Con NumPy è possibile utilizzare funzioni matematiche e statistiche per l'elaborazione delle immagini.

Si prevede dunque di realizzare un codice avente come input la foto di ciascun provino associato ad un punto del piano fattoriale.

Il codice ha lo scopo di associare ad ogni provino un valore che descriva l'intensità del difetto del pezzo stampato risultante dall'utilizzo di uno specifico set di parametri.

Lo script è diviso in sezioni, ciascuna delle quali ha una funzione ben precisa e che verrà illustrata di seguito.

Nella prima sezione dello script vengono eseguite delle operazioni preliminari per lo svolgimento delle funzioni impiegate nell'elaborazione delle immagini.

Una volta importata l'immagine da analizzare, viene data la possibilità di selezionarne una porzione specifica, che sarà oggetto di successive analisi.

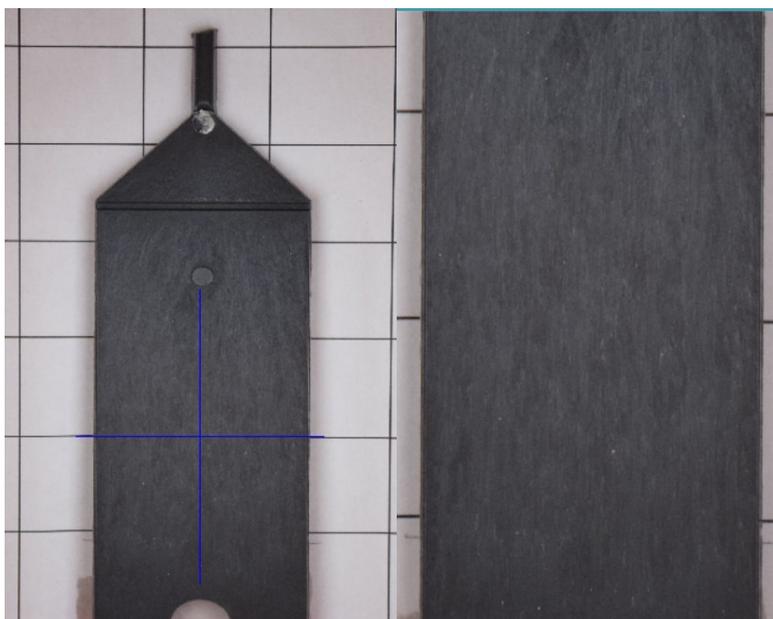


Figura 14: Selezione dell'area di interesse

```

#Import Libraries
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import cv2
import pandas as pd
import glob
import os
import sys

# Utility Functions
def show_img_cv(window,img):
    cv2.namedWindow(window,cv2.WINDOW_NORMAL)
    #cv2.resizeWindow(window,img.shape[0],img.shape[1])
    cv2.imshow(window,img)
    cv2.waitKey(0)
    cv2.destroyAllWindows()

def show_img(img, size): ### show_img(img,img.shape)
    current_dpi = plt.rcParams['figure.dpi']
    height=size[0]
    width=size[1]
    figsize = width/current_dpi, height/current_dpi
    fig=plt.figure(figsize = (12,16))
    plt.imshow(img,cmap='gray')

def create_labels(thresholds):
    labels=[]
    bound_sx=0
    for i, threshold in enumerate(thresholds):
        label=str(bound_sx)+'-'+str(threshold)
        bound_sx=threshold
        labels.append(label)
    labels.append(str(bound_sx)+'-'+str(255))
    return labels

# Import Image
image=cv2.imread(r"C:\TESI\0B2\FOTO.JPG")

show_img_cv('Import Image',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

# Select a Region of Interest and save it (TO DO ONLY ONCE)
cv2.namedWindow("Select_ROI", cv2.WINDOW_NORMAL)
selection = cv2.selectROIs("Select_ROI", image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

#Save Selection
import pickle
outfile = open('selection.py', 'wb')
pickle.dump(selection, outfile)
outfile.close()

##### Retrieve Selected Area (resize_image) --- Both Grayscale and RGB
#Retrieve Selection
import pickle
infile = open('selection.py','rb')
selection = pickle.load(infile)
infile.close()

#Resize original image
x=selection[0][0]
y=selection[0][1]
w=selection[0][2]
h=selection[0][3]

gray=cv2.cvtColor(image,cv2.COLOR_RGB2GRAY)
resize_gray=gray[y:y+h,x:x+w]
resize_image=image[y:y+h,x:x+w]
show_img_cv('Resize',resize_image)

```

Figura 15: Sezione 1 dello script

In questa fase si vuole estrarre dall'area precedentemente selezionata la sola regione contenente il provino oggetto di studio, distinguendolo dal background. Tale operazione può essere scomposta in tre passaggi:

1. L'immagine a colori viene convertita in scala di grigi. Per ogni pixel, descritto dalla somma di tre valori corrispondenti ai singoli canali (RGB), se ne ottiene uno ad un singolo canale ove il valore varia tra 0 e 255
2. L'immagine in scala di grigi viene convertita in bianco e nero tramite sogliatura. Per individuare il livello di soglia ottimale si utilizza l'algoritmo di Otsu. Trovata la soglia ottimale, tutti i pixel con un valore d'intensità superiore alla soglia saranno assegnati al livello di foreground che rappresenta il provino, mentre quelli con un valore inferiore o uguale alla soglia saranno assegnati al livello di background.
3. Si esegue la funzione *contour detection* per rilevare il contorno limite del provino e le sue coordinate per delimitare così la regione d'interesse (ROI) da analizzare nei successivi step.



