



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Caratterizzazione delle proprietà meccaniche di un manicotto in lega di alluminio pressocolata

Relatore: Ch.mo Prof. Paolo Ferro

Laureando: Andrea Cenghialta

Anno Accademico 2015/2016

Sommario

La tesi ha come obiettivo la valutazione delle proprietà meccaniche di un manicotto, in lega di alluminio pressocolata, della gamba telescopica di un treppiede per videocamere e macchine fotografiche.

Il lavoro si concentra sull'identificazione delle cause che ne provocano la rottura, a seguito dell'applicazione di carichi statici e ciclici ed il confronto delle prestazioni di due leghe secondarie diverse, come alternativa a quella primaria attualmente utilizzata.

Nella prima parte viene effettuata un'analisi numerica agli elementi finiti, con lo scopo di valutare le condizioni di carico del componente in esercizio e determinare le zone con maggior concentrazione delle tensioni. Da questa risulta che la geometria del manicotto presenta una zona critica, in corrispondenza della variazione di sezione dovuta ad una discontinuità geometrica nella parte soggetta al carico di esercizio.

Dai risultati ottenuti si sviluppa la seconda parte, sperimentale, che consiste in prove comparative di rottura statica ed a carichi ciclici su campioni delle diverse leghe.

Contestualmente, sugli stessi viene effettuata un'investigazione dei difetti, derivanti dal processo di produzione, tramite controlli non distruttivi ed analisi delle superfici di frattura.

Dalle prove sperimentali risulta che, allo stato *as cast*, i componenti in lega primaria presentano prestazioni superiori rispetto a quelli prodotti in lega secondaria, ma a seguito di un trattamento di stabilizzazione, le proprietà meccaniche di questi ultimi migliorano considerevolmente, mantenendo un'ottima funzionalità del componente.

Si osserva inoltre come le prestazioni dei manicotti, indipendentemente dalla lega, siano fortemente influenzate dalla concentrazione e disposizione dei difetti, che siano essi porosità o film d'ossido, sulla sezione resistente del manicotto.

Nella parte finale, basandosi sui risultati dell'analisi numerica iniziale, si definisce una correlazione tra i risultati delle prove sperimentali e la presenza dei difetti.

INDICE

1	Introduzione	1
2	Le leghe di alluminio	3
2.1	Leghe da fonderia	5
3	Il processo produttivo	9
3.1	La pressocolata	9
3.1.1	Pressocolata in camera fredda	10
4	Difetti nei getti pressocolati	13
4.1	Difetti da ritiro – Macroporosità	15
4.2	Difetti da gas – Porosità per intrappolamento di aria	16
4.3	Difetti di riempimento - Gocce fredde	16
4.4	Fasi indesiderate – Inclusioni non metalliche	17
4.5	Difetti superficiali da gas – Blisters	18
4.6	Eccesso di materiale – Bava	18
5	Il manicotto	19
6	Analisi agli elementi finiti	25
6.1	Libreria dei materiali	25
6.1.1	Modello del materiale 44100	27
6.1.2	Modello del materiale 5086	32
6.2	Analisi di convergenza della mesh	33
6.2.1	Analisi preliminare	33
6.2.2	Analisi di convergenza	38
6.3	Analisi definitiva	41
6.3.1	Modello e mesh	41
6.3.2	Contatti	43
6.3.3	Carichi e vincoli	47
6.3.4	Risultati	51
6.3.5	Confronto delle tre leghe	57

6.4	Analisi estensimetrica	59
6.4.1	Preparazione del componente	60
6.4.2	Risultati	61
6.4.3	Confronto con l'analisi FEM	64
7	Classificazione ai Raggi X.....	67
8	Caratterizzazione delle leghe utilizzate	69
8.1	Composizione chimica.....	69
8.2	Struttura metallografica.....	71
8.2.1	Composti infragilenti	74
8.2.2	Banda superficiale di alluminio.....	75
8.3	Difetti	76
9	Prove Statiche.....	81
9.1	Strumentazione e struttura di prova	81
9.2	Preparazione del componente	84
9.3	Curve caratteristiche delle prove.....	84
9.4	Risultati	88
9.4.1	Confronto dei risultati nei due lati.....	88
9.4.2	Lato B.....	91
10	Prove a carichi ciclici	95
10.1	Strumentazione e struttura di prova	95
10.2	Curve caratteristiche delle prove.....	96
10.3	Risultati	98
11	Tattamento termico su leghe 47100.....	101
11.1	Influenza del tempo di trattamento	101
11.2	Prove sperimentali.....	108
11.2.1	Prove statiche.....	108
11.2.2	Prove a carichi ciclici.....	111
11.3	Verifica della funzionalità.....	113

12	Correlazione tra prestazioni e difetti	117
12.1	Influenza dei difetti sulla resistenza	117
12.2	Il Fattore di Penalità.....	119
12.3	Prove statiche	122
12.4	Prove a carichi ciclici	122
13	Conclusioni	125
14	Bibliografia	127
15	Ringraziamenti.....	129

1 Introduzione

Lino Manfrotto + Co Spa è un'azienda Vicentina leader mondiale nell'ideazione, produzione e distribuzione di supporti ed accessori professionali per la fotografia, l'illuminazione e l'intrattenimento. Tra i suoi prodotti sono presenti diverse linee di treppiedi, per videocamere e macchine fotografiche, sviluppati con materiali innovativi quali leghe di alluminio, materiali compositi e tecnopolimeri.

L'azienda, orientata al miglioramento, è particolarmente attenta ai nuovi sviluppi del mercato ed alle esigenze del cliente finale, avendo come primo obiettivo la soddisfazione di quest'ultimo. Il lavoro esposto di seguito deriva dalla volontà dell'impresa di ottimizzare uno dei suoi articoli per adeguarlo alle peculiarità di solidità ed affidabilità che caratterizzano i suoi prodotti.

L'oggetto di studio della tesi è un manicotto, in lega di alluminio, realizzato tramite pressocolata, utilizzato in una serie di treppiedi dell'azienda.

In Figura 1.1(a), è rappresentato un treppiede, modello 290 Xtra, mentre in Figura 1.1(b) il particolare di una gamba, nel quale è visibile il manicotto in esame.

Questo componente assolve alla funzione di fissaggio delle sezioni telescopiche delle gambe del sostegno.



Figura 1.1 (a): treppiede Manfrotto. (b): particolare di una gamba con il manicotto.

I classici treppiedi Manfrotto hanno gambe telescopiche costituite da tre o quattro sezioni, in base all'ingombro che si vuole ottenere quando il supporto viene chiuso. All'estremità di ogni sezione è presente un manicotto che, durante l'utilizzo da parte del cliente, viene aperto e chiuso attraverso l'apposita leva per regolare la lunghezza della gamba.

Ciò si traduce nella necessità, da parte del componente, di resistere a carichi ciclici per una vita pari alla vita utile dell'intero sostegno; un valore ammissibile è 5000 cicli di apertura-chiusura della leva.

Il lavoro che segue si concentra sul comportamento meccanico del manicotto più piccolo, relativo all'ultima sezione della gamba. Questo perché, in alcuni casi, presenta una vita a fatica non compatibile con quella del treppiede.

Un primo obiettivo dell'analisi è l'identificazione delle cause dell'anticipata rottura, che possono essere imputate ad un errore nella geometria, alla presenza di particolari difetti nel getto o alla concomitanza di entrambi gli effetti.

Si considera inoltre la possibilità di sostituire la lega di alluminio attualmente utilizzata; una lega primaria EN AC-44100, con una secondaria EN AC-47100 o una EN AC-47100 modificata con 250 ppm di stronzio. Tale cambiamento ha come obiettivo sia l'aumento della vita a fatica del manicotto, sia, grazie alla maggiore concentrazione di ferro, un'agevolazione dell'estrazione dei getti dallo stampo, con una minore usura dello stesso. La lega attualmente utilizzata porta infatti ad un deterioramento della superficie degli stampi, che si ripercuote sulla finitura superficiale del manicotto. Questo provoca poi una scarsa adesione della vernice, che in alcuni casi tende a sfogliarsi.

2 Le leghe di alluminio

Le leghe di alluminio, grazie alle loro caratteristiche di leggerezza, resistenza meccanica e alla corrosione, trovano largo impiego in numerosi ambiti dell'ingegneria.

Da diverso tempo, in applicazioni dove è richiesta una buona resistenza specifica a temperature non superiori ai 300°C, queste leghe stanno sostituendo i materiali storicamente utilizzati, quali acciai e ghise.

La buona duttilità e la bassa temperatura di fusione di questi materiali rendono convenienti tecnologie di deformazione plastica e di fonderia non praticabili con altri metalli.

L'alluminio puro, grazie all'ottima resistenza alla corrosione, conducibilità termica ed elettrica viene utilizzato in termodinamica, elettronica e per la produzione di svariati accessori per la cucina. Questo materiale però è caratterizzato da scarse proprietà meccaniche; per incrementarle, in ambiti strutturali, viene alligato con altri elementi.

Il processo produttivo dell'alluminio parte dalla bauxite. Da questo minerale si ricava, tramite il processo Bayer, l'ossido di alluminio e successivamente, con il processo elettrolitico Hall-Héroult, si ottiene l'alluminio puro. La purezza è attorno al 99.5% e può essere portata al 99.99% con ulteriori processi elettrolitici.

La sigla P-A seguita dalla purezza, identifica l'alluminio commercialmente puro. L'alluminio così prodotto è definito alluminio primario.

L'alluminio secondario è invece ricavato dal riciclo di rottami e sfridi di lavorazione. Questi vengono separati da metalli ferrosi, vetro e plastica, pretrattati per eliminare deposizioni superficiali e successivamente inviati ad un forno che si occupa della fusione e separazione da inquinanti ancora presenti.

Sebbene l'efficienza dei processi Bayer e Hall-Héroult sia migliorata nel corso degli anni, la produzione di alluminio primario richiede ancora una quantità di energia di molto superiore rispetto al secondario, ma permette di ottenere un prodotto con purezza maggiore.

L'alluminio, puro o alligato è destinato principalmente a lavorazioni di deformazione plastica. Le leghe derivanti da alluminio secondario, maggiormente inquinate, vengono invece utilizzate per processi di fonderia.

Uno dei principali inquinanti nelle leghe di alluminio è il ferro. La presenza di questo elemento dà origine a composti ternari Al-Si-Fe caratterizzati da una forma aciculare [1], che penalizza le proprietà meccaniche. Una concentrazione inferiore allo 0.5% è caratteristica delle leghe primarie, mentre una quantità attorno all'1%, tipica delle leghe nella pressocolata, riduce l'aggressività del materiale nei confronti dell'acciaio degli stampi. Evitando l'adesione metallo-stampo, limita l'usura di quest'ultimo. Inoltre, grazie all'incremento della resistenza meccanica a caldo dei getti, l'estrazione dagli stampi viene migliorata [2].

La classificazione convenzionalmente utilizzata per le leghe di alluminio è riportata in Figura 2.1 [3], esse vengono suddivise in base alla tecnologia di lavorazione:

- Leghe da deformazione plastica
- Leghe da fonderia

Un'ulteriore classificazione, per le leghe da deformazione plastica, riguarda la possibilità o meno di essere trattate termicamente.

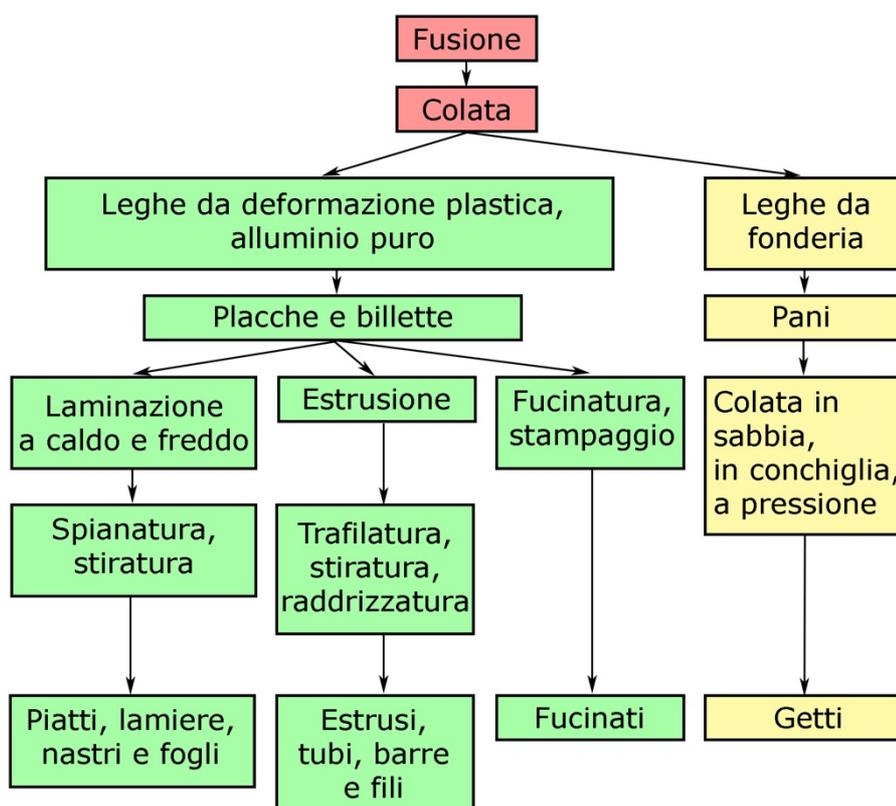


Figura 2.1 Classificazione delle leghe di alluminio.

2.1 Leghe da fonderia

Sono numerose le leghe da fonderia disponibili. La designazione europea, definita dalla normativa UNI EN 1708-1:2003, è riportata in Figura 2.2.

Ogni sigla è definita da:

- Prefisso EN.
- Due lettere di cui la prima è A per l'alluminio, mentre la seconda indica la forma del prodotto (pane per rifusione, getto o lega madre).
- Un trattino.
- Cinque cifre, di cui la prima indica il principale elemento in lega, la seconda il gruppo della lega, la terza è arbitraria mentre le ultime due sono generalmente zero.

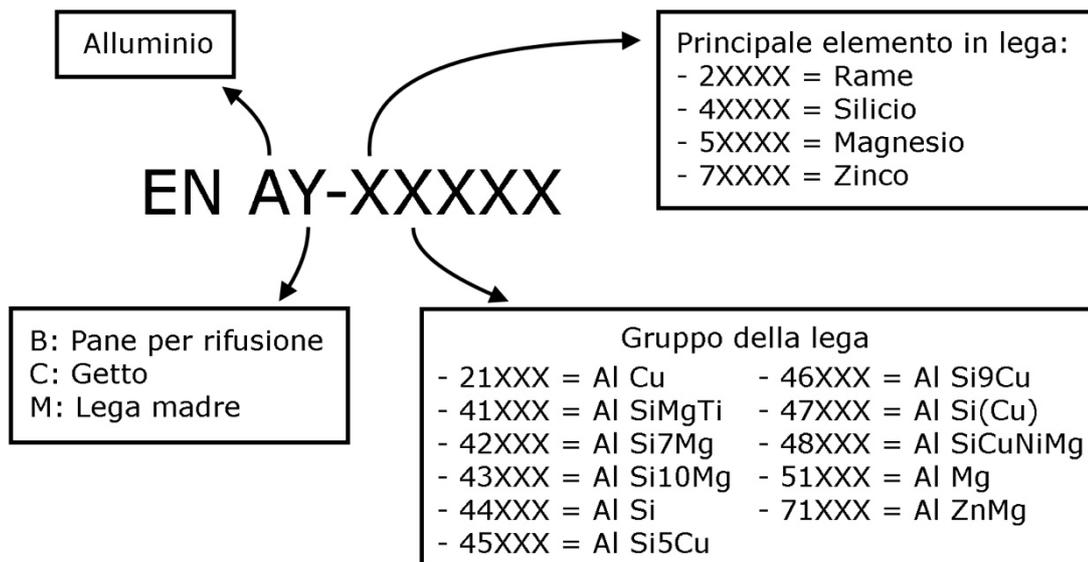


Figura 2.2 Designazione delle leghe da fonderia secondo UNI EN 1780-1:2003.

Ulteriori classificazioni sono in uso. La designazione statunitense prevede l'utilizzo di due o tre cifre delle quali la prima indica la famiglia della lega, mentre le altre due una particolare composizione.

Nell'ampio panorama delle leghe da fonderia, le famiglie più utilizzate sono:

- Al – Cu
- Al – Cu – Si
- Al – Si
- Al – Mg

Tra queste, la più diffusa è la Alluminio – Silicio.

Il silicio conferisce un'ottima colabilità, elevata resistenza alla corrosione, buona saldabilità ed una diminuzione del peso specifico e del ritiro volumetrico durante la solidificazione.

In Figura 2.3 è rappresentato il diagramma di stato della lega Alluminio – Silicio.

La lega ha una solubilità totale allo stato liquido ed una parziale allo stato solido.

Il limite di solubilità del silicio nell'alluminio è pari ad 1.65% a 577°C ed alla stessa temperatura forma un eutettico con 11.7% di silicio. Concentrazioni attorno a questo valore, circa 12-13%, sono quelle che danno le caratteristiche migliori in termini di processabilità e prestazioni meccaniche.

Quantità superiori di silicio aumentano ulteriormente la fluidità, quindi migliorano la colabilità, ma provocano un degrado delle proprietà meccaniche.

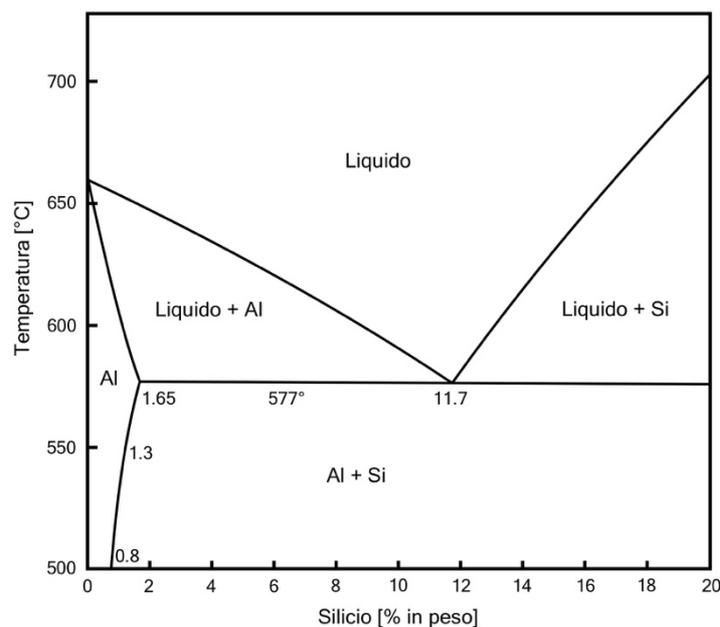


Figura 2.3 Diagramma di stato Alluminio – Silicio.

Come è possibile osservare in figura 2.4 (a), la struttura di solidificazione delle leghe ipoeutettiche è costituita da fase α , in bianco, formata da alluminio con silicio in soluzione solida, circondate da fase eutettica costituita da lamelle alternate di alluminio e silicio. Ciò è dovuto al passaggio durante la solidificazione nell'area bifasica "Liquido + Al", in questo intervallo solidificano le prime dendriti di alluminio, definito alluminio primario. La struttura delle leghe eutettiche prevede invece la sola presenza di fase eutettica, Figura 2.4(b). Mentre in Figura 2.4 (c) si può osservare la struttura di una lega ipereutettica con bacchette di silicio primario, solidificato nell'intervallo bifasico "Liquido + Si", immerse in una matrice di fase eutettica.

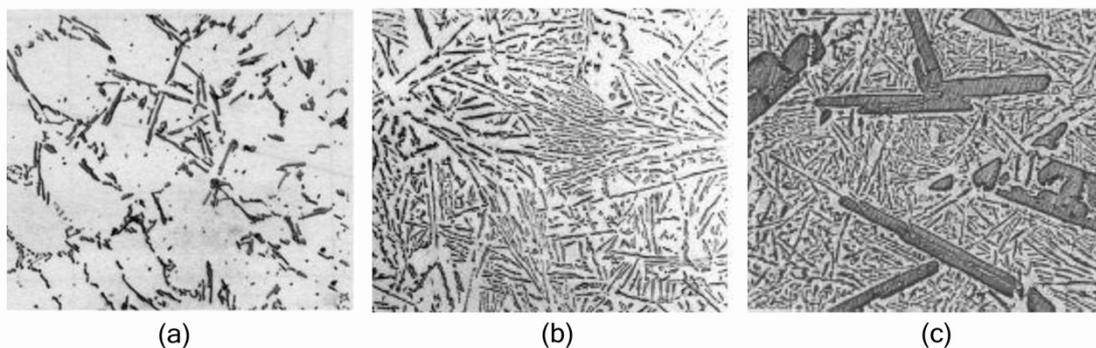


Figura 2.4 Micrografia di un lega ipoeutettica (a), eutettica (b), ipereutettica (c).

Queste strutture, concordi con il diagramma di stato, si ritrovano solamente in getti in lega binaria Al-Si solidificati lentamente, come successione di stati di equilibrio, alla pressione atmosferica.

Nelle leghe utilizzate in ambito industriale sono invece presenti anche alliganti minori ed elementi inquinanti. Inoltre i processi di produzione prevedono solidificazioni veloci. In particolare, nel caso della pressocolata, la solidificazione avviene con un notevole sottoraffreddamento e sotto l'azione del pistone di iniezione che mantiene in pressione il liquido. Queste condizioni alterano quelli che sono i presupposti di validità del diagramma di stato, infatti aumentando la velocità di solidificazione, si ha un abbassamento della temperatura dell'eutettico ed uno spostamento verso valori di concentrazione di silicio maggiori.

Come risultato si hanno strutture miste, diverse rispetto a quelle che si avrebbero in condizioni di equilibrio, che inoltre variano all'interno dello stesso getto a seconda della velocità di solidificazione delle varie zone.

La forma allungata ed appuntita delle bacchette di silicio della fase eutettica, presente in tutte le leghe di alluminio con composizioni prossime all'eutettico, può essere modificata in una più globulare, tramite il processo metallurgico definito appunto "modifica" [4,5]. Questa operazione consiste nell'aggiungere alla lega opportune quantità di sodio, calcio, stronzio o antimonio che andando ad agire sul meccanismo di solidificazione alterano il processo di crescita del silicio eutettico, senza influenzare la fase α .

Ulteriori elementi producono questo effetto, ma solo sodio e stronzio hanno un'azione modificante forte a basse concentrazioni. Lo stronzio viene preferito per una maggiore facilità di manipolazione e stoccaggio rispetto al sodio.

Una morfologia più arrotondata del silicio migliora le proprietà meccaniche della lega, ma si deve prestare attenzione al trattamento del bagno a seguito della modifica, infatti con discrete quantità di elementi modificanti, alte temperature del fuso ed elevate permanenze in forno si può incrementare l'assorbimento di idrogeno, la formazione di ossidi e di porosità.

Questi effetti negativi possono annullare gli effetti benefici apportati dalla modifica [6]. In Tabella 2.1 sono riportati gli effetti dei principali elementi alliganti nelle leghe Al-Si.

<i>Fe</i>	È solitamente presente come impurezza con concentrazioni non superiori all'1%. Origina composti ternari Al-Si-Fe infragilenti. Nella pressocolata riduce l'adesione della lega con gli stampi.
<i>Si</i>	Migliora la colabilità, riduce i ritiri da solidificazione, ma peggiora la lavorabilità alle macchine utensili.
<i>Mn Cr Co</i>	Con concentrazioni pari a quelle del ferro ne modificano la morfologia dei composti annullandone gli effetti dannosi. Con concentrazioni dell'1% aumentano le proprietà ad alte temperature.
<i>Na Ca Sr Sb</i>	Elementi modificatori della morfologia del silicio.
<i>Ti B Zr</i>	In piccole quantità vengono utilizzati per il raffinamento del grano cristallino.
<i>Ni</i>	Un aggiunta al 2.5% aumenta le proprietà meccaniche alle elevate temperature.
<i>Mg</i>	L'aggiunta di magnesio con concentrazioni tra 0.2-0.5% permette di effettuare trattamenti termici di solubilizzazione e tempra allo scopo di formare composti Mg_2Si .
<i>P</i>	Con percentuale tra 0.01-0.03% rifinisce la forma delle particelle di silicio in leghe ipereutettiche.
<i>Cu</i>	Migliora le proprietà meccaniche, la lavorabilità, ma riduce la resistenza a corrosione.

Tabella 2.1 Effetti degli elementi alliganti nelle leghe Al-Si.

3 Il processo produttivo

Il processo produttivo è l'insieme delle fasi attraverso le quali il componente finale prende forma. Le proprietà meccaniche e l'aspetto estetico di quest'ultimo sono fortemente influenzate dalla tipologia e dalle caratteristiche del processo, che devono essere attentamente analizzate affinché il prodotto soddisfi le specifiche tecniche definite in fase progettuale.

3.1 La pressocolata

La pressocolata è un processo di fonderia largamente utilizzato in ambito industriale per la produzione di componenti di piccole e medie dimensioni in svariati ambiti: automotive, meccanica generale, ingegneria civile ed elettronica.

È possibile operare con diversi tipi di metalli, benché sia particolarmente utilizzata per formare prodotti in lega di alluminio e magnesio.

Il processo consiste nell'iniettare il metallo fuso, tramite un pistone, all'interno di uno stampo permanente ed estrarlo al termine della solidificazione.

L'automazione raggiunta permette una grande versatilità ed un'elevata produttività. A queste caratteristiche si aggiungono la buona finitura superficiale e l'accuratezza dimensionale del getto in uscita dallo stampo, che fanno della pressocolata uno dei processi di produzione economicamente più vantaggiosi.

Ciò avviene nel caso in cui i parametri di processo e la preparazione del bagno siano attentamente controllati, solo così infatti è possibile limitare l'insorgenza di difetti nel getto ed ottenere un prodotto di buona qualità.

I processi di pressocolata possono essere suddivisi in due categorie: pressocolata in camera calda ed in camera fredda [7]. Nel primo caso il sistema di iniezione si trova all'interno del crogiolo, mentre nel secondo caso i due sono separati.

Nelle macchine per la pressocolata in camera calda il sistema di iniezione è quindi costantemente in contatto con il metallo fuso. Per evitare un'eccessiva usura degli organi si utilizza questa tecnologia solamente per i metalli con bassa temperatura di fusione, quali piombo e zinco.

Per le leghe di alluminio e magnesio si preferisce la configurazione in camera fredda, il sistema di iniezione è meno esposto alla temperatura del metallo fuso, con la conseguenza però di un minor controllo su quest'ultima.

3.1.1 Pressocolata in camera fredda

Nel processo di pressocolata in camera fredda, come rappresentato in Figura 3.1, il metallo fuso viene introdotto nella camera di iniezione da un crogiolo e successivamente viene spinto tramite un pistone, ad elevata velocità e pressione, all'interno della cavità dello stampo, mantenuto chiuso dall'azione di una pressa.

La pressione viene mantenuta durante tutta la fase di solidificazione, al termine della quale il pistone si ritrae, lo stampo si apre ed il getto viene estratto.

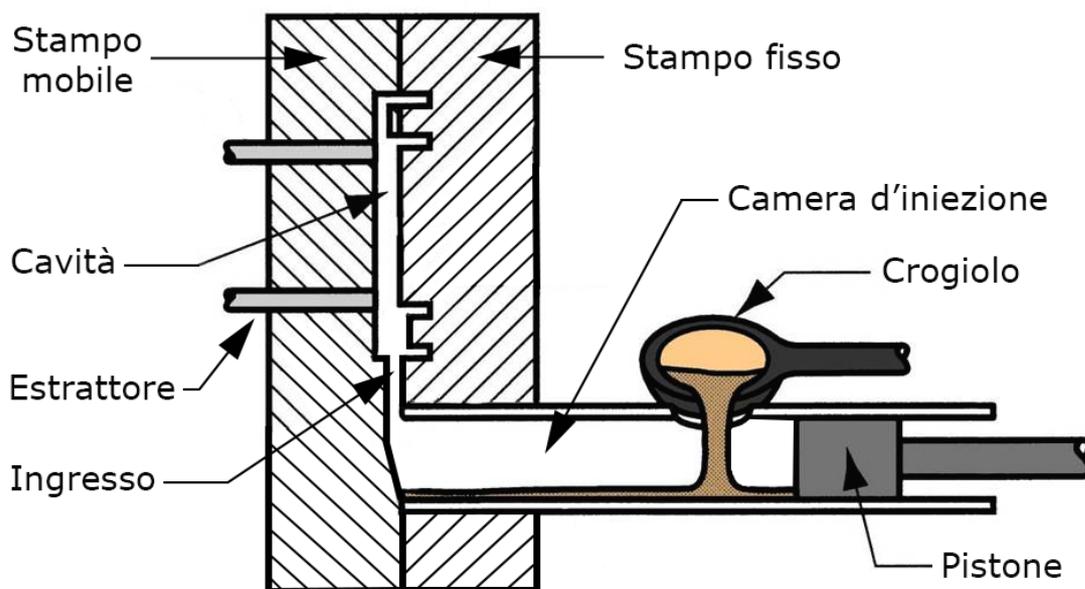


Figura 3.1 Schema della pressocolata in camera fredda.

Lo stampo è suddiviso in due parti, una fissa connessa alla macchina ed una mobile azionata dalla pressa. Prima di iniziare un ciclo di stampaggio, avviene la preparazione degli stampi. Ciò consiste nella lubrificazione degli stessi con soluzioni che hanno l'obiettivo di migliorare lo scorrimento del metallo e creare una barriera che faciliti l'estrazione del getto al termine del processo.

Terminata la procedura preliminare, ha inizio il processo. Questo può essere suddiviso in tre fasi, durante le quali variano la pressione e la velocità del pistone. Il loro andamento è rappresentato in Figura 3.2.

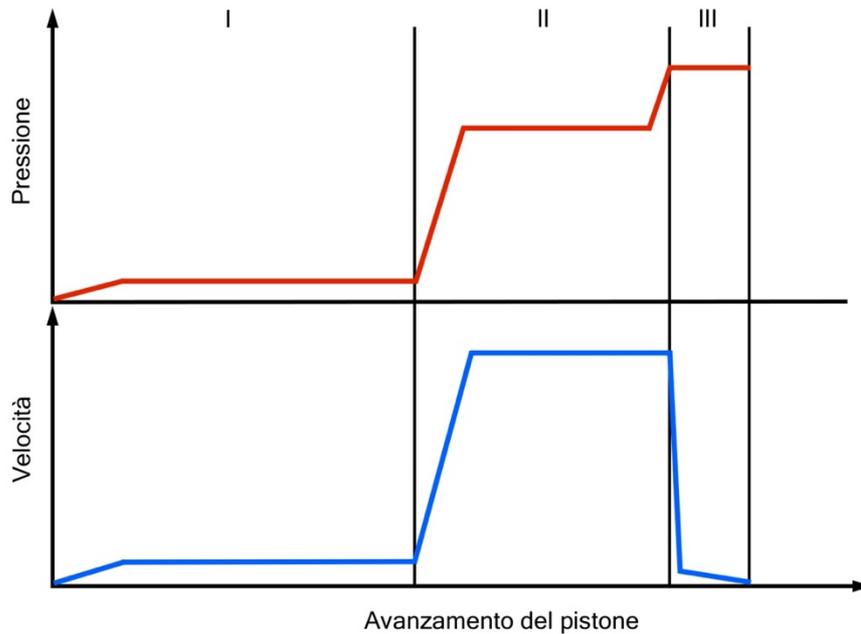


Figura 3.2 Andamento della pressione e velocità durante il ciclo di colata.

La prima fase consiste in un avanzamento lento del pistone, l'obiettivo è spingere l'aria presente nella camera, all'interno della cavità e farla uscire attraverso gli appositi sfiati. La velocità in questa fase non dev'essere eccessiva per evitare di intrappolare troppa aria nella lega. La pressione che si genera è quella necessaria a vincere la resistenza del gas nel passaggio attraverso le uscite.

Quando il metallo raggiunge l'ingresso dello stampo c'è il passaggio alla seconda fase. La velocità del pistone aumenta per assicurare il completo riempimento dello stampo ed evitare inneschi di solidificazioni, mentre la pressione subisce un incremento a causa della maggiore resistenza allo scorrimento offerta dal liquido. Ciò prosegue finché la cavità viene riempita, la pressione aumenta ulteriormente e la velocità cala bruscamente. Ha quindi inizio la terza fase, di solidificazione, durante la quale il pistone mantiene in pressione il metallo per contrastare i ritiri volumetrici. Fondamentale è che il fronte di solidificazione propaghi dall'estremità dello stampo fino all'ingresso, in questo modo è possibile continuare a fornire metallo liquido allo stampo e ridurre al minimo le cavità da ritiro. Ciò si ottiene con opportuni canali di raffreddamento dello stampo o utilizzando,

se necessario, dei punzoni (“squeeze pins”) che comprimono il metallo nelle zone della cavità con spessori maggiori.

La potenzialità del processo in termini di produttività è molto elevata, in particolare se confrontata con le altre tecnologie di fonderia. Di contro i costi di investimento e manutenzione di macchine e stampi sono sostenibili solo con elevati volumi produttivi. Non ultimo, i getti ottenuti per pressocolata presentano una quantità di difetti superiore rispetto agli altri processi, cosa che limita le prestazioni, l’affidabilità e la possibilità di operare trattamenti termici.

In Figura 3.3 è rappresentato il getto multi-impronta, in uscita dalla macchina, per la realizzazione dei manicotti. Nel getto è visibile l’attacco di colata, ovvero la parte di metallo solidificata a contatto con il pistone, i canali di colata che congiungono la camera di iniezione con i manicotti, gli otto manicotti ed all’estremità di quest’ultimi, dalla parte opposta all’ingresso del liquido, i pozzetti di lavaggio. In questi ultimi finisce il primo metallo, ricco di ossidi, porosità e inquinato dal lubrificante.

A seguito della formatura, i manicotti si separano dai canali di colata. I primi vengono rifiniti alle macchine utensili e successivamente verniciati, mentre gli attacchi con le relative ramificazioni vengono inviati nuovamente alla fonderia per essere riciclati.

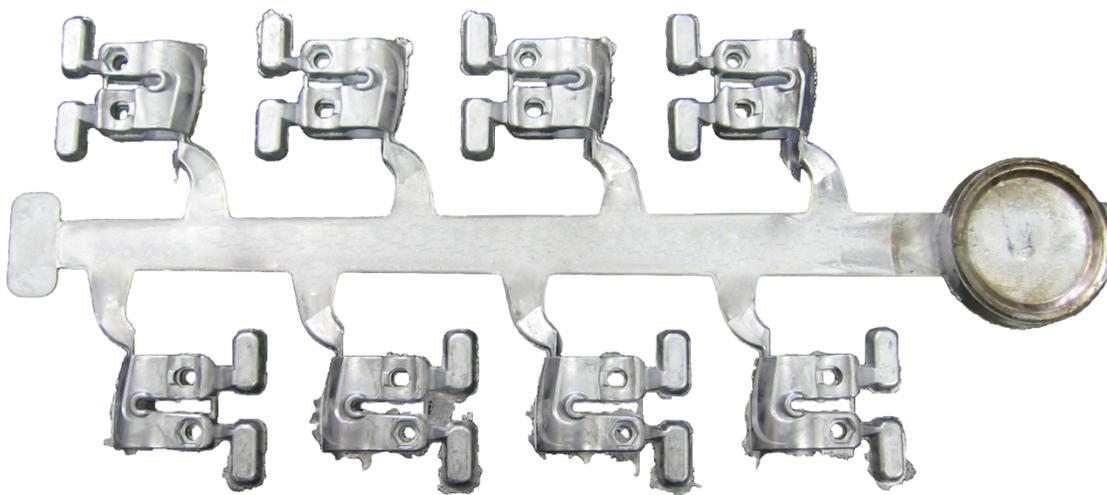


Figura 3.3 Grappolo di manicotti in uscita dalla macchina di pressocolata.

4 Difetti nei getti pressocolati

La necessità di ridurre i tempi ciclo, per aumentare l'utilizzo delle macchine e la produttività, nell'ambito della pressocolata, si scontra con l'insorgenza, nei getti, di numerose tipologie di difetti. Questi compromettono le proprietà dei materiali e di conseguenza dei prodotti finali, che possono presentare prestazioni non soddisfacenti o disomogenee.

Una corretta progettazione degli stampi, unita ad un buon controllo dei parametri del processo durante tutte le fasi, permette di ottimizzare il sistema, bilanciando gli obiettivi di produttività e qualità del prodotto.

La presenza di difetti nei getti pressocolati è una caratteristica intrinseca di questa tipologia di processo di formatura. L'elevata velocità di riempimento dello stampo e la sua complessità geometrica comportano una turbolenza nel deflusso del metallo; la permanenza del metallo fuso nella camera di iniezione anticipa la solidificazione di alcuni composti e i cicli termici a cui sono soggetti gli stampi ne compromettono l'integrità. Tutti questi sono fattori che inevitabilmente comportano la formazione di difetti. Non essendo possibile eliminarne completamente la presenza, risulta fondamentale una valutazione degli stessi ed un'analisi delle cause che permetta un'azione correttiva sul sistema.

In accordo con [8], i difetti possono essere classificati su tre livelli.

Il primo livello consiste in una suddivisione in base a morfologia e posizione:

- Interni (Figura 4.1)
- Superficiali (Figura 4.2)
- Geometrici (Figura 4.3)

La seconda ne considera l'origine metallurgica, ad esempio si possono avere difetti da ritiro, difetti da gas, ecc.

La terza invece definisce nel dettaglio il tipo di difetto. Si vede come uno stesso fenomeno metallurgico, ad esempio l'intrappolamento di gas, possa provocare diversi difetti, interni e superficiali.

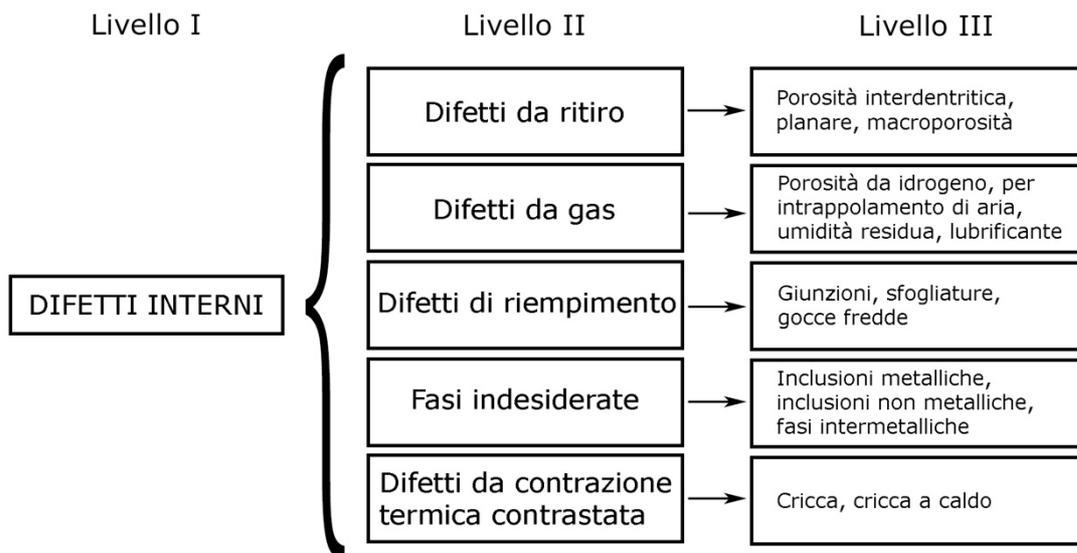


Figura 4.1 Classificazione dei difetti interni secondo AIM.

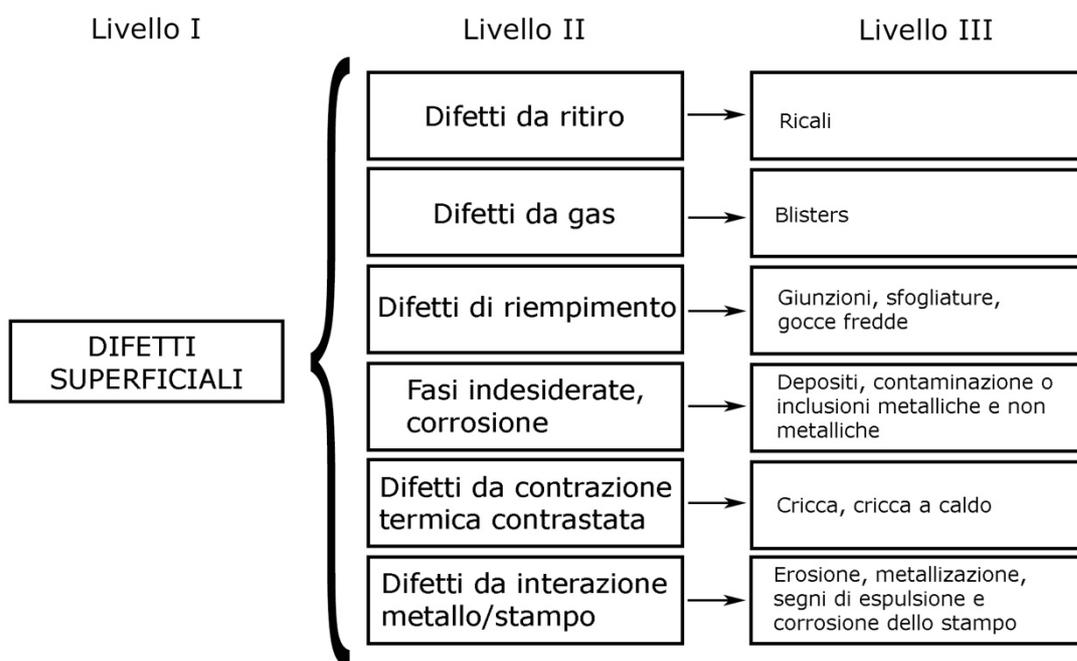


Figura 4.2 Classificazione dei difetti superficiali secondo AIM.

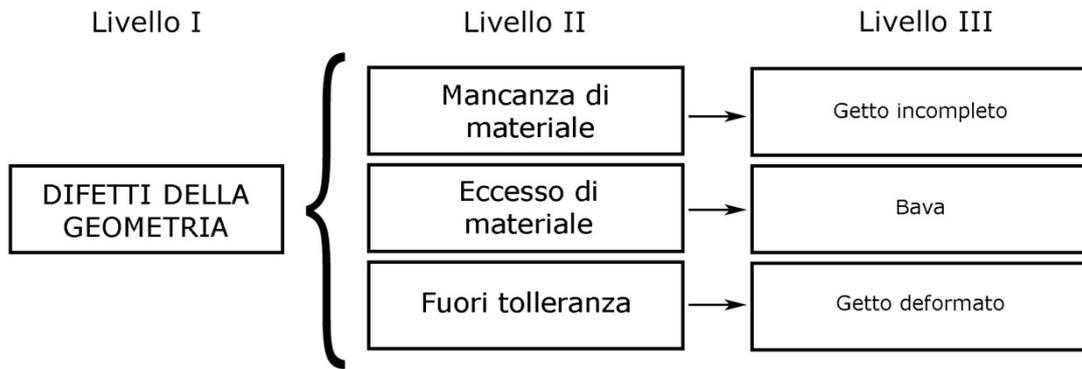


Figura 4.3 Classificazione dei difetti della geometria secondo AIM.

Di seguito vengono riportati e brevemente descritti i difetti più diffusi [9].

4.1 Difetti da ritiro – Macroporosità

Una macroporosità è una porosità dovuta ad un ritiro volumetrico durante la solidificazione. In questa fase il metallo, passando dallo stato liquido a quello solido diminuisce il suo volume. Questo fenomeno si verifica nei punti dello stampo, distanti dall'attacco di colata ed in cui lo spessore della cavità è superiore rispetto alla media. Queste zone, solidificando per ultime, rimangono isolate dal resto dello stampo e non sono quindi raggiungibili da ulteriore materiale che potrebbe contrastare il ritiro.

In Figura 4.4 è rappresentata la micrografia (b) di una porzione della zona cerchiata nella radiografia (a) nella quale è visibile una macroporosità.

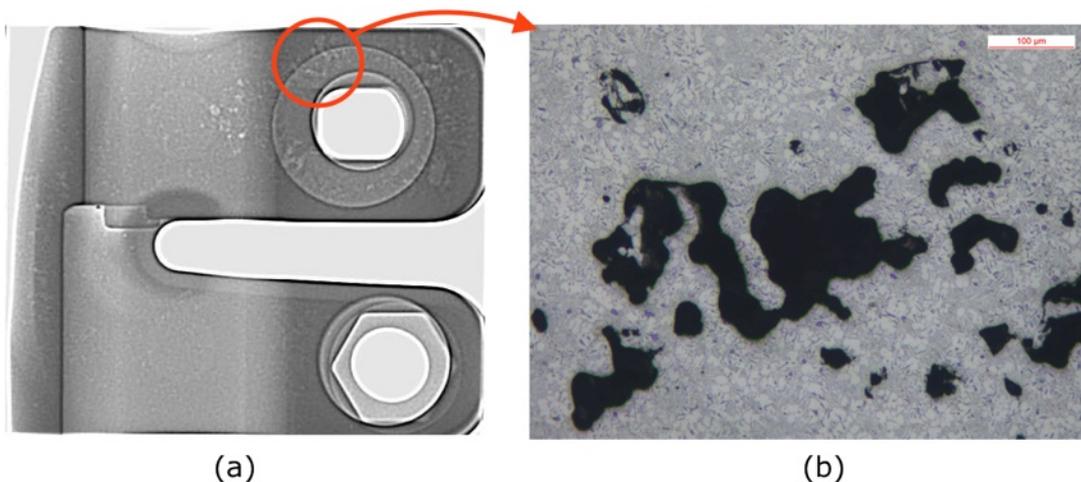


Figura 4.4 Macroporosità su di un manicotto.

4.2 Difetti da gas – Porosità per intrappolamento di aria

Le porosità da intrappolamento di aria sono i difetti più comuni riscontrabili nei getti pressocolati. L'aria viene intrappolata nel liquido durante l'attraversamento della camera di iniezione, i canali di colata o la cavità dello stampo, a causa della turbolenza del flusso del metallo. Le bolle d'aria rimangono nel liquido e durante la solidificazione formano le porosità, di forma sferica o ellissoidale. In figura 4.5 sono cerchiati degli esempi nella radiografia (a), mentre alcune porosità, di cui una di notevole dimensione, è evidente nella micrografia (b) della sezione di un manicotto.