Figura 16: Funzione di *contour detection* e definizione della ROI

```

#Find sample contours

#Image processing on rotated image
cutoff,otsu=cv2.threshold(resize_gray,0,255,cv2.THRESH_BINARY_INV+cv2.THRESH_OTSU)
opening = cv2.morphologyEx(otsu,cv2.MORPH_OPEN, kernel=np.ones(shape=(20,20)))

#Contours detection
contours,hierarchy=cv2.findContours(opening,cv2.RETR_CCOMP,cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
ext=[]
for i in range (len(contours)):
    if hierarchy[0][i][3]==-1:
        #cv2.drawContours(resize_image, contours, i, (0,255,0), 3)
        ext.append(i)
print('Number of external contours detected: ',len(ext),ext)

#Retrieve only the contour of the sample
contours_area=[]
for i in ext:
    area=cv2.contourArea(contours[i])
    contours_area.append(area)
max_area=max(contours_area)
max_index=contours_area.index(max_area)
border=contours[max_index]
print(border.shape)

#Draw contours and show them
contour_image = np.copy(resize_image)
cv2.drawContours(contour_image, border, -1, (255,0,0), 3)
show_img_cv('Sample contours',contour_image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

#Get coordinates for the region of interest
border=border.reshape(border.shape[0],border.shape[2])
x_border=border[:,0] #Get only the x coordinates of the sample contour

#Calculate Histogram
n, bins, patches = plt.hist(x=x_border, bins=50,alpha=0.7, rwidth=0.85) #Calculate the histograms of the x coordinates
sorted_n=np.sort(n) # "n" is the number of elements inside each bin
max1=sorted_n[-1] # # max1 take only the two biggest bins. The two biggest bins are related to the x coordinates of the sample
max2=sorted_n[-2]
ind1=np.where(n==max1)[0][0] #Get the indexes of the two biggest bins in the original numpy array
ind2=np.where(n==max2)[0][0]
x_max=np.max([int(bins[ind1]),int(bins[ind2])]) # Get the x coordinates of the two sample edges
x_min=np.min([int(bins[ind1+1]),int(bins[ind2+1])])

# Get the region of interest for further analysis
roi=resize_gray[:,x_min+5:x_max-5]
roi_color=resize_image[:,x_min+5:x_max-5]

roi_image = np.copy(resize_image)
cv2.rectangle(roi_image,pt1=(x_min,0),pt2=(x_max,roi_image.shape[0]),
              color=(0,255,0),thickness=5)
show_img_cv('Show ROI',roi_image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

Figura 17: Sezione 2 dello script

Si procede ora all'analisi della ROI appena ottenuta.

Si considera la ROI come una matrice le cui dimensioni corrispondono all'altezza e alla larghezza della regione d'interesse. La larghezza e la lunghezza vengono divisi rispettivamente in n_x e n_y intervalli, scomponendo quindi la ROI in più elementi della matrice. L'idea alla base dell'analisi è quella di far scorrere uno slider per ogni riga della matrice principale secondo gli n_y intervalli; per ogni riga, lo slider si muoverà secondo n_x step, calcolando di volta in volta la deviazione standard di ogni elemento. La deviazione standard rappresenta la misura della dispersione dei valori della matrice di pixel. Infine per ogni riga si calcola la media delle n_x deviazioni standard ottenute.

Per ogni riga si ottiene così un valore medio delle deviazioni standard, chiamato in questa sede *variation_global*. Si plottano tali valori lungo tutta la lunghezza della ROI e si otterrà la distribuzione del difetto lungo il provino.

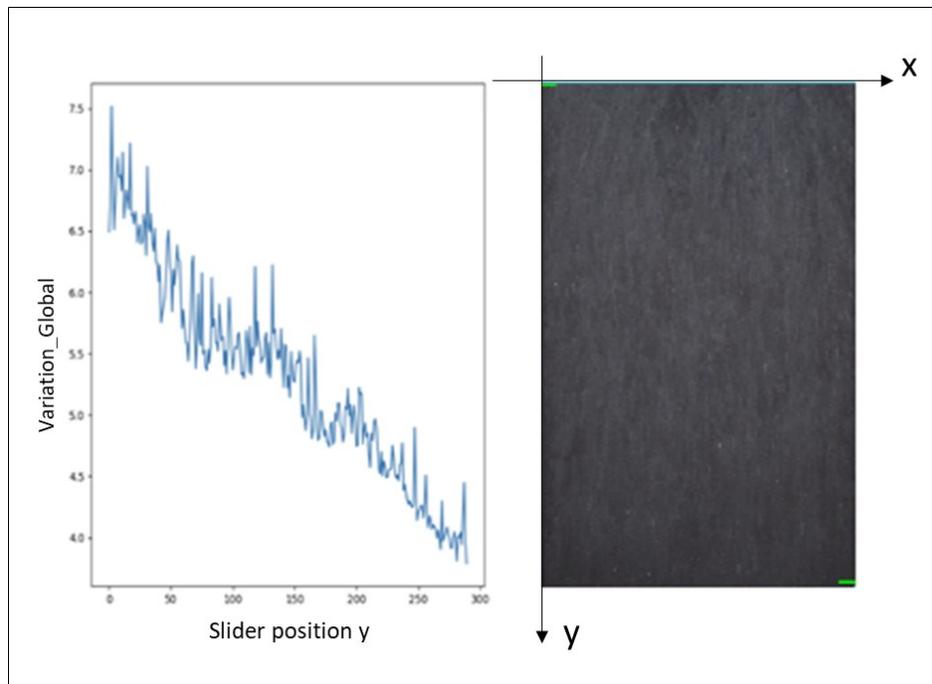


Figura 18: Esempio dell'analisi dell'andamento della variabile *Variation_global* in funzione della posizione in *y* dello slider

Come indice di difettosità globale del provino si considera infine il valore medio di questa distribuzione lungo l'asse y, ovvero il valore denominato *variation_mean*.

Ad ogni provino viene associato così un valore che ha lo scopo di quantificare globalmente la presenza del difetto e la sua intensità. Tale valore viene considerato quindi come il parametro di risposta su cui basare le analisi del seguente studio, che si affronta nei successivi capitoli.

```
n_y=300
n_x=20
w=roi.shape[1] #the width is the number of columns
h=roi.shape[0] #the height is the number of rows
dy=int(round(h/n_y))
dx=int(round(w/n_x))

variation_global=[]
y=0
for i in range(n_y-2):
    variation_list=[]
    x=0
    for j in range(n_x-1):
        slider=roi[y:y+dy,x:x+dx]
        std=np.std(slider)
        mean=np.mean(slider)
        variation=std
        variation_list.append(variation)
        x=x+dx
    variation_row=np.mean(np.array(variation_list))
    variation_global.append(variation_row)
    y=y+dy
variation_global=np.array(variation_global)

roi_copy=np.copy(roi_color)
cv2.rectangle(roi_copy,pt1=(0,0),pt2=(dx,dy),
              color=(0,255,0),thickness=3)
cv2.rectangle(roi_copy,pt1=(x,y),pt2=(x+dx,y+dy),
              color=(0,255,0),thickness=3)
show_img_cv('Slider_position',roi_copy)
```

```
#create a DataFrame
df=pd.DataFrame(data=variation_global,columns=['Variation_global'])
variation_mean=np.mean(df)