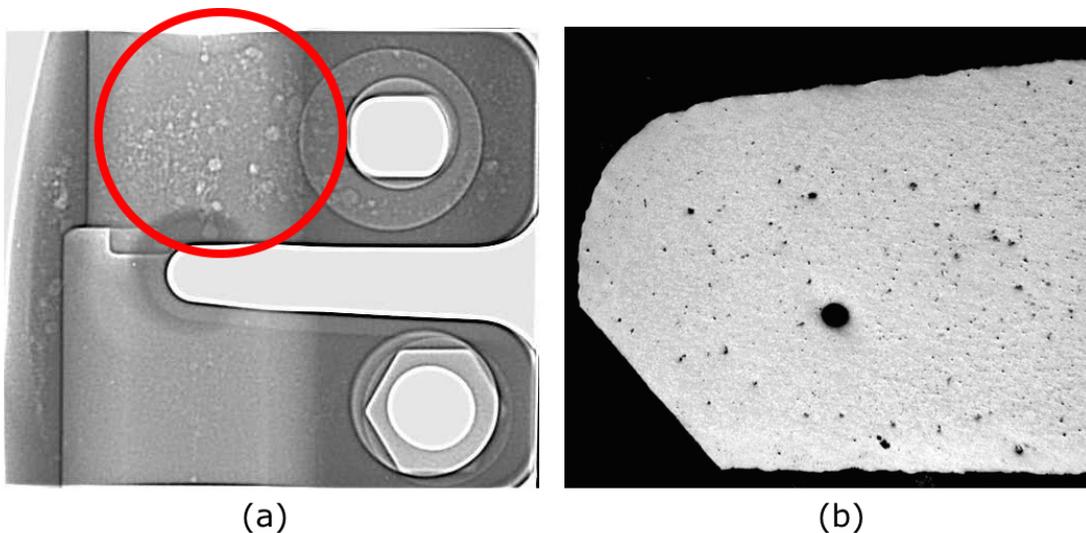


Figura 4.5 Una radiografia (a) ed una micrografia (b) di un manicotto con porosità.

4.3 Difetti di riempimento - Gocce fredde

Una goccia fredda è una porzione di materiale con una struttura più fine rispetto alla zona circostante e separata da essa da un sottile strato di ossido.

La goccia fredda si forma durante il riempimento, nei casi in cui il fronte di avanzamento sia caratterizzato da una forte turbolenza. Le gocce che si separano dal resto del flusso solidificano a contatto con le superfici fredde dello stampo. Se rimangono a contatto con esso rappresentano dei difetti superficiali, mentre sono considerati interni se vengono trasportate nella cavità dal resto del materiale.

La struttura più fine è dovuta alla maggior velocità di solidificazione rispetto al resto del materiale, mentre lo strato di ossido è causato dal contatto con l'aria nei passaggi dello stampo, due esempi sono riportati in Figura 4.6.

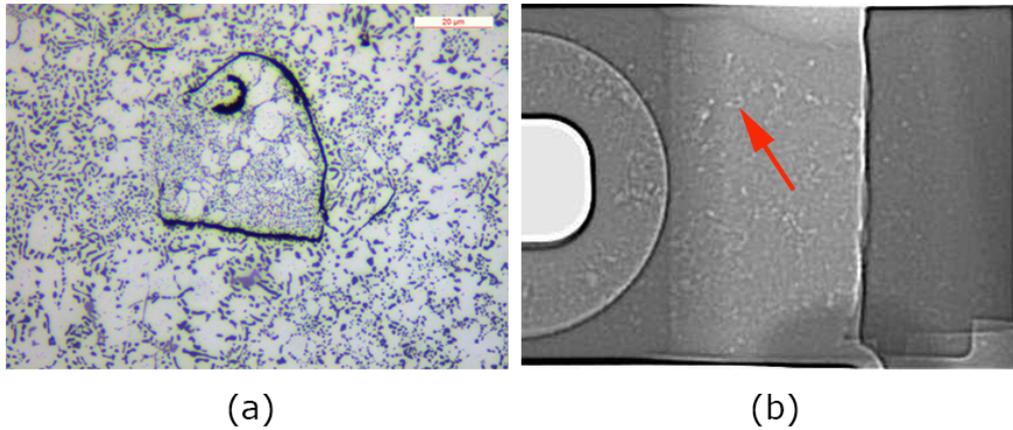


Figura 4.6 Una micrografia (a) ed una radiografia (b) di una goccia fredda.

4.4 Fasi indesiderate – Inclusioni non metalliche

Nelle leghe di alluminio una classica inclusione, sotto forma di particella o film, è rappresentata dall'ossido di alluminio, composto duro e fragile, che si forma quando il metallo fuso entra in contatto con l'aria.

In Figura 4.7 è mostrata una micrografia nella quale è visibile un film di ossido.

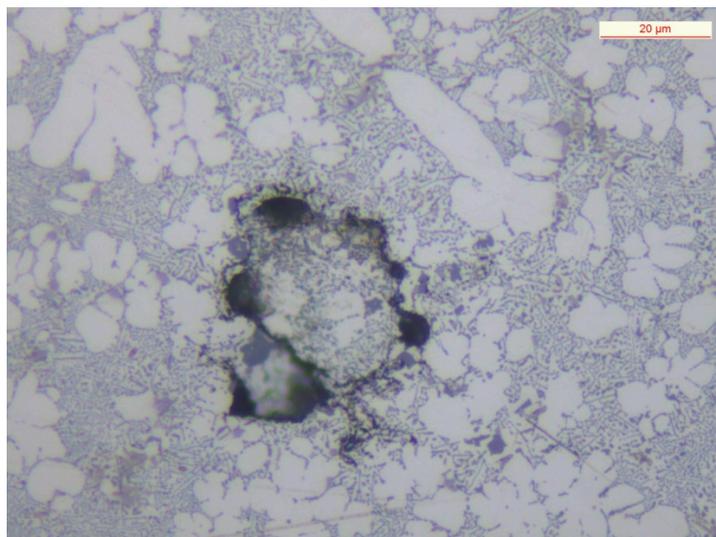


Figura 4.7 Micrografia di un ossido di alluminio.

4.5 Difetti superficiali da gas – Blisters

I blisters sono rigonfiamenti della superficie dovuti ad intrappolamento di gas. Quando il getto è caldo, a seguito di un trattamento termico o durante l'estrazione dagli stampi, le porosità situate in prossimità della superficie, possono espandersi verso l'esterno deformando plasticamente il materiale. In Figura 4.8 sono riportati degli esempi.



Figura 4.8 Blisters. [AIM]

4.6 Eccesso di materiale – Bava

La bava si genera per un eccesso di materiale che si infiltra tra i due semistampi. È visibile ad occhio nudo ed è dovuta o ad un'insufficienza della forza di serraggio o a causa di una diversa espansione termica degli stampi. Un esempio è riportato in figura 4.9.

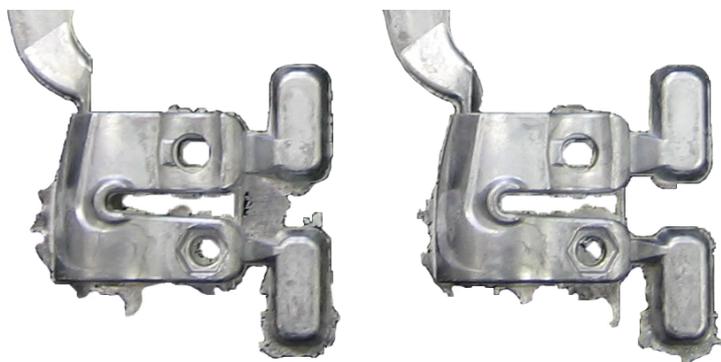


Figura 4.9 Bava in due manicotti.

5 Il manicotto

Una sezione della gamba del treppiede è costituita da due tubi, uno interno ed uno esterno, il primo scorre dentro al secondo e viene vincolato ad esso tramite il manicotto. In Figura 5.1 sono rappresentate due viste del sistema completo ed assemblato, mentre in Figura 5.2 il singolo manicotto.



Figura 5.1 Manicotto assemblato con tubi.



(a)

(b)

Figura 5.2 Manicotto singolo.

Il componente presenta un foro passante con sezione a D di due diametri diversi. Nella porzione del foro con diametro maggiore, visibile in Figura 5.2(a), viene inserita l'estremità del tubo esterno e vincolato al manicotto serrando l'apposita vite con una coppia di 1.8 Nm. La porzione del foro più piccolo, visibile in Figura 5.2(b), è invece adibita a stringere il tubo interno, che viene bloccato azionando la levetta.

Nella fase di assemblaggio del treppiede, il dado di fissaggio della leva viene serrato applicando una coppia di 1.4 Nm, che provoca una deformazione plastica del manicotto.

Affinché la funzionalità del sistema sia garantita, alla chiusura della leva, il tubo interno dev'essere vincolato a quello esterno, così da assicurare stabilità all'intero sostegno. All'apertura della leva invece il ritorno elastico del manicotto dev'essere tale da permettere lo scorrimento relativo tra i due tubi.

Com'è possibile vedere in Figura 5.3(a), la distanza tra le estremità mobili del manicotto, prima dell'assemblaggio, è pari a 4 mm. A seguito del serraggio del dado della levetta, al carico definito dalle specifiche, la distanza si porta a 1.3 mm, Figura 5.3 (b). In questa condizione il tubo interno è vincolato a quello esterno. All'apertura della leva la distanza risulta 2.6 mm, Figura 5.3(c). Il tubo interno è libero di scorrere e la leva non applica più nessun carico sul manicotto. Quest'ultimo non si riporta alle condizioni iniziali, con un'apertura di 4 mm, a causa della deformazione plastica permanente.

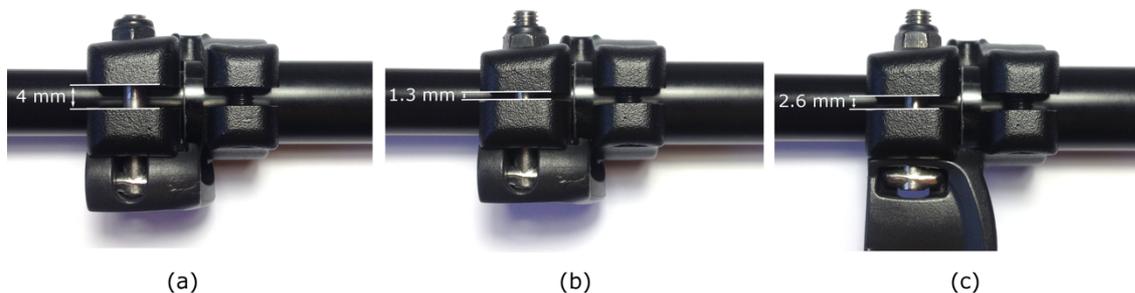


Figura 5.3 Configurazioni di esercizio del manicotto.

Quanto appena descritto rappresenta le condizioni di funzionamento corrette del sistema, in termini di distanze medie. È stata infatti riscontrata una variabilità, di circa 0.1 mm nelle misurazioni, effettuate tramite stereoscopio, giustificata dalle inevitabili differenze geometriche tra i vari manicotti e tubi.

Nella valutazione delle tre leghe alternative, oltre alle caratteristiche inerenti il processo produttivo e le proprietà meccaniche quali resistenza e vita in esercizio dei componenti, è importante verificare che vengano rispettati i requisiti di funzionalità del sistema.

Fondamentale è che, a leva chiusa, la distanza tra le estremità non sia di molto superiore a 1.3 mm, altrimenti si compromette la stabilità del sostegno, non garantendo un fissaggio

sufficientemente solido, mentre a leva aperta la distanza dev'essere pari o superiore a 2.6 mm per permettere il libero scorrimento del tubo interno.

Durante le prove di assemblaggio dei manicotti si è inoltre osservato che il carico applicato a seguito della chiusura della levetta è variabile. Quest'ultima agisce su un perno filettato M5x0.8 sul quale è avvitato un dado flangiato autobloccante. Note le caratteristiche geometriche della filettatura e del dado, riassunte in Tabella 5.1, e la coppia di serraggio, è possibile stimare la forza assiale applicata dal perno [10].

<i>Diametro nominale</i>	d	6 mm
<i>Passo</i>	p	0.8 mm
<i>Metà angolo di profilo</i>	β	30°
<i>Diametro medio filettatura</i>	d_m	4.3 mm
<i>Diametro medio superficie di appoggio del dado</i>	D_m	6.5

Tabella 5.1 Caratteristiche filettatura.

Una parte della coppia di serraggio viene impiegata per vincere gli attriti nella filettatura, un'altra per quelli tra la superficie di appoggio del dado e la sua sede nel manicotto.

A causa del dado autobloccante si ipotizza un coefficiente di attrito radente nella filettatura $\mu = 0.25$, mentre tra dado e sede $\mu_d = 0.2$.

È possibile quindi calcolare i due parametri:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{p}{\pi d}\right) = 2.92^\circ \qquad \varphi = \arctg(\mu) = 14.03$$

La formula (1), ricavata scomponendo le componenti della forza che agiscono sul diametro medio del filetto, permette di calcolare la forza assiale agente sul perno a seguito dell'applicazione di una coppia $C = 1400 \text{ Nmm}$.

$$F = \frac{C}{\frac{\mu_d D_m}{2} + \frac{d_m \cos\beta \sin\alpha + \mu \cos\alpha}{2 \cos\beta \cos\alpha - \mu \sin\alpha}} \cong 1000 \text{ N} \quad (1)$$

Tramite la stessa formula si può calcolare anche la forza applicata dal bullone di fissaggio del manicotto sul tubo esterno, che risulta essere pari a circa 1400 N.

Quanto calcolato è frutto di una stima sulla base di semplificazioni analitiche ed ipotesi sui coefficienti di attrito, le forze di precarico applicate al manicotto in fase di assemblaggio e quelle in fase di utilizzo possono variare a causa di diversi fattori.

La strumentazione utilizzata per il montaggio, quale il cacciavite dinamometrico, è affetto da un errore sulla misura, quindi non applica sempre esattamente la stessa coppia. Al variare delle condizioni della filettatura, cambia il carico applicato e quindi la deformazione imposta al manicotto. Tale deformazione è influenzata anche dalle dimensioni effettive di manicotto e tubo, dalla loro finitura superficiale e dallo spessore della vernice.

La geometria stessa del manicotto e dell'intero sistema permette inoltre diverse condizioni di chiusura della leva.

Com'è possibile vedere in Figura 5.4, il tubo interno con la leva aperta, può ruotare di 5° nel manicotto, ed avendo una sezione a D, in base alla posizione con la quale viene chiuso, cambia la forza resistente offerta dal sistema, quindi la deformazione effettiva imposta al manicotto e di conseguenza lo stato tensionale agente su di esso.

La posizione in Figura 5.4(a) risulta più critica rispetto a quella in Figura 5.4(b). In entrambi i casi la leva impone alle due estremità mobili lo stesso spostamento, ma nel primo caso, poiché il manicotto va subito in appoggio sul tubo, assume una posizione che risulta più rigida, con un conseguente aumento dello stato tensionale.



Figura 5.4 Possibile rotazione del tubo interno al manicotto.

Ulteriore fonte di variabilità è la posizione del dado nella sua sede durante la chiusura della levetta. Quest'ultima, quando viene aperta non aderisce più al manicotto, ma ha un po' di gioco, che permette a leva e dado di muoversi nella loro sede. In Figura 5.5(a) il dado si posiziona correttamente, ma può succedere che la leva venga chiusa con il dado come in Figura 5.5(b); in questo caso il carico applicato alla porzione mobile del manicotto è maggiore. Si impone lo stesso abbassamento, ma ad una distanza inferiore dal tubo.

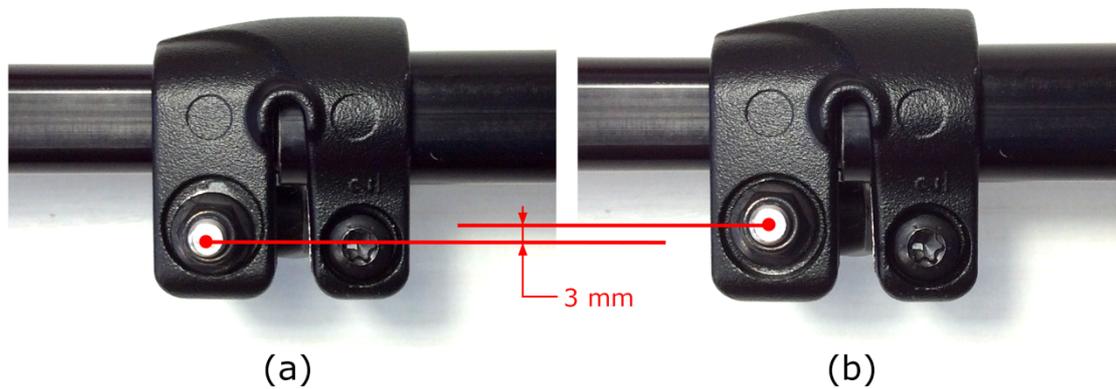


Figura 5.5 Possibili posizioni del dado nella sede.

Queste variabili causano un'instabilità dei carichi in esercizio sul manicotto. Per valutare il comportamento del componente anche nelle condizioni più gravose, le prove sperimentali vengono eseguite con forze variabili, nella zona della levetta, tra i 1000 e 1500 N.

Nel proseguimento della trattazione viene utilizzata una denominazione particolare per le parti interessanti del manicotto.

In Figura 5.6 sono riportati i nomi dati a due porzioni del componente.

La parte mobile del manicotto dalla parte della levetta è stata definita "Lato A", mentre quella dalla parte del dado di fissaggio "Lato B".

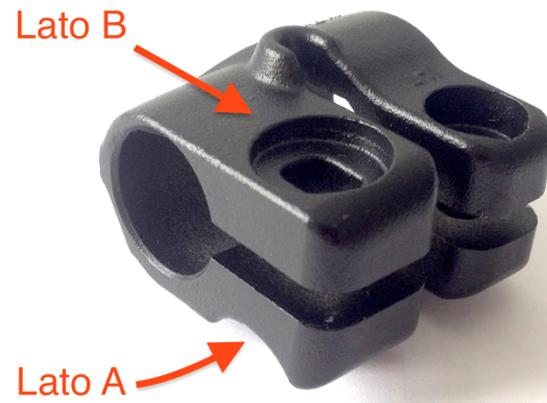


Figura 5.6 Nomenclatura delle parti del manicotto.

6 Analisi agli elementi finiti

Per valutare lo stato tensionale del componente in esercizio, si effettua un'analisi agli elementi finiti, tramite il codice di calcolo ANSYS Workbench.

Viene dapprima effettuata una preparazione della libreria dei materiali da utilizzare nelle analisi, successivamente si valuta la correttezza della mesh con un'analisi di convergenza della stessa e per concludere viene eseguita l'analisi effettiva.

Il tutto viene infine validato da un'analisi estensimetrica sul componente reale con lo scopo, oltre che verificare la correttezza del modello, anche di valutare l'entità dei carichi applicati dalla leva sul manicotto.

6.1 Libreria dei materiali

Durante le prove di assemblaggio preliminari si è osservato che il manicotto, a seguito del montaggio e del primo serraggio di vite e leva, subisce una deformazione plastica permanente. Questo comporta la necessità di effettuare un'analisi FEM con materiali che abbiano un comportamento elasto-plastico; se così non fosse e si utilizzassero materiali con comportamento lineare-elastico, i risultati darebbero dei picchi di tensione non realistici nelle zone in cui si supera il limite di snervamento del materiale.

Risulta quindi necessaria una preparazione della libreria dei materiali in quanto quella standard interna al programma fa riferimento solo a materiali lineari-elastici.

Il materiale attualmente utilizzato per la produzione dei manicotti è una lega EN AC-44100. Le leghe prese in considerazione come alternative sono invece la EN AC-47100 e la EN AC-47100 con 250 ppm di stronzio.

In Tabella 6.1 sono riportati i valori delle proprietà meccaniche minime per le leghe 44100 e 47100, secondo la normativa UNI EN 1706:2010, di provini ricavati da getti ottenuti per pressocolata.

Come riportato nella normativa, i valori sono puramente indicativi in quanto le proprietà sono particolarmente influenzate dai parametri di processo e dalla geometria del componente.

	<i>Carico di rottura [MPa]</i>	<i>Carico di snervamento [MPa]</i>	<i>Allungamento [%]</i>
<i>EN AC-44100</i>	220	120	2
<i>EN AC-47100</i>	240	140	1

Tabella 6.1 Proprietà meccaniche minime secondo normativa UNI EN 1706:2010.

I dati riportati nella normativa non sono però sufficienti a definire il comportamento elasto-plastico del materiale, ma forniscono solamente un'indicazione circa le proprietà generali del materiale.

Per la definizione del comportamento dei materiali da utilizzare nella simulazione numerica, si considerano i risultati di prove di trazione, su provini piatti delle stesse leghe.

In Figura 6.1 sono rappresentate le curve ingegneristiche sforzo-deformazione di tre materiali. Si vede come le leghe 47100 abbiano un comportamento confrontabile; quella modificata allo stronzio presenta un allungamento leggermente superiore rispetto a quella standard dovuto all'effetto di arrotondamento delle bacchette di silicio dato dalla modifica.

La lega 44100 presenta invece un limite di snervamento e carico di rottura inferiore, ma un allungamento superiore rispetto alle altre due.

In Tabella 6.2 sono riportate le proprietà meccaniche ricavate dalle prove di trazione.

	<i>Carico di rottura [MPa]</i>	<i>Carico di snervamento $R_{p0.2}$ [MPa]</i>	<i>Allungamento [%]</i>
<i>44100</i>	252	123	3.5
<i>47100</i>	264	142	2
<i>47100 Sr</i>	262	144	2.2

Tabella 6.2 Proprietà meccaniche delle tre leghe.

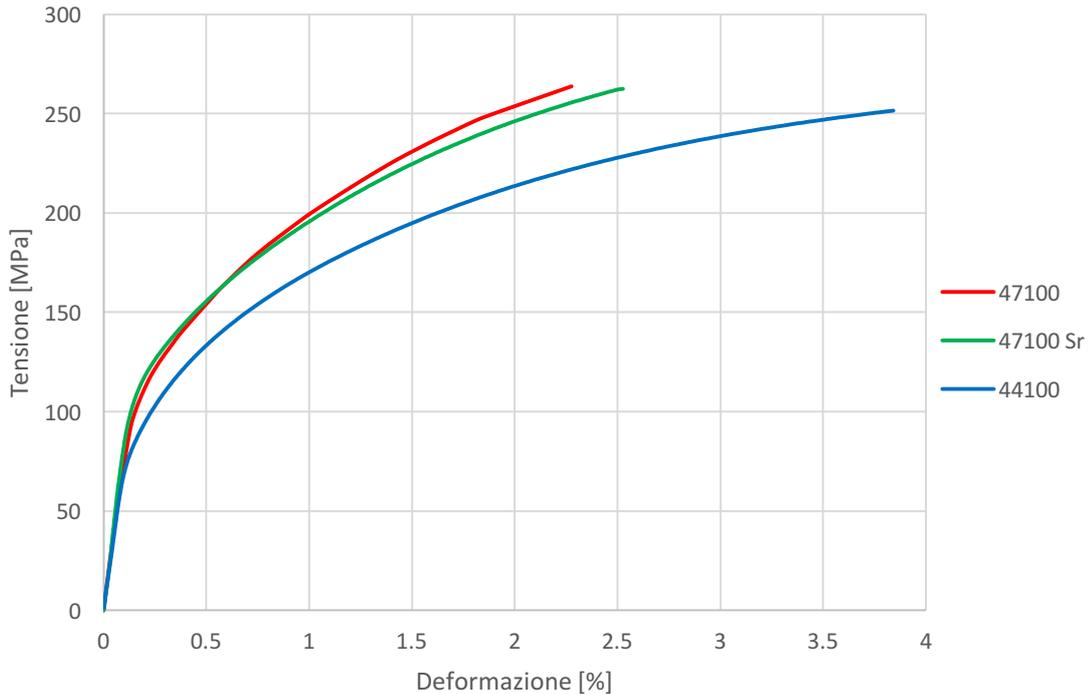


Figura 6.1 Curve ingegneristiche sforzo-deformazione delle tre leghe.

Di seguito viene descritto il procedimento di importazione in ANSYS del modello del materiale 44100. Tramite la stessa procedura vengono definiti i materiali 47100 e 47100 modificato. Infine sono riportate le proprietà meccaniche del materiale utilizzato per i tubi, una lega da deformazione plastica 5086.

6.1.1 Modello del materiale 44100

La creazione del modello del materiale parte dall'analisi dei risultati della prova di trazione. Questi, come rappresentati in precedenza, sono riferiti alle grandezze ingegneristiche, come prima cosa si deve quindi definire la curva in grandezze vere.

A questo scopo si applicano ai dati le seguenti formule:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{ing}) \qquad \sigma_t = \sigma_{ing}(1 + \varepsilon_{ing})$$

Dove ε_t e σ_t sono rispettivamente la deformazione vera e la tensione vera, mentre ε_{ing} e σ_{ing} le grandezze ingegneristiche di partenza.

In Figura 6.2 è rappresentata la curva ingegneristica e vera del materiale 44100.

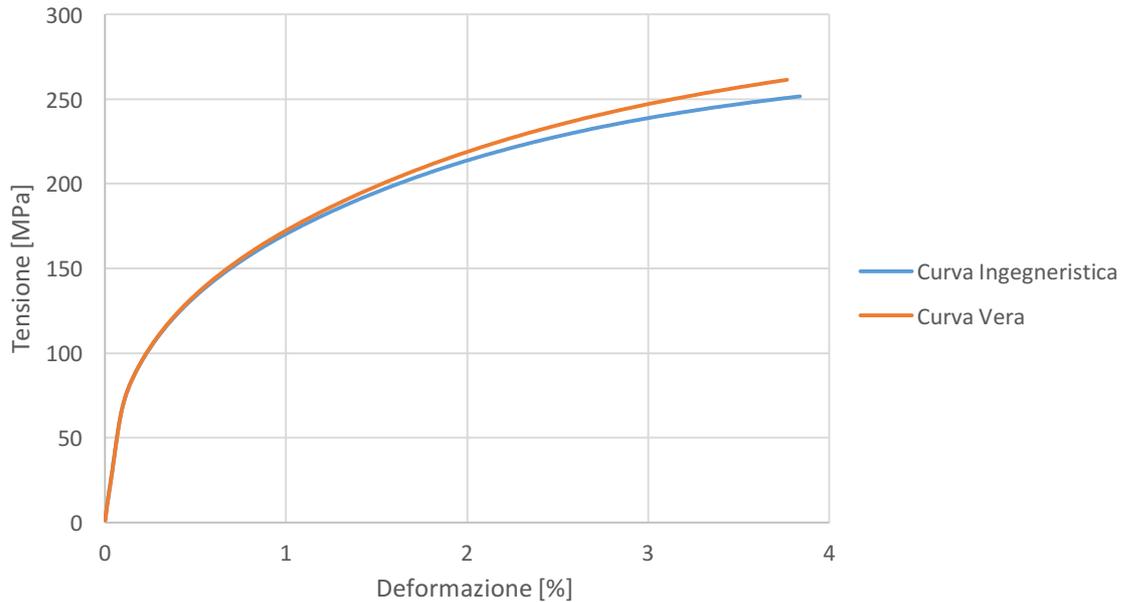


Figura 6.2 Curva vera ed ingegneristica 44100.

I dati da fornire per la definizione del materiale in ANSYS sono il modulo elastico ed una serie di punti, a partire dallo snervamento, con i quali viene tracciata la curva del tratto plastico.

Per far ciò si deve dividere il tratto elastico da quello plastico. Il problema in questo caso riguarda la definizione del limite di snervamento.

Nei materiali che non presentano un evidente punto di transizione tra i due tratti, si definisce il carico di snervamento come la deviazione dalla linearità dello 0.2%. Questo corrisponde al carico che lascia una deformazione permanente nel materiale pari allo 0.2%.

Se si importasse la curva seguendo questa definizione, verrebbe creato un materiale con un comportamento diverso da quello reale. Il confronto tra questa curva, con $R_{p0.2} = 123$ MPa e la curva vera della lega 44100 è rappresentata in Figura 6.3.

Com'è possibile vedere si ottengono due curve molto diverse. La differenza è netta in prossimità dello snervamento, punto di fondamentale importanza per la corretta soluzione dell'analisi e la successiva determinazione delle tensioni.

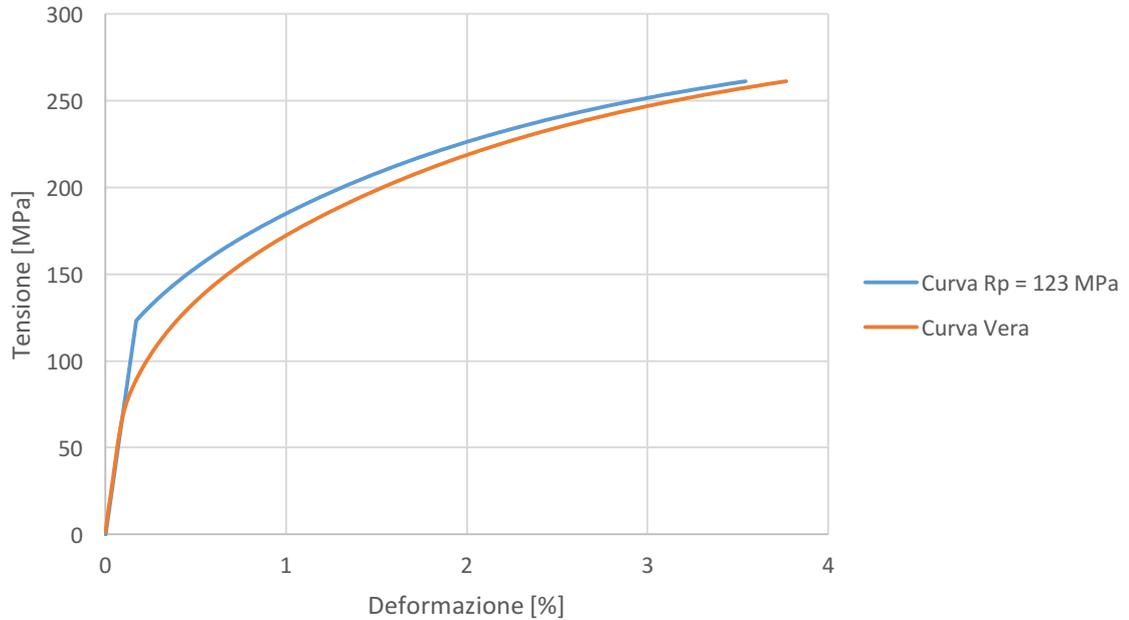


Figura 6.3 Confronto tra curva reale e curva con snervamento secondo definizione.

Si sceglie quindi di suddividere la curva imponendo come limite tra i due tratti un valore di 65 MPa. Visivamente l'ultimo punto che presenta un andamento lineare con i precedenti.

In Figura 6.4 è rappresentata la curva del materiale fino al valore definito in precedenza. Dall'equazione della linea di tendenza è possibile ricavare il modulo elastico del materiale; in questo caso pari a 72900 MPa.

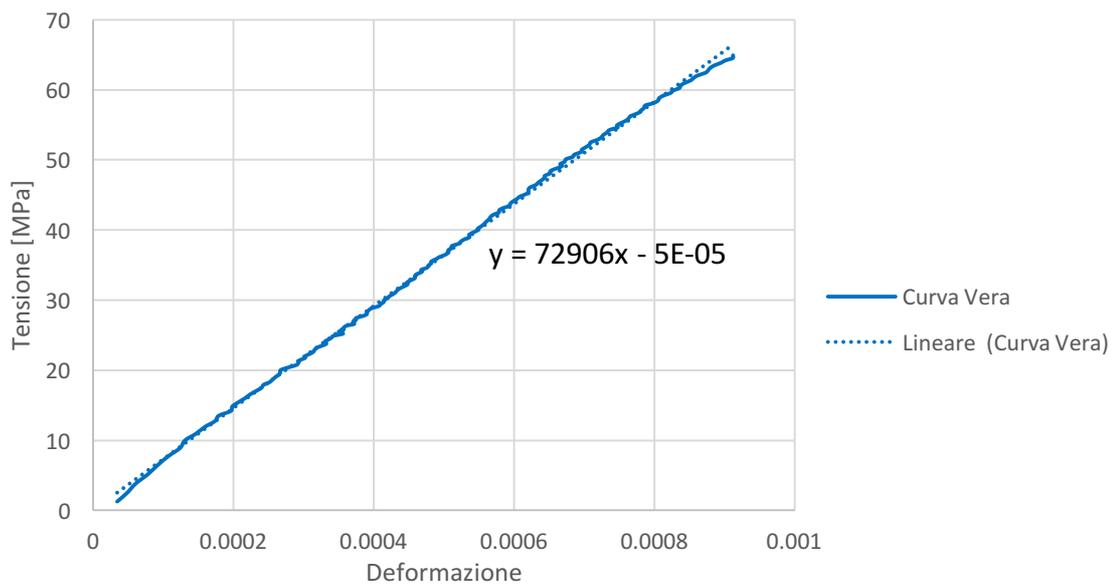


Figura 6.4 Tratto elastico del materiale 44100.

Identificato il valore del modulo elastico è possibile iniziare a definire il materiale. I dati inseriti, circa le proprietà fisiche ed elastiche, sono riassunti in Tabella 6.3.

<i>Densità</i>	2.67 kg/dm ³
<i>Modulo di Young</i>	72900 MPa
<i>Rapporto di Poisson</i>	0.33

Tabella 6.3 Proprietà fisiche ed elastiche 44100.

Per quanto riguarda il tratto plastico si sceglie il modello “Multilinear Isotropic Hardening”. Questo modello comporta che la superficie espanda uniformemente in tutte le direzioni a seguito di una deformazione plastica, è indicato per grandi deformazioni, ma non per analisi con carichi ciclici [11].

L’importazione della curva consiste nell’inserimento di un numero di punti, coppie di valori *tensione-deformazione*, non superiore a cento, che definiscano il tratto plastico del materiale. Successivamente il programma, per ricreare la curva, unisce i punti importati con delle spezzate.

In Figura 6.5 è rappresentato il tratto plastico, traslato verso lo zero, per l’importazione in ANSYS. Un aspetto fondamentale è che il primo punto della curva, corrispondente allo snervamento, sia caratterizzato da una deformazione nulla.

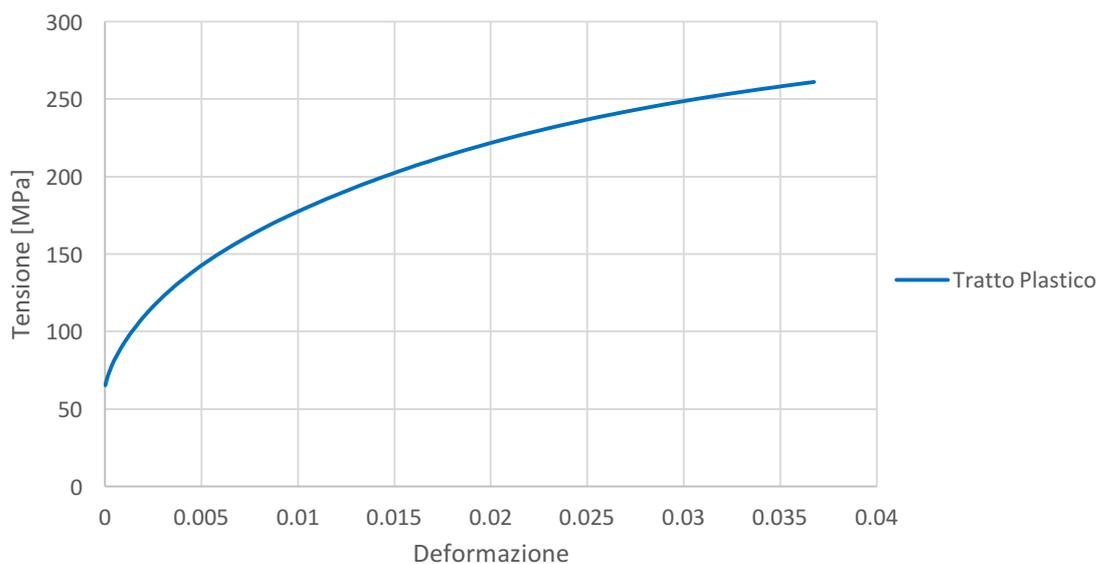


Figura 6.5 Tratto plastico 44100.

Per verificare l'accuratezza del materiale si effettua un'analisi in ANSYS che simula una prova di trazione. La geometria che si utilizza per l'analisi è un provino, modellato tramite il software CAD PTC Creo Parametric, con sezione 3x10 mm e lungo 25 mm.

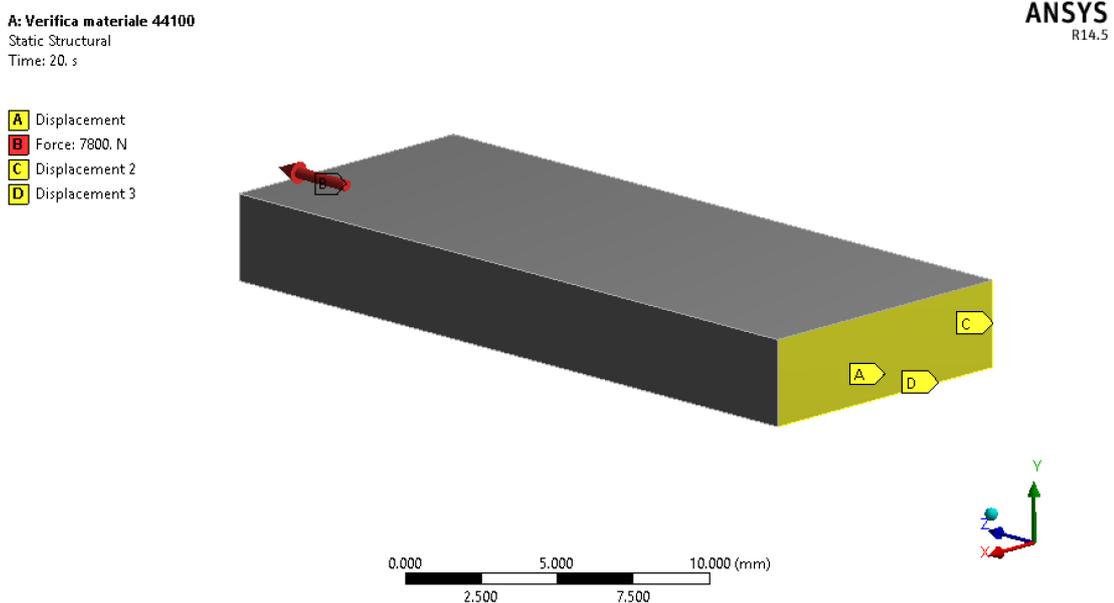


Figura 6.6 Modello per la verifica del materiale.

Se ne vincola la superficie di una estremità (A) agli spostamenti lungo Z e due spigoli della stessa superficie, uno agli spostamenti in Y (D) ed uno a quelli in X (C). In questo modo l'area è libera di contrarsi a seguito dell'applicazione del carico, cosa non possibile se venisse bloccata a tutti gli spostamenti.

Sulla superficie opposta a quella vincolata è invece applicata una forza di 7800 N che pone in trazione il provino.

Per poter tracciare la curva dei risultati durante tutta l'esecuzione della prova, questa viene scomposta in 20 LoadStep.

I risultati richiesti sono lo spostamento della superficie sulla quale è applicata la forza e la tensione normale all'asse Z in quella stessa superficie.

In Figura 6.7 è rappresentata la curva della prova di trazione reale del materiale e quella risultante dalla simulazione in ANSYS. Ad una deformazione dell'1%, la simulazione fornisce un valore di tensione inferiore del 4% rispetto alla curva di riferimento. Lo stesso errore si riscontra anche negli altri materiali, è di entità trascurabile ed inoltre avendo come obiettivo un confronto tra le leghe, un errore costante non influenza i risultati.

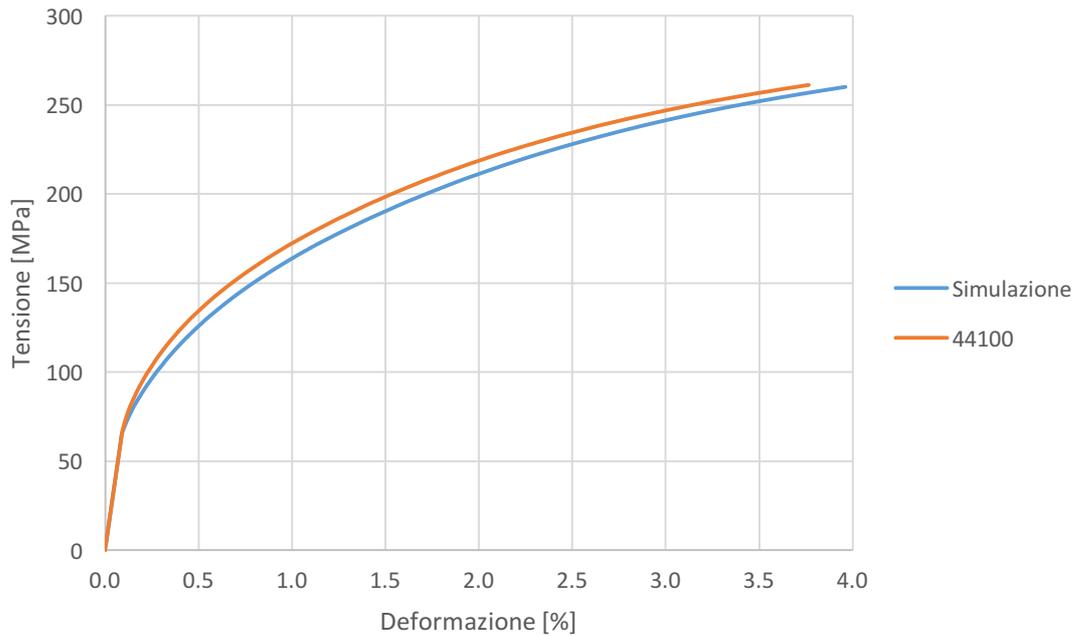


Figura 6.7 Confronto tra simulazione e curva reale del materiale 44100.

6.1.2 Modello del materiale 5086

L'analisi FEM viene effettuata valutando l'interazione tra il manicotto ed i tubi sui quali viene assemblato, si deve quindi creare un materiale anche per quest'ultimi.

Da specifica tecnica, i tubi vengono realizzati in alluminio 5086, una lega alluminio-magnesio da deformazione plastica, allo stato H36, quindi incruditi e stabilizzati. Dopo la formatura vengono riscaldati a bassa temperatura per aumentarne la duttilità e stabilizzarne le proprietà meccaniche.

Durante le prove di assemblaggio non è stata riscontrata una deformazione plastica evidente di questi componenti, di conseguenza, per non complicare inutilmente l'analisi, si utilizza un modello lineare-elastico, le cui proprietà sono riassunte in Tabella 6.4.

<i>Densità</i>	2.66 kg/dm ³
<i>Modulo di Young</i>	71000 MPa
<i>Rapporto di Poisson</i>	0.33

Tabella 6.4 Proprietà meccaniche del materiale 5086.

6.2 Analisi di convergenza della mesh

I risultati di un'analisi FEM sono solitamente tanto più accurati quanto più piccole sono le dimensioni degli elementi del modello. Di contro, l'aumento del numero di elementi, rende più complessa la soluzione, che richiederà un tempo maggiore.

Tramite l'analisi di convergenza della mesh si individua un valore ottimale del numero di elementi che rappresenta un compromesso tra l'accuratezza dei risultati e la durata della soluzione.

Si esegue una prima analisi sul solo manicotto, con una mesh rada, costituita da pochi elementi, utile per identificare le zone critiche.

Successivamente si diminuisce progressivamente la dimensione degli elementi e si valuta l'andamento dei risultati nelle zone identificate in precedenza.

6.2.1 Analisi preliminare

L'analisi viene eseguita sul modello CAD del manicotto fornito da Manfrotto.

Si importa il modello in ANSYS Workbench, Figura 6.8 e gli si assegna il materiale 44100 precedentemente creato.

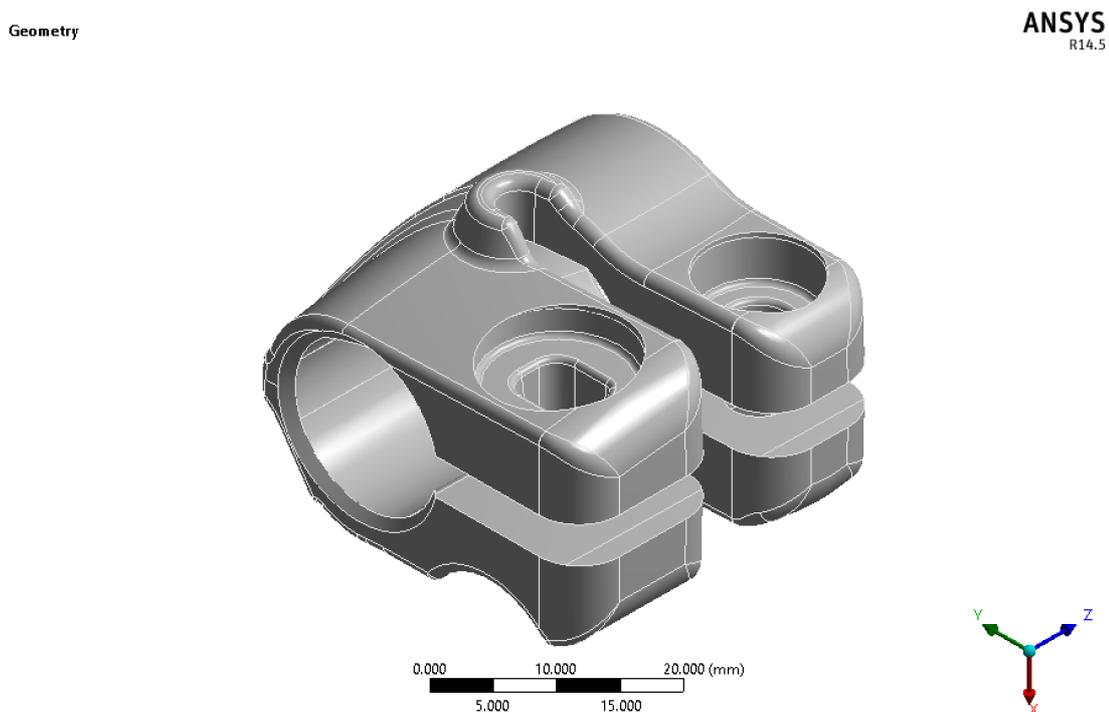


Figura 6.8 Modello CAD del manicotto.

La mesh, di tipo *free*, viene eseguita lasciando tutti i parametri di default ad eccezione della dimensione degli elementi che viene imposta pari a 3 mm; questa rappresenta la lunghezza massima che può avere il lato di un elemento e ne risulta una suddivisione del modello in 14708 elementi tetraedrici rappresentata in Figura 6.9.