print(variation_mean)
```

Figura 19: Sezione 3 dello script

4. SET-UP SPERIMENTALE

Definiti i metodi e gli approcci per la costruzione del piano sperimentale e per le analisi d'immagine dei provini, ora si illustra nel dettaglio il set-up sperimentale adottato.

4.1 FASE DI STAMPAGGIO

Per lo stampaggio dei provini viene utilizzata la pressa Battenfeld HM 110 / 525H / 210 S messa a disposizione dal laboratorio.



Figura 20: Pressa d'iniezione Battenfeld

La geometria del provino non ha un'influenza diretta sullo studio, in quanto dalle osservazioni preliminari si evince che il difetto compare anche su geometrie diverse e più o meno complesse. Si utilizza quindi uno stampo dalla geometria semplice per facilitare le successive analisi.

Lo stampo utilizzato è costituito da una cavità rettangolare con un punto di iniezione a valle di una camera calda e situato in prossimità di un gate a ventaglio, impiegato per uniformare il flusso. È presente un inserto che realizza un foro circolare sul provino che non ha un'utilità per lo studio in esame ma viene utilizzato per facilitare l'aggrappaggio del provino nella piastra mobile e per favorirne quindi l'estrazione agile.

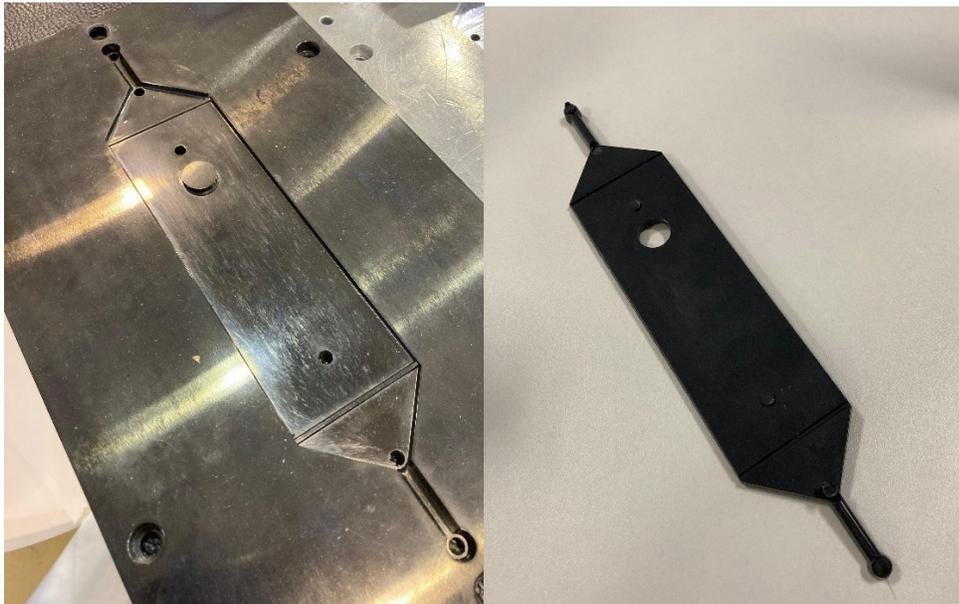


Figura 21: Piastra stampo ed esempio di provino utilizzato per lo studio

Si utilizza polipropilene da post consumo R-POMIX GS-PP prodotto dall'azienda di riciclo "Montello S.p.A", ottenuto dal riciclo di packaging proveniente dai rifiuti urbani. Di seguito si riportano le proprietà fisiche e chimiche fornite dall'azienda di produzione.

Physical and Chemical Properties

Information on basic physical and chemical properties

Form:	Flakes, Agglomerates or Granules
Colour:	gray various tone
Odour:	Typical of the product
pH Value:	Not applicable
Melting range:	50 - 170 °C
Ignition temperature:	> 360 °C
Evaporation rate:	Not applicable
Density:	< 1 g/cm ³
Solubility in water:	Insoluble
Self ignition:	Not self-igniting
Thermal decomposition:	> 250 °C
Explosion hazard:	Not explosive

Other information

Bulk density:	200 – 600 kg/m ³
---------------	-----------------------------

Figura 22: Proprietà fisiche e chimiche del materiale

Per rilevare la corretta influenza dei parametri sul difetto, è fondamentale mantenere costanti i parametri di processo di stampaggio non coinvolti nell'analisi. Si impostano e si fissano quindi quest'ultimi tramite l'interfaccia della pressa. Valutando i risultati di alcune stampe di prova e le relative curve di pressione derivanti dal sensore di pressione integrato nell'unità di iniezione, si identificano e si impostano i valori ottimali dei parametri di stampaggio specifici per la geometria e la tipologia di provino in esame.

In particolare, si imposta una pressione di impaccamento di 600 bar per la durata di 11s, un volume di dosaggio di 35 cmm³ iniettato con una portata di 30 cmm³/s. Si imposta la temperatura dello stampo a 40°C. Il materiale infine viene precedentemente posto nell'essiccatore ad una temperatura di 90°C per 1 ora in modo da eliminare l'umidità in eccesso.

4.2 FASE DI ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI

Successivamente allo stampaggio, è necessario fotografare i provini per le successive operazioni di image processing.

Si utilizza una fotocamera Nikon D5300 messa a disposizione dal laboratorio. Le impostazioni di acquisizione vengono mantenute costanti per tutte le immagini rilevate. In particolare, le immagini vengono acquisite con un'apertura del diaframma $f/4.2$, un tempo di esposizione di $1/2500$ sec e ISO 1600.



Figura 23: Fotocamera Nikon D5300 utilizzata per l'acquisizione delle immagini

Per garantire un buon processo di analisi d'immagine, la sua ripetibilità e validità, è fondamentale mantenere un ambiente controllato per l'acquisizione fotografica. Viene dunque adottata una camera oscura in cui posizionare il provino per l'acquisizione, dotata di due lampade a luci bianche a LED ad intensità regolabile che illuminano in modo omogeneo il provino. In questo modo è possibile evitare che la luce naturale non controllata e le relative ombreggiature influenzino le successive analisi. Infatti, quest'ultima si basa sulla variazione del colore in scala di grigi e di conseguenza eventuali ombre o esposizioni luminose differenti potrebbero compromettere la sperimentazione. Per cui è fondamentale garantire le stesse condizioni di acquisizioni, in termini di ambiente e impostazioni della macchina fotografica utilizzata.



Figura 24: Ambiente di acquisizione delle immagini

5. SPERIMENTAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI

Ora si illustra nel dettaglio la fase sperimentale e i relativi risultati.

5.1 FASE 1: SCREENING

Per prima cosa viene proposto un piano fattoriale di screening con l'obiettivo di individuare i fattori con influenza considerata significativa sul fenomeno in analisi.

I fattori presi in considerazione sono stati scelti sulla base degli studi e delle osservazioni qualitative preliminari descritte nei precedenti capitoli. In particolare si sceglie di esaminare l'effetto di quattro parametri: la temperatura, il tempo di residenza e la velocità di dosaggio del fuso nell'unità di iniezione e la Back Pressure.