ANSYS
R14.5

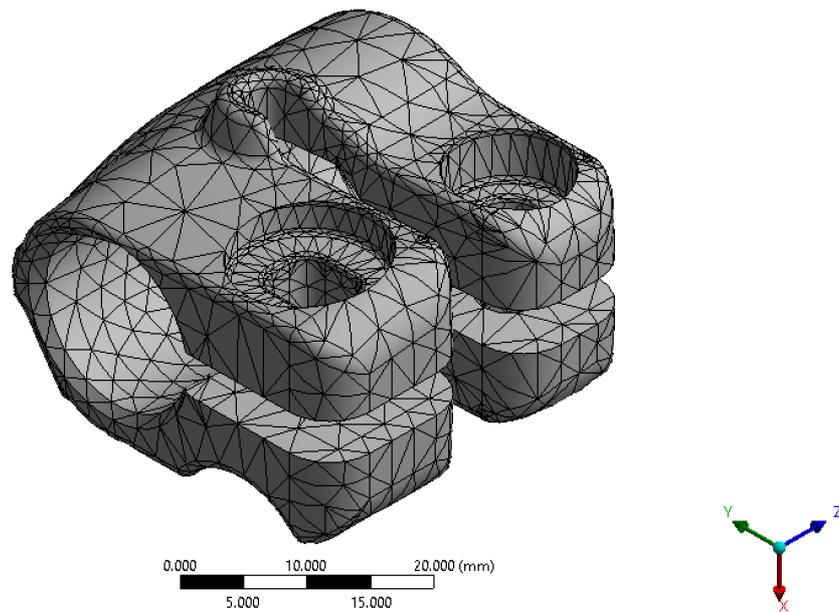


Figura 6.9 Mesh del modello con elementi da 3mm.

Per la definizione dei carichi e dei vincoli è necessaria la creazione di altri sistemi di riferimento rispetto a quello globale cartesiano rappresentato nelle immagini precedenti. Vengono creati due sistemi di riferimento polare. Rispettivamente centrati nell'asse del foro con diametro minore: *Sistema polare foro piccolo* e maggiore: *Sistema polare foro grande* del manicotto. Questi due fori hanno gli assi disassati di 0.25 mm, cosa che non permette la creazione di un unico sistema di riferimento.

In Figura 6.10 sono rappresentati tutti i carichi e vincoli imposti al modello. In particolare sono applicate le forze sulle superfici di appoggio della levetta e del relativo dado pari a 1000 N e su quelle di vite e dado di fissaggio sul tubo esterno pari a 1400 N.

Per quanto riguarda i vincoli, sulle superfici di contatto del manicotto con il tubo esterno, per simulare la presenza di quest'ultimo, vengono bloccati gli spostamenti radiali rispetto al *Sistema polare foro grande*.

A: Analisi preliminare
Static Structural
Time: 1. s

ANSYS
R14.5

- A Displacement
- B Displacement 2
- C Displacement 3
- D Displacement 4
- E Displacement 5
- F Force: 1000. N
- G Force 2: 1000. N
- H Force 3: 1400. N
- I Force 4: 1400. N

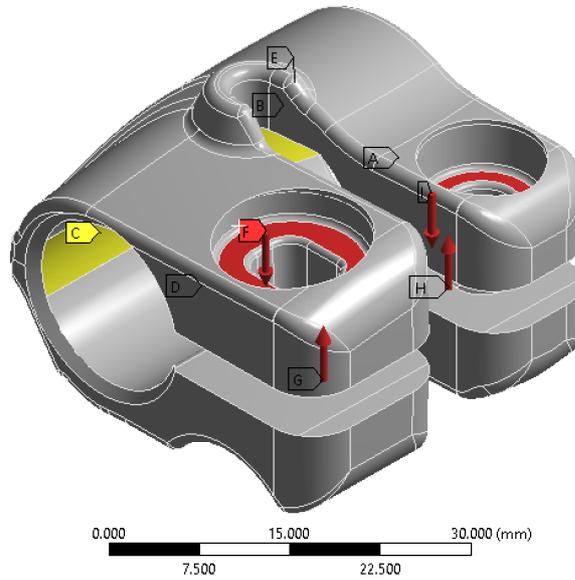


Figura 6.10 Carichi e vincoli dell'analisi di convergenza.

Per evitare moti rigidi dell'intero componente, vengono vincolati gli spostamenti assiali (Z) e circonferenziali (Y), rispetto al *Sistema polare foro grande*, di uno spigolo del modello, contrassegnato dal cartellino giallo in Figura 6.11.

A: Analisi preliminare
Displacement 5
Time: 1. s

ANSYS
R14.5

- Displacement 5
Components: Free;0;0. mm

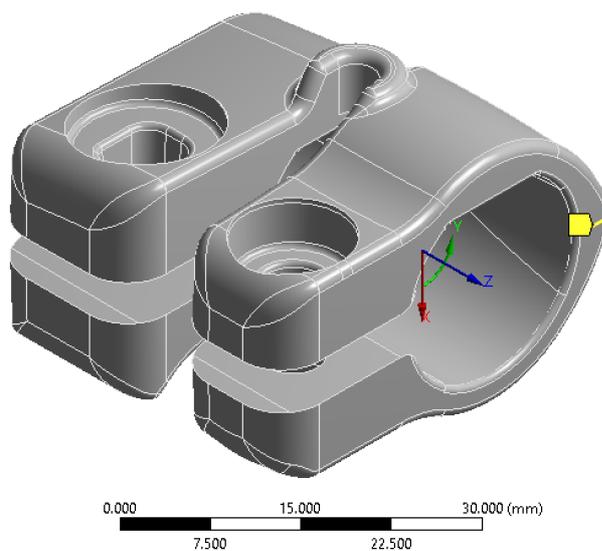


Figura 6.11 Spigolo vincolato.

L'ultima da vincolare è la zona di contatto del manicotto con il tubo interno. Questa è costituita da più superfici. Tre di esse sono porzioni della superficie laterale di un cilindro e sono quelle sulle quali è stato basato il sistema di riferimento polare di quel foro, le altre sono superfici sformate, con il diametro che aumenta spostandosi verso il foro più grande.

Ciò è dovuto ad un compromesso in fase progettuale. Le superfici cilindriche permettono di avere un'area sufficientemente ampia e stabile a contatto con il tubo per assicurarne il bloccaggio, quelle sformate facilitano l'uscita della spina che crea il foro durante il processo di pressocolata.

Per simulare l'interazione del manicotto con il tubo interno si impone un primo vincolo agli spostamenti radiali, rispetto al *Sistema polare foro piccolo*, su una delle tre superfici cilindriche, rappresentata in giallo in Figura 6.12.

A: Analisi preliminare
Displacement 3
Time: 1. s

ANSYS
R14.5

Displacement 3
Components: 0;Free;Free mm

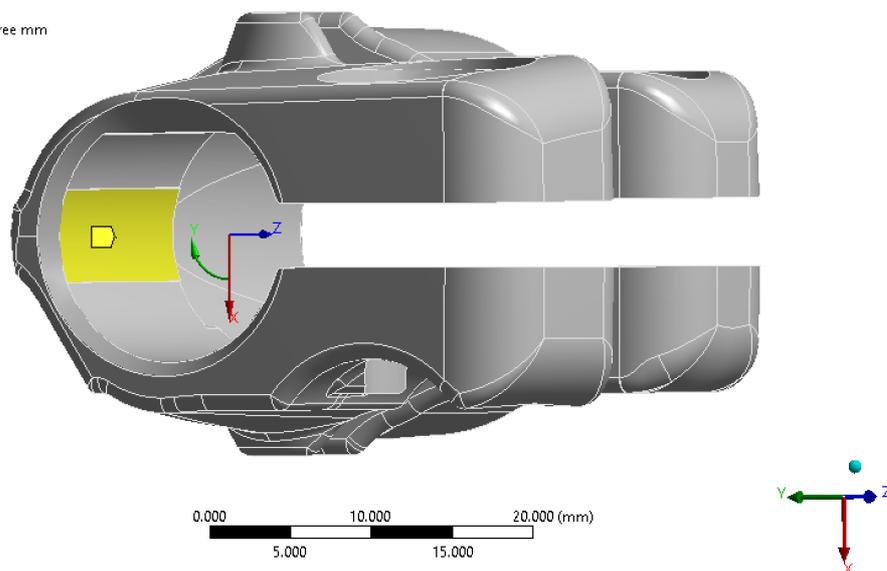


Figura 6.12 Superficie del foro vincolata agli spostamenti radiali.

Sulle altre due superfici, rappresentate in Figura 6.13, si impone invece uno spostamento radiale (in direzione X) pari a -0.3 mm. Questo valore corrisponde alla differenza tra il diametro del foro del manicotto che misura 15.8 mm ed il diametro esterno del tubo di 15.5 mm.

A: Analisi preliminare
Displacement 4
Time: 1. s

ANSYS
R14.5

Displacement 4
Components: -0.3;Free;Free mm

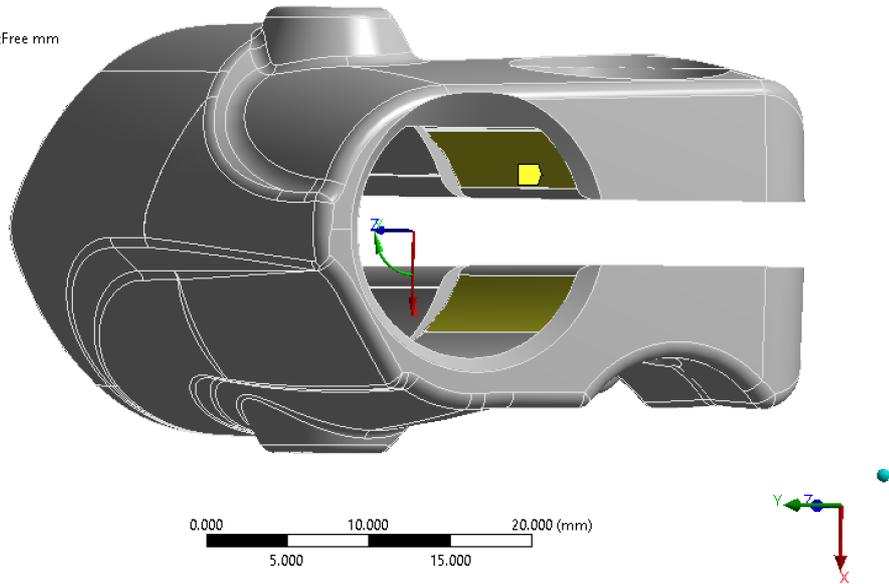


Figura 6.13 Superfici mobili.

In Figura 6.14 sono rappresentati i risultati dell'analisi in termini di tensione equivalente di Von Mises. Concentrandosi sulla zona nella quale agisce la levetta, si vede come ci sia una concentrazione di tensioni in prossimità del raccordo cerchiato.

A: Analisi preliminare
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

ANSYS
R14.5

191.47 Max
112.65
98.618
84.585
70.552
56.519
42.486
28.453
14.42
0.38674 Min

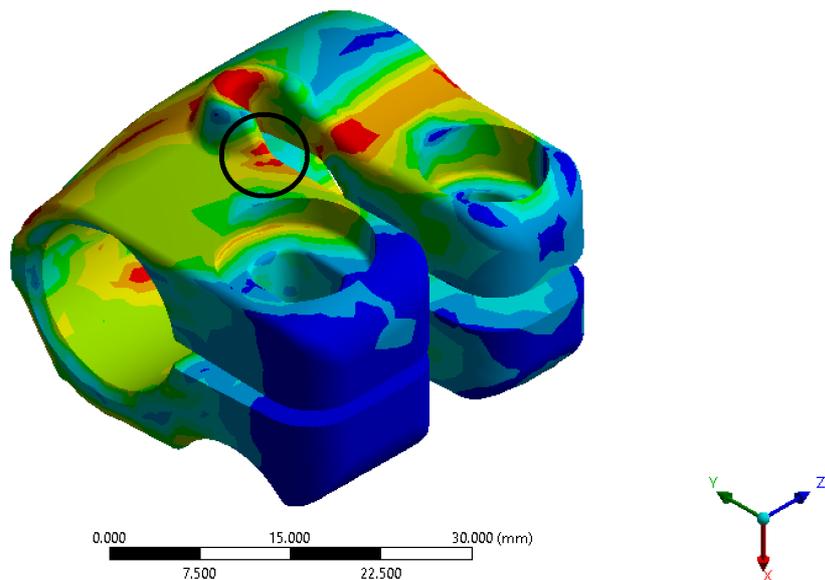


Figura 6.14 Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises.

Dall'analisi risultano presenti ulteriori criticità, che però riguardano zone non interessanti per lo studio in corso, quale la zona di fissaggio sul tubo esterno. Questa, durante l'utilizzo del componente, è soggetta al solo carico costante dovuto al serraggio della vite.

6.2.2 Analisi di convergenza

Eseguita l'analisi preliminare, la si ripete mantenendo la stessa configurazione di carichi e vincoli, ma si diminuisce progressivamente la dimensione degli elementi.

Per valutare l'accuratezza dei risultati si considera come riferimento il valore massimo della tensione equivalente di Von Mises nelle zone di interesse, rappresentate in verde in Figura 6.15. Si tratta di tutte le superfici poste in trazione nel lato B del manicotto.

A: Analisi preliminare

ANSYS
R14.5

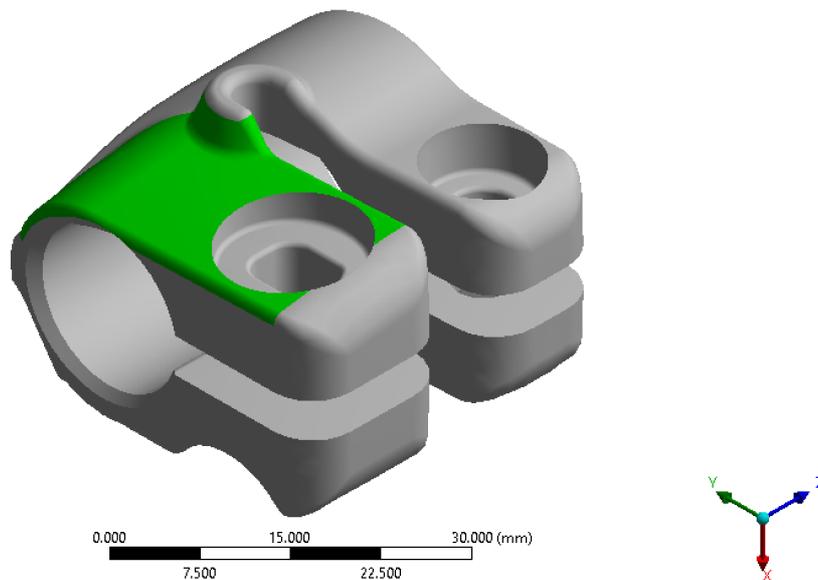


Figura 6.15 Zone di interesse per l'analisi di convergenza.

In Figura 6.16 è rappresentato l'andamento della tensione massima, rispetto al numero di elementi del modello.

In Tabella 6.5 sono invece riportati i risultati dell'analisi di convergenza, con i dati relativi ad ogni mesh. L'errore è quello che si ha utilizzando quella particolare mesh rispetto alla mesh più fine successiva.

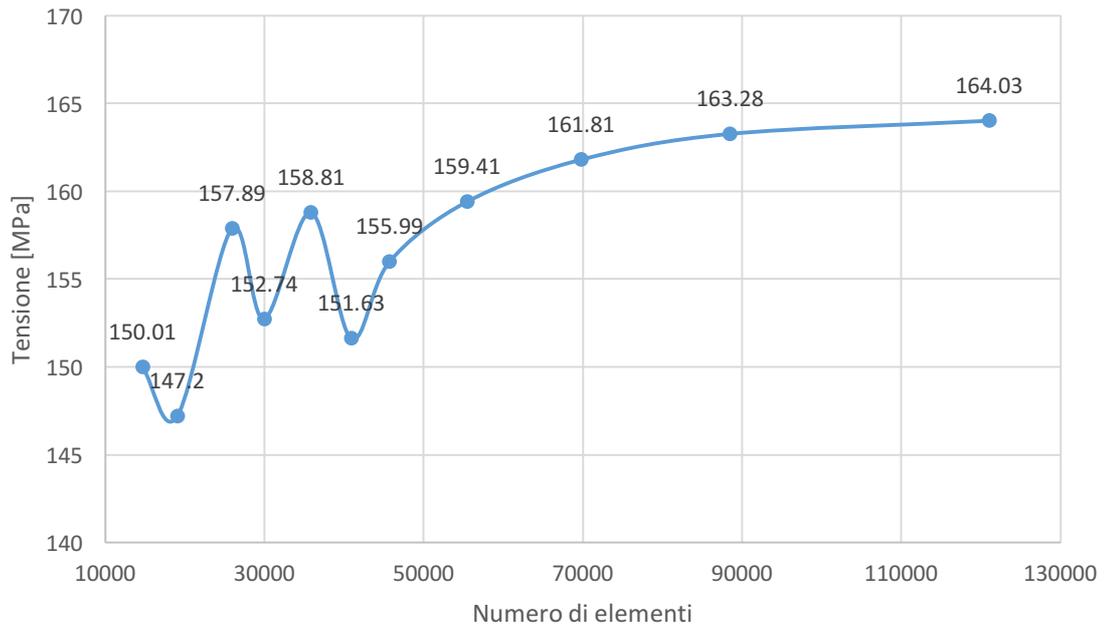


Figura 6.16 Andamento della tensione in funzione del numero di elementi.

<i>Dimensione degli elementi</i>	<i>Numero degli elementi</i>	<i>Tensione massima [MPa]</i>	<i>Errore [%]</i>	<i>Tempo analisi [s]</i>
3	14708	150.01	1.873	48.5
2	19082	147.2	7.262	61.8
1.5	25937	157.89	3.262	100.3
1.3	29972	152.74	3.974	103.1
1.1	35868	158.81	4.521	116
1	40924	151.63	2.875	130.9
0.9	45722	155.99	2.192	155.8
0.8	55437	159.41	1.506	309.3
0.7	69767	161.81	0.908	409.4
0.6	88481	163.28	0.459	509.6
0.5	121023	164.03		747.6

Tabella 6.5 Valori dell'analisi di convergenza.

Le prime analisi sono caratterizzate da un'instabilità del risultato, che converge poi, aumentando il numero degli elementi, attorno al valore di 164 MPa.

Questo si ottiene con elementi da 0.5 mm di dimensione massima che corrisponde a 121023 elementi totali e richiede un tempo di analisi di 747.6 s.

È interessante osservare come già con elementi da 0.8 mm si ottenga un errore inferiore al 2% e soprattutto un tempo di analisi pari 75% del tempo della mesh successiva.

Si esegue quindi l'analisi con la mesh rappresentata in Figura 6.17, essa è costituita da elementi di 1 mm, un *Face Sizing* da 0.7 mm sulle superfici di contatto dei fori ed un infittimento (*Refinement*) di primo livello sul raccordo critico del lato B. In totale si hanno 59586 elementi. Il risultato, in termini di tensione equivalente di Von Mises, è identico a quello ottenuto con elementi da 0.5mm: 164.03 MPa, ma con un tempo di soluzione del 50% inferiore: 389.5 s.

ANSYS
R14.5

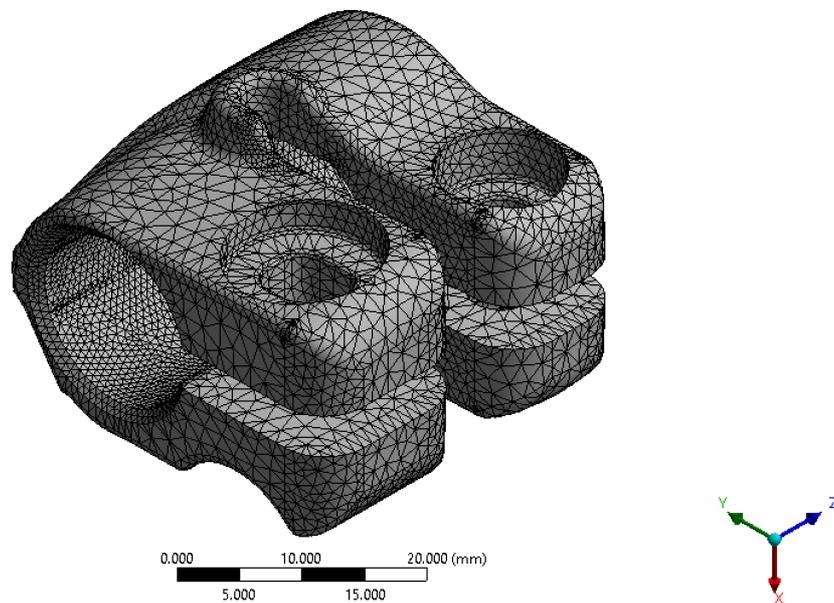


Figura 6.17 Mesh ottimale.

6.3 Analisi definitiva

L'analisi definitiva viene eseguita su un modello più complesso rispetto a quello preliminare ed introduce un'ulteriore non linearità alla soluzione, la prima è rappresentata dal comportamento elasto-plastico del materiale, la seconda dal contatto che si verifica tra il manicotto ed il sostegno sul quale va in appoggio.

Questa viene ripetuta uguale, variando il materiale del manicotto tra i tre definiti in precedenza: 44100, 47100 e 47100 modificato.

Il materiale del sostegno rimane in tutte le analisi il 5086.

6.3.1 Modello e mesh

Il modello utilizzato è un assemblato, creato tramite il software Creo Parametric, costituito dal modello CAD del manicotto fornito da Manfrotto ed un sostegno tubolare, rappresentato in Figura 6.18. Quest'ultimo ha dimensione e configurazione pari a quella dei tubi utilizzati in fase di assemblaggio del prodotto.

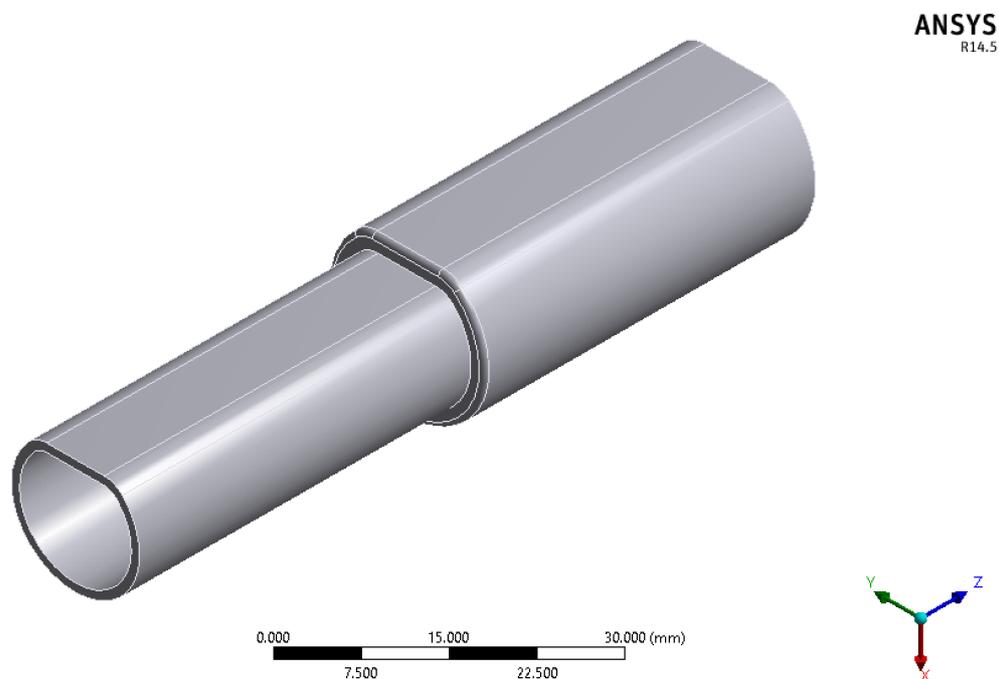


Figura 6.18 Sostegno tubolare.

Come per l'analisi preliminare, vengono creati i sistemi di riferimento polare: *Sistema polare foro piccolo* e *Sistema polare foro grande* riferiti ai fori del manicotto.

La mesh è una variante del risultato ottimale dell'analisi di convergenza ed i parametri sono riassunti in Tabella 6.6. Per entrambi i componenti del modello viene imposto un *Body Sizing*, dimensione massima degli elementi, pari ad 1 mm. Successivamente viene infittita la mesh tramite un *Contact Sizing*, con dimensione massima di 0.7 mm; questo crea una mesh più fine nelle zone di contatto che migliora l'accuratezza dei risultati e facilita la convergenza della soluzione. Infine, sulla superficie del raccordo critico nel lato B, viene eseguito un *Refinement* di primo livello. Il risultato complessivo è rappresentato in Figura 6.19.

	<i>Manicotto</i>	<i>Sostegno</i>
<i>Body Sizing</i>	1 mm	1 mm
<i>Contact Sizing</i>	0.7 mm	0.7 mm
<i>Refinement</i>	Livello 1 Raccordo critico lato B	-

Tabella 6.6 Parametri della mesh.

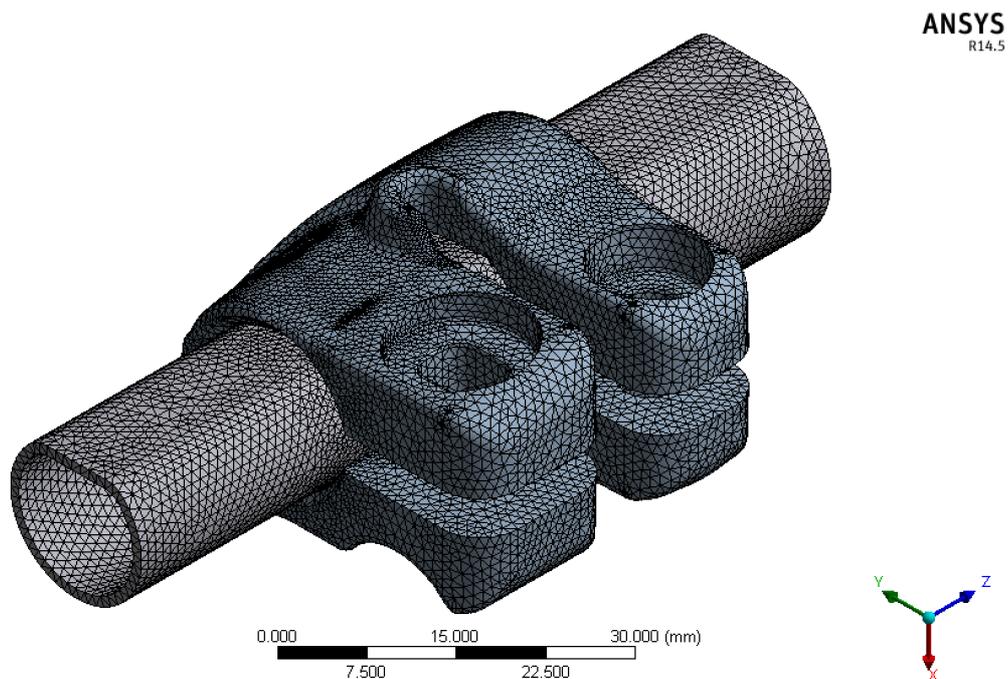


Figura 6.19 Mesh del modello.

6.3.2 Contatti

Se in un'analisi agli elementi finiti sono presenti più corpi, si deve specificare che tipo di interazione esiste tra loro affinché venga costituita una relazione di rigidità.

Se ciò non accade, le relative matrici di rigidità sono scollegate e i due si comportano indipendentemente l'uno dall'altro con l'eventualità di una compenetrazione non realistica.

Risulta quindi necessario definire degli elementi di contatto tra i corpi che permettano di equilibrare le forze tra essi scambiate.

Quanto definito in seguito è il risultato finale di un processo di affinamento progressivo basato su più analisi, svolto valutando gli output forniti dal solutore e valutandone le difficoltà di convergenza.

I tipi di contatto offerti da ANSYS Workbench sono diversi [12] e le loro caratteristiche sono riassunte in Tabella 6.7. Considerando il caso in esame, si ha un gap dovuto allo spazio iniziale tra manicotto e sostegno, inoltre è richiesta la possibilità di slittamento per permettere l'assestamento del contatto tra i due corpi.

La scelta tra le tipologie di contatti si restringe quindi a due: *Frictionless* e *Frictional*. Considerando la difficoltà nel definire un coefficiente d'attrito tra i due componenti che sia realistico e valido per tutte le condizioni di esercizio del sistema e l'aumento della complessità della soluzione che comporta un'analisi con attriti, si sceglie di utilizzare il contatto di tipo *Frictionless*. Quest'ultimo rappresenta una semplificazione della realtà, ma evita i possibili errori dati da una stima errata dell'attrito.

<i>Tipo di contatto</i>	<i>Gap</i>	<i>Slittamento</i>	<i>Tipo di analisi</i>
<i>Bonded</i>	NO	NO	Lineare
<i>No Separation</i>	NO	SI	Lineare
<i>Frictionless</i>	SI	SI	Non lineare
<i>Rough</i>	SI	NO	Non lineare
<i>Frictional</i>	SI	SI	Non lineare

Tabella 6.7 Caratteristiche dei contatti in ANSYS Workbench.

In Figura 6.20 sono rappresentate le superfici di contatto del modello. In blu è evidenziata la *Surface target*, in rosso la *Surface contact*, rispettivamente costituite dalle superfici esterne del sostegno e quelle interne del manicotto.

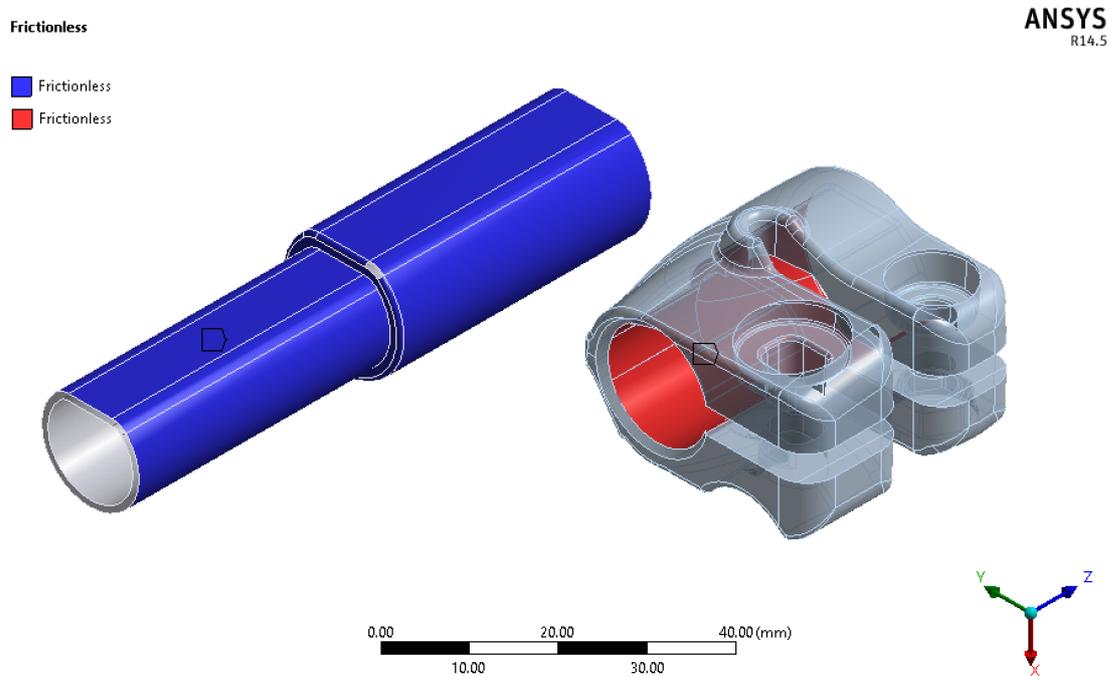


Figura 6.20 Superfici di contatto del modello.

Di seguito verranno elencate e brevemente descritte le opzioni di contatto definite nell'analisi.

Come prima cosa è possibile scegliere il comportamento del contatto tra tre diverse impostazioni:

- *Symmetric*
- *Asymmetric*
- *Auto-Asymmetric*.

Nel primo caso si impedisce la compenetrazione di entrambe le superfici, quindi la *Surface contact* non può penetrare la *Surface target* e viceversa.

Nel secondo caso si impedisce solo alla *Surface contact* di penetrare la *Surface target*.

Nel terzo caso invece si impone un comportamento asimmetrico, ma con la possibilità, da parte del solutore, di invertire target e contact.

Nell'analisi in esame si impone un comportamento Simmetrico. Questo aumenta il numero di iterazioni necessarie alla soluzione, ma permette di ottenere risultati più accurati e riguardanti entrambi i corpi del modello [13].

Come algoritmo di soluzione si imposta: *Augmented Lagrange*. Questa è una variazione della formulazione più semplice *Pure Penalty* ed entrambe possono essere considerate come il posizionamento di molle rigide tra le due superfici che devono andare in contatto.

$$F_n = k_n \times x_n \quad (2)$$

La formulazione *Pure Penalty* è rappresentata dalla formula (2). L'effetto della forza normale F_n viene contrastato dalle molle con rigidità k_n e si accetta la compenetrazione delle due superfici di un valore x_n .

All'aumentare di k_n , definito *Normal Stiffness Factor*, diminuisce la penetrazione tra i due corpi. Idealmente, ponendo infinita la rigidità del contatto, la penetrazione si annulla, ma ciò non è numericamente possibile.

La scelta del valore di k_n influenza sia l'accuratezza che la convergenza dell'analisi. Valori bassi della rigidità facilitano la soluzione, ma aumentando la penetrazione, inficiano l'accuratezza dei risultati.

$$F_n = k_n \times x_n + \lambda \quad (3)$$

La formula (3) rappresenta l'algoritmo della formulazione *Augmented Lagrange*.

L'unica differenza rispetto alla *Pure Penalty* è la presenza del termine λ .

Durante le iterazioni il valore della penetrazione viene confrontato con un valore di riferimento, se questo è superiore al riferimento, viene aumentato il valore di λ .

Di conseguenza la formulazione *Augmented Lagrange* risulta meno sensibile al valore della rigidità del contatto ed è consigliato dalle guide di ANSYS per problemi con contatti *Frictionless* e *Frictional* con grandi deformazioni [14].

Un ulteriore vantaggio dato da questo algoritmo è la possibilità di aggiornare automaticamente la rigidità del contatto, cosa utile nel caso in cui, durante l'analisi, cambino le superfici di contatto tra i corpi.

Nel caso in esame, si eseguono alcune prove con un *Normal Stiffness Factor* pari a 1, ovvero il valore di default, ma ciò comporta difficoltà di convergenza; di conseguenza lo si impone pari a 0.1, con un aggiornamento dello stesso ad ogni iterazione. Successivamente, ad analisi completata, si valuta la penetrazione dei due corpi. Questa assume un valore massimo, in una porzione limitata del modello, di 4 centesimi di millimetro, che viene ritenuto accettabile.

Qualsiasi sia la formulazione scelta per l'analisi si deve definire quale sia il metodo di identificazione delle superfici nelle quali si verifica il contatto. Di default ANSYS imposta come *Detection Method: On Gauss Point*. Questo significa che le superfici vengono identificate sulla base di una serie di punti, posizionati sugli spigoli degli elementi della mesh del modello. In alternativa ci sono i metodi nodali, che utilizzano i nodi della mesh come riferimenti. Il primo metodo ha a disposizione più punti, utile se si utilizza una mesh rada, il secondo è invece più stabile in quanto non si creano ulteriori componenti, ma si utilizzano i nodi della mesh.

Si seleziona quindi l'opzione: *Nodal – Normal To Target*, consigliata dalle guide di ANSYS per le analisi nelle quali si hanno contatti costituiti da superfici con spigoli [15]. In questo caso gli spigoli sono presenti nelle zone di transizione tra le parti sformate e non dei fori del manicotto.

Un ulteriore parametro è: *Interface Treatment*. Questo definisce il comportamento delle superfici nel caso in cui non sia ancora stato stabilito il contatto. È possibile specificare una distanza costante, o variabile nel tempo, tra le due superfici in modo da ignorare il gap, oppure, come nel caso in esame, lasciare che sia il solutore a chiudere lo spazio vuoto e stabilire il contatto [16]. Si specifica quindi l'opzione: *Adjust to Touch*.

L'ultimo parametro definito è *Time Step Controls*, questo permette al solutore di variare il numero di substep dell'analisi. In particolare si specifica l'opzione: *Automatic Bisection* che permette di aumentare il numero di substep nel caso in cui il solutore incontri problemi di convergenza.

In Tabella 6.8 sono riassunte tutte le impostazioni specificate in precedenza.

<i>Type</i>	Frictionless
<i>Behavior</i>	Symmetric
<i>Formulation</i>	Augmented Lagrange
<i>Detection Method</i>	Nodal – Normal to Target
<i>Interface Treatment</i>	Adjust To Touch
<i>Normal Stiffness</i>	Manual
<i>Normal Stiffness Factor</i>	0.1
<i>Update Stiffness</i>	Each Iteration
<i>Time Step Controls</i>	Automatic Bisection

Tabella 6.8 Impostazioni del contatto.

6.3.3 Carichi e vincoli

Un'analisi base agli elementi finiti è costituita da un unico *Loadstep*, ovvero un intervallo di carico della durata di 1 s, durante il quale la forza viene applicata in modo lineare partendo da un valore iniziale, zero ed arrivando al valore finale.

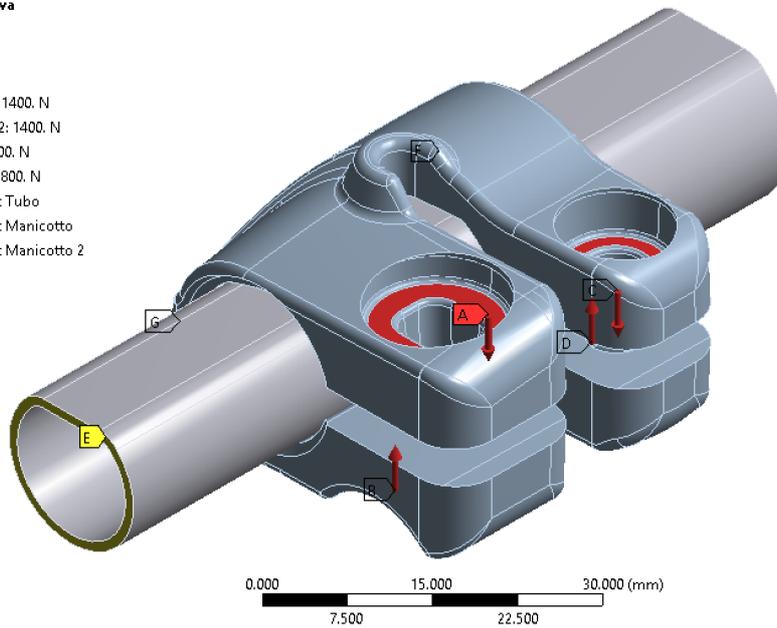
Nel caso in cui siano presenti delle non linearità, dovute al materiale o alla presenza di contatti, il *Loadstep* viene scomposto in ulteriori intervalli definiti *Substep*, durante i quali viene progressivamente applicata una porzione del carico finale e l'equilibrio delle forze è ottenuto con un processo iterativo.

L'analisi in esame è costituita da 10 *Loadstep*, in questo modo i carichi vengono scomposti ed applicati in modo controllato e distribuito in un tempo maggiore. Ciò permette di giungere più facilmente a convergenza dovendo il solutore lavorare con range di carico più bassi. Consente inoltre di valutare i risultati anche negli istanti intermedi, non solo in quello finale.

In Figura 6.21 e 6.22 sono rappresentati i carichi e i vincoli applicati al modello, rispettivamente dalla parte del lato B e lato A del manicotto.

B: Analisi definitiva
 Static Structural
 Time: 10. s

- A** Forza levetta: 1400. N
- B** Forza levetta 2: 1400. N
- C** Forza vite: 1800. N
- D** Forza vite 2: 1800. N
- E** Displacement Tubo
- F** Displacement Manicotto
- G** Displacement Manicotto 2

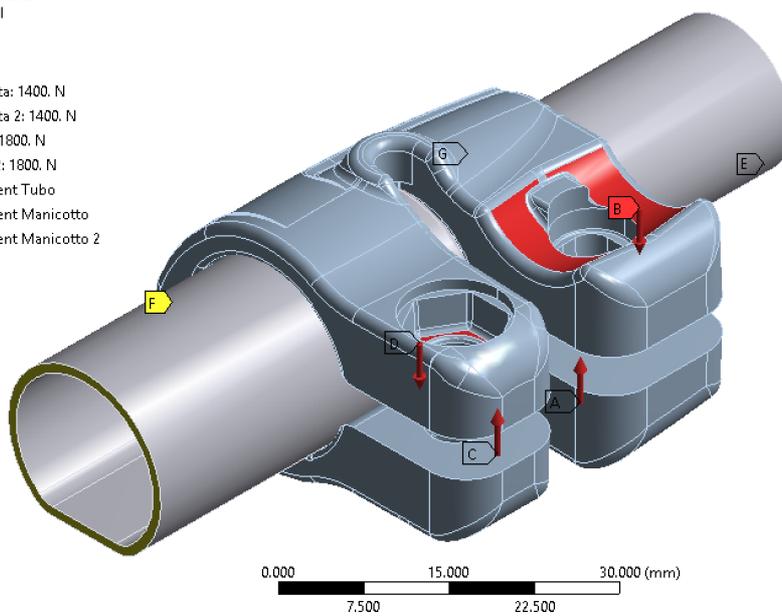


ANSYS
 R14.5

Figura 6.21 Carichi e vincoli nell'analisi definitiva. Lato B.

B: Analisi definitiva
 Static Structural
 Time: 10. s

- A** Forza levetta: 1400. N
- B** Forza levetta 2: 1400. N
- C** Forza vite: 1800. N
- D** Forza vite 2: 1800. N
- E** Displacement Tubo
- F** Displacement Manicotto
- G** Displacement Manicotto 2



ANSYS
 R14.5

Figura 6.22 Carichi e vincoli analisi definitiva. Lato A.

Come nell'analisi preliminare, le forze sono applicate sulle superfici di appoggio dei componenti di serraggio, quali leva e vite, con direzione X.

Queste sono caratterizzate da valori superiori rispetto a quanto risulta dalle prove di assemblaggio del manicotto. Ciò permette di valutare lo stato tensionale anche nel caso in cui si ecceda con il carico definito dalle specifiche di montaggio.

In Tabella 6.9 sono riassunti i valori dei carichi applicati ad ogni Loadstep, nella porzione di manicotto sulla quale agiscono la leva e la vite.

<i>Loadstep</i>	<i>Forza Leva [N]</i>	<i>Forza Vite [N]</i>
1	140	180
2	280	360
3	420	540
4	560	720
5	700	900
6	840	1080
7	980	1260
8	1120	1440
9	1260	1620
10	1400	1800

Tabella 6.9 Andamento dei carichi per ogni Loadstep.

Per quanto riguarda i vincoli, vengono bloccate per tutti gli spostamenti, le superfici di estremità del tubo di sostegno.

Sul manicotto invece si vincolano due spigoli. Quello in Figura 6.23 è vincolato agli spostamenti circolari ed assiali rispetto al *Sistema polare foro grande*, per tutta la durata dell'analisi. Ciò permette al manicotto di andare in appoggio sul sostegno senza però ruotare o traslare lungo Z.

B: Analisi definitiva
Displacement Manicotto
Time: 10. s

ANSYS
R14.5

■ Displacement Manicotto
Components: Free;0;0. mm

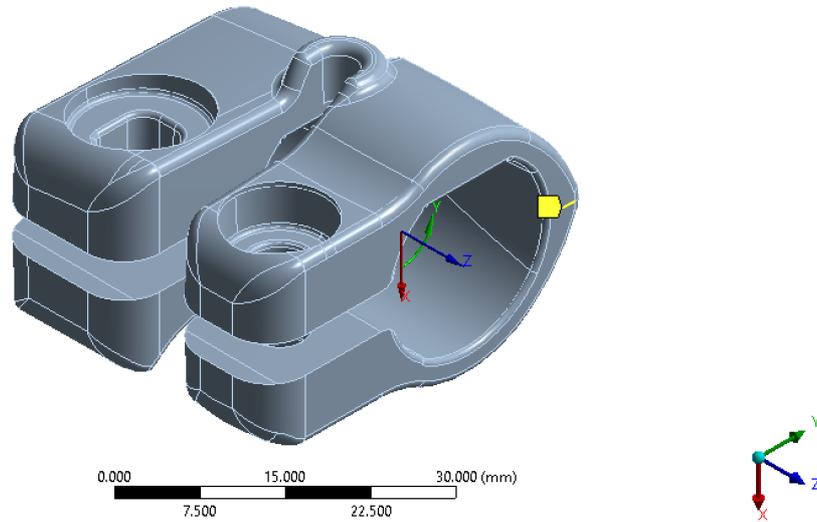


Figura 6.23 Spigolo vincolato per tutta la prova.

Lo spigolo in Figura 6.24 viene invece vincolato agli spostamenti circolari ed assiali rispetto a *Sistema polare foro piccolo* fino al terzo Loadstep e successivamente sbloccato.

B: Analisi definitiva
Displacement Manicotto 2
Time: 10. s

ANSYS
R14.5

■ Displacement Manicotto 2
Components: Free;0;0. mm

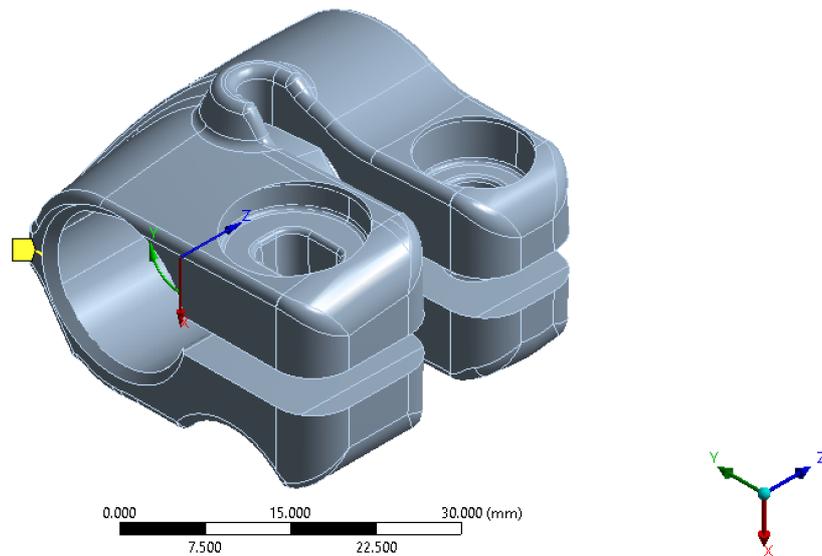


Figura 6.24 Spigolo vincolato fino al terzo Loadstep.

Da analisi precedenti si vede che a partire dal quarto Loadstep il manicotto è in contatto con il sostegno, si sceglie quindi questo come limite per sbloccare lo spigolo, così da permettere al componente di ruotare leggermente ed assestarsi meglio al tubo.

Si eseguono anche delle analisi sbloccando entrambi gli spigoli a partire dal quarto Loadstep, ma si incontrano problemi di stabilità del sistema. Vengono indicati errori dovuti a moti rigidi del manicotto e di conseguenza si decide di mantenere almeno un vincolo per tutta la durata dell'analisi.