Per ogni parametro si individuano due livelli, ovvero due valori che rappresentano solitamente gli estremi inferiori e superiori della finestra di stampaggio del prodotto. Si combinano quindi questi valori in un piano fattoriale completo, ossia in cui vengono identificati come punti sperimentali tutte le possibili combinazioni tra i livelli di ciascun parametro, con lo scopo di studiare anche le interazioni tra i diversi fattori.

Nella Tabella 1 si illustrano i livelli scelti per ciascun parametro.

Tabella 1: Livelli dei parametri della fase 1 di Screening

PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	LIVELLO 1	LIVELLO 2
T_{melt}	°C	215	245
t_{residence}	min	0	6
Back Press	bar	75	150
Vel dosaggio	mm/s	55	110

In questo caso, con 4 parametri e 2 livelli per ciascun parametro, si ottengono $2^4=16$ punti sperimentali.

Considerando la variabilità intrinseca del processo produttivo in analisi, si eseguono più prove per lo stesso punto sperimentale, ossia si stampano più provini con lo stesso set di parametri. In questo caso si ritiene opportuno eseguire tre ripetizioni per ogni punto, ottenendo quindi un totale di $3 \times 2^4=48$ prove.

Di seguito si illustrano i livelli e il piano sperimentale completo.

Tabella 2: Piano fattoriale della fase 1 di screening

Order	T melt	t residence	Back Press	vel dosaggio	Mean_Variance
1	215	0	75	55	3,52
1	215	0	75	55	3,62
1	215	0	75	55	3,46
2	215	0	75	110	3,60
2	215	0	75	110	3,73
2	215	0	75	110	3,69
3	215	0	150	55	3,45
3	215	0	150	55	3,61
3	215	0	150	55	3,63
4	215	0	150	110	3,76
4	215	0	150	110	3,66
4	215	0	150	110	3,60
5	215	6	75	55	4,13
5	215	6	75	55	4,22
5	215	6	75	55	4,24
6	215	6	75	110	4,69
6	215	6	75	110	4,54
6	215	6	75	110	4,29
7	215	6	150	55	4,32
7	215	6	150	55	4,52
7	215	6	150	55	4,52
8	215	6	150	110	4,47
8	215	6	150	110	4,36
8	215	6	150	110	4,36
9	245	0	75	55	3,68
9	245	0	75	55	3,90
9	245	0	75	55	3,84
10	245	0	75	110	3,70
10	245	0	75	110	3,76
10	245	0	75	110	3,83
11	245	0	150	55	4,64
11	245	0	150	55	4,21
11	245	0	150	55	4,64
12	245	0	150	110	4,25
12	245	0	150	110	3,80
12	245	0	150	110	4,15
13	245	6	75	55	4,96
13	245	6	75	55	5,11
13	245	6	75	55	5,19
14	245	6	75	110	5,13
14	245	6	75	110	5,14
14	245	6	75	110	4,92
15	245	6	150	55	4,96
15	245	6	150	55	5,34
15	245	6	150	55	5,13
16	245	6	150	110	5,07
16	245	6	150	110	5,18
16	245	6	150	110	4,92

5.1.1 ANALISI DEI RISULTATI

Si procede quindi all'analisi dei risultati ottenuti.

L'analisi verrà condotta tramite Minitab®, un software di analisi statistica dei dati. Di seguito si illustrano nello specifico le analisi effettuate.

In primo luogo si riportano i risultati relativa all'analisi dei residui. Tale analisi permette di verificare l'attendibilità statistica dei risultati ottenuti. [21] Per semplicità si studia la rappresentazione grafica proposta dal software.

Nel "Normal Probability Plot" si nota una distribuzione normale dei residui, in quanto essi si dispongono lungo una retta.

Nel grafico "Residual versus fitted values" notiamo una distribuzione randomica dei punti rispetto all'asse x, il che indica l'assenza di bias del modello di fitting. Questa distribuzione è considerata corretta e ottimale.

Lo stesso andamento randomico si nota anche nel grafico "Residual versus order" in cui valgono le considerazioni precedenti. Un andamento randomico dei residui in tale grafico indica che l'ordine di esecuzione delle prove sperimentali non influisce sui risultati, validando statisticamente i risultati ottenuti.

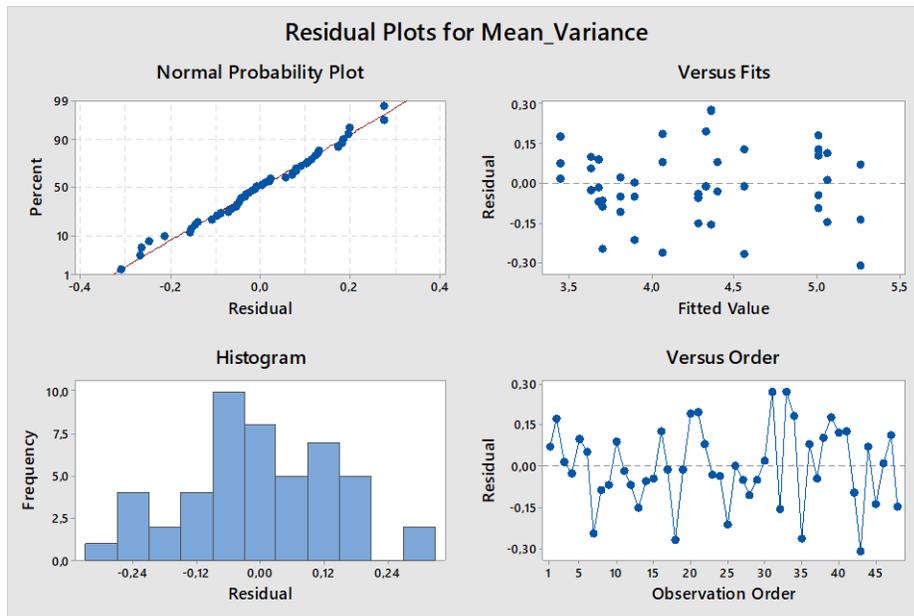


Figura 25: Grafici dei residui della fase 1 di Screening. a) Distribuzione normale, b) Grafico residui vs risposta c) Istogramma della frequenza dei residui, d) Grafico dei residui vs ordine delle prove

In secondo luogo si riportano i risultati dell'ANOVA (Analysis of Variance). Quest'ultima consiste in un insieme di tecniche statistiche utilizzate per lo studio e la modellazione della relazione tra i gruppi di dati di una sperimentazione, ossia quelli riferiti alle variabili di input e quelli riferiti alle variabili di risposta.

Nel caso in esame questo tipo di analisi permette di individuare i parametri di input del processo che hanno un'influenza statisticamente significativa sulla risposta, ossia sul difetto in analisi.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
T melt	1	3,7647	3,7647	148,86	0,000
t residence	1	10,0849	10,0849	398,77	0,000
Back Press	1	0,2768	0,2768	10,95	0,002
vel dosaggio	1	0,0009	0,0009	0,03	0,853
T melt*t residence	1	0,2322	0,2322	9,18	0,004
T melt*Back Press	1	0,1389	0,1389	5,49	0,025
T melt*vel dosaggio	1	0,2248	0,2248	8,89	0,005
t residence*Back Press	1	0,1276	0,1276	5,05	0,031
t residence*vel dosaggio	1	0,0240	0,0240	0,95	0,336
Back Press*vel dosaggio	1	0,1330	0,1330	5,26	0,028
Error	37	0,9357	0,0253		
Lack-of-Fit	5	0,3189	0,0638	3,31	0,016
Pure Error	32	0,6168	0,0193		
Total	47	15,9434			

Figura 26: Risultati dell'ANOVA della fase 1 di Screening

In particolare ci si focalizza sul “p-Value” o “valore di probabilità”. Questo valore statistico è considerato infatti un parametro di riferimento per capire se i risultati sperimentali ottenuti in una ricerca scientifica sono da considerarsi significativi oppure no. Se il p-value assume valori pari o inferiori al valore di soglia impostato 0.05, l'influenza del fattore sulla risposta è considerata significativa e viceversa.

Nel caso in esame questo valore ci conferma parzialmente l'ipotesi di partenza dello studio. Infatti come previsto i fattori temperatura del fuso, tempo di residenza, Back Pressure e le loro interazioni hanno un'influenza considerata significativa sul fenomeno; mentre al contrario la velocità di dosaggio risulta ininfluente. Questa prima analisi ci permette di escludere quindi questo parametro dai successivi studi.

Successivamente ci si pone l'obiettivo di individuare la rilevanza effettiva dei parametri rimasti in gioco, così da porre la concentrazione su quelli maggiormente influenti. Si pone l'attenzione quindi sul diagramma di Pareto, che riporta graficamente i risultati dell'analisi precedente.

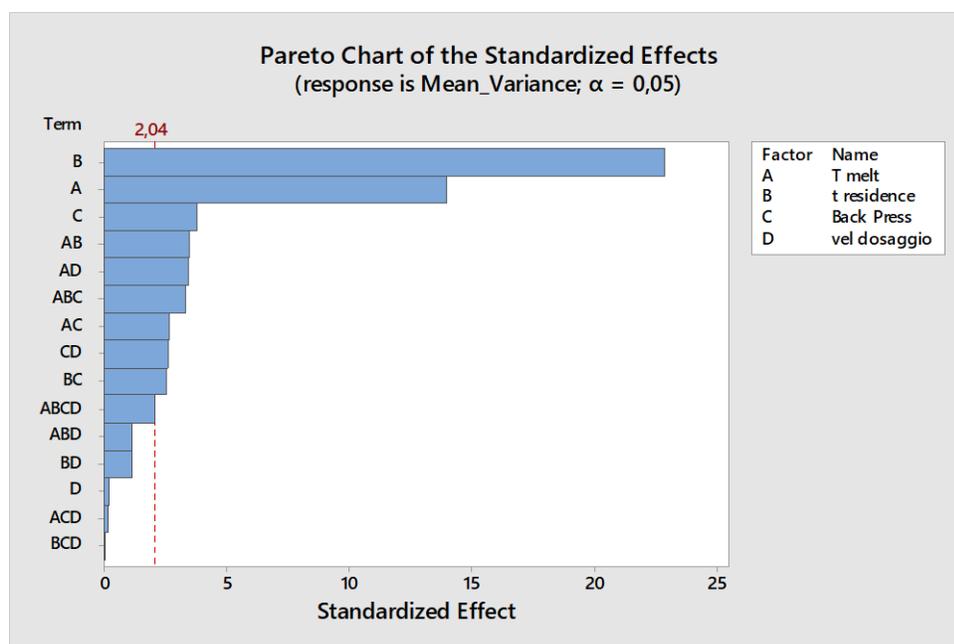


Figura 27: Diagramma di Pareto della fase 1 di Screening

Tale grafico permette di visualizzare chiaramente come la temperatura del fuso e il tempo di residenza abbiano un'influenza notevolmente più rilevante rispetto agli altri parametri significativi.

Tali risultati possono essere visualizzati anche mediante altri strumenti grafici, come riportato di seguito. La pendenza elevata delle rette nel “Main Effect Plot” indica l’elevata capacità del parametro di influenzare la risposta. Una retta piatta è invece sinonimo di un effetto più blando del fattore sulla risposta, come è possibile notare osservando il grafico relativo alla velocità di dosaggio.

Da questi risultati quindi, si elabora il secondo piano sperimentale che prevede di studiare in modo più approfondito l’influenza dei due parametri più significativi.

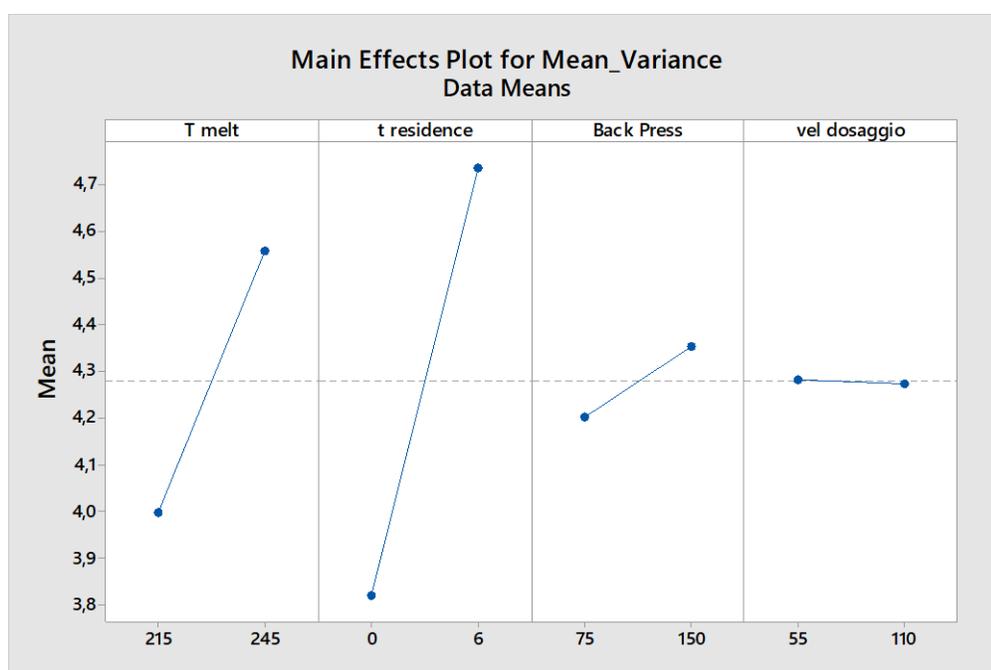


Figura 28: Effetto dei parametri sulla media della risposta "Mean_Variance"

5.2 FASE 2: MODELLAZIONE

Il secondo piano sperimentale prevede la variazione dei fattori che si sono dimostrati i più influenti sulla comparsa del difetto durante la fase di screening, ovvero temperatura del fuso e tempo di residenza. Questo studio ha l'obiettivo di dettagliare l'effetto dei due parametri significativi sul difetto in esame al fine di sviluppare un modello matematico che leghi la variazione di tali parametri al parametro utilizzato per identificare la presenza e l'intensità delle "sfiamature" sul provino.

Per approfondire lo studio precedente si decide di far variare i fattori su 4 livelli, per dettagliare l'intervallo scelto nelle analisi di screening. Di conseguenza si ottengono nuovamente 16 punti sperimentali. Anche in questo caso valgono le considerazioni statistiche fatte precedentemente e si decide di eseguire tre ripetizioni per ogni combinazione di fattori, ottenendo così un totale di 48 prove di stampaggio.

I parametri di Back Pressure e velocità di dosaggio variati nella fase precedente, vengono impostati ora ad un valore costante di 110bar e 80mm/s rispettivamente. In Tabella 3 si riportano i livelli dei parametri considerati nel nuovo piano fattoriale.

Tabella 3: Livelli dei parametri della fase 2 di Modellazione

PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	LIVELLO 1	LIVELLO 2	LIVELLO 3	LIVELLO 4
T_{melt}	°C	215	225	235	245
$t_{residence}$	min	0	2	4	6

Di seguito si riporta il piano sperimentale completo con i relativi valori di output del codice di elaborazione dei provini.

Tabella 4: Piano fattoriale della fase 2 di Modellazione

Order	T melt	t residence	Mean_variance
1	215	0	4,20
1	215	0	4,17
1	215	0	4,19
2	215	2	4,44
2	215	2	4,38
2	215	2	4,46
3	215	4	4,97
3	215	4	4,78
3	215	4	4,82
4	215	6	5,33
4	215	6	5,21
4	215	6	5,31
5	225	0	4,55
5	225	0	4,38
5	225	0	4,39
6	225	2	4,70
6	225	2	4,75
6	225	2	4,49
7	225	4	5,29
7	225	4	5,31
7	225	4	4,92
8	225	6	5,42
8	225	6	5,41
8	225	6	5,16
9	235	0	4,62
9	235	0	4,45
9	235	0	4,73
10	235	2	5,23
10	235	2	5,44
10	235	2	5,22
11	235	4	5,17
11	235	4	5,01
11	235	4	5,41
12	235	6	5,28
12	235	6	5,37
12	235	6	5,37
13	245	0	5,23
13	245	0	5,22
13	245	0	5,28
14	245	2	5,27
14	245	2	5,50
14	245	2	5,34
15	245	4	5,44
15	245	4	5,54
15	245	4	5,37
16	245	6	5,36
16	245	6	5,37
16	245	6	5,42

5.2.1 ANALISI DEI RISULTATI

Si eseguono solo alcune delle analisi analoghe a quelle del primo studio. Infatti l'obiettivo di questo secondo piano sperimentale è diverso: in questo caso i fattori considerati serviranno a produrre un modello che lega la risposta ai due parametri considerati, scelti sulla base delle analisi precedenti e ritenuti quindi i più significativi.

Si riportano i risultati dell'ANOVA. In questo caso i fattori considerati si possono ritenere entrambi significativi, con un p-value inferiore al valore soglia definito di 0.05. Questo conferma le conclusioni a cui si è giunti a monte dell'analisi del primo piano fattoriale.