6.3.4 Risultati

In Figura 6.25 sono rappresentati i risultati, in termini di tensione equivalente di Von Mises, per l'intero modello con manicotto in lega 44100, a seguito dell'applicazione di un carico di 1000 N (Loadstep 7, Substep 2) sulle superfici di azione della levetta.

Il valore massimo di 437.68 MPa riportato nella legenda della Figura 6.25, è relativo al sostegno, modellato con il materiale 5086, con comportamento lineare-elastico. Questo picco, evidenziato dal cartellino *Max* in Figura 6.26, è dovuto alla pressione esercitata dagli spigoli vivi, visibili in Figura 6.27, presenti nei fori del manicotto.

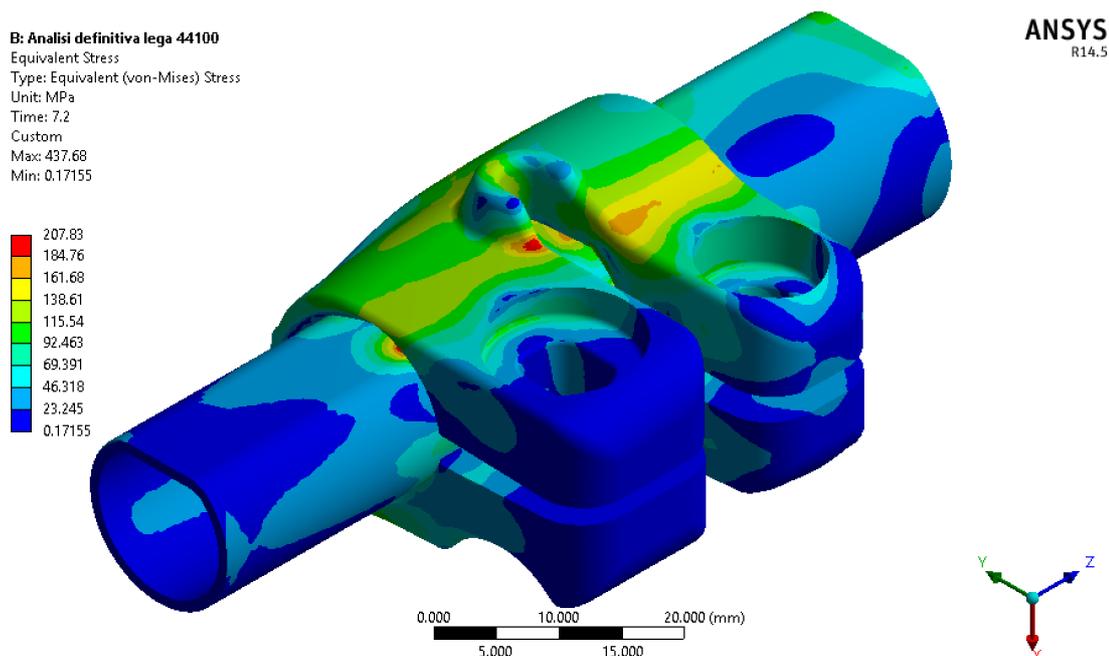


Figura 6.25 Tensione equivalente di Von Mises per l'intero modello.

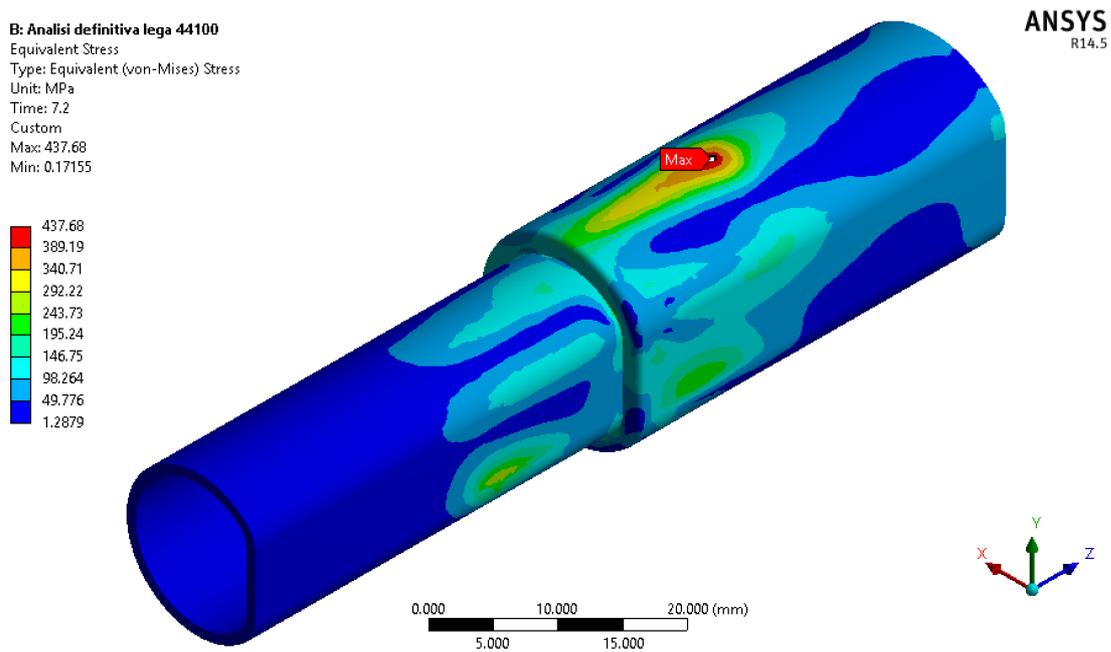


Figura 6.26 Tensione equivalente di Von Mises per il sostegno.

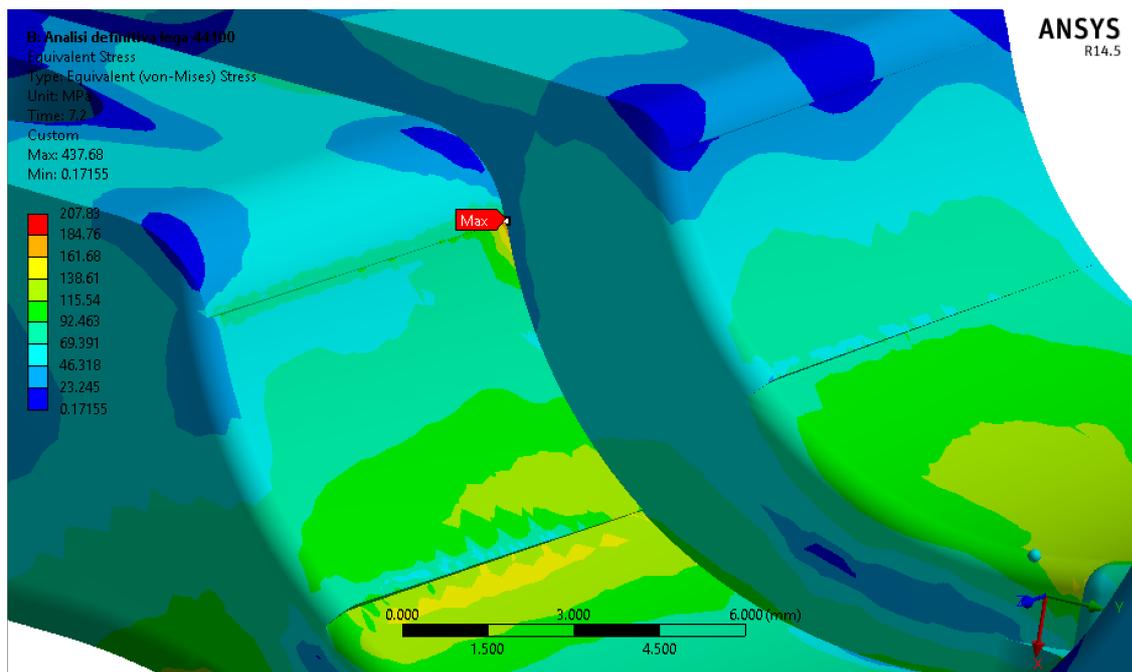


Figura 6.27 Spigoli vivi nei fori del manicotto.

In prossimità di questi spigoli, in particolare in quello evidenziato dal cartellino *Max* in Figura 6.27, si ha anche il picco massimo di tensione nel manicotto, che corrisponde al valore di fondo scala della tensione: 207.83 MPa. Questa non viene considerata come una criticità in quanto nel componente reale questi spigoli non sono presenti, inoltre

queste zone lavorano a compressione, condizione meno gravosa dello stato di trazione che interessa la superficie esterna del manicotto. Concentrandosi su quest'ultimo, in Figura 6.27 e 6.28, si vede come presenti una sola zona critica rappresentata dal raccordo nel lato B della nervatura di rinforzo, la sporgenza arrotondata che separa le due zone del manicotto, quella fissa sul tubo esterno e quella mobile che vincola quello interno.

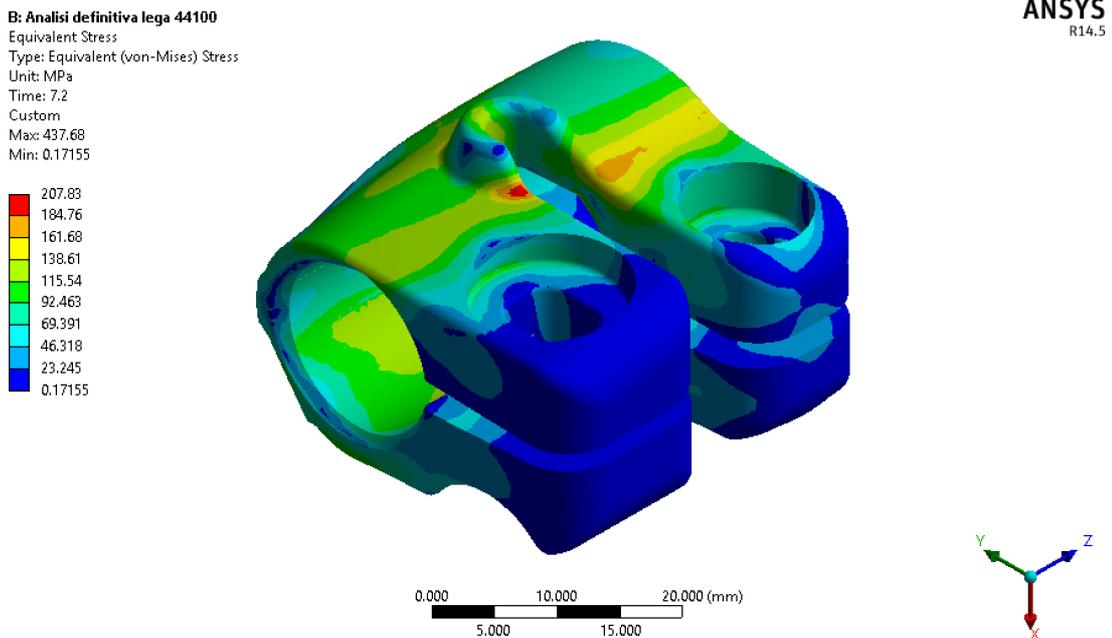


Figura 6.28 Tensione equivalente di Von Mises nel manicotto. Lato B.

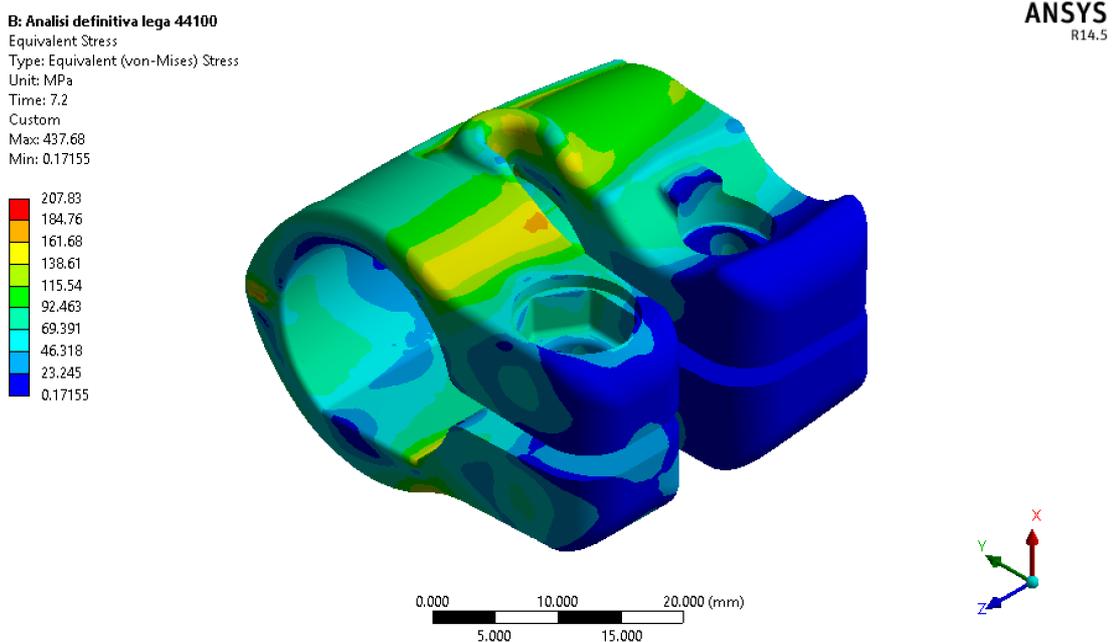


Figura 6.29 Tensione equivalente di Von Mises nel manicotto. Lato A.

Dall'analisi si vede come una zona estesa, in entrambi i lati del manicotto, superi il limite di snervamento del materiale, pari a 123 MPa, a riprova che il componente subisce una deformazione plastica permanente. Il picco di tensione in prossimità del raccordo della nervatura risulta essere di 202 MPa, inferiore ai 260 MPa di carico di rottura del materiale.

In Figura 6.30 sono rappresentati i risultati, come tensione equivalente di Von Mises, con 1400 N di forza sulle superfici di azione della levetta.

Com'è possibile vedere la distribuzione delle tensioni rimane molto simile a quella con carichi inferiori, ma si porta ovviamente a valori superiori. In particolare la tensione sul raccordo critico risulta essere di 223 MPa.

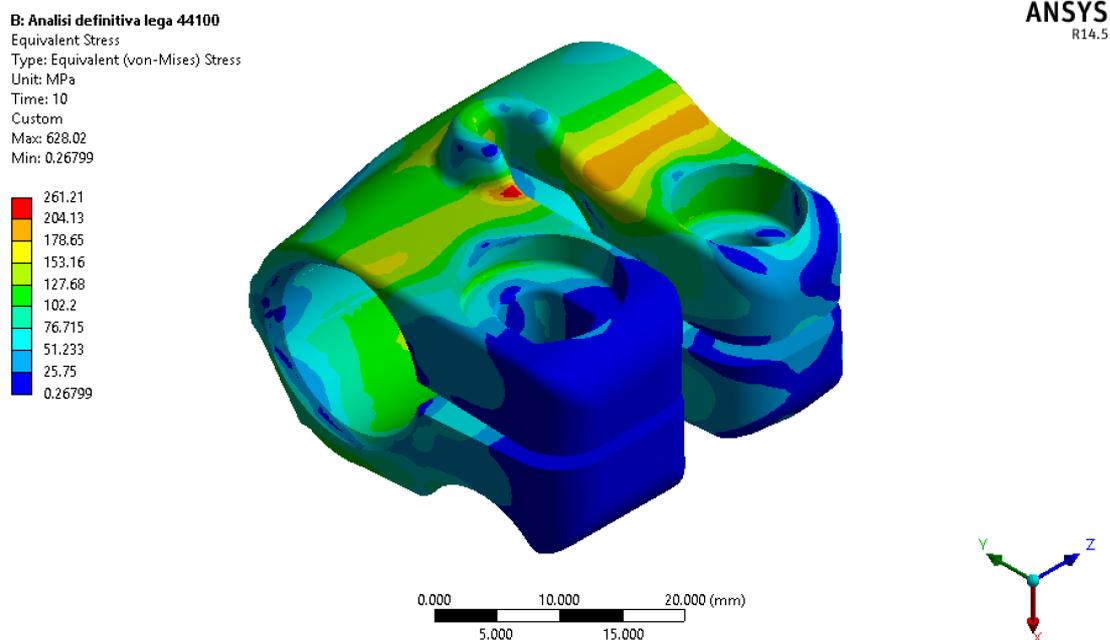


Figura 6.30 Tensione equivalente di Von Mises per il manicotto. Lato B. 1400 N.

Dall'analisi si evidenzia quindi come il componente, proprio nella parte che lavora a carichi cicli, presenti una concentrazione di tensioni importante.

Questo non rappresenta un problema con i carichi statici applicati in fase di assemblaggio, in quanto genera solamente una deformazione plastica localizzata senza arrivare a rottura, ma può rappresentarlo durante la fase di utilizzo da parte del cliente.

I cicli di apertura e chiusura della leva possono innescare in quel punto una cricca che poi propaga fino alla rottura del componente.

In Figura 6.31 è rappresentata la deformazione totale, in millimetri, confrontabile con la deformazione che si verifica nei componenti reali. Nelle prove di assemblaggio, la distanza tra le estremità mobili, con la leva chiusa, risulta essere in media di 1.3 mm con una dispersione di ± 0.1 mm. Dall'analisi FEM risulta essere 1.5 mm. Una differenza del 15% rispetto al valore medio misurato sui componenti reali, considerando le ipotesi semplificative fatte, può essere considerata accettabile.

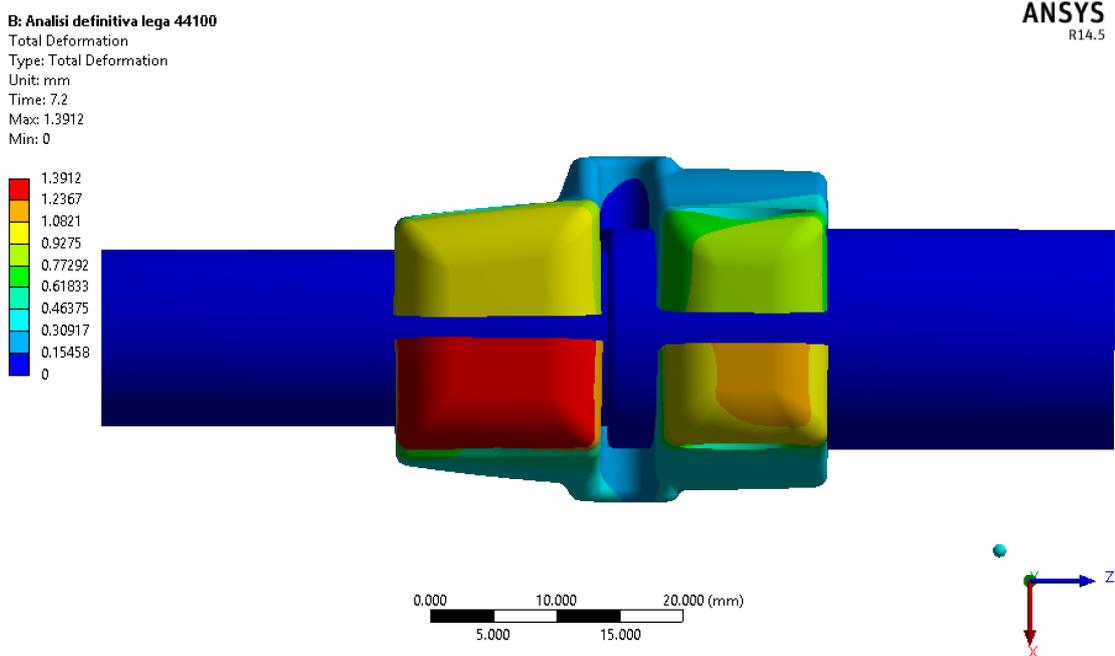


Figura 6.31 Distanza estremità mobili.

Ulteriori risultati interessanti riguardano le condizioni del contatto, in Figura 6.32 è rappresentato il gap, la distanza tra manicotto e sostegno.

Si vede come la distanza iniziale dovuta alla differenza di diametro tra manicotto e tubo sia stata annullata, garantendo il contatto su buona parte della superficie.

In Figura 6.33 invece viene rappresentata la penetrazione tra le superfici dei due corpi. Il valore massimo si ha in prossimità del punto di contatto tra il manicotto e lo spallamento del sostegno, il punto di passaggio dal diametro maggiore a quello minore. Tale valore è pari a 4 centesimi di millimetro, ed essendo localizzato in un punto non particolarmente interessante non crea preoccupazioni circa la validità dei risultati.

Valori prossimi al massimo sono presenti anche in prossimità degli spigoli tra le superfici dei fori, ma come per i picchi di tensione, non essendo rappresentativi del componente reale, non vengono considerati.

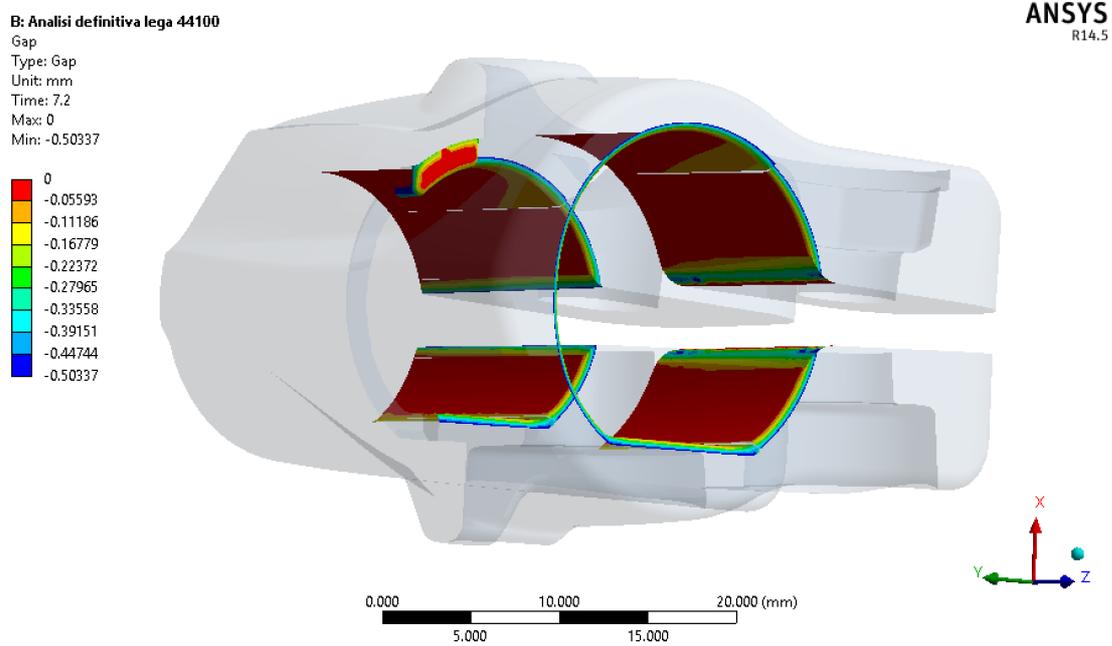


Figura 6.32 Gap tra manicotto e sostegno.

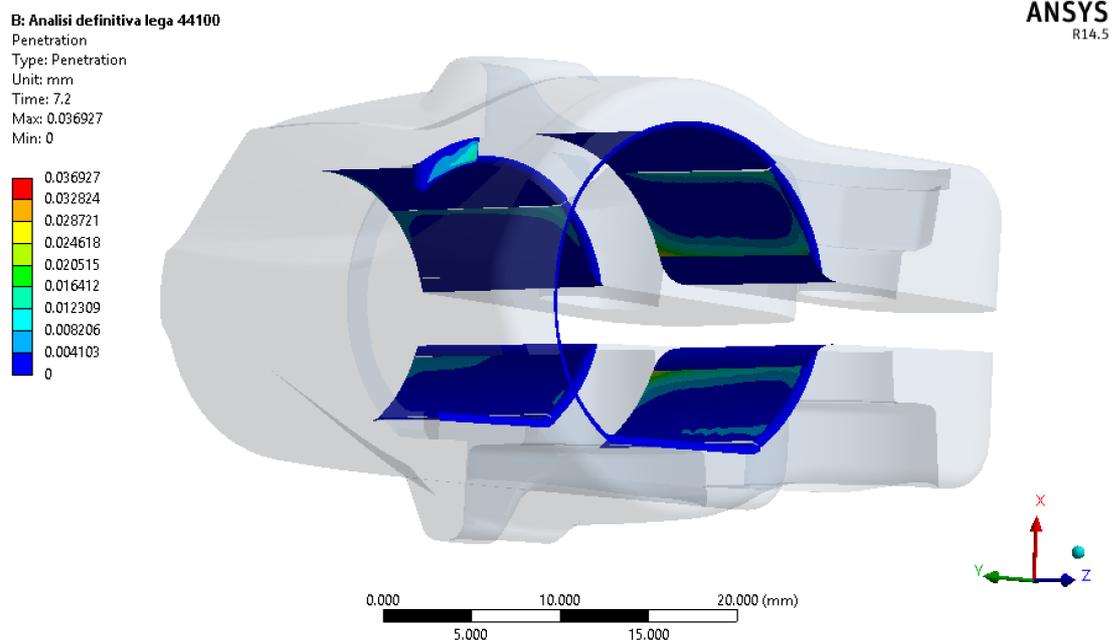


Figura 6.33 Penetrazione tra i due corpi.

6.3.5 Confronto delle tre leghe

I risultati dell'analisi precedente si riferiscono al manicotto modellato con il materiale 44100. Si eseguono le prove anche con gli altri due materiali della libreria e di seguito è riportato un confronto.

Con le leghe 47100 si ottiene la stessa distribuzione delle tensioni della lega 44100, ma cambiano i valori assoluti, che risultano maggiori. Quanto riportato in precedenza, circa la criticità del raccordo, può essere esteso anche a queste leghe.

In Tabella 6.10 sono riportati i valori del picco di tensione nel raccordo critico con un carico applicato sulle superfici di appoggio della leva di 1000 N.

	44100	47100	47100 Sr
<i>Tensione su raccordo [MPa]</i>	202	227	221

Tabella 6.10 Confronto dei risultati con le tre leghe.

In Figura 6.34 sono rappresentati i risultati della prova con il manicotto in lega 47100, mentre in Figura 6.35 quelli della lega 47100 modificata allo stronzio.

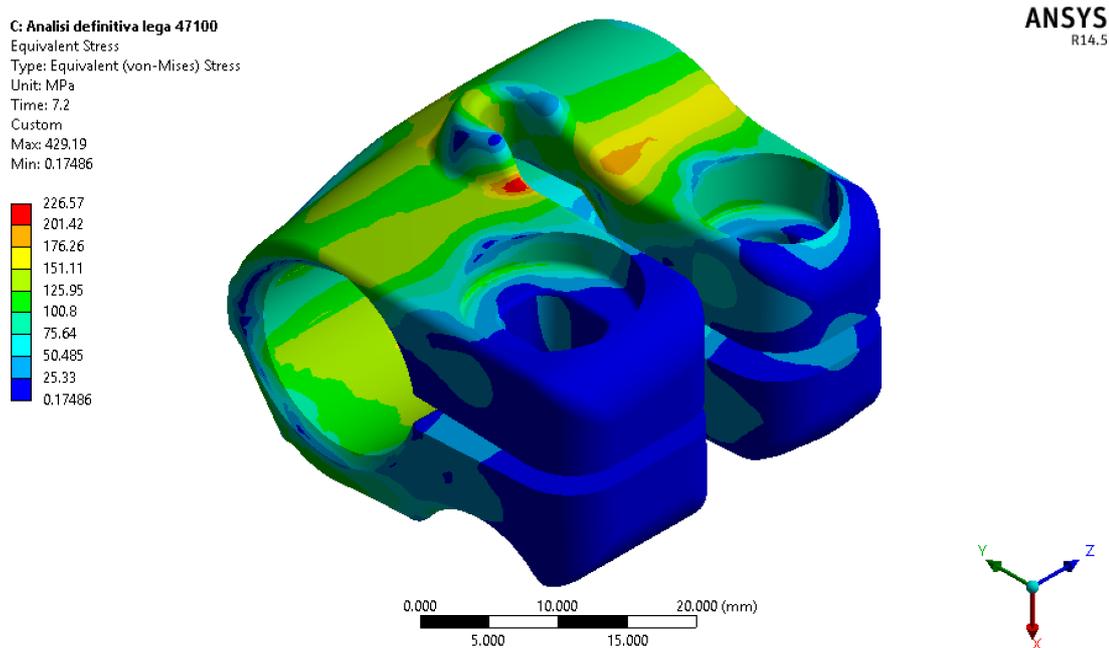


Figura 6.34 Tensione equivalente di Von Mises nel manicotto in lega 47100

D: Analisi definitiva lega 47100 Sr
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 7.2
 Custom
 Max: 428.93
 Min: 0.17418

ANSYS
 R14.5

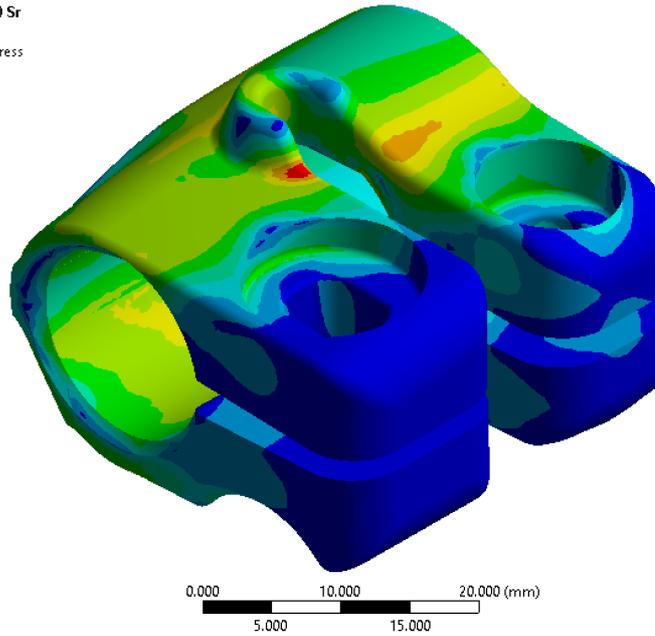
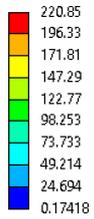


Figura 6.35 Tensione equivalente di Von Mises nel manicotto in lega 47100 Sr

Interessante risulta essere la differenza tra le tre leghe circa la distanza tra le due estremità mobili del manicotto. In Tabella 6.11 sono riassunti i valori e si vede come, la maggior rigidità delle leghe 47100 che si osserva dalle curve delle prove di trazione, si rifletta su questi risultati.

Rispetto alla lega 44100, a parità di carico, con le leghe 47100 il manicotto rimane più aperto.

	44100	47100	47100 Sr
<i>Distanza tra estremità [mm]</i>	1.49	1.57	1.58

Tabella 6.11 Confronto distanza tra le estremità mobili.

Ciò comporta una differenza di pressione di contatto tra manicotto e tubo, di conseguenza un minore carico assiale supportabile dalla gamba. In Tabella 6.12 sono riportati i valori di pressione massima sulle superfici di contatto tra il foro di diametro minore del manicotto ed il tubo.

Si può osservare, come prevedibile dalle misurazioni della distanza, che i manicotti nelle leghe 47100, a parità di carico (1000 N), applichino una pressione minore al tubo.

In Figura 6.36(a) è rappresentata la pressione di contatto della lega 44100, mentre in Figura 6.36(b) quella della lega 47100.

	44100	47100	47100 Sr
<i>Pressione di contatto</i> [MPa]	109.69	90.39	90.58

Tabella 6.12 Confronto pressione di contatto tra le leghe a 1000 N.

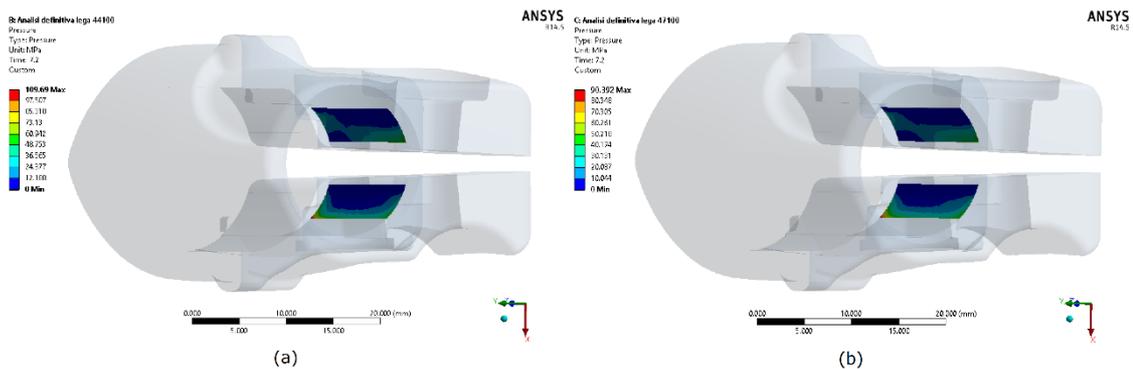


Figura 6.36 Confronto pressione di contatto tra lega 44100 (a) e lega 47100 (b)

Considerando i risultati della lega 44100, in termini di pressione di contatto, come riferimento. Per avere la stessa funzionalità, quindi la stessa pressione, sui manicotti nelle leghe 47100 dev'essere applicato un carico di chiusura della leva pari a 1100 N. Questa forza, invertendo la formula (1), si ottiene con una coppia di serraggio di 1.5 Nm.

6.4 Analisi estensimetrica

Per validare il modello agli elementi finiti, viene eseguita un'analisi estensimetrica. Questa procedura consiste nel misurare le deformazioni sulla superficie del componente attraverso l'utilizzo di particolari strumenti: gli estensimetri.

Questi sono delle resistenze ricavate da una lamina di materiale metallico adagiate su di un supporto plastico. La varietà di dimensioni disponibili sul mercato è notevole e la scelta del modello si basa sulle esigenze della particolare applicazione.

L'estensimetro viene incollato sulla superficie del componente e permette di ricavarne le deformazioni a seguito dell'imposizione di un carico. Ciò che si misura è la variazione di resistenza dell'estensimetro, correlabile alla deformazione attraverso un fattore di taratura, misurato sperimentalmente dal produttore [17].

I risultati dell'analisi estensimetrica, come deformazioni in particolari zone del componente, permettono quindi un confronto con il modello agli elementi finiti.

6.4.1 Preparazione del componente

Gli estensimetri utilizzati sono degli HBM 0.6/120 LY41. Si tratta di estensimetri fotoincisi, lineari, con un'unica griglia di misura.

Di seguito le loro caratteristiche:

- Griglia di misura lunga 0.6 mm e larga 1 mm.
- Resistenza nominale: 120 Ω .
- Fattore di taratura: $1.76 \pm 1.5\%$.
- Auto-compensanti per l'acciaio.

La caratteristica di autocompensazione significa che sono caratterizzati da un coefficiente di dilatazione termica pari a quella dell'acciaio, di conseguenza una variazione di temperatura e quindi di dimensione nel componente, si trasferisce uguale nell'estensimetro.

Nel caso in esame vengono però applicati su una lega di alluminio, quindi non viene rispettata la corrispondenza tra i coefficienti di dilatazione termica, che per l'alluminio è circa $\alpha_{Al} = 20 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$, mentre per l'estensimetro è $\alpha_{est} = 10.8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Per evitare errori sulla misurazione, si applica l'estensimetro sul componente subito prima di effettuare le misure. In questo modo si limita al minimo l'influenza delle variazioni di temperatura.

L'analisi si esegue su un manicotto in lega 44100 verniciato.

Le zone sulle quali si incollano gli estensimetri vengono carteggiate per rimuovere la vernice e spianate per permettere una perfetta adesione degli stessi.

Due delle zone scelte sono sul lato B del manicotto, in particolare in prossimità del raccordo critico ed una è sulla parte posteriore. Gli estensimetri incollati sono quindi tre, numerati come in Figura 6.37 e sono posizionati lungo la direzione Y del modello CAD, questo permette un facile confronto con le deformazioni calcolate agli elementi finiti lungo la stessa direzione.

L'incollaggio viene eseguito tramite un adesivo cianoacrilato. Questo risulta ottimo per misurazioni sperimentali ripetute poche volte o di breve durata, in quanto tende ad irrigidirsi nel tempo e quindi influenzare la risposta dell'estensimetro alle sollecitazioni. Nel caso in esame, le misurazioni vengono eseguite nella sola giornata di applicazione degli estensimetri, di conseguenza si preferisce la praticità di tale adesivo rispetto ad altri più stabili nel tempo.

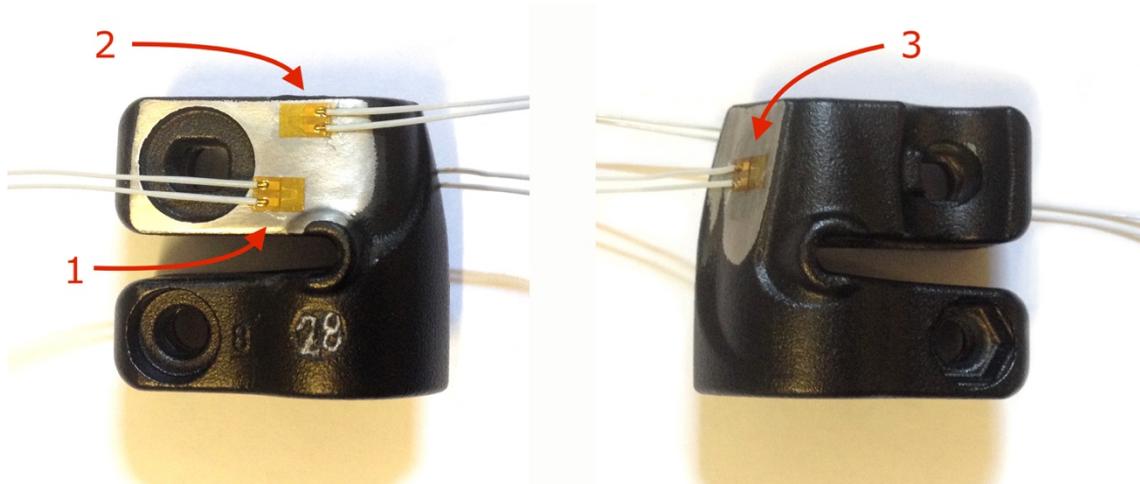


Figura 6.37 Manicotto con estensimetri.

6.4.2 Risultati

Dopo aver incollato gli estensimetri, il manicotto viene montato sui tubi e viene avvitata la vite che lo fissa al tubo esterno applicando la coppia di serraggio definita dalle specifiche del componente: 1.8 Nm. La registrazione delle deformazioni viene quindi avviata ed in Figura 6.38 è rappresentato quanto rilevato.

Come prima operazione viene serrato il dado della levetta a 1.4 Nm, gli estensimetri che inizialmente registravano una deformazione nulla si portano ad un primo valore di picco. Successivamente la levetta viene aperta e chiusa ripetutamente.

I picchi di deformazione, corrispondenti alla leva in posizione di chiusura, sono da subito stabili, mentre i valori delle valli si stabilizzano dopo i primi cicli, ciò è dovuto all'incrudimento del materiale a seguito della deformazione plastica.

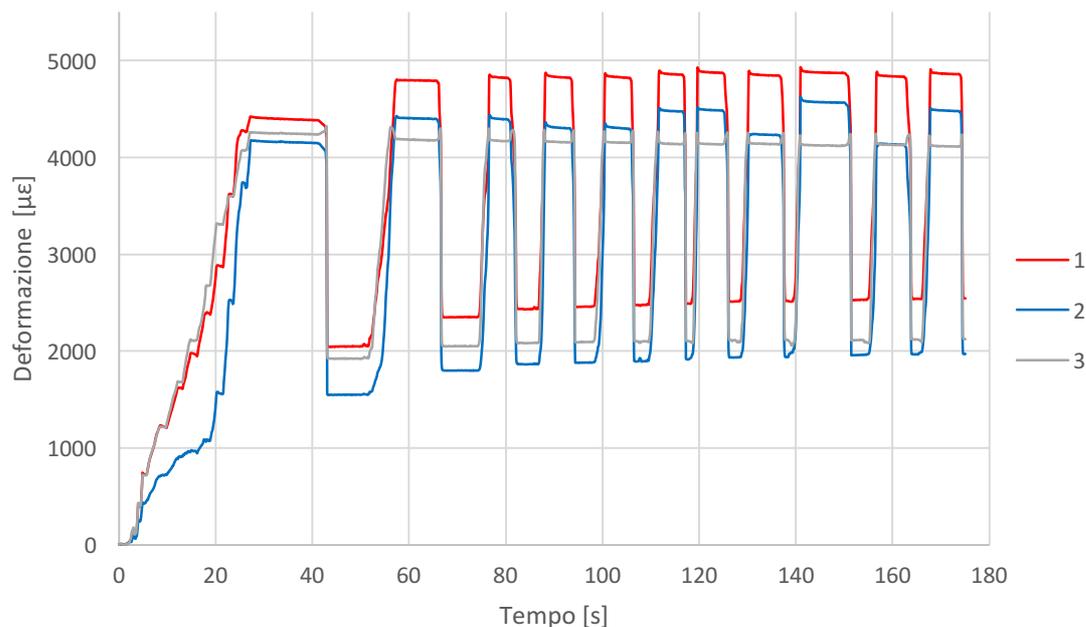


Figura 6.38 Deformazione degli estensimetri a cicli di apertura e chiusura della levetta.

Come descritto nel capitolo riguardante le prove di assemblaggio, il tubo interno al manicotto può ruotare e a leva chiusa si identificano due posizioni opposte, distanti 1° tra loro. Questo comporta una diversa configurazione dei carichi sul componente.

Nei primi cicli di apertura e chiusura della levetta, registrati con gli estensimetri, non si dà importanza alla rotazione del tubo interno, che viene lasciato posizionarsi casualmente. Successivamente invece, negli ultimi quattro cicli, durante la chiusura della levetta se ne blocca manualmente la rotazione e si può vedere come la deformazione rilevata dal secondo estensimetro cambi, mentre quella del primo e del terzo non venga influenzata.

In particolare, il valore di deformazione maggiore si ha quando il tubo viene posizionato come in Figura 6.39 (a), mentre il valore più basso si ha con la configurazione in Figura 6.39(b). Ricordando che il tubo non è a sezione circolare, ma con forma a D, si verifica che nel primo caso il manicotto appoggia subito sullo spigolo del tubo, la porzione del componente soggetta a flessione è più corta e si registra una deformazione maggiore in corrispondenza dell'appoggio, dove è posizionato il secondo estensimetro.

Nel secondo caso invece tutta la porzione mobile del componente è libera di flettere, di conseguenza, avendo un braccio più lungo ed imponendo la stessa freccia all'estremità libera, la deformazione in quel punto è minore.



Figura 6.39 Opposte posizioni di rotazione del tubo interno.

Il motivo per cui solamente il secondo estensimetro vede un innalzamento della deformazione, mentre il primo resta ad un valore costante, è dovuto al fatto che, come visibile nella sezione in Figura 6.40, la porzione del foro del manicotto che va in appoggio sullo spigolo del tubo è sformata. Non essendo una superficie cilindrica, ma conica, solo la parte in prossimità del secondo estensimetro risente della rotazione del tubo, in quanto è quella che effettivamente va in contatto.

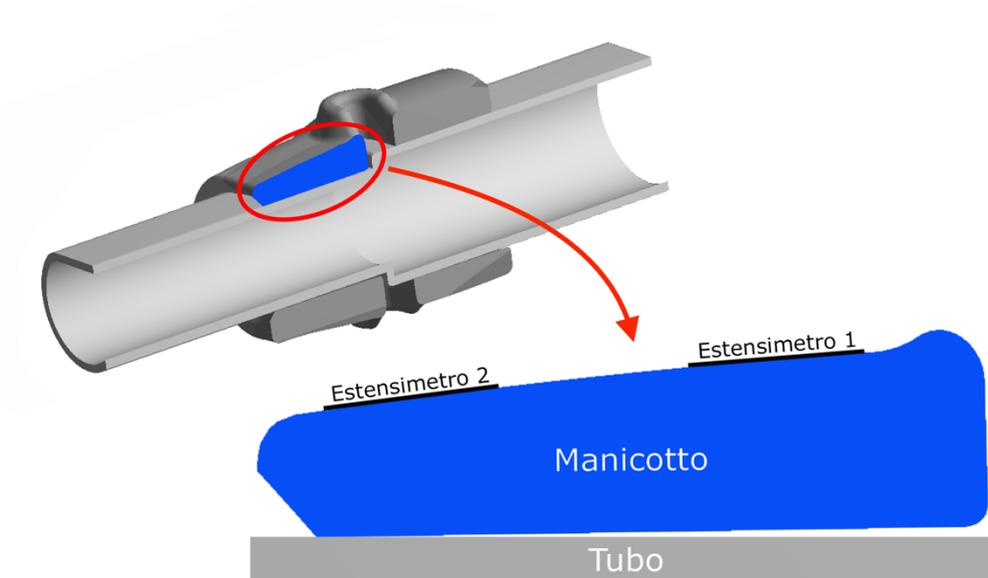


Figura 6.40 Sezione del lato B del manicotto in appoggio.

6.4.3 Confronto con l'analisi FEM

La misura fornita dagli estensimetri è pari al valore medio di deformazione che si ha nella zona coperta dalla griglia dello strumento. Di conseguenza, per operare un confronto con il modello FEM, non è sufficiente valutare una deformazione puntuale, ma si deve calcolare la media delle deformazioni dei nodi presenti nelle aree sulle quali sono posizionati gli estensimetri nel componente reale.

Per far ciò si utilizza la funzione di ANSYS Workbench: *User Defined Results*.

Considerando un estensimetro, si seleziona sul modello una porzione di nodi, compatibile con l'area della griglia dell'estensimetro reale ed in questa si calcola la deformazione totale. Il risultato fornito è un listato con il valore di deformazione per ogni nodo selezionato. Facendo la media di questi risultati si ottiene il valore di deformazione totale media per l'estensimetro in esame.

In Figura 6.41(a) è riportato il manicotto con i due estensimetri del lato B, mentre in Figura 6.41(b) il modello CAD con le aree selezionate per il confronto.