```
Factor Information

Factor      Levels  Values
T melt      4      215; 225; 235; 245
t residence  4      0; 2; 4; 6

Analysis of Variance

Source              DF  Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Model                15  7,8465  0,52310  38,17    0,000
  Linear              6  6,4758  1,07930  78,75    0,000
    T melt            3  3,0056  1,00187  73,10    0,000
    t residence        3  3,4702  1,15673  84,40    0,000
  2-Way Interactions  9  1,3707  0,15230  11,11    0,000
    T melt*t residence  9  1,3707  0,15230  11,11    0,000
Error                 32  0,4386  0,01371
Total                 47  8,2851
```

Figura 29: Risultati dell'ANOVA della fase 2 di Modellazione

L' "Interaction plot" in questo caso risulta essere di particolare interesse. Dal grafico si può notare come all'aumentare del tempo di residenza i punti sperimentali a temperature differenti si avvicinino ad un unico valore elevato.

Questo dimostra che per tempi di residenza elevati, l'effetto della temperatura sul difetto tende a diminuire. In altre parole, il tempo di residenza diventa il fattore dominante del fenomeno quando assume valori particolarmente elevati. A livello pratico questo implica che, se nel processo incorrono dei tempi di residenza elevati, la presenza del difetto è rilevabile a qualsiasi temperatura del fuso utilizzata.

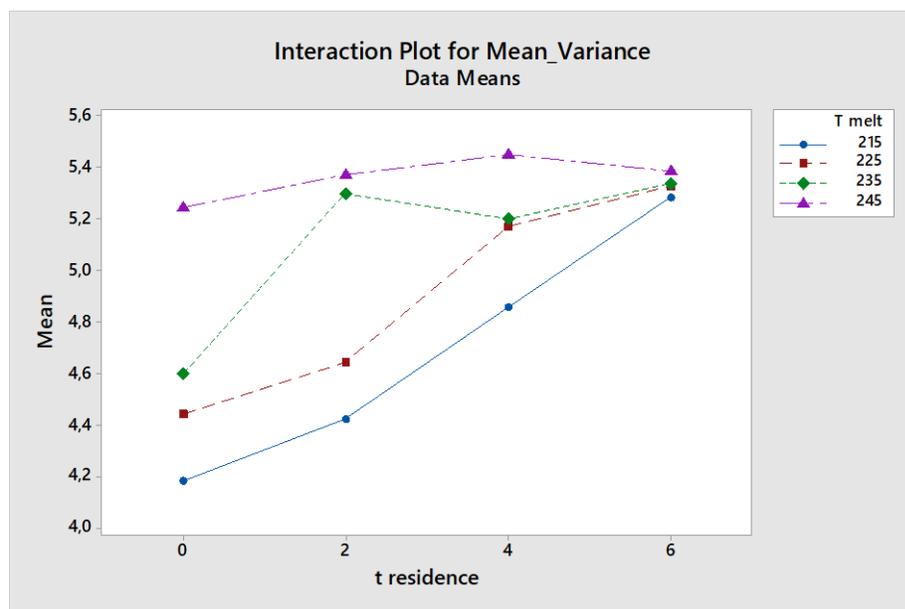


Figura 30: Grafico delle interazioni tra i fattori della fase 2 di Modellazione

5.2.2 MODELLO DI REGRESSIONE

Ora si procede allo sviluppo e all'analisi del modello di regressione lineare. Tale modello permette di legare i parametri alla variabile di risposta scelta per identificare la presenza e l'intensità del difetto.

Per la creazione del modello verranno utilizzati i dati ottenuti dal secondo piano fattoriale e importati sul software Minitab®.

Si utilizza la funzione di fit dei dati che applica il metodo dei minimi quadrati per la creazione del modello di best fit, rappresentato da una funzione lineare. Tale metodo si propone di minimizzare la somma dei quadrati delle distanze tra i dati sperimentali e i punti della curva che rappresenta la funzione stessa.

In Figura 31 si riporta l'equazione di regressione ottenuta e i risultati relativi all'analisi.