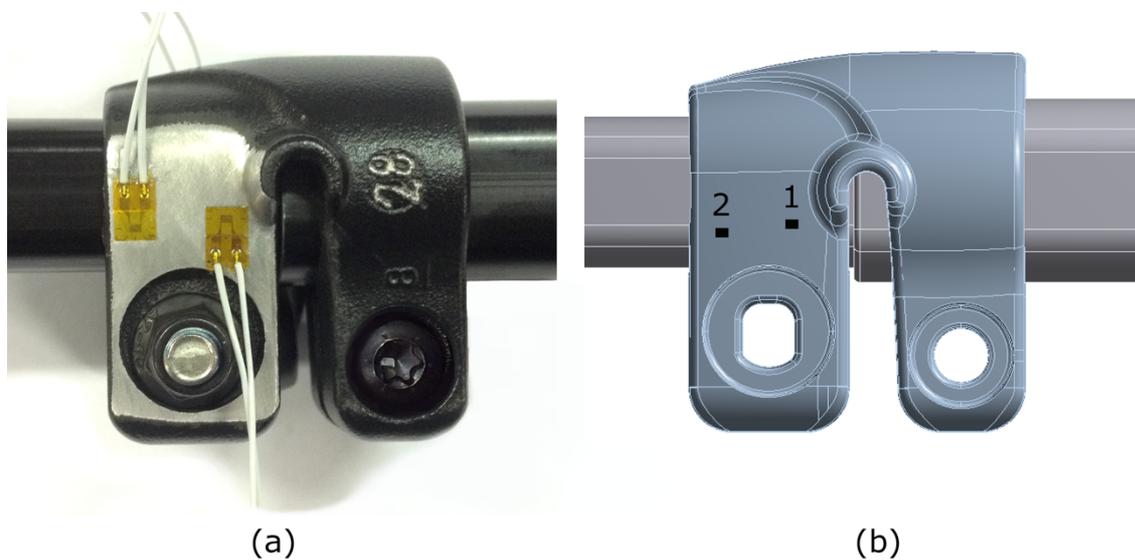


Figura 6.41 Aree di confronto dei risultati FEM con analisi estensimetrica.

L'espressione che viene definita per lo *User Defined Results* è:

$$- \text{EPPLY} + \text{EPELY}$$

Ciò corrisponde alla somma della deformazione plastica ed elastica lungo Y, riferita al sistema di riferimento globale. Questa direzione è concorde con quella di misura degli estensimetri.

Questo è valido per i primi due estensimetri. Il terzo, come riportato in Figura 6.42(a), non è orientato concorde al sistema di riferimento globale. Si utilizza quindi la stessa espressione precedente, ma si calcolano i risultati rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano, con asse X entrante nella superficie di incollaggio dell'estensimetro ed asse Y parallelo all'asse Y del sistema globale, Figura 6.42(b).

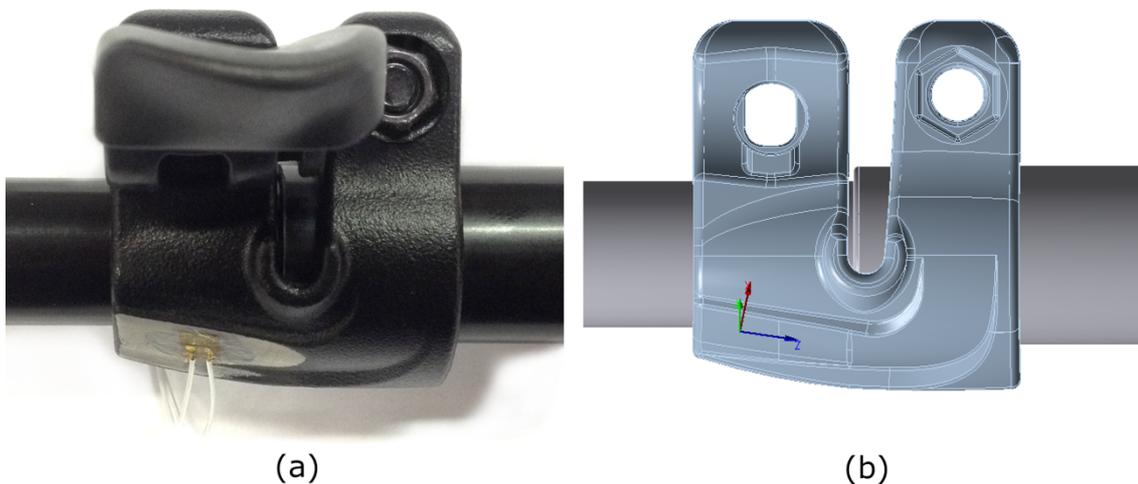


Figura 6.42 Sistema di riferimento per i risultati del terzo estensimetro

Si possono quindi calcolare le deformazioni medie nelle aree coperte dalle griglie degli estensimetri nel modello FEM e confrontarle con i valori misurati sperimentalmente.

Volendo valutare quale sia l'entità del carico applicato dalla levetta nella fase di chiusura, si calcolano le deformazioni al variare della forza e si confrontano questi risultati con quelli dati dagli estensimetri.

In Tabella 6.13 sono riportati i valori di deformazione misurati dagli estensimetri e quelli ricavati dal modello FEM. La corrispondenza si ottiene al Substep 7.2 dell'analisi, con un carico di 1000 N.

<i>Estensimetro</i>	<i>Deformazione sperimentale [$\mu\epsilon$]</i>	<i>Deformazione modello FEM [$\mu\epsilon$]</i>	<i>Errore</i>
1	4800	4810	0.2 %
2	4500	4420	1.8 %
3	4100	3700	9.8 %

Tabella 6.13 Confronto analisi estensimetrica e FEM.

Per i primi due estensimetri, posizionati sul lato B del manicotto, il valore determinato dall'analisi FEM ha un errore inferiore al 2% rispetto a quello sperimentale.

Per quanto riguarda il terzo, l'errore è attorno al 10 %, l'analisi estensimetrica fornisce un valore superiore rispetto a quella numerica.

Ciò può essere dovuto alla preparazione del componente per l'applicazione degli estensimetri. Per avere una superficie sufficientemente ampia e piatta da permettere l'incollaggio dell'intero supporto dell'estensimetro, si è asportata una quantità di materiale forse eccessiva. Questo riduce lo spessore della sezione del manicotto in quella zona che può essere la causa della maggiore deformazione registrata sperimentalmente.

Ad ogni modo si è verificato che, come calcolato nel capitolo cinque, nelle corrette condizioni di funzionamento, il carico applicato dalla levetta, a seguito del serraggio del dado ad 1.4 Nm, è pari a 1000 N.

7 Classificazione ai Raggi X

Come analisi preliminare, si effettua una suddivisione in tre categorie dei campioni, in base ai difetti, attraverso un controllo non distruttivo tramite Raggi X.

Durante l'ispezione il componente viene irradiato da un fascio di Raggi X; sulla base della densità e dello spessore del materiale, il fascio viene attenuato durante l'attraversamento del pezzo. Tale attenuazione viene identificata da un detector, posto dopo il componente, che permette la costruzione dell'immagine. Questa è in scala di grigi, nella quale i punti più scuri sono quelli in cui l'attenuazione è maggiore, quelli più chiari minore. I parametri dell'emettitore sono mantenuti costanti per tutte le analisi e sono pari a 79.8 kV e 100 μ A.

La strumentazione a disposizione permette di discriminare disomogeneità dell'ordine del decimo o centesimo di mm, di conseguenza, tra le varie tipologie di difetti, risultano evidenti le porosità, rappresentate da zone più chiare e tondeggianti. Composti intermetallici ed ossidi, sono caratterizzati da dimensioni molto contenute, la loro densità non è molto diversa da quella dell'alluminio, per quest'ultimo è 2.7 kg/dm³ mentre per l'allumina è 3.9 kg/dm³ e non comportano variazioni di spessore, quindi la loro identificazione tramite questa analisi risulta essere complessa, se non impossibile.

In Figura 7.1 sono rappresentate le scansioni di riferimento per la classificazione. Considerando che l'influenza dei difetti sulle prestazioni del componente, è tanto maggiore quanto più questi sono localizzati in un punto caratterizzato da una concentrazione delle tensioni, la suddivisione viene eseguita valutando visivamente la quantità e dimensione dei difetti nella zona cerchiata in rosso, corrispondente al raccordo critico della nervatura.

Manicotti che presentano difetti generalizzati, ma ne sono esenti nella zona critica vengono considerati buoni; al contrario, componenti che hanno pochi difetti, ma sono tutti concentrati dove la loro influenza è maggiore, vengono classificati come scadenti.

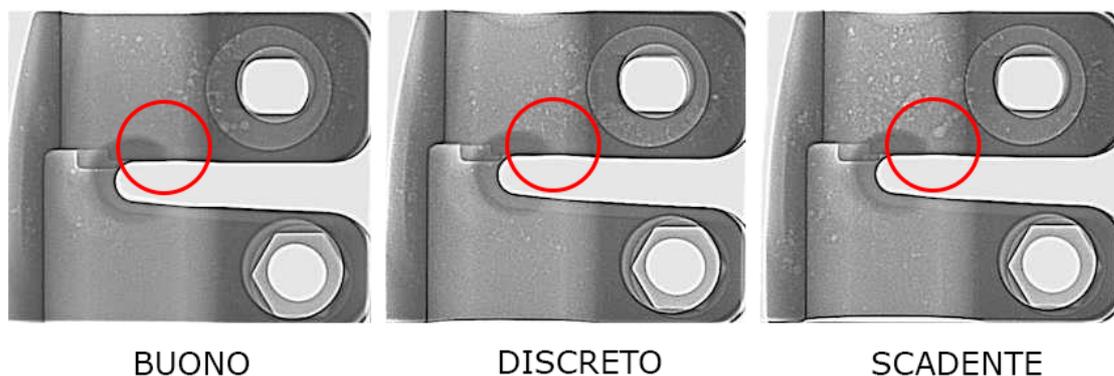


Figura 7.1 Scansioni di riferimento per la classificazione ai Raggi X.

In Tabella 7.1 sono riportati i risultati della classificazione dei manicotti, per ogni lega, con il numero totale di campioni analizzati.

Dalla suddivisione risulta che passando dalla lega 44100 alla 47100 ed in special modo alla 47100 modificata, aumenta la percentuale di campioni buoni, mentre diminuisce quella dei discreti e scadenti.

La sostituzione della lega permetterebbe quindi di ridurre la quantità di difetti nei getti. Ciò comporterebbe una maggiore stabilità delle proprietà meccaniche del materiale e di conseguenza una omogeneità delle prestazioni dei componenti.

	<i>Numero di campioni</i>	<i>BUONI</i>	<i>DISCRETI</i>	<i>SCADENTI</i>
<i>44100</i>	69	35 %	51 %	14 %
<i>47100</i>	47	43 %	40 %	17 %
<i>47100 Sr</i>	48	63 %	29 %	8 %

Tabella 7.1 Classificazione dei manicotti.

8 Caratterizzazione delle leghe utilizzate

Il materiale attualmente utilizzato per la produzione dei manicotti è una lega primaria Alluminio-Silicio 44100. La bassa presenza di impurezze, in particolare di ferro, evita la formazione di composti infragilenti, ma al tempo stesso rende la lega particolarmente aggressiva nei confronti degli stampi, cosa che ne compromette l'integrità. Ciò si ripercuote sui prodotti finali in termini di tolleranze dimensionali e finitura superficiale. Si valuta quindi la possibilità di sostituire il materiale con uno che permetta di ridurre l'usura degli stampi ed aumentare la vita in esercizio del componente.

Come alternativa si considerano le leghe secondarie 47100 e 47100 modificata con 250ppm di stronzio. Queste leghe, derivanti dal processo di riciclo dell'alluminio, sono più economiche rispetto alle primarie e la maggior concentrazione di ferro evita l'adesione del metallo all'acciaio degli stampi.

8.1 Composizione chimica

Per la determinazione della composizione chimica dei manicotti è stata effettuata un'analisi chimica attraverso uno spettrometro di massa, in particolare uno spettrometro ad emissione ottica della Oxford Instruments: Foundry-Master Pro.

Questo strumento, attraverso una scarica elettrica, fa volatilizzare una certa quantità di materiale dal campione. Gli ioni in fase gassosa così ottenuti, dopo essere stati accelerati, attraversano un analizzatore che li separa sulla base del rapporto massa/carica ed infine vengono raccolti da un rivelatore. Nel rivelatore questi generano un segnale elettrico proporzionale al numero di ioni presenti. I segnali vengono successivamente rielaborati e convertiti in uno spettro di massa.

In Tabella 8.1 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi di tre manicotti delle diverse leghe confrontati con le concentrazioni degli elementi definite dalla normativa UNI EN 1706:2010.

	<i>Campione</i> 44100	<i>EN AC</i> 44100	<i>Campione</i> 47100	<i>Campione</i> 47100 Sr	<i>EN AC</i> 47100
<i>Al</i>	85.8	Rimanente	85.9	85.9	Rimanente
<i>Si</i>	13	10.5-13.5	11.6	11.4	10.5-13.5
<i>Fe</i>	0.458	0.65	0.575	0.698	1.3
<i>Cu</i>	0.0834	0.15	0.849	0.825	0.7-1.2
<i>Mn</i>	0.294	0.55	0.199	0.289	0.55
<i>Mg</i>	0.0227	0.10	0.0824	0.0764	0.35
<i>Zn</i>	0.116	0.15	0.45	0.438	0.55
<i>Cr</i>	0.0223	-	0.037	0.0623	0.10
<i>Ni</i>	0.0083	0.10	0.0511	0.0488	0.30
<i>Ti</i>	0.032	0.20	0.0487	0.0461	0.20
<i>Ca</i>	0.0007	< 0.05	0.0027	0.0018	< 0.05
<i>Pb</i>	0.0136	0.10	0.0324	0.0321	0.20
<i>Sn</i>	< 0.0004	-	0.0065	0.0058	0.10
<i>Sr</i>	< 0.0001	-	< 0.0001	0.0257	-

Tabella 8.1 Analisi chimica manicotti.

Dall'analisi si osserva come la lega 44100, primaria, presenti una quantità di elementi alliganti ed impurezze minore rispetto alle leghe 47100, ma una concentrazione di silicio maggiore, ipereutettica, pari al 13%.

Le leghe 47100 si differenziano tra loro principalmente per la concentrazione di ferro e per la presenza di 250 ppm di stronzio in quella modificata.

Dai risultati dell'analisi chimica è possibile valutare lo *sludge factor* (4), un parametro che considera la concentrazione di ferro, manganese e cromo. Questi tendono ad interagire tra loro e con gli altri elementi della lega formando *sludge*: composti intermetallici infragilenti.

$$\text{Sludge Factor} = (1 \times \% \text{Fe}) + (2 \times \% \text{Mn}) + (3 \times \% \text{Cr}) \quad (4)$$

Attraverso un accurato controllo di temperature e tempi di permanenza del fuso nel crogiolo e in camera di iniezione, è possibile limitare la creazione di questi composti. Composti che oltre ad avere un effetto negativo sulle proprietà meccaniche della lega, ne diminuiscono la fluidità e impoverendo la lega di ferro, ne aumentano la tendenza ad aderire alle pareti dello stampo.

In tabella 8.2 sono riportati i valori dello *sludge factor* per le tre leghe in esame. Si vede come per la lega 44100 e la 47100 standard i valori siano simili, mentre risulta maggiore per la 47100 modificata allo stronzio. Un valore inferiore ad 1.8 generalmente previene la formazione di sludge in leghe mantenute a temperature superiori a 650°C, mentre per temperature inferiori è generalmente identificato come limite un fattore 1.4 [1].

	44100	47100	47100 Sr
<i>Sludge Factor</i>	1.11	1.08	1.46

Tabella 8.2 Sludge Factor delle tre leghe.

8.2 Struttura metallografica

Dall'analisi numerica si vede come il manicotto presenti una zona critica in prossimità del raccordo della nervatura nel lato B. Si effettua quindi l'analisi metallografica nella sezione resistente del componente in corrispondenza di tale criticità.

Vengono preparati tre provini, sezionando i manicotti ed inglobandoli a caldo, con resina fenolica, per 10 minuti a 160°C.

In Figura 8.1 sono riportate le panoramiche delle sezioni dei manicotti nelle tre diverse leghe. Si vede come tutte presentino porosità da gas e da ritiro volumetrico diffuse, con una concentrazione maggiore in prossimità del centro della sezione, ultima zona a solidificare.

Nelle panoramiche si può notare come nelle leghe 47100, siano presenti molti piccoli composti, sotto forma di puntini scuri, non visibili nella sezione in lega 44100.

In prossimità dei bordi della sezione, nelle parti a contatto con lo stampo, sono inoltre visibili delle zone con una microstruttura più fine rispetto a quelle circostanti.

Ciò è dovuto all'elevato sottoraffreddamento subito, che provoca una solidificazione più veloce con una conseguente maggiore concentrazione di eutettico.

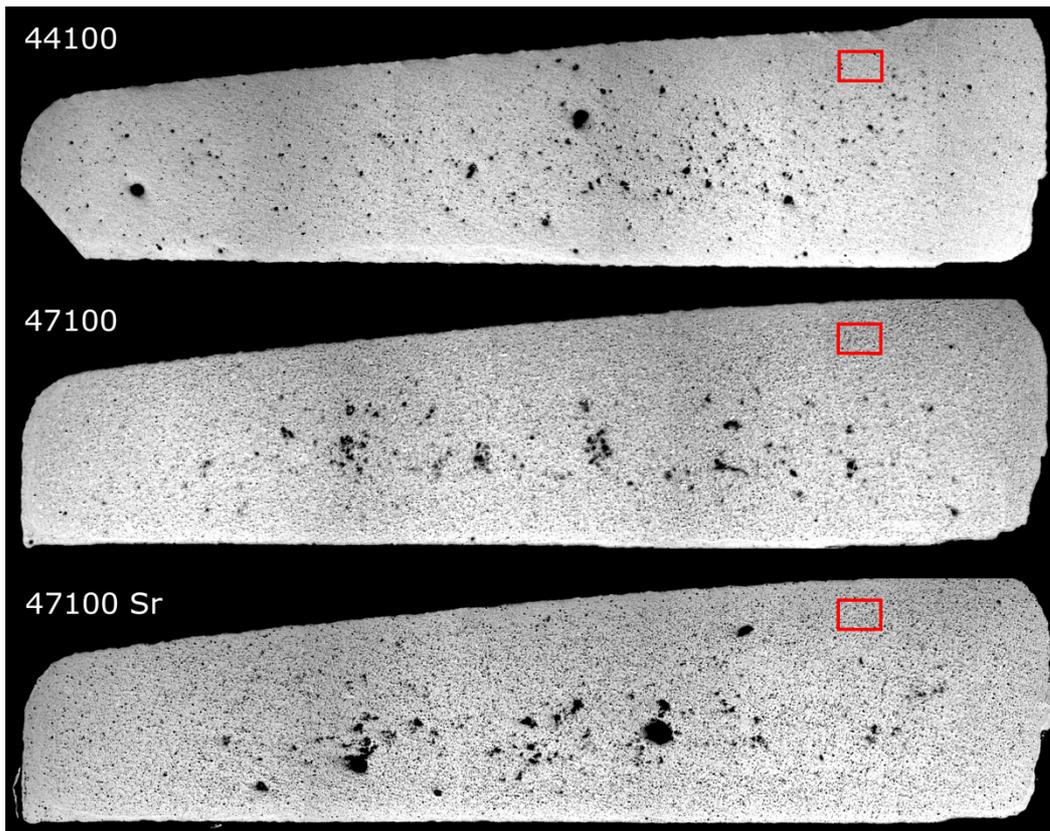


Figura 8.8.1 Panoramiche delle sezioni.

In Figura 8.2 sono riportate le micrografie a 100 e 500 ingrandimenti delle aree riquadrate in Figura 8.1. Sono acquisite nella medesima zona del getto, in prossimità del raccordo critico. Si vede come la struttura del silicio eutettico della lega 47100 sia più fine rispetto a quella della 44100, ma formi in molte zone una maglia interconnessa che rappresenta un percorso facilitato alla propagazione della cricca. Questo conferisce un carico di rottura superiore, ma anche una minore duttilità al materiale.

La struttura più fine del silicio nella lega 47100 può essere dovuta alla concentrazione di rame dieci volte superiore rispetto alla 44100, oppure ad una differenza nei parametri di processo, dei quali non si è a conoscenza; ad esempio una minore temperatura del bagno o degli stampi. In Figura 8.3 è rappresentata la micrografia a 500x della lega 47100, nella stessa zona precedente, a seguito di un attacco selettivo per leghe contenenti rame, che evidenzia in nero i composti CuAl_2 e Cu-Mg . La composizione è: 75 ml H_2O e 25 ml HNO_3 ed il campione viene immerso per 30 s a 70°C . Come è possibile vedere, benché la concentrazione dell'elemento sia pari allo 0.8%, la quantità di composti è limitata. Il raffreddamento veloce ne ha impedito la formazione, mantenendo il rame nell'eutettico, cosa che può provocare un accorciamento delle bacchette di silicio [18]. La lega 44100,

avendo invece una concentrazione di rame pari allo 0.08%, non presenta questo affinamento, ma mostra una morfologia del silicio a bacchette ben definite e separate tra loro. La frattura, durante la propagazione, segue le bacchette di silicio, ma viene rallentata dalla matrice duttile di fase α . La composizione ipereutettica di questa lega è inoltre evidenziata dalla presenza di alcuni cristalli di silicio primario, tra cui uno ben visibile nella micrografia a 500x.

Dalle micrografie della lega 47100 modificata, si vede invece come l'aggiunta dello stronzio, rispetto alla lega standard, comporti una morfologia del silicio eutettico più corta e tozza, ciò ne interrompe la connessione, migliorando la duttilità della lega.

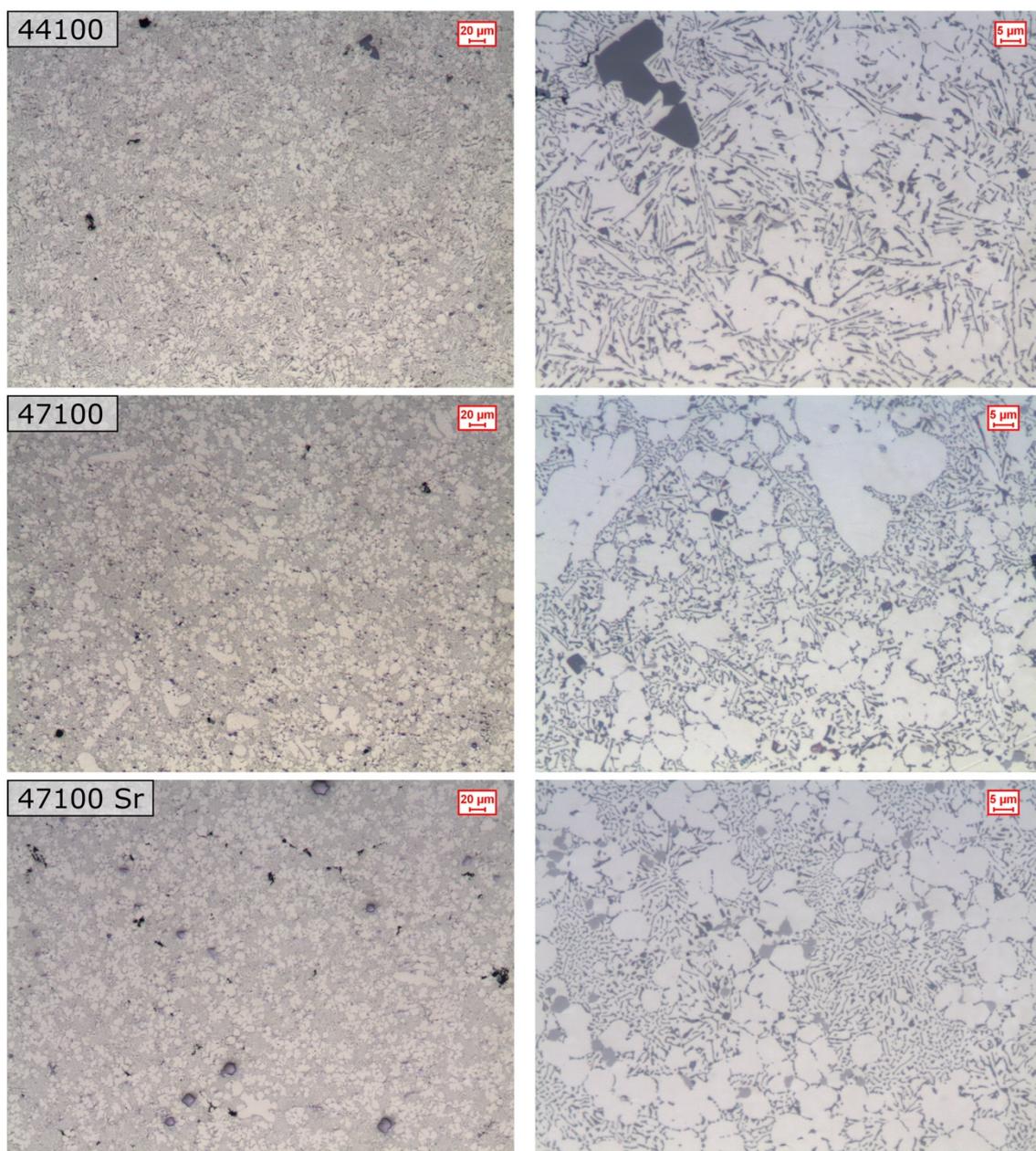


Figura 8.8.2 Micrografie a 100 e 500 ingrandimenti delle tre leghe.

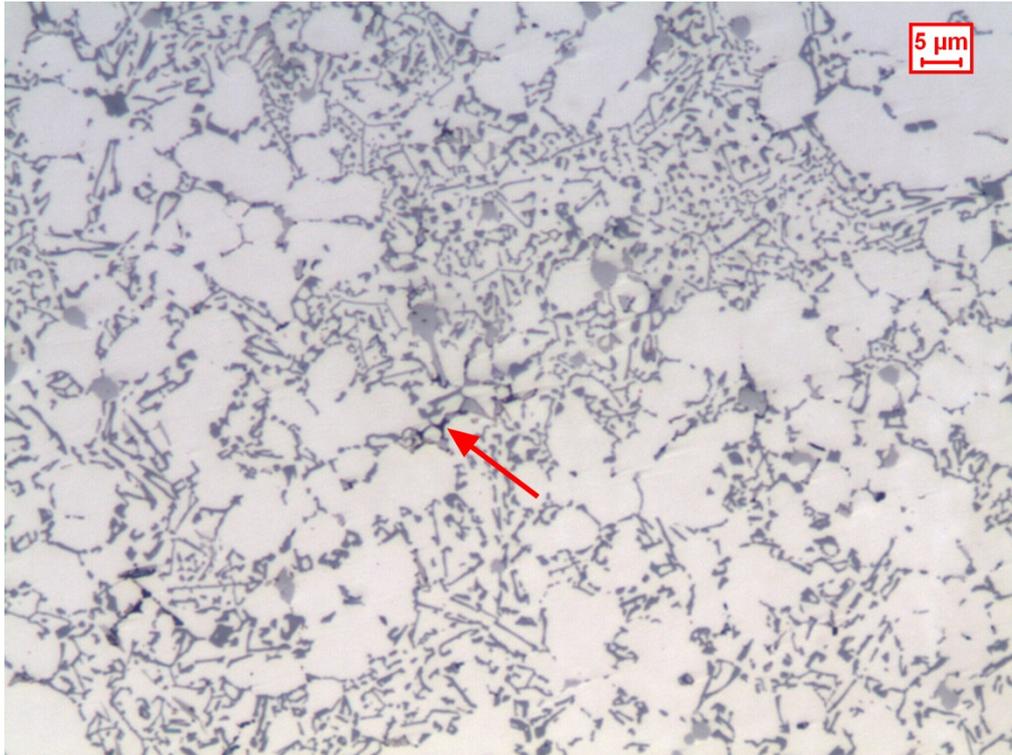


Figura 8.8.3 Micrografia a 500x, lega 47100, dopo attacco selettivo per composti in rame.

8.2.1 Composti infragilenti

In Figura 8.4 sono riportate le micrografie a 500 ingrandimenti, delle zone in prossimità del raccordo critico, per le tre leghe a seguito di un attacco chimico per leghe contenenti ferro. Questo mette in risalto i composti intermetallici in ferro, rame e magnesio evidenziandoli in nero. È costituito da 80 ml di H₂O e 20 ml di H₂SO₄ ed il campione viene immerso per 60 s a 70°C. Come ci si può aspettare dall'analisi chimica, risulta che le leghe 47100, avendo una composizione più ricca di questi elementi, presentano una quantità maggiore di composti. Questi, rappresentando un'interruzione della struttura del materiale, comportano un infragilimento e quindi una diminuzione della duttilità della lega.

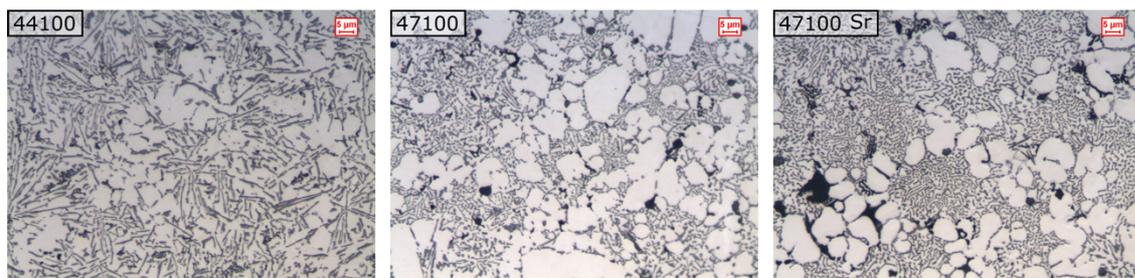


Figura 8.8.4 Micrografie a 500x delle tre leghe a seguito di un attacco chimico per composti intermetallici.

La forma dei composti è influenzata dalla presenza in lega di manganese, questo genera intermetallici con il ferro, con morfologia compatta o poligonale. Rispetto a quella aciculare dei composti in solo ferro, alluminio e silicio, è meno dannosa per le proprietà meccaniche del materiale [1].

A seguito dell'attacco chimico, è stata misurata la quantità di tutti i composti evidenziati, per le tre leghe. Se ne misura la superficie e la si pone in relazione all'area totale della micrografia. In Tabella 8.3 sono riportati i valori di area percentuale per le tre leghe e la deviazione standard delle misurazioni.

	44100	47100	47100 Sr
<i>Area dei composti [%]</i>	0.93	2.59	3.39
<i>Deviazione standard</i>	0.38	0.66	0.60

Tabella 8.3 Quantità composti infragilenti per le tre leghe.

8.2.2 Banda superficiale di alluminio

Osservando il bordo della sezione in Figura 8.5, in prossimità del raccordo, si vede come nella lega 44100, che ha una maggiore concentrazione di silicio, la banda superficiale ricca di alluminio, a contrario di quanto si possa pensare, sia di spessore maggiore rispetto a quella della lega 47100, che è invece più sottile e discontinua. Questa banda, essendo caratterizzata da elevata duttilità, può ritardare l'innesco di cricche, ma lo spessore esiguo ne limita l'effetto.

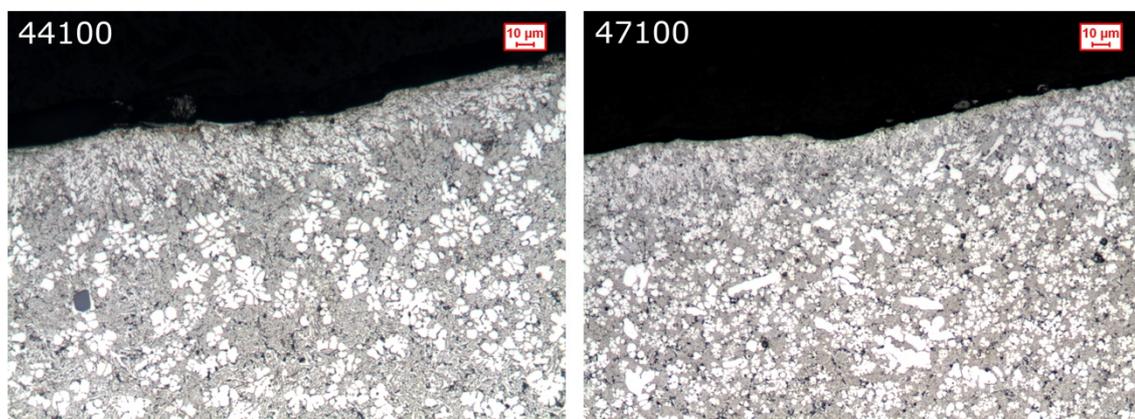


Figura 8.8.5 Micrografie a 200x della banda superficiale ricca di alluminio.

La concomitanza degli effetti infragilenti, dovuti alla morfologia del silicio e dalla presenza di composti intermetallici, causano una minore duttilità nelle leghe 47100 rispetto alla 44100. Ciò si riscontra nelle curve delle prove di trazione illustrate nel capitolo 6, dalle quali risulta che le leghe secondarie sono caratterizzate da un carico di rottura leggermente superiore alla lega primaria, ma un allungamento dimezzato.

8.3 Difetti

Analizzando le superfici dei campioni sono stati identificati una serie di difetti microstrutturali che hanno effetti negativi sulle proprietà meccaniche del materiale. Per poterli osservare meglio si effettua sulle superfici un attacco chimico: *Murakami modificato*, di composizione: 60 ml H₂O, 10 g NaOH, 5 g K₃Fe(CN)₆ specifico per le leghe alluminio-silicio. Questo mette in risalto i precipitati, l'eutettico, i composti intermetallici e i bordi grano.

I difetti trattati di seguito derivano principalmente dal processo produttivo e sono presenti su tutti i campioni indipendentemente dal materiale analizzato, per questo motivo, per evitare inutili ripetizioni, si prende come riferimento il campione in lega 47100.

In Figura 8.6 è rappresentata la panoramica della superficie a seguito dell'attacco chimico. I riquadri rossi evidenziano le zone approfondite ad ingrandimenti maggiori nelle immagini successive.

Come accennato in precedenza, in prossimità del bordo, indicata dalle frecce, si vede una banda di materiale più fine, ricca di eutettico, solidificata molto velocemente a contatto con lo stampo. In Figura 8.7 viene rappresentata un'immagine a 50 ingrandimenti della zona 1, dove risulta evidente la differenza di struttura tra il bordo e la parte centrale della sezione, più ricca di fase α .

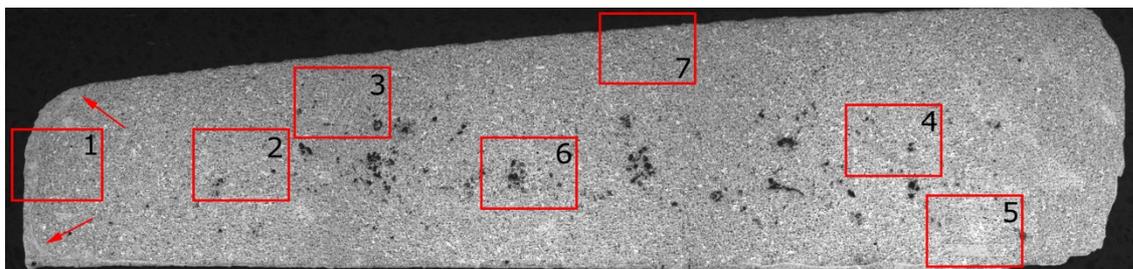


Figura 8.8.6 Panoramica del campione in lega 47100 dopo attacco chimico.

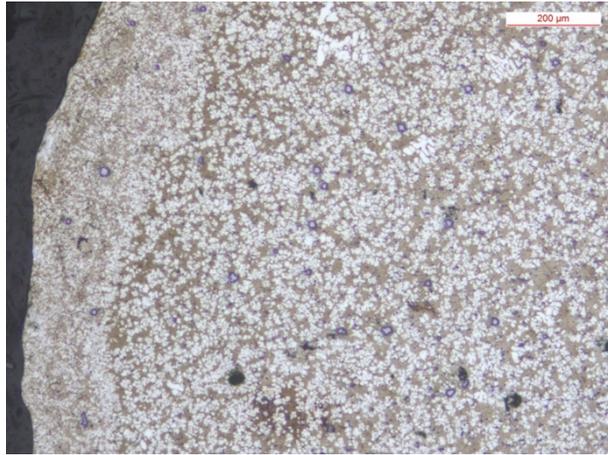


Figura 8.8.7 Micrografia circa la differenza di struttura tra bordo e interno. 50x. Zona 1.

In Figura 8.8 sono riportate due micrografie a 50 ingrandimenti della zona 2 e 3 della panoramica. È possibile vedere due diverse tipologie di gocce fredde. La prima, presente in entrambe le immagini è costituita da una struttura più grossolana e ricca di alluminio. Si tratta di una fase solidificata in camera di iniezione e successivamente trascinata all'interno dello stampo dal resto del materiale. Di questa viene indicata con delle frecce la superficie di separazione dal resto del materiale.

In Figura 8.8(a) viene cerchiata la seconda tipologia di goccia fredda, questa è invece derivata dal processo di iniezione, si tratta di una goccia di materiale separato dal fronte di avanzamento, solidificato velocemente a contatto con le pareti dello stampo e successivamente trasportato dal liquido all'interno della cavità. La differenza rispetto a prima riguarda la struttura, più fine e contornata da ossido dovuto al contatto con l'aria presente nella cavità durante il processo.

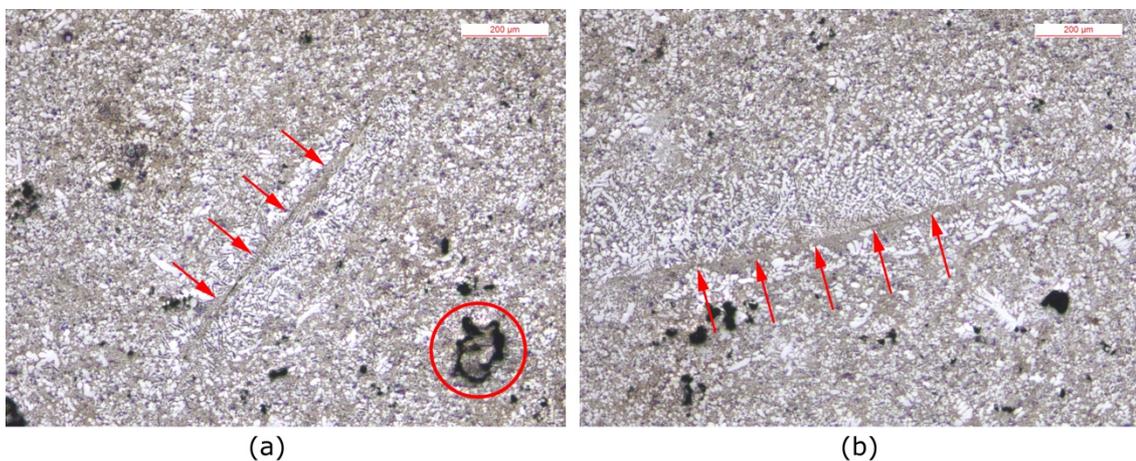


Figura 8.8.8 Micrografie di gocce fredde. 50x. (a) zona 2, (b) zona 3.

In Figura 8.9 sono riportate le micrografie della zona 4 e 5 nelle quali sono presenti altre due gocce fredde. In Figura 8.9(b) è cerchiata la sezione trasversale di una di queste nella quale è possibile vedere chiaramente la diversa struttura rispetto alle zone circostanti.

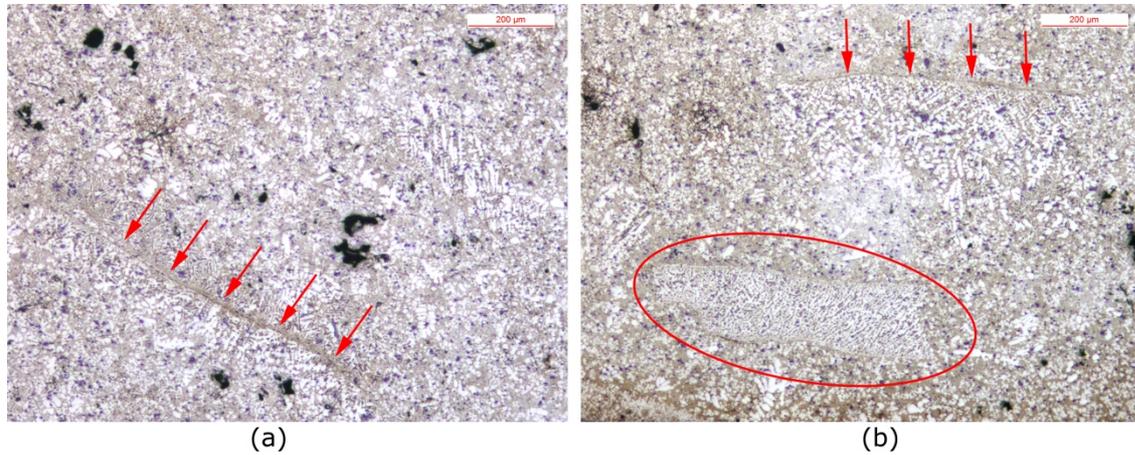


Figura 8.8.9 Micrografie di gocce fredde. 50x. (a) zona 4, (b) zona 5.

In Figura 8.10(a), micrografia relativa alla zona 6, è indicata con una freccia una porosità da ritiro. Questa è caratterizzata da una forma irregolare, che permette di distinguersela dalle porosità da gas, che solitamente hanno una forma sferica o tondeggiante.

In Figura 8.10, sia (a) che (b), quest'ultima relativa alla zona 7, sono cerchiata delle fasi indesiderate, costituite da dendriti di alluminio primario, che interrompono l'uniformità della fase eutettica. Come visibile, queste fasi sono presenti sia a bordo, che al centro del campione. Più in generale, tutti i tipi di difetti riscontrati non presentano una concentrazione particolare, ma sono omogeneamente dispersi nella sezione.

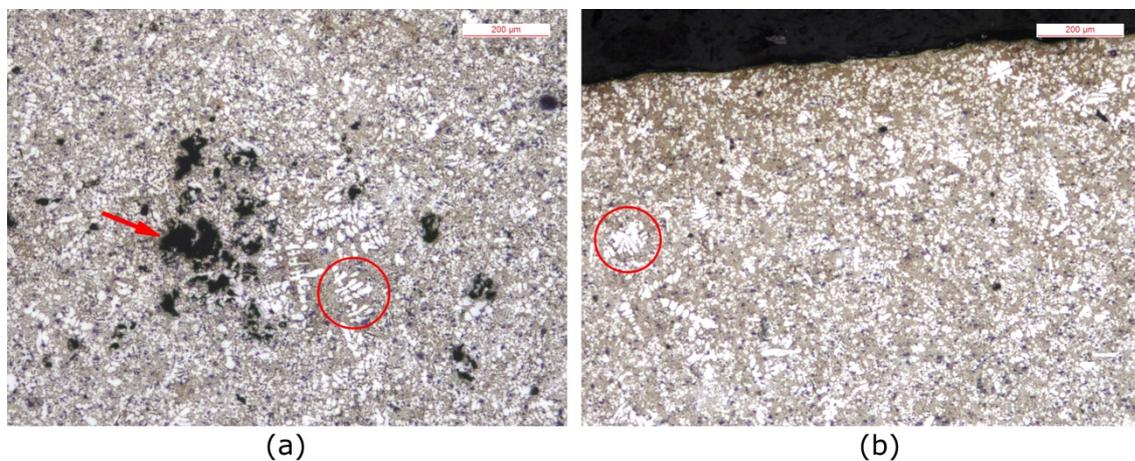


Figura 8.8.10 Micrografie di fasi indesiderate e porosità. 50x. (a) zona 6, (b) zona 7.

In Figura 8.11, micrografia a 500 ingrandimenti, è rappresentato un film di ossido di alluminio. Questo composto, caratterizzato da un'elevata durezza e fragilità, può essere presente sia in forma di particelle che di pellicole. Quest'ultima morfologia è quella più deleteria per le proprietà meccaniche in quanto rappresenta un'interruzione della struttura del materiale, che sfogliandosi all'applicazione del carico, diminuisce la sezione resistente del componente.

Queste discontinuità si generano durante il processo produttivo ed avendo temperature di fusione più elevate di quelle della lega, non possono essere eliminati tramite trattamenti termici a seguito della formatura del componente. Di conseguenza per ridurre il numero se ne deve evitare la formazione o eliminarli opportunamente dal bagno.

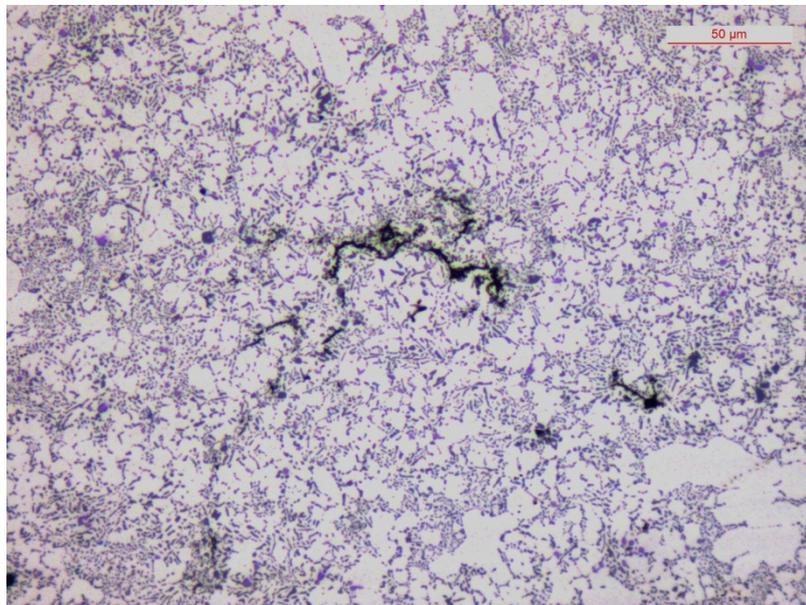


Figura 8.8.11 Micrografia con ossido. 500x.

9 Prove Statiche

Per avere una prima indicazione sulla variazione delle prestazioni dei manicotti al variare della lega, vengono eseguite delle prove statiche.

Durante questi test il manicotto viene montato in una struttura appositamente progettata e realizzata e viene applicato un carico, tramite un punzone, su una porzione del componente, fino a giungere alla rottura.

Vengono innanzitutto eseguite delle prove su entrambi i lati del manicotto per valutare sperimentalmente quale fornisca la resistenza minore. In seguito si effettuano ulteriori test sul lato B, con lo scopo di valutare le differenze tra le leghe.

9.1 Strumentazione e struttura di prova

La struttura utilizzata per le prove sperimentali è realizzata in acciaio ed è costituita da più componenti. Questi possono essere assemblati in due configurazioni diverse, cosa che permette di eseguire i test su entrambi i lati del manicotto.

L'elemento principale è un'incastellatura, sulla cui base sono presenti due fori filettati, uno per ogni configurazione, che permettono di installarla sul supporto inferiore, da collocare sulla parte fissa della macchina di prova.

Il manicotto viene montato su un sostegno, modellato con le dimensioni dei tubi, da posizionare sull'incastellatura.

Il carico è applicato da un punzone. Per i test sul lato B se ne utilizza uno piatto con sezione circolare, che va in appoggio sulla sede del dado, mentre per quelli sul lato A uno arrotondato che si adatta alla sede della levetta.

Il punzone viene avvitato in un secondo supporto da collocare sulla parte mobile della macchina.

In Figura 9.1 è rappresentato l'esploso della struttura di prova, nella quale è possibile vedere i vari componenti.

In Figura 9.2(a) è rappresentata la configurazione della struttura per le prove sul lato A, mentre in Figura 9.2(b) quella per le prove sul lato B. Tra le due cambia il posizionamento del castelletto rispetto al supporto inferiore, il punzone e la posizione del manicotto con relativo sostegno.

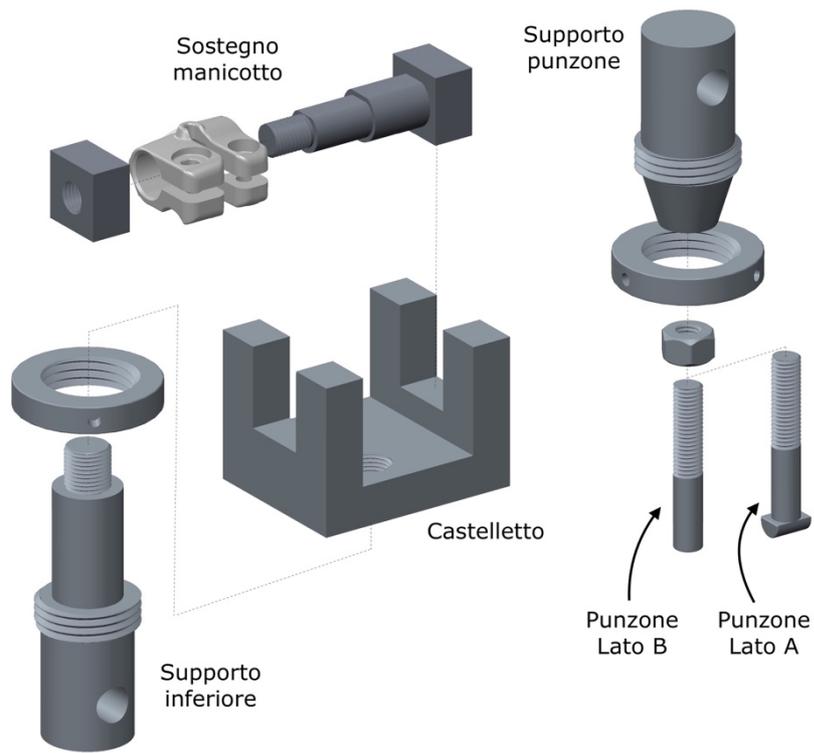


Figura 9.1 Esploso della struttura di prova.

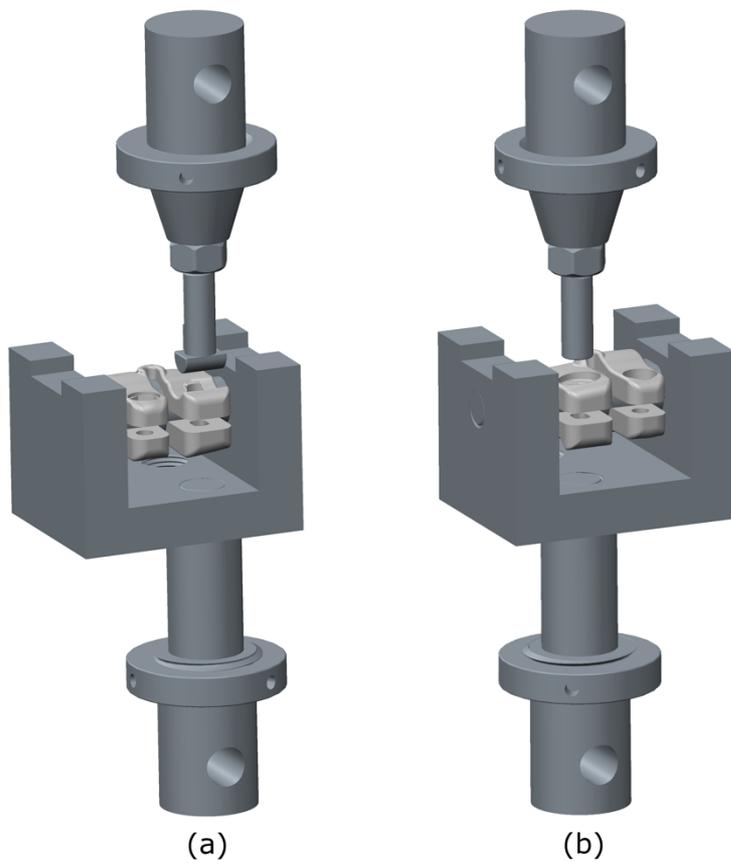


Figura 9.2 Rappresentazione delle due configurazioni di prova. (a): Lato A. (b): Lato B.

Dopo aver installato la struttura sulla macchina, una MTS Criterion Model 43, si monta il manicotto sul proprio sostegno e lo si vincola ad esso tramite la vite di fissaggio del tubo esterno. Questa viene serrata alla coppia da specifica di 1.8 Nm.

Successivamente si posiziona il manicotto con relativo sostegno sul castelletto, si porta il punzone in appoggio sul componente, si applica un precarico di 0.08 kN e si fa partire la prova. Questa consiste nell'abbassamento del punzone alla velocità costante di 2 mm/min fino alla rottura della porzione di manicotto sollecitata.

Ciò che viene registrato è l'andamento della forza applicata dalla macchina al componente in funzione dell'avanzamento del punzone.

In Figura 9.3 è rappresentata la struttura di prova assemblata sulla macchina durante un test sul lato B di un campione.



Figura 9.3 Esempio di prova statica sul lato B di un manicotto.

9.2 Preparazione del componente

La classificazione tramite i Raggi X permette di identificare quale sia la lega che presenta il minor numero di difetti, ma analizzando il manicotto intero non è possibile ricavare informazioni sull'esatta collocazione dei difetti osservati.

Il manicotto è suddiviso in due lati, che nelle scansioni vengono sovrapposti, non si può quindi definire univocamente se ciò che si vede sia posizionato sul lato B o A.

Per questo motivo, avendo la possibilità di effettuare le prove sperimentali su un solo lato del manicotto, si decide di tagliare la parte non interessante, eseguire una scansione ai Raggi X della porzione rimanente e successivamente sottoporla alla prova di rottura.

Con questa procedura si vuole ricavare una correlazione tra la concentrazione dei difetti nel componente e le prestazioni dello stesso, con l'obiettivo di definire delle soglie di accettabilità da utilizzare durante un controllo qualità.

In questo modo è possibile scartare tutti i componenti che, presentando ai Raggi X una certa quantità di difetti, possono essere soggetti ad una rottura in esercizio.

9.3 Curve caratteristiche delle prove

In Figura 9.4 è mostrata la curva rappresentativa di una prova eseguita sul lato B. Si vede l'andamento del carico applicato in kilonewton in funzione dello spostamento in millimetri del punzone.

La curva può essere suddivisa, in base ai cambi di pendenza, in tre parti. La prova ha inizio con un gap tra manicotto e supporto, Figura 9.5(a). La prima fase finisce con il primo ginocchio, che corrisponde al punto in cui il componente arriva in contatto con lo spigolo del sostegno, visibile nella sezione del manicotto in Figura 9.5(b). Il cambio di pendenza è dovuto alla riduzione della lunghezza della parte soggetta a flessione, cosa che comporta un aumento della rigidità del sistema. La seconda parte giunge fino al secondo ginocchio, in questo punto le superfici di contatto del manicotto sono completamente in appoggio sul sostegno, Figura 9.5(c). La rigidità aumenta ulteriormente e si entra nella terza fase durante la quale la curva prosegue fino alla rottura del componente.

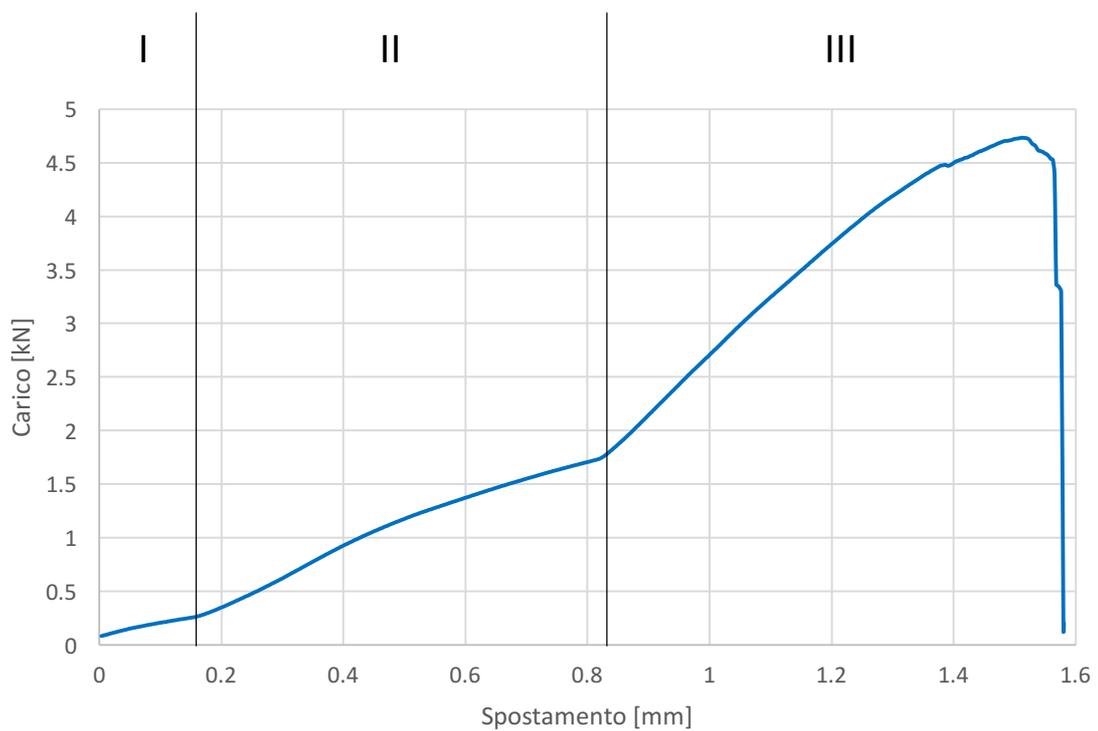


Figura 9.4 Curva di una prova statica sul lato B.

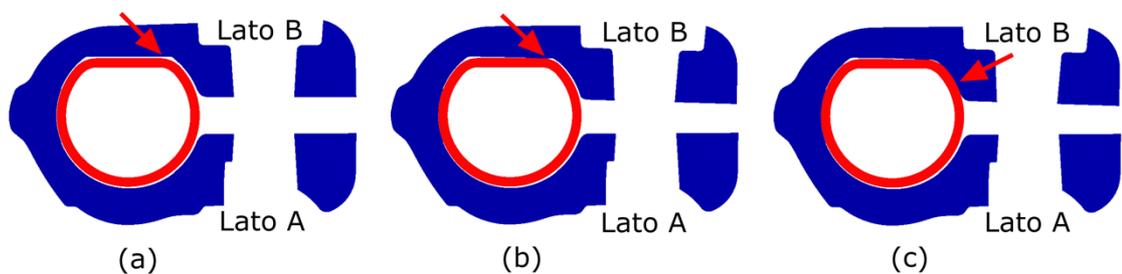


Figura 9.5 Variazione dei punti di appoggio durante la prova statica lato B.

Il primo tratto della curva è di assestamento. La sua durata, in termini di spostamento, dipende dal posizionamento angolare del manicotto rispetto al sostegno nella fase di assemblaggio per la prova.

La posizione come in Figura 9.6(a) comporta una elevata durata della prima fase in quanto il manicotto per giungere in appoggio sullo spigolo deve eseguire un notevole spostamento. La posizione in Figura 9.6(b) invece annulla la prima fase in quanto il manicotto è in appoggio sullo spigolo del sostegno e quindi la curva parte dal primo ginocchio.

Effettuare le prove posizionando casualmente il manicotto comporta un'elevata dispersione nei valori di spostamento massimo (spostamento relativo al carico massimo) perché sono fortemente influenzati dalla durata della prima fase.

Per evitare l'influenza di quest'ultima, le prove si eseguono tutte portando il manicotto in appoggio sul sostegno come in Figura 9.6(b). La curva risultante è rappresentata in Figura 9.7.

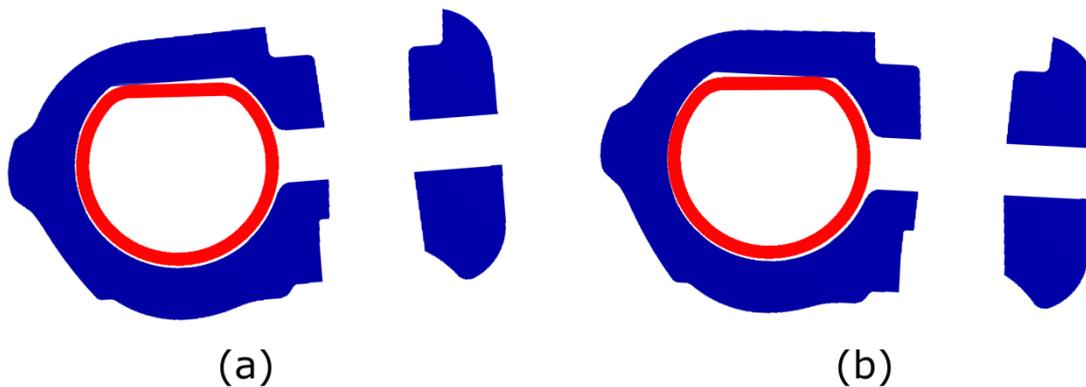


Figura 9.6 Posizioni angolari del manicotto nella fase di montaggio sul sostegno.

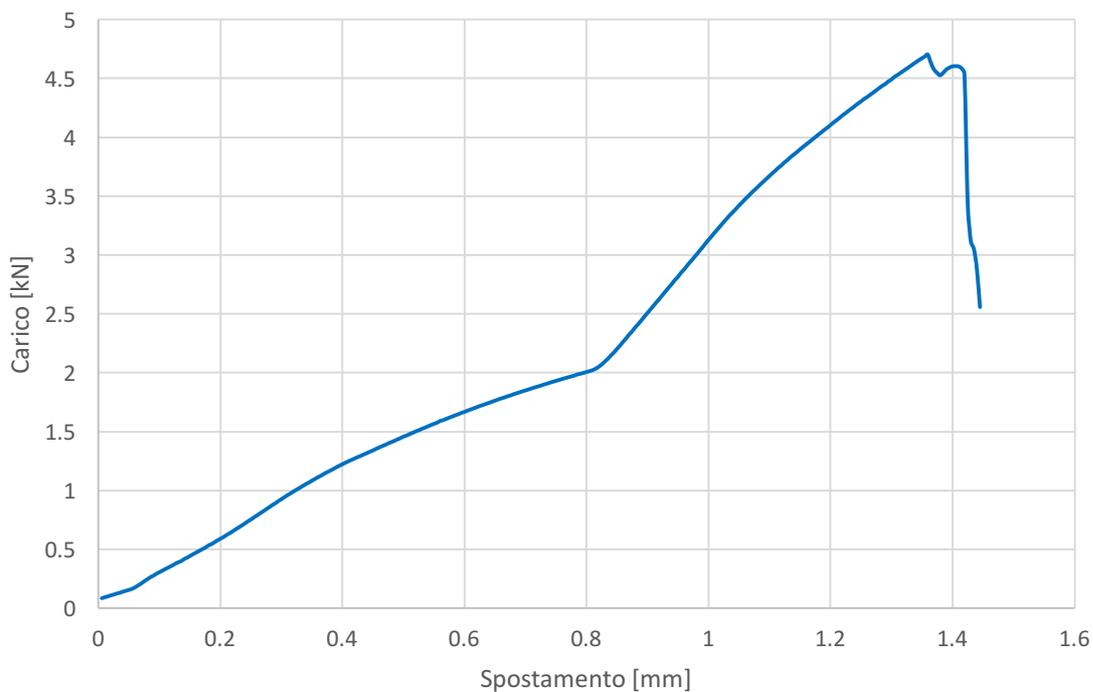


Figura 9.7 Curva di una prova statica sul lato B con manicotto in appoggio sul sostegno.

Per quanto riguarda il lato A, essendo la sezione in quella zona completamente circolare, senza punti di appoggio, l'andamento della curva, visibile in Figura 9.8, è meno brusco rispetto a quello delle prove sul lato B. È presente un solo ginocchio, dovuto all'appoggio del manicotto sul sostegno. Si passa dalla condizione in Figura 9.9(a), dove il manicotto è staccato dal supporto, a quella in Figura 9.9(b) dove si stabilisce gradualmente il contatto.

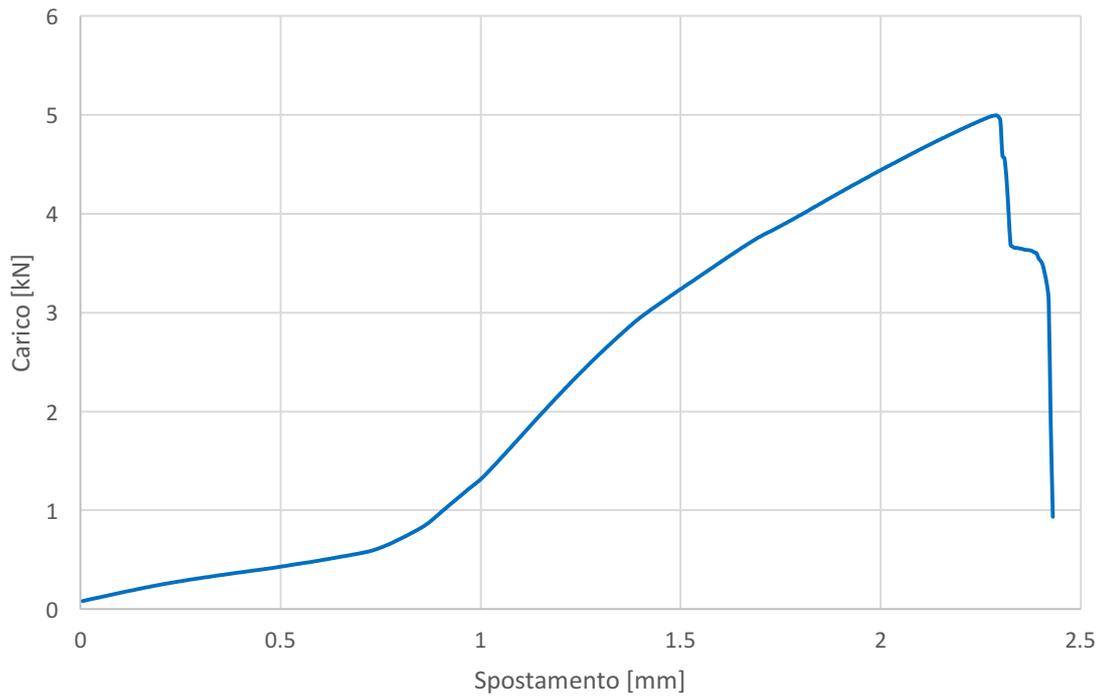


Figura 9.8 Curva di una prova statica sul lato A.

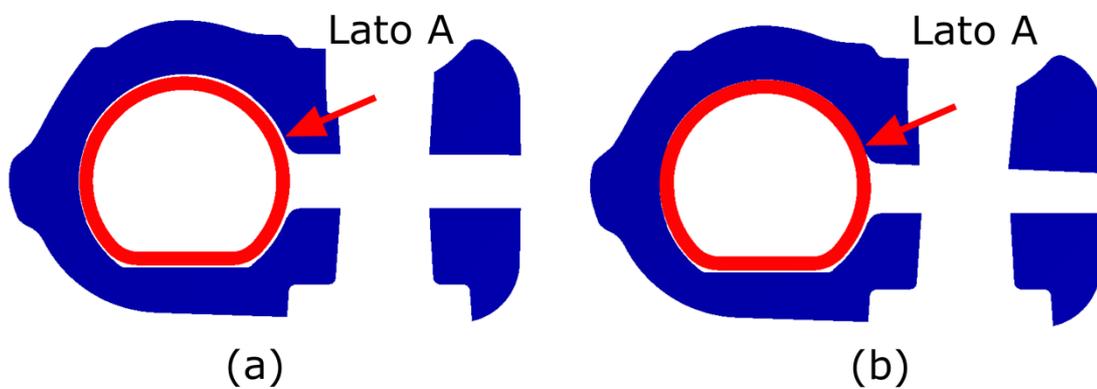


Figura 9.9 Contatto del manicotto con il sostegno durante una prova statica nel lato A.

9.4 Risultati

9.4.1 Confronto dei risultati nei due lati

In Tabella 9.1 sono riportati i valori medi del carico di rottura e del relativo spostamento delle prove statiche sul Lato A. Vengono eseguite quattro prove per ogni lega e successivamente altre sei per la sola 44100, in quanto si vede essere quella che fornisce le prestazioni migliori.

	<i>Carico massimo [kN]</i>	<i>Deviazione standard carico</i>	<i>Spostamento massimo [mm]</i>	<i>Deviazione standard spostamento</i>
<i>44100</i>	5.06	0.63	2.43	0.17
<i>47100 Sr</i>	4.71	0.25	2.54	0.17
<i>47100</i>	4.31	0.43	2.37	0.17

Tabella 9.1 Risultati prove statiche sul lato A.

I risultati delle prove sul lato B sono riportati in Tabella 9.2. Vengono eseguite otto prove per la lega 47100, dieci per la 47100 modificata e tredici per la 44100.

	<i>Carico massimo [kN]</i>	<i>Deviazione standard carico</i>	<i>Spostamento massimo [mm]</i>	<i>Deviazione standard spostamento</i>
<i>44100</i>	4.07	0.59	1.36	0.11
<i>47100 Sr</i>	3.88	0.7	1.19	0.15
<i>47100</i>	3.48	0.61	1.04	0.08

Tabella 9.2 Risultati prove statiche sul lato B.

Anche in questo caso le prestazioni migliori sono date dai manicotti in lega 44100.

In Figura 9.10(a) è riportato un manicotto rotto a seguito di una prova statica sul lato A, in Figura 9.10(b) uno sottoposto ad una prova sul lato B.

Entrambi presentano la tipologia di rottura caratteristica dei due lati, in particolare nel caso del lato B, la rottura si innesca sempre sul raccordo della nervatura, indicato dalla freccia e propaga poi lungo tutta la sezione resistente.

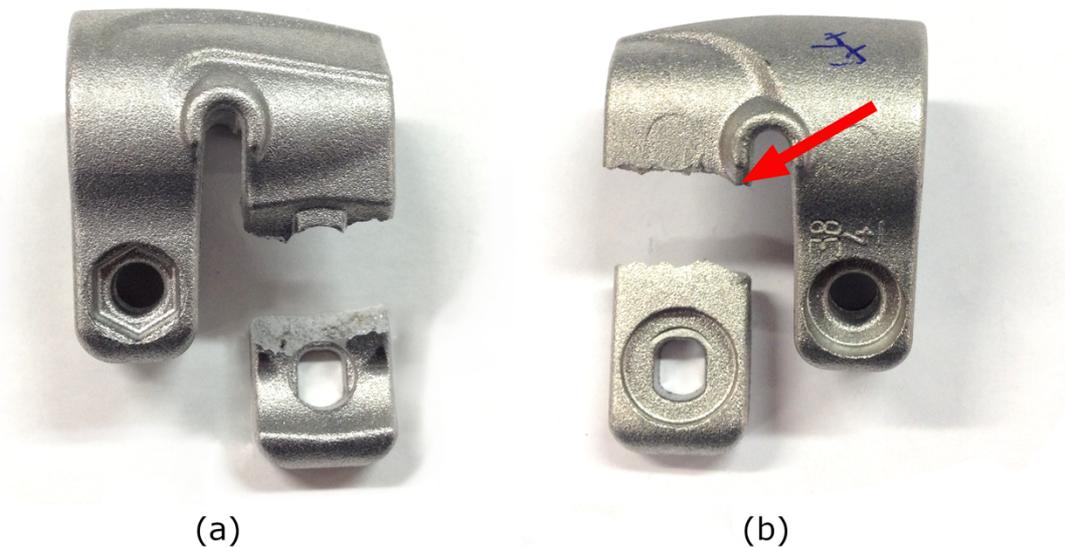


Figura 9.10 Manicotti rotti a seguito di una prova statica. (a) lato A. (b) lato B.

Utilizzando punzoni diversi, i valori ricavati dalle prove sui due lati non sono direttamente confrontabili. Per il lato A viene usato un punzone arrotondato che durante la prova, quindi durante l'abbassamento dell'estremità del manicotto, mantiene costante il punto di applicazione del carico.

Il punzone piatto utilizzato invece per le prove sul lato B, parte inizialmente poggiando su tutta la superficie della sede nel manicotto, ma con l'avanzare della prova, si porta ad agire solamente nella porzione della sede più vicina al sostegno. Varia quindi il punto di applicazione della forza, in particolare, considerando la porzione di manicotto come una trave incastrata con un carico in punta, diminuisce il braccio e quindi il momento flettente risultante.

Da quest'analisi deriva che le prove eseguite sul lato A sono più severe di quelle sul lato B. Ottenendo comunque valori del carico di rottura sul lato A maggiori di quelli sul lato B si può affermare che quest'ultimo è quello critico: anche in condizioni di test più favorevoli fornisce prestazioni inferiori.

A conferma di ciò, si esegue una prova statica sul lato B di un campione in lega 47100 utilizzando un punzone con estremità a cuneo. In questo modo si mantiene costante il punto di applicazione del carico, al centro della sede, per tutta la durata del test.

In Figura 9.11 è riportata la curva risultante confrontata con quella di riferimento di una prova standard, con il punzone piatto, su un campione della stessa lega.

Si vede come, applicando la forza sempre sullo stesso punto, si ottenga una curva meno pendente, ciò è dovuto ad una minore rigidità del sistema. Risulta inoltre inferiore il carico di rottura, pari a 1.91 kN, rispetto a 3.48 kN medio delle altre prove.

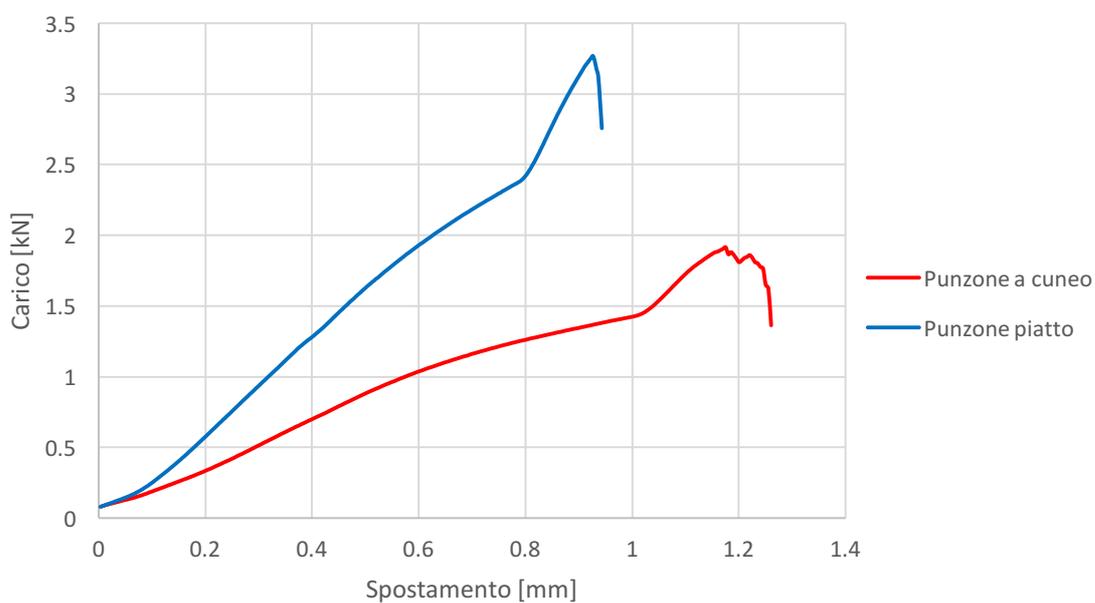


Figura 9.11 Confronto delle curve delle prove al variare del punzone.

Per evitare di invalidare prove già eseguite e considerando questo come un metodo puramente comparativo delle prestazioni dei manicotti nelle varie leghe, tutti i test ufficiali sono stati effettuati con il punzone piatto. Il test con il punzone a cuneo, che permette una configurazione dei carichi simile a quella delle prove sul lato A, è stato eseguito solamente per validare la conclusione che la porzione critica del manicotto, come deriva dall'analisi FEM, è il lato B.

9.4.2 Lato B

Le prove statiche confermano che il lato B è la porzione critica del componente, di conseguenza si concentra l'analisi su questa parte.

In Figura 9.12 sono riportati i risultati del carico di rottura in funzione dello spostamento per le prove dei manicotti nelle varie leghe, dalle quali si vede che le prestazioni migliori sono date dai componenti in lega 44100. La maggiore duttilità di questa lega si ripercuote in un maggior allungamento a rottura, diminuisce inoltre l'influenza del raccordo della nervatura che permette di ottenere un carico di rottura del manicotto superiore, benché quello intrinseco della lega sia leggermente inferiore.

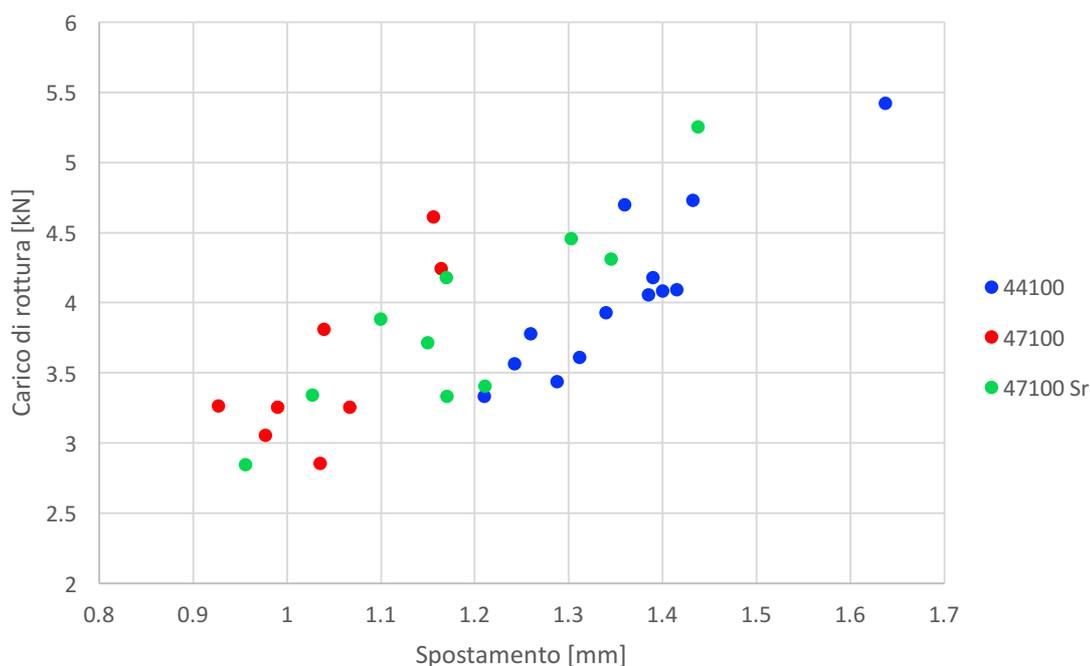


Figura 9.12 Risultati prove statiche lato B.

La dispersione dei risultati è dovuta alla concentrazione dei difetti nel componente. Maggiore è il numero di difetti, che comportano una diminuzione della sezione resistente, minori sono le prestazioni del manicotto.

Concentrandosi sulla lega 44100 si classificano in tre categorie i manicotti sulla base delle scansioni ai Raggi X del solo lato B. In Figura 9.12 sono riportate tre immagini di riferimento, rappresentative della suddivisione.

Si rappresentano poi i risultati delle prove sulla base della suddivisione fatta: Figura 9.14.

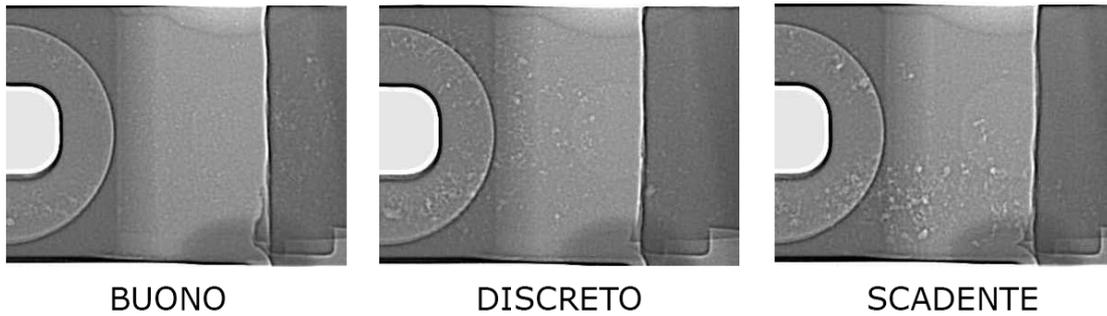


Figura 9.13 Scansioni di riferimento per la classificazione del lato B.

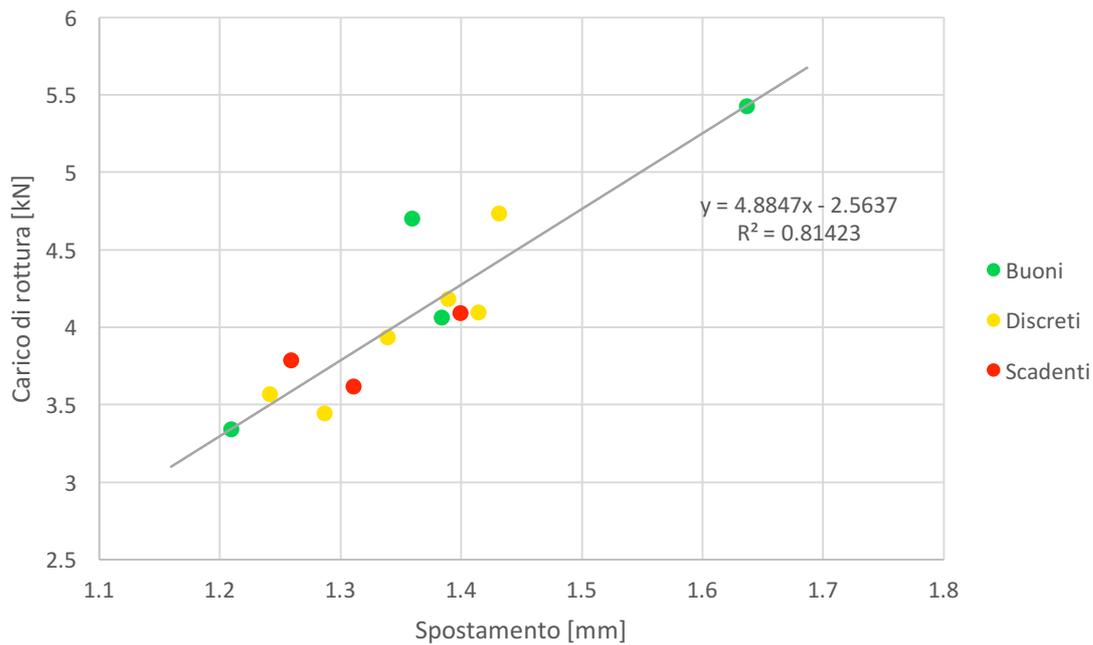


Figura 9.14 Risultati prove statiche lato B, lega 44100, classificati sulla base dei Raggi X.

Dal grafico in Figura 9.14 si vede come non ci sia una correlazione tra la valutazione della qualità dei componenti basata sui Raggi X e le loro prestazioni effettive. Proprio il manicotto considerato come esempio per rappresentare i componenti *buoni* in Figura 9.13, è quello che presenta il carico di rottura più basso.

In Figura 9.15 sono riportate le superfici di frattura, acquisite tramite stereoscopio, del manicotto con carico di rottura più basso (a) e quello più elevato (b), entrambi precedentemente classificati come buoni. Si vede come il componente con le prestazioni peggiori presenti, in prossimità del raccordo della nervatura, cerchiato in rosso, un film d'ossido. Questo, essendo caratterizzato da un'elevata fragilità, all'applicazione del

carico si sfoglia senza garantire alcuna resistenza. Inoltre, essendo posizionato in un punto particolarmente sollecitato, ha una notevole influenza sulle caratteristiche meccaniche del componente.

Il manicotto con il carico di rottura più elevato non presenta invece particolari difetti nella zona in prossimità del raccordo critico, ma solo un ossido nell'estremità opposta della sezione, cerchiato in rosso, la cui influenza è trascurabile.

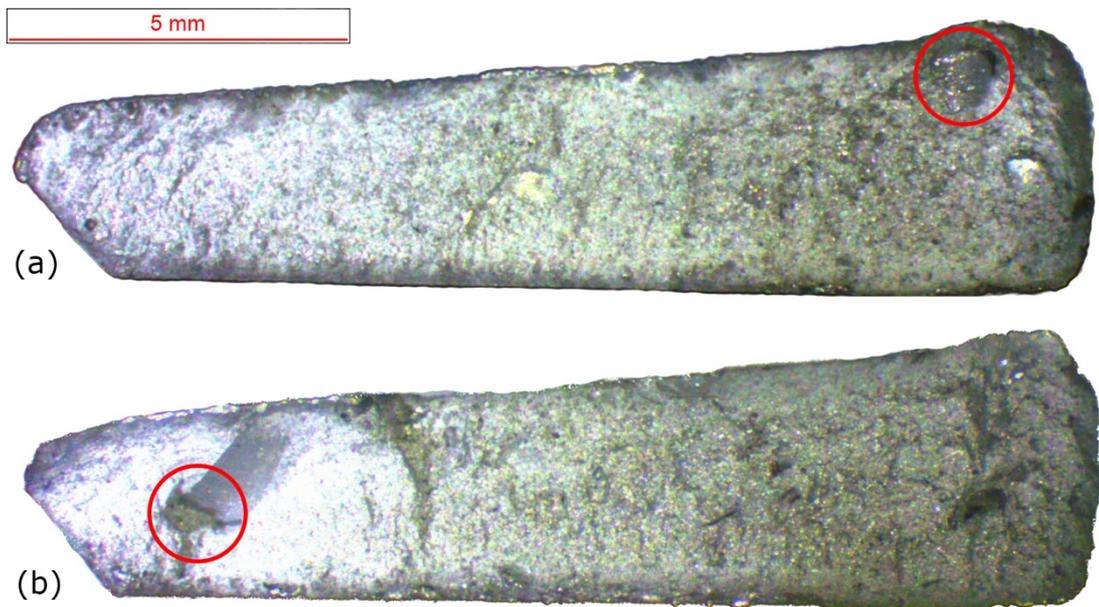


Figura 9.15 Superfici di frattura di due manicotti.

Dai risultati ottenuti dalle prove statiche non è quindi possibile prevedere il comportamento in esercizio dei componenti basandosi solo su un'analisi ai Raggi X. Con questa tipologia di controllo si identificano solo una parte dei difetti, in particolare le porosità, ma non si riesce a discriminare altri, quali gli ossidi, che influenzano pesantemente le proprietà meccaniche del materiale.

10 Prove a carichi ciclici

Le prove a carichi ciclici consentono di confrontare il comportamento dei manicotti nelle varie leghe, all'applicazione di un carico variabile nel tempo.

I test non ricreano le condizioni di carico applicate al componente in esercizio, ma essendo effettuati solamente su di una porzione del manicotto, il lato B, rappresentano un metodo diretto per confrontare le diverse leghe.

I valori del numero di cicli a rottura determinati con i test descritti in seguito non sono quindi direttamente confrontabili con i valori di vita a fatica dei manicotti in esercizio.

10.1 Strumentazione e struttura di prova

Per le prove si utilizza una macchina MTS 858 Mini Bionix, mentre la struttura di sostegno del manicotto è la stessa usata per le prove statiche. L'unica differenza riguarda il punzone. In Figura 10.1(a) è rappresentato il punzone piatto utilizzato per le prove statiche, mentre in Figura 10.1(b) quello per le prove a carichi ciclici. Per queste se ne utilizza uno a cuneo perché permette di mantenere invariato il punto di applicazione del carico durante lo svolgimento del test, sempre al centro della sede del dado. Questo riduce le variazioni di rigidità e garantisce quindi un andamento più lineare della curva *Carico-Spostamento*.



Figura 10.1 Punzoni utilizzati nelle prove. (a) prove statiche. (b) prove a carichi ciclici.

In Figura 10.2(a) è riportata un'immagine della strumentazione di prova in funzione, mentre in Figura 10.2(b) il particolare del punzone in appoggio sul manicotto, sul quale sta propagando una cricca.

Anche in questo caso, come per le prove statiche, viene tagliato il lato A, si esegue una scansione ai Raggi X del lato B e successivamente si sottopone il campione alla prova.

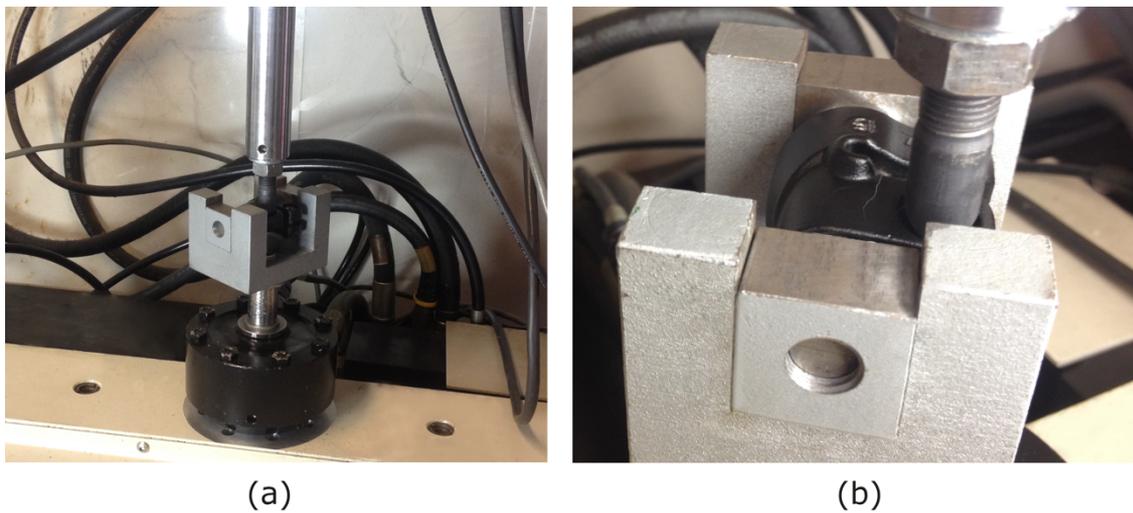


Figura 10.2 Strumentazione e struttura di prova.

10.2 Curve caratteristiche delle prove

In esercizio, la leva, quando viene chiusa, impone uno spostamento alle estremità mobili del manicotto. Quando poi viene aperta non applica più alcuna azione.

Per ricreare le condizioni di funzionamento reale del componente le prove andrebbero condotte in controllo di spostamento, facendolo variare tra un valore massimo, corrispondente alla leva in posizione di chiusura ed uno nullo, quando la leva è aperta.

Come per le prove statiche il manicotto viene montato sul sostegno ed il punzone agisce sulla sede del dado di fissaggio della levetta. Il sistema può essere semplificato come una trave incastrata sollecitata in punta, alla quale si impone uno spostamento massimo per poi tornare alla posizione di partenza. Nel caso in esame, la porzione di manicotto sollecitata, durante la risalita, specialmente nei primi cicli, non ritornerebbe al punto di partenza, corrispondente ad uno spostamento nullo, ma si fermerebbe in una posizione leggermente più in basso. Ciò è dovuto alla deformazione plastica permanente indotta dal test, con un conseguente incrudimento del materiale ed una sua variazione del ritorno

alla posizione originaria. Il punzone invece tornando al punto iniziale, si separerebbe dal manicotto ed al ciclo successivo ristabilirebbe il contatto con un urto.

Per questo motivo, per facilitare l'esecuzione delle prove, si decide di effettuare i test in controllo di carico, applicando una forza variabile nel tempo con una frequenza di 5 Hz, mantenendo costante il range di carico. Benché non si ricreino le condizioni reali di esercizio, si mantiene sempre il contatto tra punzone e manicotto ed i risultati permettono un confronto tra le diverse leghe.

Dal confronto dei risultati dell'analisi agli elementi finiti e le prove estensimetriche, si determina che il carico agente sul manicotto a seguito della chiusura della levetta è pari a 1000 N. Dalle prove di assemblaggio si osserva però che le condizioni di chiusura possono variare e di conseguenza anche la sollecitazione applicata al componente.

Per valutare gli effetti della variazione delle condizioni di chiusura si eseguono le prove a tre diversi range di carico: 900 N, 1125 N e 1350 N, mantenendo costante il rapporto di carico $R = 0.1$, pari al rapporto tra il valore minimo e massimo della forza applicata.

Quindi, per esempio, per il range di carico di 900 N si impone come valore massimo 1000 N e come minimo 100 N.

In Figura 10.3 sono riportati alcuni cicli rappresentativi della prova di un manicotto in lega 44100 con range di carico di 1125 N.

Il campionamento dei dati viene eseguito a 200 Hz.

Il manicotto viene assemblato sul sostegno come per le prove statiche, quindi ruotato in modo tale che sia in appoggio sullo spigolo del supporto e poi fissato. Successivamente si posiziona il tutto sulla struttura, si porta il punzone in appoggio, se ne azzerava il segnale di posizione e si fa partire la prova.

Come è possibile vedere, il range di carico rimane costante, ma all'avanzare della prova e quindi con il propagare della cricca, la posizione media di oscillazione del manicotto aumenta. Il valore medio dello spostamento per i primi cicli è 0.73 mm, mentre per il ciclo 10000 è 0.95 mm. Ciò significa che il punzone e quindi il manicotto, con l'avanzare della prova, si porta a lavorare in una posizione più bassa rispetto a quella di partenza.

Ciò è dovuto alla modalità di esecuzione del test. In esercizio, il manicotto lavora sempre attorno alla stessa posizione, imposta dalla leva. In questo caso, applicando sempre uno stesso range di carico, con il propagare della cricca, la resistenza del sistema diminuisce e si porta a lavorare a spostamenti maggiori. Abbassandosi, cambia la disposizione dei

carichi sul manicotto, in particolare, venendo maggiormente compresso sul supporto, aumenta l'attrito e quindi la rigidità. Una parte del carico viene spesa comprimendo il componente contro il supporto e non sottoponendolo a flessione. A riprova di ciò è sufficiente osservare la pendenza delle curve dei primi cicli e confrontarla con quella degli ultimi. Durante i primi cicli il sistema ha una rigidità tale che l'ampiezza di oscillazione è di 0.32 mm. Al diecimillesimo ciclo ha invece una rigidità superiore, che comporta un dimezzamento dell'ampiezza pari a 0.14 mm.