```
Analysis of Variance
Source          DF  Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Regression      3  7,2650  2,42167  104,45   0,000
  T melt        1  3,1717  3,17171  136,80   0,000
  t residence    1  1,0382  1,03816   44,78   0,000
  T melt*t residence 1  0,8658  0,86577   37,34   0,000
Error           44  1,0201  0,02318
  Lack-of-Fit   12  0,5815  0,04846    3,54   0,002
  Pure Error    32  0,4386  0,01371
Total           47  8,2851

Model Summary
          S    R-sq  R-sq (adj)  R-sq (pred)
0,152264  87,69%   86,85%      86,15%

Coefficients
Term          Coef  SE Coef  T-Value  P-Value  VIF
Constant     -4,192   0,757    -5,53    0,000
T melt        0,03847  0,00329   11,70    0,000    2,80
t residence    1,355    0,202    6,69    0,000  424,20
T melt*t residence -0,005372  0,000879 -6,11    0,000  426,00

Regression Equation
Mean_variance = -4,192 + 0,03847 T melt + 1,355 t residence - 0,005372 T melt*t residence
```

Figura 31: Risultato e Analisi della regressione

Si pone attenzione soprattutto ai p-value relativi ai coefficienti e al valore di R-sq (coefficiente di determinazione).

Come detto nelle precedenti analisi, un p-value inferiore al valore di soglia dello 0.05 indica che la relazione espressa con tali coefficienti tra le variabili predittive e la risposta è statisticamente significativa, come nel caso in esame.

Il valore R-sq esprime invece la capacità del modello di fitting di predire in modo accurato i valori sperimentali. Questo valore viene quindi utilizzato per determinare la qualità del fitting dei dati sperimentali. Nel caso in esame si ha un R-sq di 0.88, che suggerisce una buona correlazione tra le variabili di input e la risposta.

Si giunge così ad un'equazione di regressione che collega i parametri influenti all'intensità del difetto, giungendo così all'obiettivo dello studio.

6. CONCLUSIONI

Nel presente studio si è prodotto un modello di regressione lineare in grado di collegare la presenza e l'intensità del difetto ai parametri di processo dello stampaggio a iniezione che risultano significativamente influenti sul fenomeno in analisi.

Come punto di partenza, si è partiti con una fase di osservazione costituita da un'analisi qualitativa del fenomeno e della letteratura con lo scopo individuare le possibili cause della comparsa del difetto. In particolare, si procede con un'analisi del materiale e l'elaborazione di alcune stampate di prova. Tali azioni preliminari hanno portato all'individuazione dei parametri di processo su cui incentrare la successiva fase sperimentale. I parametri individuati sono la temperatura del fuso, il tempo di residenza, la back pressure e la velocità di dosaggio del materiale.

Si è dunque proceduto con la fase sperimentale, composta da una prima fase di screening e una seconda di modellazione. Il componente utilizzato per lo studio è un provino planare rettangolare dalla geometria semplice, disponibile in laboratorio. Il materiale utilizzato è un polipropilene riciclato da post consumo.

Nella prima fase di screening si procede all'esecuzione di un piano fattoriale completo in cui vengono fatti variare i quattro fattori scelti su due livelli estremi che rappresentano la finestra di stampaggio del provino scelto. Come grandezza di confronto si è scelto il parametro di output di un codice Python, creato per l'analisi delle immagini acquisite fotografando i provini stampati in condizioni e ambiente controllato. Tale parametro rappresenta quantitativamente e globalmente l'intensità del difetto sulla superficie del provino.

I risultati della fase di screening hanno mostrato l'influenza preponderante di due dei parametri considerati, ovvero la temperatura del fuso e il tempo di residenza, escludendo invece l'influenza di Back Pressure e Velocità di dosaggio.

Nella seconda fase sperimentale quindi, si esamina e si approfondisce l'effetto dei due parametri significativi individuati, con lo scopo di creare un modello di regressione che li metta in diretta correlazione con il parametro di output scelto per la descrizione del fenomeno.

Si realizza quindi un secondo piano fattoriale completo, in cui si variano i due parametri scelti su quattro livelli, in modo da dettagliare e completare le analisi precedenti.

Attraverso gli strumenti forniti dal software di analisi, si procede quindi alla realizzazione del modello. Si effettua poi l'analisi dell'equazione di regressione ottenuta, che evidenzia una buona correlazione tra le variabili di input e la risposta, giungendo così all'obiettivo dello studio.

In conclusione, il caso studio propone una metodologia efficace per quantificare la correlazione tra il processo dello stampaggio a iniezione e la qualità superficiale del prodotto stampato. Tale metodo è implementato a partire dallo specifico componente, processo e difetto riscontrato ma offre un modello di approccio idoneo anche per contesti diversi, in cui si ha l'esigenza di correlare un difetto superficiale ai parametri che regolamentano il processo produttivo.

Inoltre, tale metodologia rappresenta un possibile strumento per valutare, prevedere o correggere l'effetto delle proprietà del materiale proveniente da riciclo post consumo, ossia di un parametro incontrollabile del processo in analisi, al fine di garantire la qualità del prodotto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «Plastics-the Facts 2022 OCTOBER 2022».
- [2] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, R. A. Shanks, M. Combe, e T. Collister, «Mechanical reprocessing of polyolefin waste: A review», *Polym Eng Sci*, vol. 55, n. 12, pagg. 2899–2909, dic. 2015, doi: 10.1002/pen.24182.
- [3] A. M. Amadei, L. Rigamonti, e S. Sala, «Exploring the EU plastic value chain: A material flow analysis», pagg. 921–3449, 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107105.
- [4] «PROGRAMMA SPECIFICO DI PREVENZIONE 2023-2027».
- [5] J. C. Prata, A. L. P. Silva, T. R. Walker, A. C. Duarte, e T. Rocha-Santos, «COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics», *Environ Sci Technol*, vol. 54, n. 13, pagg. 7760–7765, lug. 2020, doi: 10.1021/ACS.EST.0C02178.
- [6] «YEARS OF MAKING PLASTICS CIRCULAR».
- [7] C. W. Tallentire e B. Steubing, «The environmental benefits of improving packaging waste collection in Europe», *Waste Management*, vol. 103, pagg. 426–436, feb. 2020, doi: 10.1016/J.WASMAN.2019.12.045.