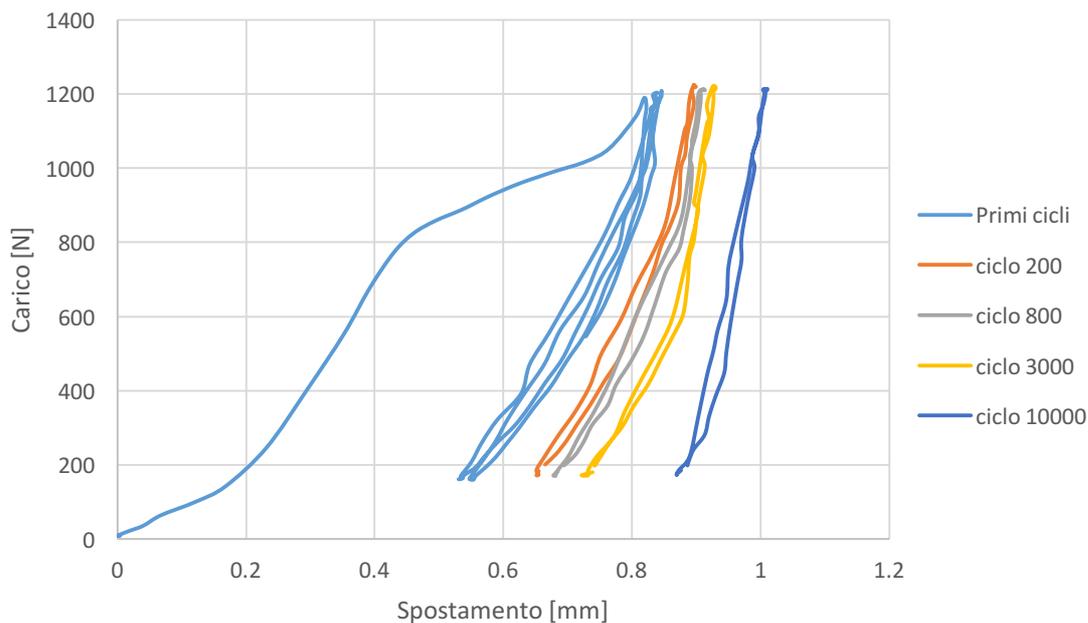


Figura 10.3 Andamento di carico e spostamento in una prova a 1125 N.

10.3 Risultati

In Figura 10.4 sono riportati i risultati delle prove a carichi ciclici dei manicotti nelle tre leghe. Si rappresenta in ordinata il range di carico, mentre in ascissa il numero di cicli a rottura in scala logaritmica. Come per le prove statiche, la lega 44100 è quella che garantisce le prestazioni migliori, seguita dalla 47100 modificata ed infine dalla 47100. Confrontando i risultati al range di carico di 900 N, i manicotti in lega 44100 sono caratterizzati da un numero di cicli a rottura medio di 15000, quelli in lega 47100 modificata di 5000 e quelli in lega 47100 standard 2000.

Su alcuni manicotti nelle due leghe 47100 si eseguono dei test con range di carico di 720 N, per valutare se una diminuzione della sollecitazione permette di portare la vita dei componenti a valori confrontabili con quelli della lega 44100.

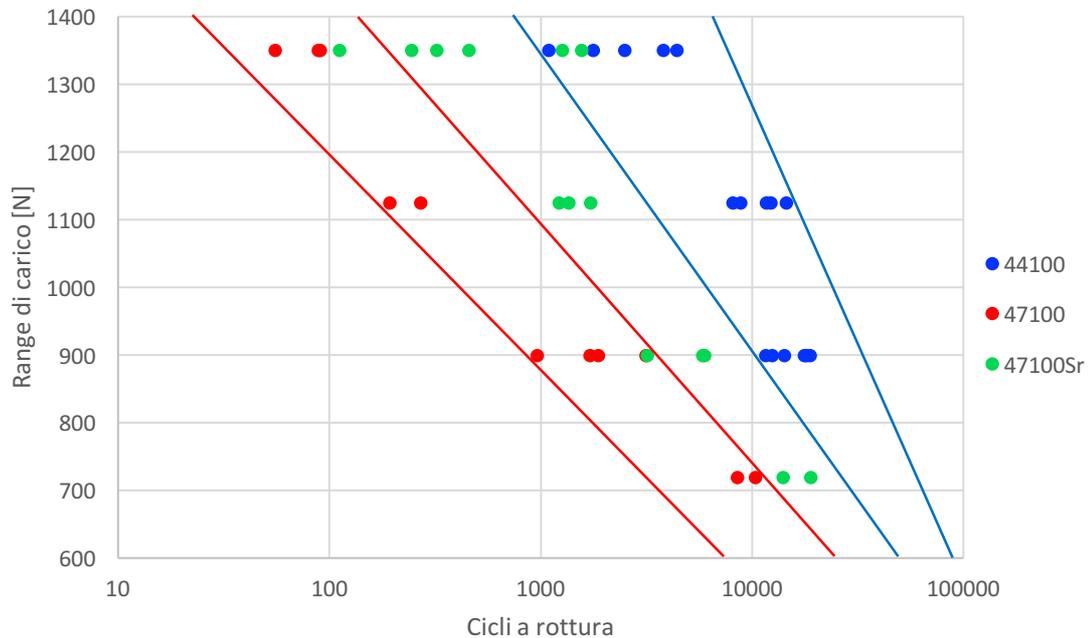


Figura 10.4 Risultati delle prove a carichi ciclici.

In tutti i campioni la rottura avviene a seguito della propagazione della cricca che si innesca sul raccordo critico della nervatura ed anche in questo caso la dispersione dei risultati è dovuta alla concentrazione dei difetti nella sezione resistente del manicotto.

In Figura 10.5 sono riportate le scansioni ai Raggi X di due campioni della lega 44100 sottoposti a test con range di carico di 900 N. Il campione (a) è quello con il numero di cicli a rottura minore, pari a 11500, mentre (b) è quello con il valore maggiore: 19000.

Dalle radiografie, entrambi possono essere classificati, secondo il metodo precedentemente descritto, come *discreti*, anche se il campione (b) presenta una quantità di porosità superiore ad (a). Come visto per le prove statiche, non si trova una corrispondenza tra la valutazione ai Raggi X e le prestazioni effettive dei manicotti.

Osservando le superfici di frattura degli stessi manicotti in Figura 10.6, si vede come il campione (a) presenti un film d'ossido, cerchiato in rosso, esattamente sul raccordo della nervatura, questo facilita l'innesco della cricca, che avviene dopo 400 cicli. Il campione (b) ha invece una superficie di frattura più pulita e non avendo particolari difetti nella zona più sollecitata mantiene intatta la sezione fino a 1800 cicli.

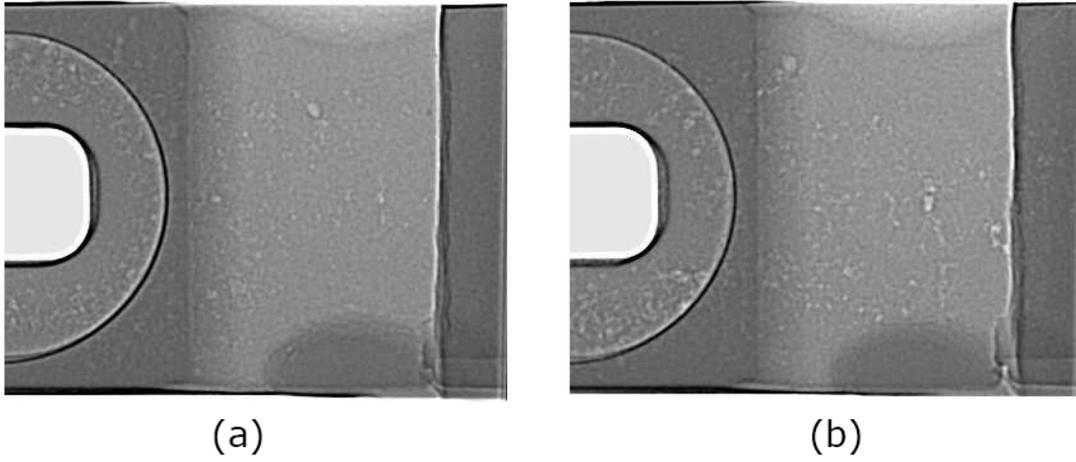


Figura 10.5 Scansioni ai Raggi X di due campioni della lega 44100.

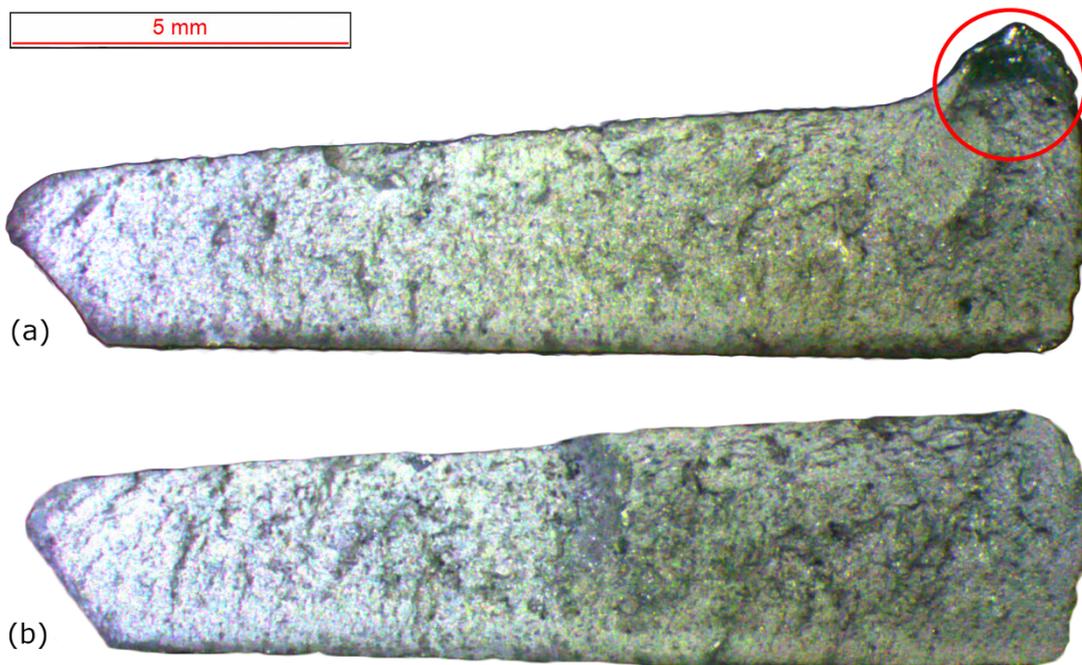


Figura 10.6 Superfici di frattura di due campioni della lega 44100.

11 Trattamento termico su leghe 47100

Dai risultati delle prove sperimentali si ottiene che i manicotti in lega 44100 sono quelli che forniscono le prestazioni migliori. Si valuta quindi se un trattamento termico di stabilizzazione a 350°C, incrementi le proprietà meccaniche dei componenti nelle leghe 47100. La permanenza a questa temperatura ed il successivo raffreddamento in aria, modifica la morfologia del silicio eutettico, le cui bacchette allungate si separano in parti più corte ed arrotondate, diminuendone l'effetto infragilente. Il processo è influenzato dal tempo e dalla temperatura del trattamento. Quest'ultima viene fissata a 350°C per evitare la formazione di blisters sulla superficie dei componenti, inaccettabili dal punto di vista estetico, ma garantire comunque una velocità sufficientemente elevata al processo, che ne permetta l'applicazione in ambito industriale.

11.1 Influenza del tempo di trattamento

In Figura 11.1 è rappresentato l'andamento della durezza Brinell, al variare del tempo di trattamento per le leghe 47100 e 47100 modificata. Per completezza è riportata anche la durezza della lega 44100 misurata al solo stato "as cast".

Nel grafico sono riportati i valori medi di tre misurazioni effettuate su porzioni di campioni trattati termicamente e successivamente inglobati in resina fenolica a 160°C per 10 minuti. Le bande di errore rappresentano la deviazione standard delle misurazioni. Si vede come, per la lega modificata, la durezza manifesti un brusco calo già dopo un'ora di trattamento, stabilizzandosi al valore di 62 HB dopo quattro ore.

Ciò è dovuto alla presenza dello stronzio, l'effetto di arrotondamento ed accrescimento del silicio è favorito dalla presenza di questo elemento, che comporta un aumento della velocità del processo.

Per la lega standard invece l'andamento è più blando, portandosi ad otto ore ad un valore prossimo a quello della lega modificata. In questo caso, la morfologia del silicio di partenza è più allungata, di conseguenza i tempi richiesti per ottenere lo stesso effetto dell'altra lega sono maggiori.

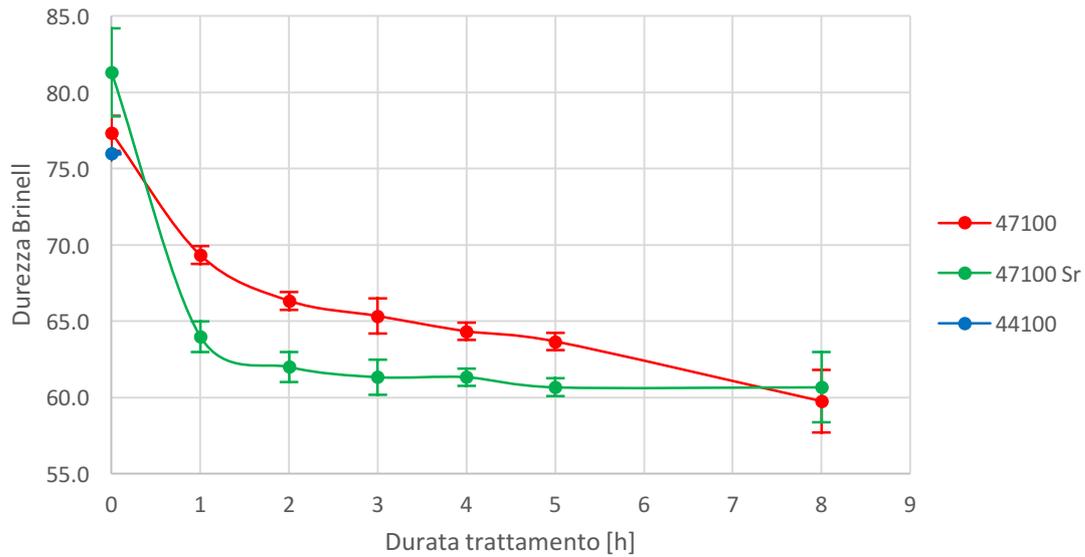
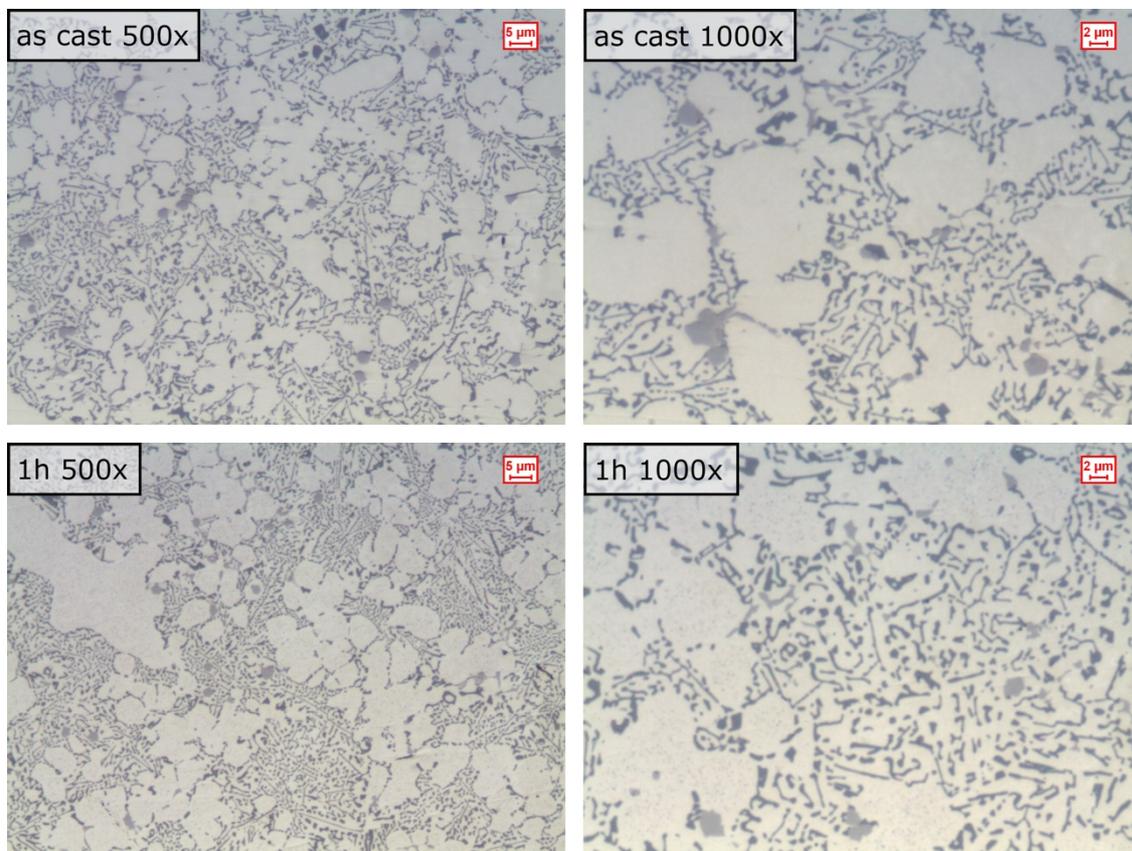


Figura 11.1 Andamento della durezza al variare del tempo di trattamento.

In Figura 11.2 sono riportate le micrografie a 500 e 1000 ingrandimenti, della lega 47100 al variare del tempo di permanenza a 350°C.

Con l'avanzare del tempo il silicio eutettico si arrotonda e nella fase α si formano ed accrescono dei precipitati, non presenti allo stato as cast.



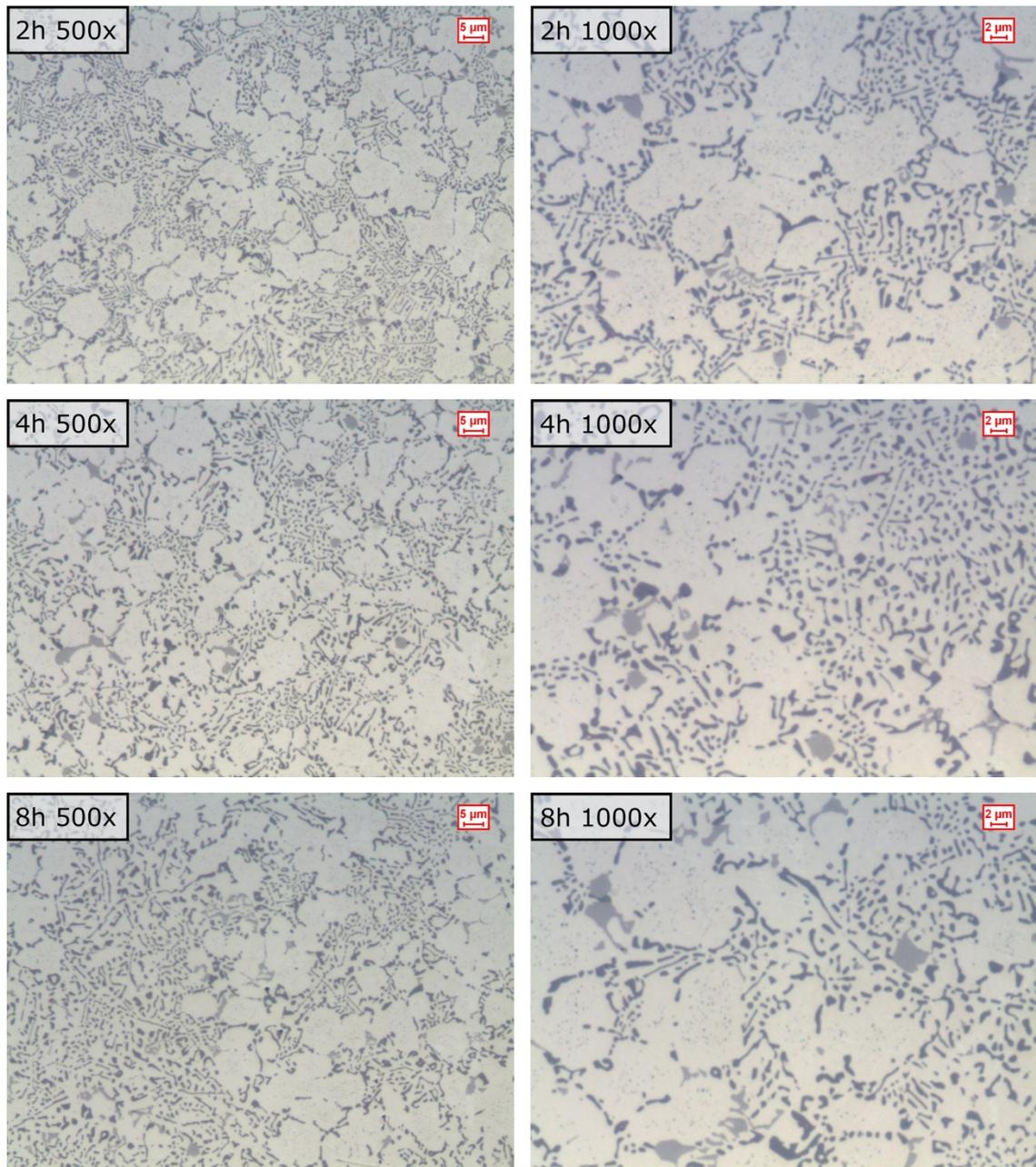


Figura 11.2 Micrografie della lega 47100, al variare del tempo di trattamento.

Si esegue un'analisi al microscopio elettronico a scansione sulla fase α , dalla quale risulta che l'elemento costituente i precipitati è silicio.

In Figura 11.3 sono rappresentate le immagini della fase α , al variare del tempo di trattamento, acquisite al SEM a 20000 ingrandimenti. In giallo viene messo in risalto il silicio. Le zone gialle particolarmente estese riguardano l'eutettico. Allo stato as cast, la fase α è completamente nera, quindi costituita da solo alluminio con altri elementi, tra cui il silicio, in soluzione solida. Già dopo un'ora di trattamento iniziano a comparire i

primi piccoli precipitati, che dopo otto ore di permanenza in forno, accrescono e si aggregano tra loro formandone di più grandi.

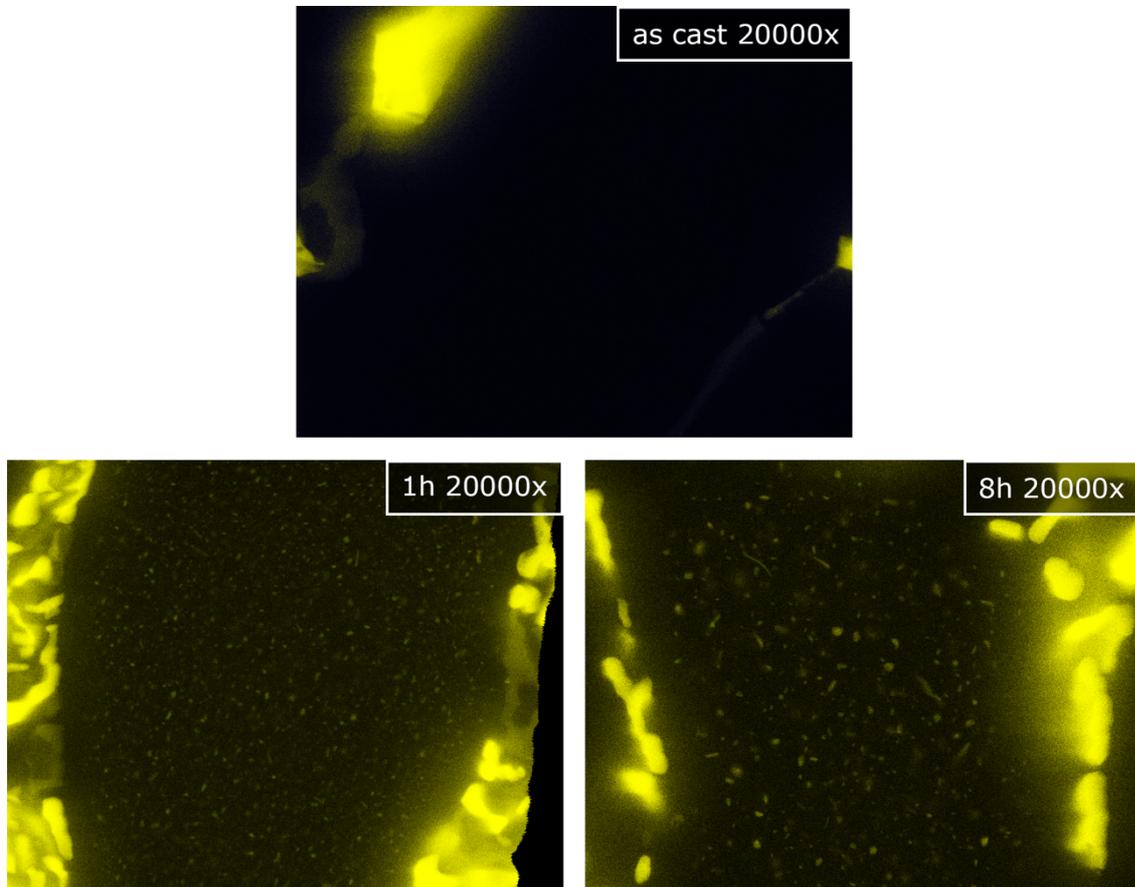
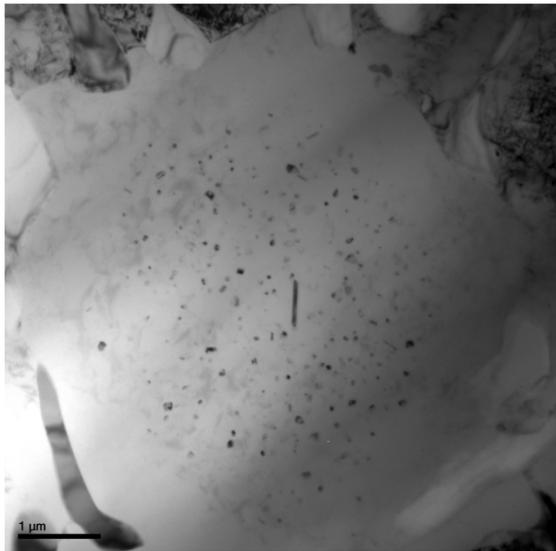


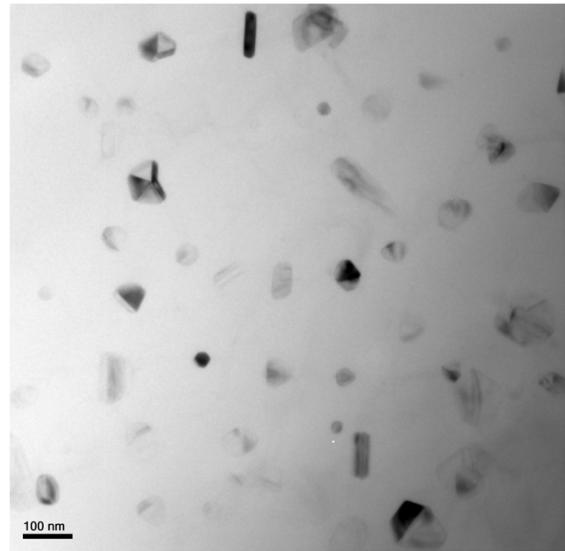
Figura 11.3 Analisi al SEM dei precipitati nella fase α della lega 47100.

Per definire più precisamente la composizione dei precipitati, si esegue un'analisi al microscopio elettronico a trasmissione. Viene confermato quanto risulta dall'analisi al SEM: l'unico elemento costituente è il silicio.

In Figura 11.4 sono riportate le immagini a 20000 e 150000 ingrandimenti della fase α del campione in lega 47100 trattato per un'ora, mentre in Figura 11.5 quelle del campione della stessa lega, trattato per otto ore. Come per le immagini ricavate al SEM, è visibile la differenza di dimensione dei precipitati al variare del tempo di trattamento.

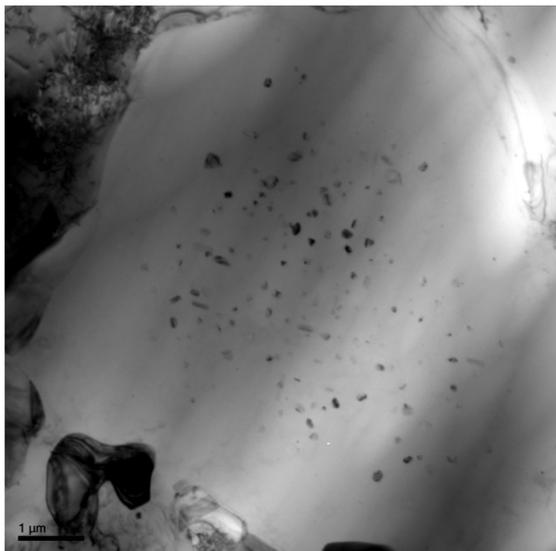


(a)

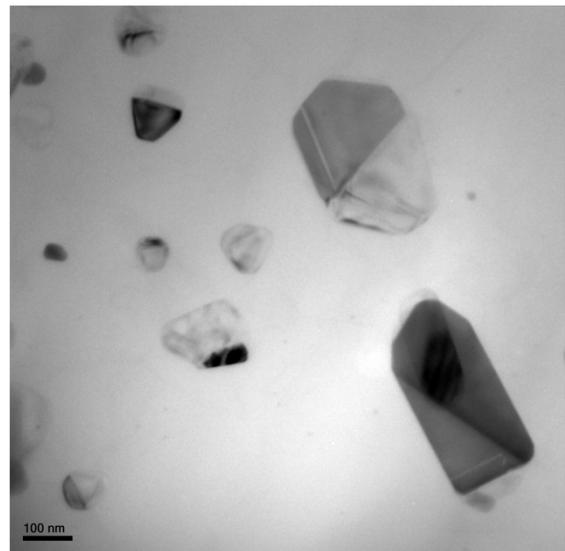


(b)

Figura 11.4 Immagini al TEM, fase α , lega 47100, un'ora di trattamento. (a): 20000x. (b): 150000x.



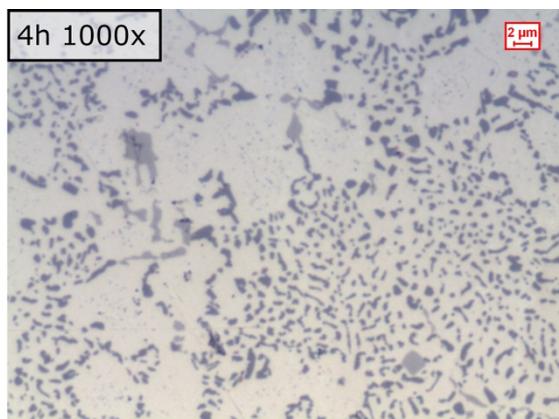
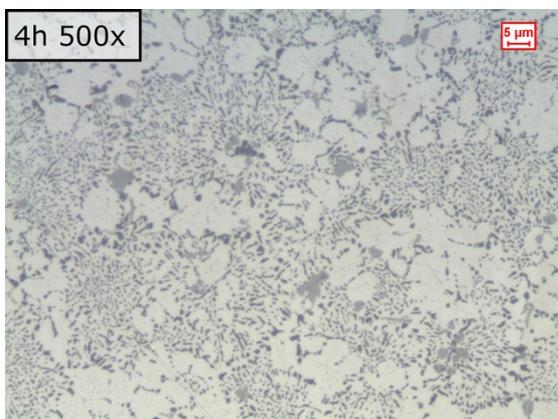
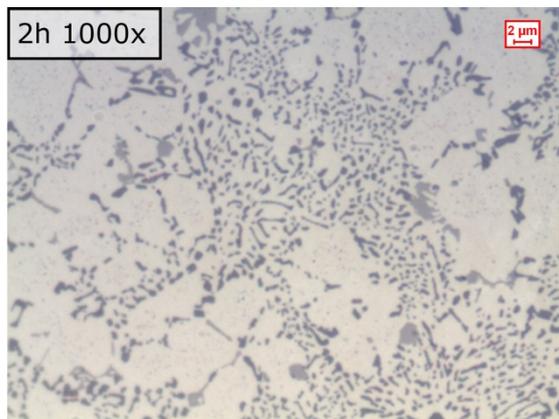
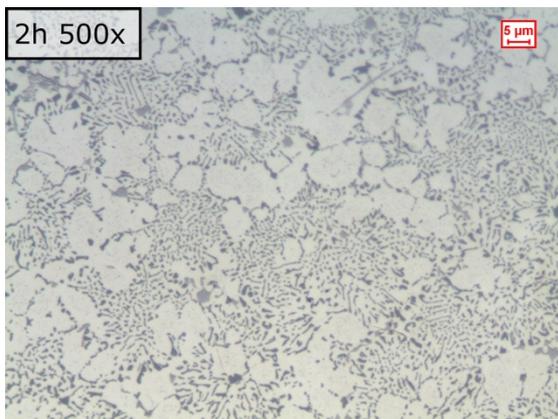
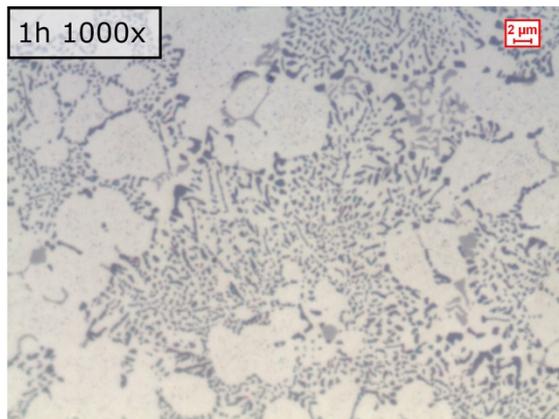
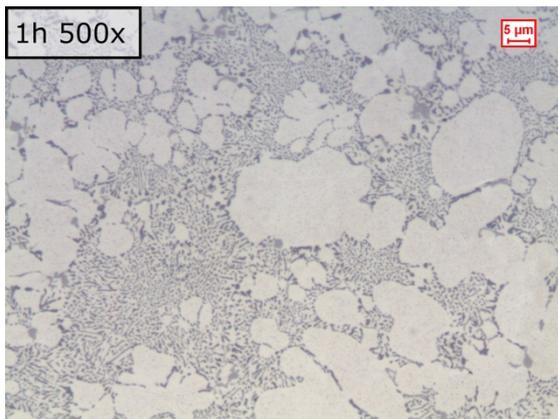
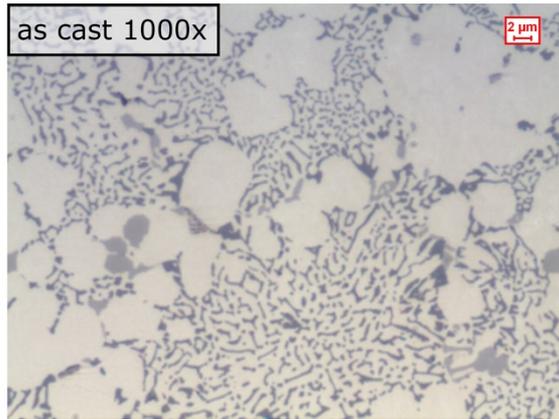
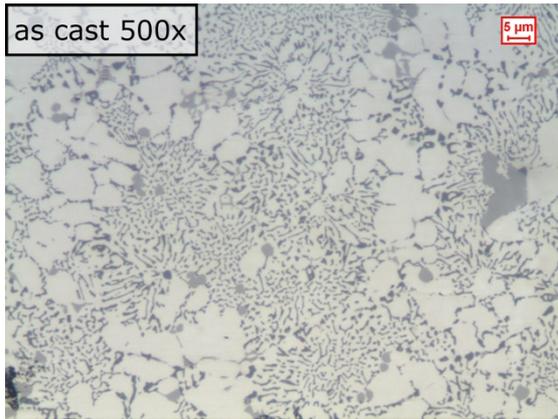
(a)



(b)

Figura 11.5 Immagini al TEM, fase α , lega 47100, otto ore di trattamento. (a): 20000x. (b): 150000x.

Per quanto riguarda la lega 47100 modificata allo stronzio, il trattamento di stabilizzazione produce gli stessi effetti. In Figura 11.6 sono riportate le micrografie al variare del tempo di trattamento.



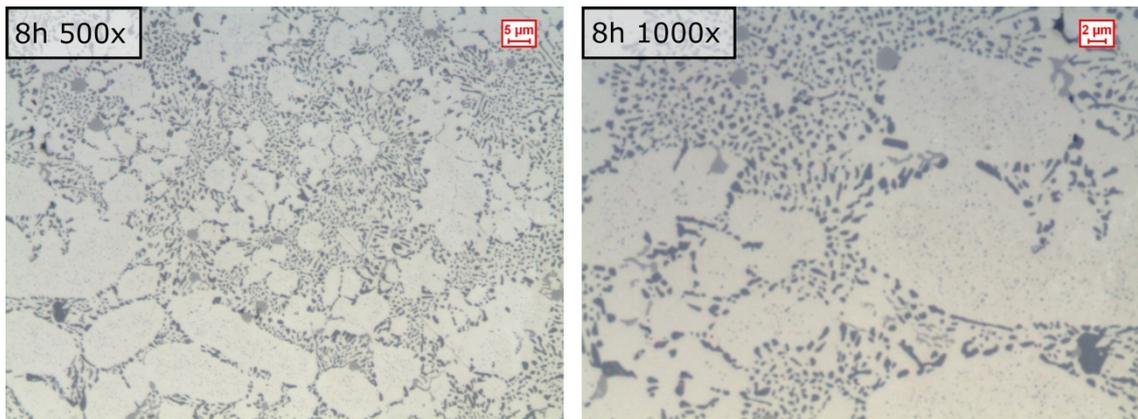


Figura 11.6 Micrografie della lega 47100 modificata, al variare del tempo di trattamento.

In Figura 11.7 sono riportate le curve delle prove di trazione, di provini pressocolati a parte, delle leghe “as cast” utilizzate nell’analisi FEM e la curva della lega 47100 modificata allo stronzio trattata termicamente per 12h a 350°C.

La variazione delle proprietà meccaniche è dovuta alla concomitanza di due fenomeni diversi, sulle due fasi della lega, che comportano però gli stessi risultati. Il primo riguarda l’eutettico: il silicio passando da una forma allungata ad una più tozza diminuisce il suo effetto infragilente. Il secondo riguarda la fase α : la formazione dei precipitati annulla l’effetto di rafforzamento dell’alluminio dato dal silicio in soluzione solida. Entrambi gli effetti concorrono a diminuire il carico di snervamento e di rottura del materiale, ma aumentarne l’allungamento e quindi la duttilità.

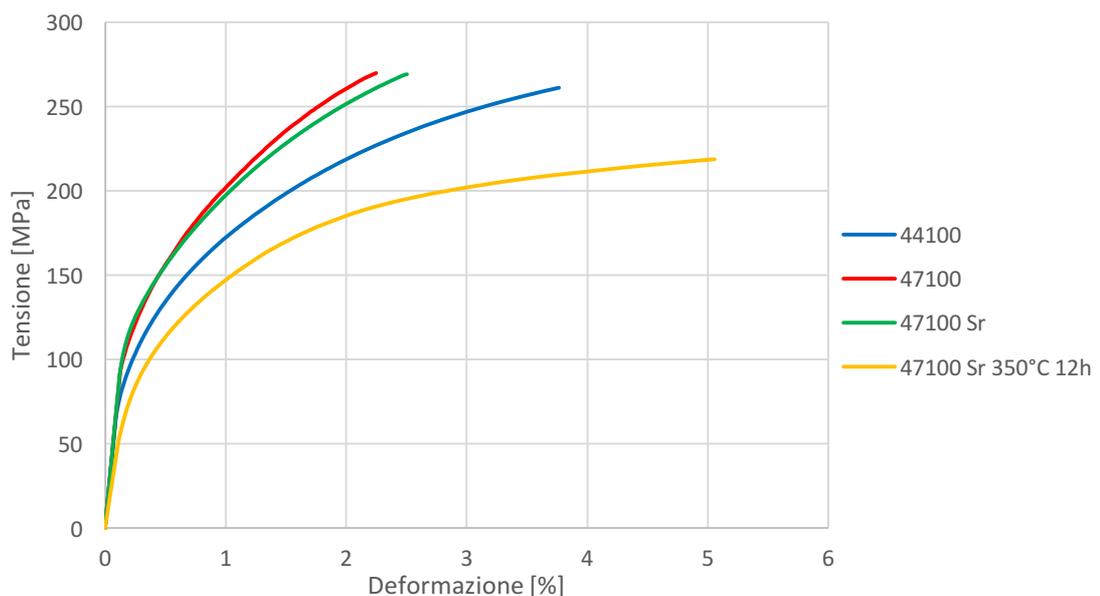


Figura 11.7 Confronto delle prove di trazione dei materiali "as cast" e trattati termicamente.

11.2 Prove sperimentali

Per valutare l'effetto del trattamento sulle prestazioni dei manicotti, si sottopongono alcuni campioni delle leghe 47100, trattati per una, due, quattro ed otto ore a 350°C, a prove statiche e a carichi ciclici. Come per i componenti *as cast* si taglia il lato A e si eseguono i test sul solo lato B. Non si effettuano scansioni ai Raggi X in quanto si è visto non essere rappresentative dell'effettiva condizione difettologica dei manicotti.

Per la lega 47100 modificata, non si eseguono prove su campioni trattati per quattro ore perché, osservando l'andamento della durezza, si presuppone che le prestazioni siano simili a quelli trattati per otto ore.

11.2.1 Prove statiche

In Figura 11.8 sono riportate le curve delle prove statiche dei componenti in lega 47100, suddivise in base alle ore di trattamento.

All'aumentare della permanenza in forno, contrariamente a quanti ci si aspetterebbe, aumenta il carico di rottura, che si stabilizza a circa 8 kN; valore più che doppio rispetto ai manicotti *as cast*. Inoltre, valutando i primi tratti delle curve, fino al cambio di pendenza, si osserva un calo della rigidezza.

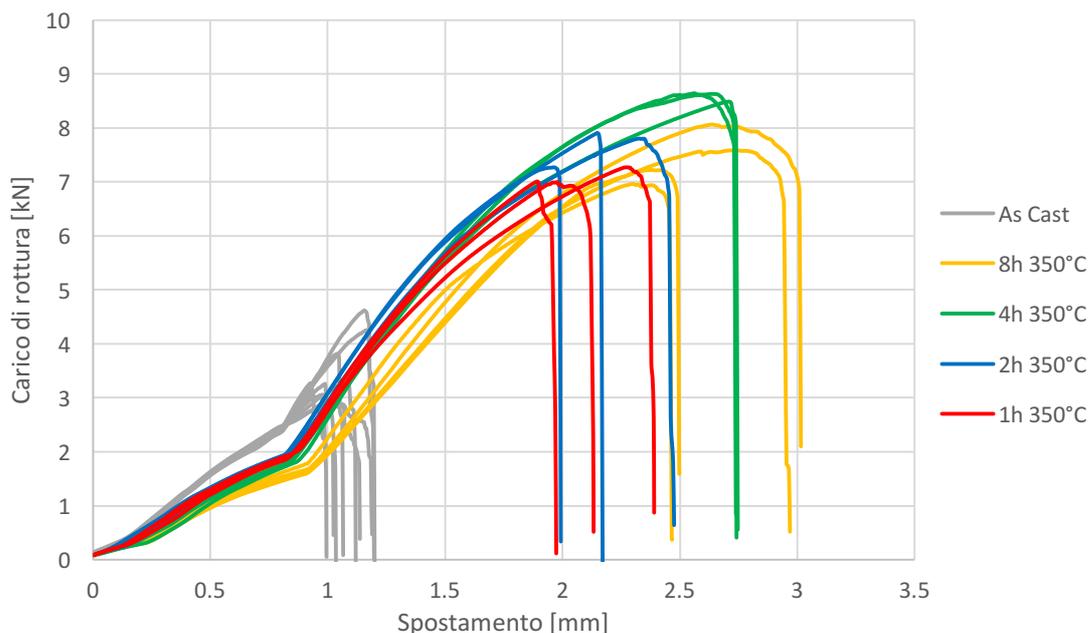


Figura 11.8 Curve delle prove statiche della lega 47100.

Benché le proprietà di resistenza intrinseche del materiale calino all'aumentare del tempo di trattamento, la resistenza dei manicotti aumenta.

Ciò è dovuto al fatto che il materiale con una resistenza meccanica inferiore ha una minore sensibilità ai difetti, intagli e cambi di geometria. Plasticizzando in una zona più ampia attorno al punto critico redistribuisce ed abbassa il picco di tensioni.

Nel caso in esame, la geometria del componente presenta un raccordo, in corrispondenza della nervatura del lato B, che funge da punto di concentrazione delle tensioni. Punto dal quale si innesca la frattura. Utilizzando un materiale con una resistenza minore, ma una maggiore duttilità, diminuisce la sensibilità al raccordo, che comporta un aumento della resistenza del componente.

La minore influenza del raccordo della nervatura è verificato anche dal cambio del tipo di rottura. In Figura 11.9 sono rappresentati due manicotti rotti a seguito di una prova statica. Il campione in Figura 11.9(a) presenta la rottura di Tipo 1, che si manifesta in tutti i campioni *as cast* e quelli trattati ad una e due ore; l'inesco avviene a partire dal raccordo critico, indicato dalla freccia. Aumentando il tempo di trattamento il materiale diviene più duttile, l'estremità del manicotto si abbassa maggiormente e si verifica la rottura di Tipo 2, che si innesca sul raccordo della sede del dado, indicato dalla freccia in Figura 11.9(b).

Nei manicotti trattati per quattro ore, il 33% dei componenti manifesta la rottura di Tipo 2, mentre ad otto ore la percentuale aumenta, portandosi al 75%.

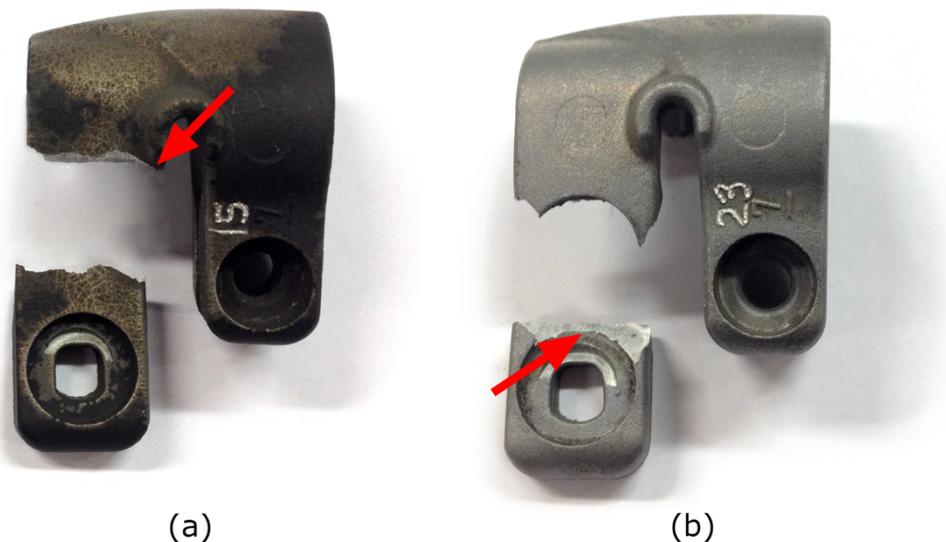


Figura 11.9 Cambio del tipo di rottura all'aumentare del tempo di trattamento.

Il cambio del punto di rottura avviene solamente nelle prove statiche ed è dovuto alla modalità di esecuzione dei test. In esercizio, al manicotto non è richiesto di resistere a carichi così elevati. Questo aspetto è comunque rappresentativo del fatto che, la variazione delle proprietà meccaniche della lega, comporti una riduzione della sensibilità del materiale al raccordo della nervatura.

In Figura 11.10 sono riportate le curve delle prove statiche della lega 47100 modificata.

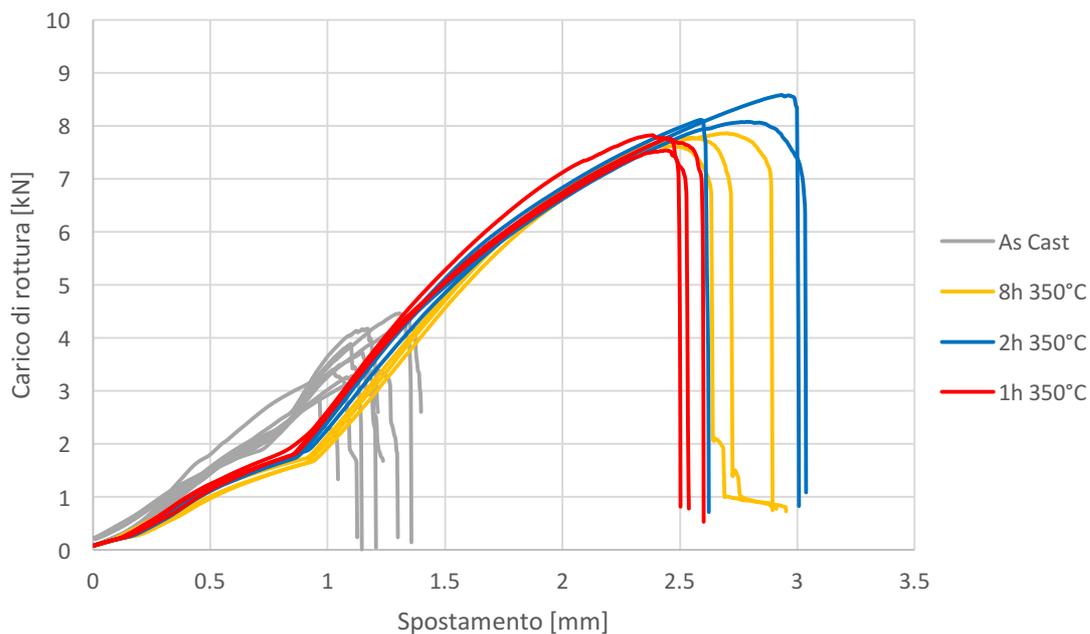


Figura 11.10 Curve delle prove statiche della lega 47100 modificata.

In Figura 11.11 sono riassunti i risultati delle prove statiche delle leghe 47100, standard e modificata, al variare del tempo di trattamento, confrontati con l'andamento della durezza.

L'evoluzione del carico di rottura segue quello della durezza. Per la lega 47100 standard l'andamento della durezza è più blando rispetto alla lega modificata e ciò si ritrova nei risultati delle prove statiche.

Si vede come la lega modificata arrivi agli stessi risultati della lega standard con tempi di permanenza dimezzati. Ad otto ore inoltre, come per la durezza, si portano allo stesso valore.

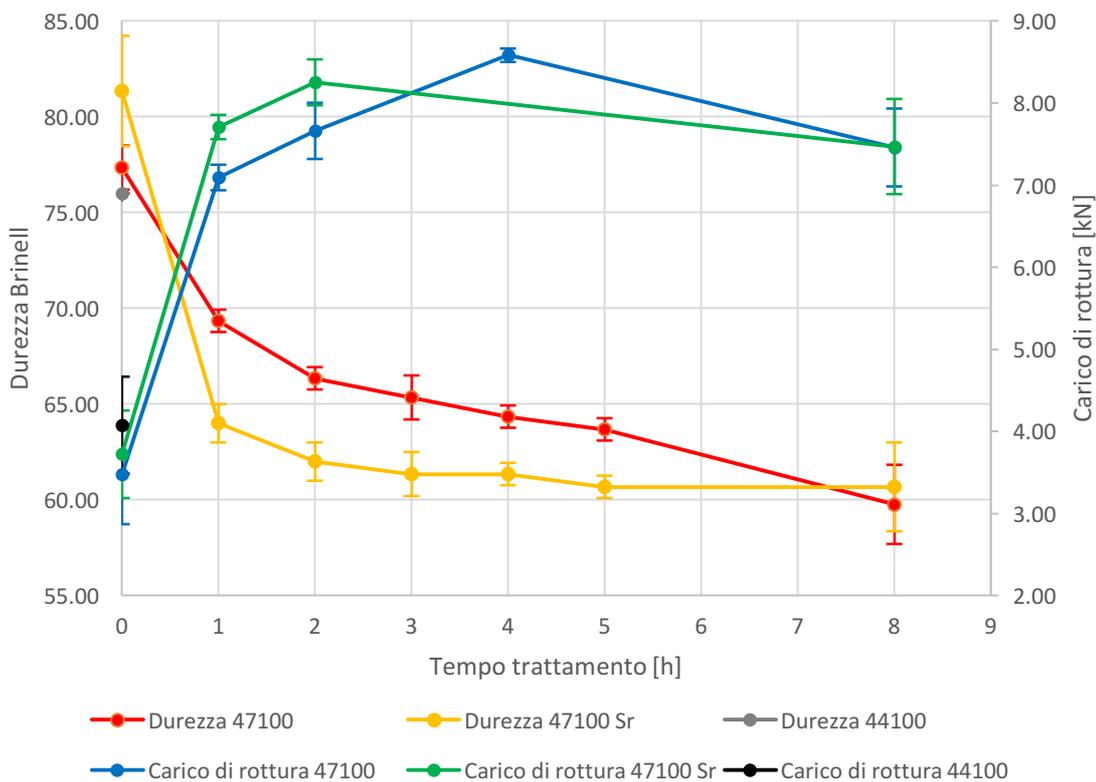


Figura 11.11 Andamento dei risultati delle prove statiche al variare del tempo di trattamento.

11.2.2 Prove a carichi ciclici

Si eseguono inizialmente due prove su campioni della lega 47100 trattata per 8 ore ad un range di carico di 900 N. Risulta che entrambi arrivano a 20000 cicli, valore al quale si ferma la prova, senza innesco della cricca. Per valutare se un aumento della sollecitazione provochi la rottura del componente, si eseguono delle prove al range di carico più severo: 1350 N. Anche in questo caso i campioni trattati per 8 ore concludono la prova senza l'innesco della cricca, quelli mantenuti in forno per tempi inferiori si rompono invece nella modalità di Tipo 1, quindi con l'innesco a partire dal raccordo critico.

In Figura 11.12 sono riportati i risultati delle prove dei componenti trattati, cerchiati in giallo, confrontati con quelli dei componenti allo stato *as cast*. Si vede come il trattamento comporti un aumento dei cicli a rottura di due ordini di grandezza.

Le leghe 47100, sottoposte alla prova con un range di carico di 1350 N, passano da circa 100 a 10000 cicli.

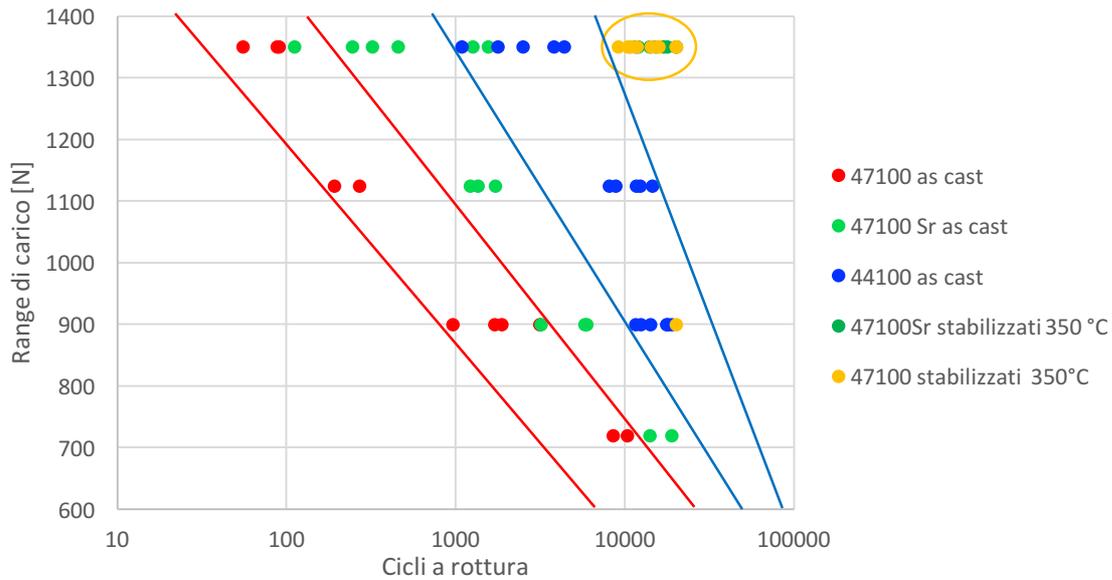


Figura 11.12 Risultati delle prove a carichi ciclici dei componenti trattati e non.

In Figura 11.13 sono riassunti i risultati delle prove a carichi ciclici al variare del tempo di trattamento, confrontati con l'andamento della durezza. L'evoluzione è prossima a quella delle prove statiche. C'è da specificare che i valori ad otto ore non si riferiscono ai cicli a rottura, ma alla conclusione della prova. Per entrambe le leghe i campioni arrivano a 20000 cicli senza conseguenze.

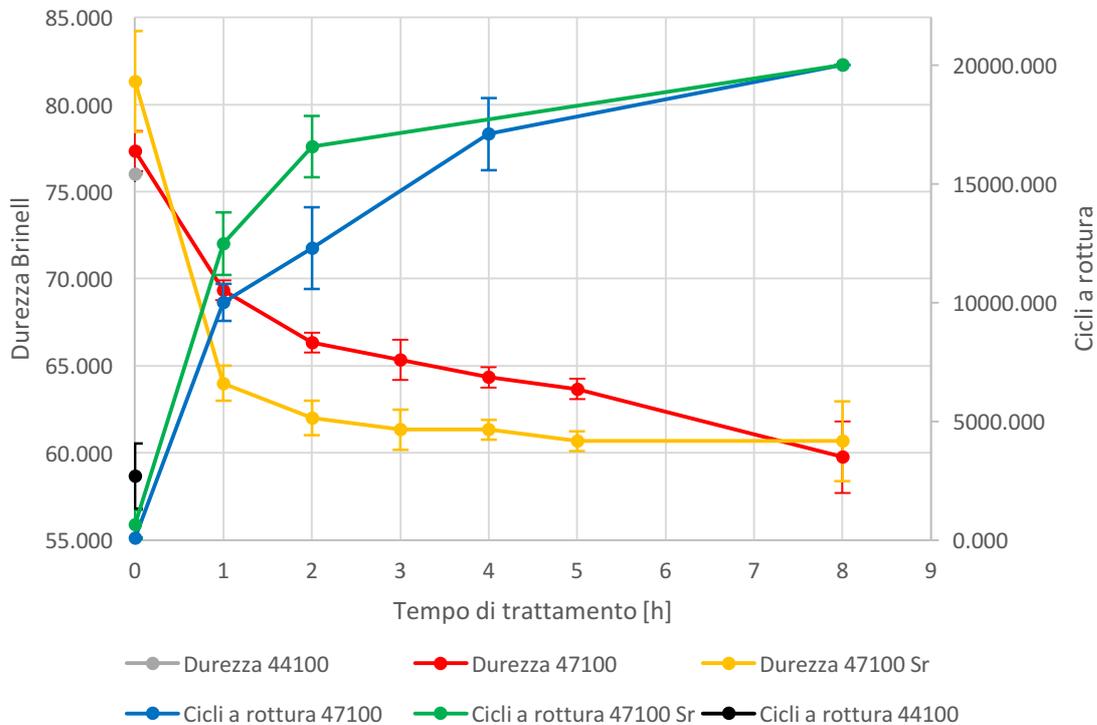


Figura 11.13 Andamento dei risultati delle prove a carichi ciclici al variare del tempo di trattamento.

11.3 Verifica della funzionalità

Il trattamento di stabilizzazione comporta una variazione delle proprietà meccaniche della lega. In particolare, ciò che influenza maggiormente la funzionalità del componente sono la rigidità, il carico di snervamento e la durezza.

Affinché il sistema funzioni correttamente, quando viene chiusa la leva, il manicotto deve stringere adeguatamente il tubo interno, mentre quando viene aperta, deve avere un ritorno elastico sufficiente da permetterne lo scorrimento.

Per verificare la funzionalità dei manicotti si fanno delle prove di assemblaggio dei componenti a seguito del trattamento termico e li si confronta con quelli allo stato *as cast*.

Ci si concentra sui manicotti in lega 47100 standard, in quanto dalle prove sperimentali risulta che, con adeguati tempi di trattamento, garantiscono gli stessi risultati di quelli nella lega modificata, più costosa e complessa da gestire durante la colata.

In Tabella 11.1 sono riportati i valori della distanza delle estremità mobili del manicotto, in condizioni di chiusura ed apertura della leva, per componenti in lega 47100, allo stato *as cast* e trattati, confrontati con quelli della lega 44100, presa come riferimento di corretta funzionalità del sistema.

Le misurazioni vengono eseguite dopo alcuni cicli di apertura e chiusura della leva, su manicotti nuovi ed assemblati con le coppie di serraggio definite dalle specifiche.

	44100	47100 <i>as cast</i>	47100 1h 350°C	47100 8h 350°C
<i>Distanza apertura [mm]</i>	2.6	2.9	2.6	2.1
<i>Distanza chiusura [mm]</i>	1.3	1.5	1.4	1.1

Tabella 11.1 Distanze estremità mobili dei manicotti nelle diverse leghe.

Dalle misurazioni si vede come i manicotti trattati termicamente, avendo un carico di snervamento inferiore, si deformino maggiormente rispetto a quello della stessa lega allo stato *as cast*. Le differenze dei valori della distanza nelle condizioni di chiusura della leva non influenzano particolarmente la funzionalità, tutti i manicotti vincolano

adeguatamente il tubo. Il comportamento in esercizio risente invece molto del ritorno elastico quando la leva viene aperta; condizione rappresentata in Figura 11.14 per quattro manicotti delle diverse leghe. Un ritorno ridotto influisce sul posizionamento del dado nella sua sede, mentre non comporta problemi allo scorrimento del tubo interno.

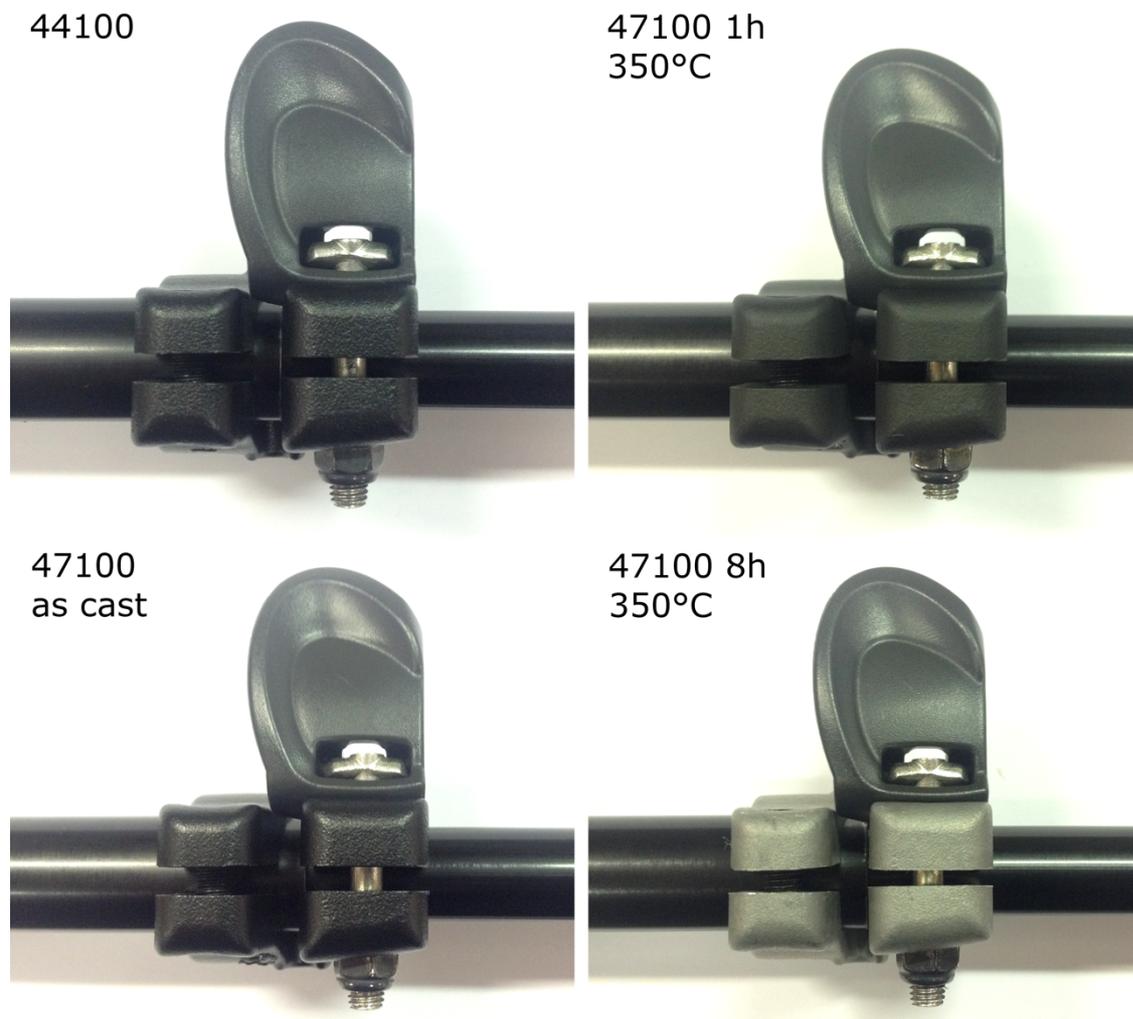


Figura 11.14 Manicotti nella configurazione di leva aperta.

Come visto nel capitolo cinque, riguardante il manicotto, il dado della leva, quando questa è aperta, può spostarsi nella sua sede e posizionarsi come in Figura 11.15(b). Nei manicotti in lega 44100 e 47100 non trattata, essendo caratterizzati da un buon ritorno elastico, il dado ha poco gioco e inoltre scorre facilmente nella sua sede, questo comporta che alla chiusura della leva si posizioni sempre correttamente, come in Figura 11.15(a). Nei manicotti trattati invece, può capitare che si blocchi nella posizione in Figura 11.15(b), questo è dovuto al maggior gioco dato dal ridotto ritorno elastico e dal fatto

che lo scorrimento del dado nella sede è reso più complicato dalla vernice rovinata dal trattamento e da una minore durezza del materiale.

In questa configurazione la rigidità del sistema è maggiore, lo stesso spostamento viene imposto ad una distanza minore rispetto all'appoggio. Ciò si traduce in una risposta più dura della leva e comporta una sollecitazione maggiore sul manicotto.

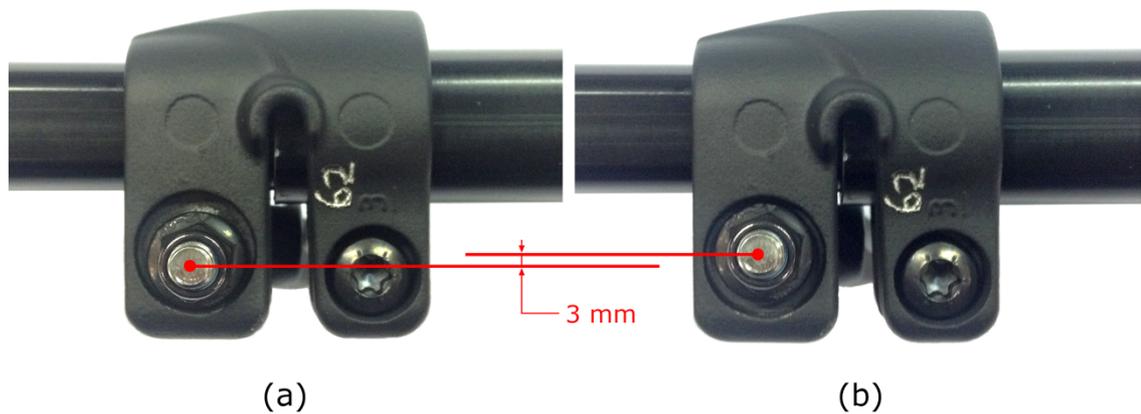


Figura 11.15 Possibili posizioni del dado della leva.

Si deve quindi trovare un compromesso tra prestazioni meccaniche e funzionalità. Questo viene identificato nei manicotti trattati per un'ora a 350°C.

Per quanto riguarda le prestazioni, il carico di rottura è il doppio rispetto ai manicotti nella lega *as cast*, mentre il numero di cicli a rottura è 100 volte superiore.

La funzionalità viene invece garantita da una durezza di circa 70 HB, inferiore rispetto ai 77 HB della lega *as cast*, ma superiore di dieci punti rispetto alla lega trattata per otto ore. Inoltre, come visibile in Tabella 11.1, le distanze di apertura e chiusura del manicotto sono prossime a quelle del componente in lega 44100. Questi aspetti, benché non sia presente il corretto strato di vernice, annullano il problema riguardante l'errato posizionamento del dado.

12 Correlazione tra prestazioni e difetti

Dalle prove sperimentali si vede come ci sia una dipendenza delle prestazioni rispetto alla concentrazione dei difetti nella sezione resistente dei componenti.

È possibile quindi determinare una correlazione tra i risultati delle prove ed un fattore che consideri posizione e dimensione dei difetti nel manicotto, definito *Fattore di Penalità*. Lo sviluppo si basa sull'assunzione che qualsiasi sia il difetto, l'effetto della sua presenza comporti la sola diminuzione della sezione resistente del componente. Per questo motivo si considerano di pari importanza porosità, film d'ossido o altre discontinuità che causino un'interruzione della regolarità della struttura del materiale.

12.1 Influenza dei difetti sulla resistenza

Si consideri il lato B del manicotto. In esercizio, a seguito della chiusura della leva, lo sforzo che si genera nella sezione può essere considerato di flessione. Questo comporta una distribuzione triangolare delle tensioni, con uno stato di compressione in prossimità del tubo e di trazione nella parte opposta. La posizione del difetto ha quindi un ruolo fondamentale sulle prestazioni: se situato nella zona a trazione ha un'influenza negativa, mentre nella zona a compressione il suo effetto può essere trascurato.

Dalle prove sperimentali, siano esse statiche o a carichi ciclici, si osserva che la frattura avviene sempre in una sezione particolare del componente, evidenziata in rosso in Figura 12.1, in corrispondenza del raccordo della nervatura.

Dai risultati dell'analisi agli elementi finiti, è possibile valutare la distribuzione delle tensioni normali a questa sezione, Figura 12.2. Si vede come, rispetto ad una distribuzione triangolare standard, la presenza della nervatura comporti una concentrazione di tensioni di trazione in una zona ben localizzata. Si stabilisce quindi che, allontanandosi da questa zona, l'effetto dei difetti sulla resistenza meccanica dei componenti si abbassi, fino ad annullarsi nella zona in compressione in prossimità del tubo.

In Figura 12.2 sono inoltre riportati i valori medi della tensione, utilizzati successivamente per la determinazione dei pesi associati ad ogni zona della sezione.

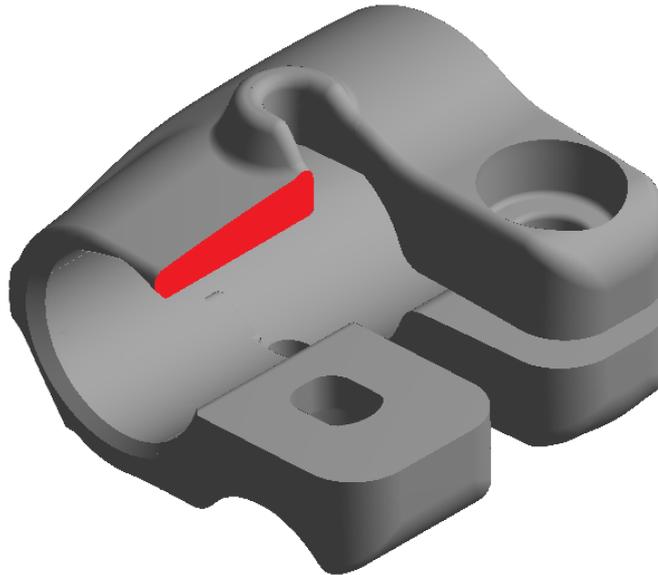


Figura 12.1 Sezione di frattura del manicotto.

B: Analisi definitiva lega 44100
 Normal Stress
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 7.2
 Custom
 Max: 263.25
 Min: -417.37

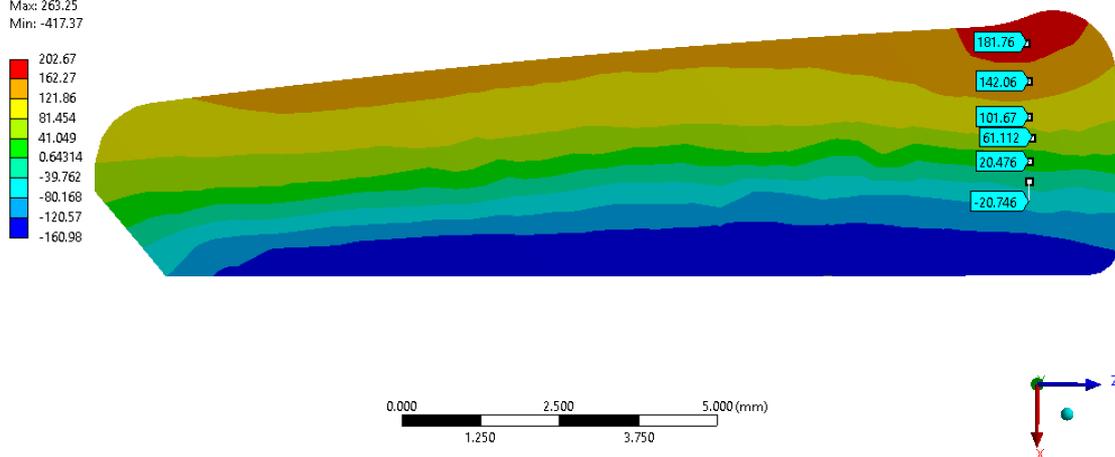


Figura 12.2 Distribuzione di tensioni normale alla sezione resistente.

Ulteriori fattori che influenzano la resistenza meccanica dei manicotti sono la dimensione, forma e orientazione dei difetti rispetto alla sezione resistente.

Mentre le porosità sono solitamente caratterizzate da una forma arrotondata, pressoché uguale qualsiasi sia la direzione in cui si osservano; i film d'ossido hanno forme più elaborate ed essendo sviluppati in un piano, in base all'orientazione che assumono rispetto alla sezione, il loro effetto sulla resistenza varia.

Si prendano in esame le superfici di frattura in Figura 12.3 di due componenti sottoposti ad una prova statica. Entrambi presentano, nella zona in prossimità del raccordo della nervatura, un film d'ossido; il campione (a) è caratterizzato da un carico di rottura inferiore rispetto a (b). Nel primo caso l'ossido ha un sviluppo parallelo alla sezione resistente, nel secondo invece prevalentemente ortogonale. La diminuzione della sezione resistente in quest'ultimo caso è quindi inferiore, motivo per cui, per la determinazione dell'effetto negativo sulla resistenza, si decide di considerare come parametro rappresentativo l'area proiettata dei difetti sulla sezione. È così possibile considerarne contemporaneamente dimensione ed orientazione.

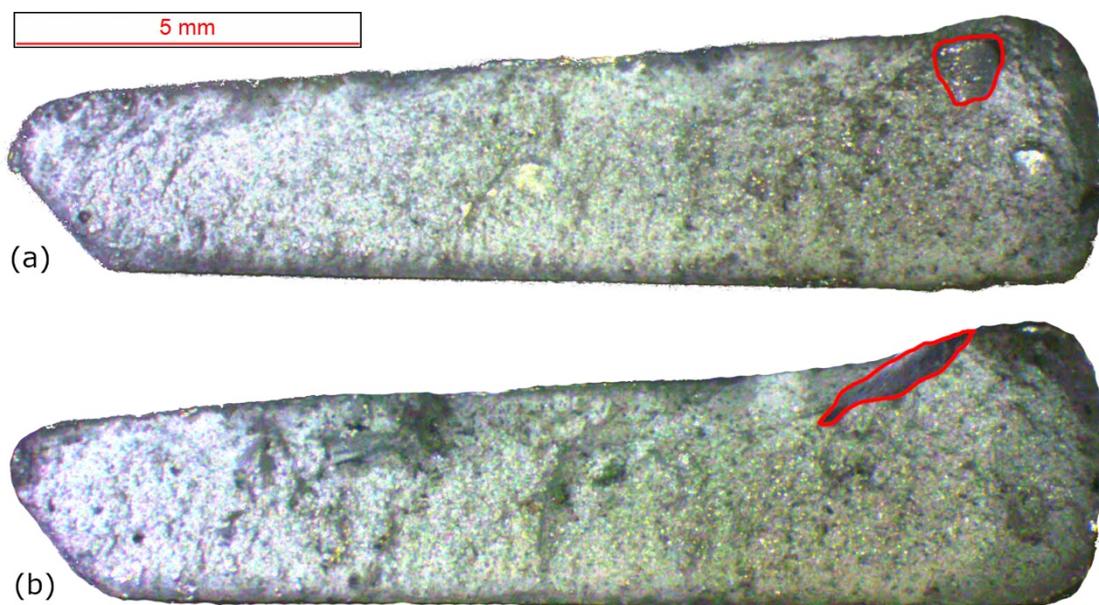


Figura 12.3 Superfici di frattura con diverse disposizione dell'ossido.

12.2 Il Fattore di Penalità

Il *Fattore di Penalità* viene definito per fornire un'indicazione complessiva circa lo stato dei difetti nella sezione resistente del manicotto. Si considerano contemporaneamente l'effetto della posizione, dimensione e orientazione dei difetti effettuando delle misurazioni sulle superfici di frattura dei componenti testati. Su queste si applica una maschera, in Figura 12.4, ricavata dai risultati dell'analisi agli elementi finiti in Figura 12.2. La maschera è suddivisa in sei zone, la prima è caratterizzata dalla tensione di trazione maggiore, la sesta invece da uno stato tensionale di compressione.



Figura 12.4 Maschera per la valutazione dell'effetto della posizione dei difetti nella sezione.

In Tabella 12.1 sono riportati i pesi di ogni zona, definiti in base al valore medio della tensione. Si trascura la sesta zona in quanto, essendo sottoposta ad uno stato di compressione, l'eventuale presenza di difetti non comprometterebbe la resistenza del componente.

I pesi vengono ricavati dividendo il valore della tensione media di ogni zona per quella della quinta, alla quale viene quindi assegnato un peso unitario.

Come ipotizzato, allontanandosi dal raccordo della nervatura, diminuisce l'influenza dei difetti, con un rapporto di 9 a 1 tra la prima e l'ultima zona.

	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	<i>Zona 3</i>	<i>Zona 4</i>	<i>Zona 5</i>
<i>Tensione media [MPa]</i>	182	142	102	61	20
<i>Peso</i>	9.1	7.1	5.1	3.05	1

Tabella 12.1 Pesì delle zone.

Definita la maschera, la si applica alla superficie di frattura di un campione e tramite il software Adobe Photoshop, dopo aver calibrato l'immagine, si misura l'area totale di ogni zona [19]. I valori, mantenuti uguali per tutti i componenti, sono riportati in Tabella 12.2.

	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	<i>Zona 3</i>	<i>Zona 4</i>	<i>Zona 5</i>
<i>Area [mm²]</i>	1.48	8.35	10.64	5.94	4.87

Tabella 12.2 Aree di ogni zona.

Si riporta quindi la maschera sulle superfici di tutti i campioni e si misura, per ogni zona, l'area proiettata dei difetti.

In Figura 12.5 è rappresentato un esempio. Le superfici di frattura in questo caso sono acquisite con un microscopio elettronico a scansione. Rispetto alle immagini acquisite con lo stereoscopio, sono caratterizzate da una migliore qualità che permette di individuare e misurare in maniera più precisa i difetti.

Per non influenzare le misurazioni delle aree si posiziona il piano di vista parallelo alla superficie di frattura. Si suddivide inoltre l'acquisizione in cinque parti, che in seguito vengono assemblate per ottenere la sezione completa. Ciò permette di aumentare la risoluzione e quindi l'attendibilità delle misure. La porzione inferiore della sesta zona viene trascurata in quanto non interessante.

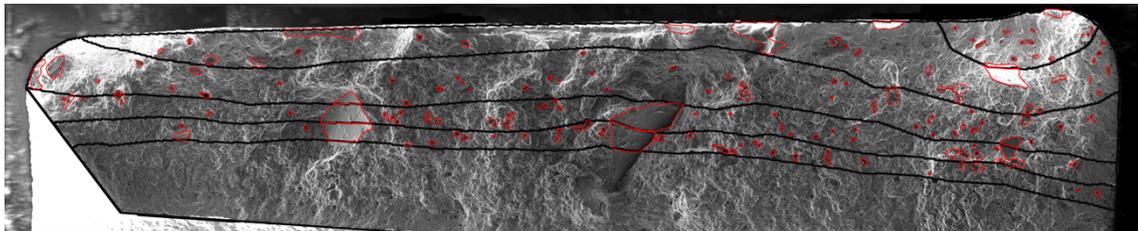


Figura 12.5 Esempio di superficie di frattura con misurazioni.

Misurate le aree dei difetti in ogni zona, tramite la formula (5) è possibile calcolare il *Fattore di Penalità* del componente in esame.

$$\text{Fattore di Penalità} = \sum_{z=1}^5 \left[\frac{(\text{Area dei difetti})_z}{(\text{Area totale})_z} \times p_z \right] \quad (5)$$

Per ognuna delle cinque zone z si calcola il rapporto tra l'area dei difetti e l'area totale moltiplicato per il peso p_z assegnatole. La somma di questi termini fornisce il *Fattore di Penalità* del manicotto.

Maggiore è il fattore, peggiore è la condizione del componente dal punto di vista difettologico.

12.3 Prove statiche

In Figura 12.6 sono riportati, per la sola lega 44100, i risultati delle prove statiche come carico di rottura rispetto al *Fattore di Penalità*. Si vede come, all'aumentare di quest'ultimo, diminuisca il carico di rottura del manicotto.

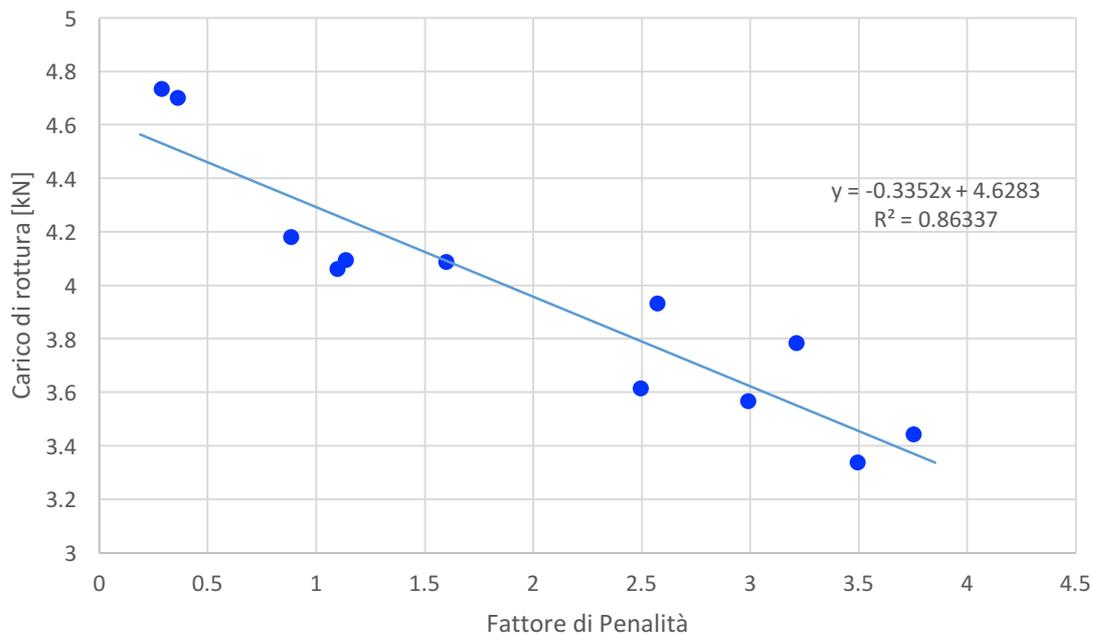


Figura 12.6 Correlazione Carico di rottura - Fattore di Penalità per le prove statiche.

12.4 Prove a carichi ciclici

Si ripete la procedura sulle superfici di frattura dei campioni in lega 44100 testati a carichi ciclici. In Figura 12.7 sono riportati i risultati, come Cicli a rottura – *Fattore di Penalità*, suddivisi in base al range di carico applicato. Analogamente ai risultati delle prove statiche, si vede che all'aumentare del *Fattore di Penalità* diminuisce il numero di cicli che portano a rottura il componente.

In questo caso però la distribuzione delle tensioni identificata dall'analisi agli elementi finiti è rappresentativa solamente per la prima parte della prova. Con l'innesco della cricca si ha una diminuzione della sezione resistente, che comporta una variazione della distribuzione delle tensioni e quindi dei pesi dei difetti.

Una correlazione più affidabile dovrebbe considerare l'avanzamento della cricca e la redistribuzione della sollecitazione che ne consegue.

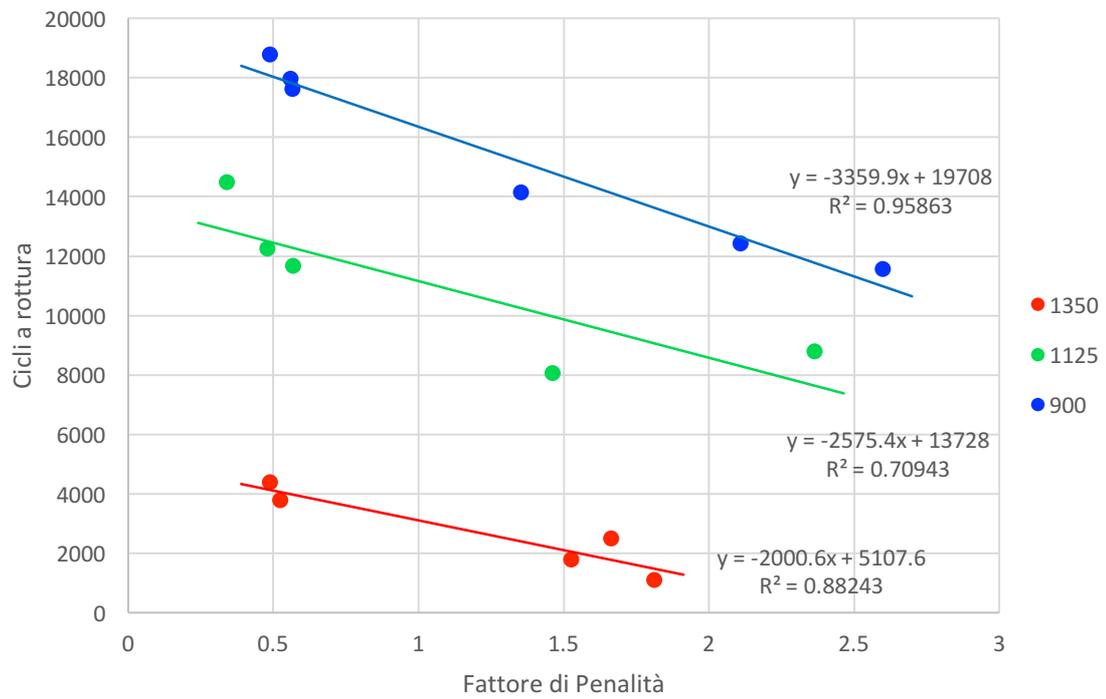


Figura 12.7 Correlazione Cicli a rottura - Fattore di Penalità per le prove a carichi ciclici.

13 Conclusioni

Dal lavoro svolto risulta che la rottura del componente è causata dalla presenza, in una zona sollecitata a fatica, di una variazione di sezione. Quando il manicotto viene posto in esercizio, in corrispondenza di tale punto, si genera una concentrazione di tensioni. Durante l'utilizzo questo fenomeno porta all'innescò di una cricca, che propaga lungo l'intera sezione fino alla rottura del componente. Una riprogettazione di quest'ultimo, centrata sull'eliminazione della criticità geometrica, rappresenta una possibile soluzione alla rottura.

La sostituzione del materiale attualmente impiegato, una lega di alluminio primaria 44100, con una secondaria 47100, standard e modificata allo stronzio, acuisce il problema circa la resistenza dei manicotti.

Un trattamento termico di stabilizzazione sulle leghe secondarie ne migliora però le prestazioni. La diminuzione del carico di rottura e snervamento, unito all'aumento della duttilità, comporta una diminuzione della sensibilità del materiale a difetti, intagli e variazioni di geometria. Il comportamento del componente risente meno della presenza della zona critica e presenta quindi una vita, all'applicazione di carichi ciclici, superiore rispetto a quella dei manicotti in lega primaria allo stato *as cast*.

La modifica allo stronzio in questo caso risulta poco utile in quanto, con tempi di trattamento adeguati, con la lega standard si ottengono gli stessi risultati.

Il trattamento termico migliora la resistenza, ma diminuendo rigidità e durezza del materiale, influenza negativamente la funzionalità del manicotto.

Con tempi di trattamento eccessivi si verificano instabilità delle condizioni di esercizio del componente. Considerando la lega 47100 standard, un compromesso viene identificato nella permanenza a 350°C per un'ora, ciò permette di migliorare notevolmente le prestazioni e mantenere una funzionalità pari a quella dei manicotti in lega 44100.

La realizzazione dei manicotti utilizzando una lega secondaria, seguita da un trattamento di stabilizzazione ad una temperatura e tempo opportuni, permette di mantenere la stessa geometria, migliorare il comportamento a fatica dei componenti e ridurre i costi di

produzione. Una lega secondaria è infatti caratterizzata da un costo inferiore rispetto ad una primaria e la maggior concentrazione di ferro riduce l'adesione con gli stampi, diminuendone l'usura.

Le prove sperimentali evidenziano inoltre come la variabilità delle prestazioni dei manicotti, sia dovuta alla diversa concentrazione dei difetti all'interno del getto. In particolare si identifica una correlazione con dimensione e posizione di porosità e film d'ossido nella sezione resistente del componente. La difficoltà di individuazione di quest'ultima tipologia di difetti tramite un'analisi ai Raggi X, ha escluso questo come unico metodo di controllo qualità.

L'impossibilità però di eseguire un'analisi difettologica complessiva con gli attuali sistemi di ispezione non distruttivi, che sia anche applicabile ad una produzione di massa, comporta che la diminuzione della variabilità delle prestazioni, è possibile solamente riducendo la formazione dei difetti nel getto tramite un controllo accurato del processo produttivo.

14 Bibliografia

- [1] G. Timelli, E. Fiorese: *Metodi di neutralizzazione del Fe in leghe Al-Si da fonderia*.
- [2] Makhlouf M. Makhlouf: *Casting Characteristics of Aluminum Die Casting Alloys*. Febbraio 2002.
- [3] F. Bonollo: *Leghe di Alluminio*. Dispensa.
- [4] M. Timpel, N. Wanderka, R. Schlesiger, T. Yamamoto, N. Lazarev, D. Isheim, G. Schmitz, S. Matsumura, and J. Banhart: *The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys*. 2012.
- [5] COMALCO: *Modification of Foundry Al-Si Alloys*. Dicembre 1997.
- [6] A. Morri: *Correlazioni tra microstruttura e proprietà meccaniche ed effetto della permanenza in temperatura in leghe Al-Si-Mg ed Al-Cu trattate termicamente*. Tesi di dottorato di ricerca. 2011.
- [7] H. I. Laukli: *High Pressure Die Casting of Aluminium and Magnesium Alloys - Grain Structure and Segregation Characteristics*. Aprile 2004
- [8] E. Gariboldi, F. Bonollo, M. Rosso: *Proposal of a Classification of Defects of High-Pressure Diecast Products*. Giugno 2007.
- [9] F. Bonollo, N. Gramegna: *The MUSIC guide to key-parameters in High Pressure Die Casting*. 2014.
- [10] G. B. Broggiato. *Viti, Bulloni e Serraggi*. Dispense del corso Elementi Costruttivi delle Macchine.
- [11] Ansys Customer Training Material: *Rate Independent Plasticity*. 2010.
- [12] Ansys Documentation: *Contact Technology Guide*. 2009.
- [13] Ansys Customer Training Material: *Introduction to Contact*. 2010.
- [14] Sheldon Imaoka: *Contact Analysis Tips*. 2009.
- [15] Ansys Documentation: *Workbench Mechanical Contact Best Practices*. 2014.
- [16] Ansys Customer Training Material: *Advanced Contact*. 2009.
- [17] M. Quaresimin, N. De Rossi: *Introduzione all'estensimetria applicata alla misura di deformazioni e carichi*.
- [18] S. Gowri, F.H. Samuel: *Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy*. Febbraio 1994.
- [19] <https://helpx.adobe.com/photoshop/using/measurement.html>

15 Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Paolo Ferro per la disponibilità e professionalità, nonché la cortesia, con cui mi ha seguito durante lo sviluppo del lavoro. Un ringraziamento al Professor Giulio Timelli per i preziosi consigli ed insegnamenti che non ha esitato a fornire.

Un grazie all'Ingegnere Eleonora Battaglia per il supporto nello svolgimento e nella stesura della tesi.

Un ringraziamento ai dottorandi ed al personale tecnico del gruppo di metallurgia del Dipartimento, in particolare Giacomo Mazzacavallo, per l'aiuto durante le esperienze in laboratorio.

Infine un sentito ringraziamento ai miei genitori e alla mia famiglia, che, con il loro sostegno morale ed economico, mi hanno consentito di raggiungere questo importante traguardo.