- [8] «Corepla - Consorzio Nazionale per la Raccolta, il Riciclo e il Recupero degli imballaggi in Plastica». Consultato: 9 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.corepla.it/riciclo-imballaggi>
- [9] A. Jansson, K. Möller, e T. Gevert, «Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling—mechanical properties», *Polym Degrad Stab*, vol. 82, n. 1, pagg. 37–46, gen. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(03)00160-5.

- [10] J. Majumdar, F. Cser, M. C. Jollands, e R. A. Shanks, «Thermal properties of polypropylene post-consumer waste (PP PCW)», *J Therm Anal Calorim*, vol. 78, n. 3, pagg. 849–863, gen. 2005, doi: 10.1007/S10973-004-0453-0.
- [11] A. Alsabri, F. Tahir, e S. G. Al-Ghamdi, «Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region», *Mater Today Proc*, pagg. 2245–2251, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.574.
- [12] P. S. Garcia, C. H. Scuracchio, e S. A. Cruz, «Effect of residual contaminants and of different types of extrusion processes on the rheological properties of the post-consumer polypropylene», *Polym Test*, vol. 32, n. 7, pagg. 1237–1243, ott. 2013, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2013.08.002.
- [13] N. M. Mehat e S. Kamaruddin, «Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method», *J Mater Process Technol*, vol. 211, n. 12, pagg. 1989–1994, dic. 2011, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2011.06.014.
- [14] J. Gim e L. S. Turng, «A review of current advancements in high surface quality injection molding: Measurement, influencing factors, prediction, and control», *Polym Test*, vol. 115, pag. 107718, nov. 2022, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2022.107718.
- [15] Joseph. Howse, *OpenCV Computer Vision with Python*. Packt Publishing, 2013.
- [16] J. Gim, H. Yang, e L. S. Turng, «Transfer learning of machine learning models for multi-objective process optimization of a transferred mold to ensure efficient and robust injection molding of high surface quality parts», *J Manuf Process*, vol. 87, pagg. 11–24, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.055.
- [17] X. Zhou, Y. Zhang, T. Mao, e H. Zhou, «Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process», 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.038.

- [18] M. Gall, P. J. Freudenthaler, J. Fischer, e R. W. Lang, «Characterization of composition and structure–property relationships of commercial post-consumer polyethylene and polypropylene recyclates», *Polymers (Basel)*, vol. 13, n. 10, mag. 2021, doi: 10.3390/polym13101574.
- [19] S. Kashyap e D. Datta, «Process parameter optimization of plastic injection molding: a review», *International Journal of Plastics Technology*, vol. 19, n. 1, pagg. 1–18, giu. 2015, doi: 10.1007/s12588-015-9115-2.
- [20] S. R. Shukla, E. A. Lofgren, e S. A. Jabarin, «Effects of injection-molding processing parameters on acetaldehyde generation and degradation of poly(ethylene terephthalate)», *Polym Int*, vol. 54, n. 6, pagg. 946–955, giu. 2005, doi: 10.1002/pi.1794.
- [21] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2017. [Online]. Disponibile su: https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Montgomery,+Douglas+C.,+Design+and+analysis+of+experiments,+Hoboken,+NJ+:+John+Wiley+%26+Sons,+Inc.,+2017&ots=X7y5rZRO55&sig=ulQRe-4JKQl3tRL7qoySWMRg8Cs&redir_esc=y#v=onepage&q=Montgomery%2C%20Douglas%20C.%2C%20Design%20and%20analysis%20of%20experiments%2C%20Hoboken%2C%20NJ%20%3A%20John%20Wiley%20%26%20Sons%2C%20Inc.%2C%202017&f=false

INDICE FIGURE E TABELLE

FIGURA 1: DISTRIBUZIONE DELLA PRODUZIONE GLOBALE DI PLASTICA PER TIPOLOGIA (FONTE: PLASTICS EUROPE)	1
FIGURA 2: DOMANDA DEI CONVERTITORI EUROPEI DI PLASTICA PER TIPOLOGIA DI POLIMERO (FONTE: PLASTICS EUROPE)	2
FIGURA 3: DOMANDA DEI CONVERTITORI EUROPEI DI MATERIE PLASTICHE PER APPLICAZIONE E TIPOLOGIA	3
FIGURA 4: VARIAZIONE PERCENTUALE DEL MFI IN FUNZIONE DEL NUMERO DI CICLI DI RIPROCESSO	4
FIGURA 5: DISTRIBUZIONE DELL'UTILIZZO GLOBALE DI PLASTICA PER APPLICAZIONE (FONTE: PLASTICS EUROPE)	5
FIGURA 6: SCHEMA DELL'ECONOMIA CIRCOLARE PER I RIFIUTI PLASTICI	6
FIGURA 7: CONTENUTO DI PLASTICA RICICLATA DA POST CONSUMO NEI NUOVI PRODOTTI	7
FIGURA 8: SISTEMA CONAI-COREPLA PER LA GESTIONE DEI RIFIUTI PLASTICI	10
FIGURA 9: CICLO DELLO STAMPAGGIO A INIEZIONE	15
FIGURA 10: DIFETTI SUPERFICIALI TIPICI DELLO STAMPAGGIO A INIEZIONE: A) BAVA, B) LINEE DI GIUNZIONE, C) TIGER STRIPES, D) RITIRO, E) JETTING, F) POROSITÀ, G) MACCHIE	18
FIGURA 11: COME SI PRESENTA IL DIFETTO SUL PROVINO	21
FIGURA 12: CURVA DSC DEL MATERIALE	22
FIGURA 13: SCHEMA PIANO FATTORIALE COMPLETO, K: NUMERO FATTORI, N: NUMERO LIVELLI	30
FIGURA 14: SELEZIONE DELL'AREA DI INTERESSE	32
FIGURA 15: SEZIONE 1 DELLO SCRIPT	33
FIGURA 16: FUNZIONE DI CONTOUR DETECTION E DEFINIZIONE DELLA ROI	34
FIGURA 17: SEZIONE 2 DELLO SCRIPT	35
FIGURA 18: ESEMPIO DELL'ANALISI DELL'ANDAMENTO DELLA VARIABILE VARIATION_GLOBAL IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE IN Y DELLO SLIDER	36
FIGURA 19: SEZIONE 3 DELLO SCRIPT	37
FIGURA 20: PRESSA D'INIEZIONE BATTENFELD	38
FIGURA 21: PIASTRA STAMPO ED ESEMPIO DI PROVINO UTILIZZATO PER LO STUDIO	39
FIGURA 22: PROPRIETÀ FISICHE E CHIMICHE DEL MATERIALE	40
FIGURA 23: FOTOCAMERA NIKON D5300 UTILIZZATA PER L'ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI	42
FIGURA 24: AMBIENTE DI ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI	43
FIGURA 25: GRAFICI DEI RESIDUI DELLA FASE 1 DI SCREENING. A) DISTRIBUZIONE NORMALE, B) GRAFICO RESIDUI VS RISPOSTA C) ISTOGRAMMA DELLA FREQUENZA DEI RESIDUI, D) GRAFICO DEI RESIDUI VS ORDINE DELLE PROVE	48
FIGURA 26: RISULTATI DELL'ANOVA DELLA FASE 1 DI SCREENING	49
FIGURA 27: DIAGRAMMA DI PARETO DELLA FASE 1 DI SCREENING	50
FIGURA 28: EFFETTO DEI PARAMETRI SULLA MEDIA DELLA RISPOSTA "MEAN_VARIANCE"	51
FIGURA 29: RISULTATI DELL'ANOVA DELLA FASE 2 DI MODELLAZIONE	54

FIGURA 30: GRAFICO DELLE INTERAZIONI TRA I FATTORI DELLA FASE 2 DI MODELLAZIONE	55
FIGURA 31: RISULTATO E ANALISI DELLA REGRESSIONE	56
TABELLA 1: LIVELLI DEI PARAMETRI DELLA FASE 1 DI SCREENING	45
TABELLA 2: PIANO FATTORIALE DELLA FASE 1 DI SCREENING	46
TABELLA 3: LIVELLI DEI PARAMETRI DELLA FASE 2 DI MODELLAZIONE	52
TABELLA 4: PIANO FATTORIALE DELLA FASE 2 DI MODELLAZIONE	53