



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Laurea In Ingegneria Meccanica

**FORMABILITÀ A FREDDO DI ACCIAI
INOSSIDABILI
AUSTENITICI E FERRITICI**

Relatore: Marco Boniardi

Correlatore: Silvia Barella

Flavio Besana – 739909

Anno Accademico 2010/2011

Ad Angela...

INDICE

<i>Introduzione</i>	pag. 5
1 – ACCIAI INOSSIDABILI – GENERALITA’	
1.1 – Introduzione	pag. 7
1.2 – Inossidabili perché...	pag. 8
1.3 – Le famigli principali	pag. 9
1.3.1 – Acciai inossidabili martensitici	pag. 10
1.3.2 – Acciai inossidabili ferritici	pag. 11
1.3.3 – Acciai inossidabili austenitici	pag. 12
1.3.4 – Acciai inossidabili austeno-ferritici	pag. 14
1.3.5 – Acciai inossidabili indurenti per precipitazione	pag. 15
2 – ACCIAI INOSSIDABILI FERRITICI	
2.1 – Introduzione	pag. 16
2.2 – Inossidabili ferritici	pag. 17
3 – PROCESSO DI FORMATURA PLASTICA DI LAMIERE: IMBUTITURA	
3.1 – Introduzione	pag. 19
3.2 – Lo stato tensionale e le sue conseguenze	pag. 21
3.3 – Anisotropia del materiale	pag. 24
3.4 – Accorgimenti progettuali e macchinari	pag. 26
3.5 – Imbutitura di pezzi non assialsimmetrici	pag. 29
4 – INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA SPERIMENTALE	
4.1 – Obiettivo	pag. 30
4.2 – Analisi dei materiali a disposizione	pag. 33
4.3 – Organizzazione della campagna di prove	pag. 39

5 – PROVE SPERIMENTALI

5.1 – Prova 439 M vs 304	pag. 40
5.1.1 – Sul campo	pag. 40
5.1.2 – Struttura metallografica	pag. 44
5.2 – Prova 441 LI vs 304	pag. 51
5.2.1 – Sul campo	pag. 51
5.2.2 – Struttura metallografica	pag. 55
5.3 – Prova 444 vs 304	pag. 62
5.3.1 – Sul campo	pag. 62
5.3.2 – Struttura metallografica	pag. 66
5.4 – Prova 470 LI vs 304	pag. 72
5.4.1 – Sul campo	pag. 72
5.4.2 – Struttura metallografica	pag. 75

6 – PROVE DI DUREZZA

6.1 – Introduzione	pag. 80
6.2 – Prima prova – vasche in 439 M e 304	pag. 82
6.3 – Seconda prova – lavandino industriale in 441 LI M e 304	pag. 92
6.4 – Terza prova – Lavamani compatto in 444 e 304	pag. 99
6.5 – Quarta prova – Lavamani compatto in 470 LI e 304	pag.102

7 – PROVE FINALI

7.1 – Considerazioni preliminari	pag. 105
7.2 – Acciaio ferritico 439 M	pag. 106
7.3 – Acciaio ferritico 441 LI	pag. 107
7.4 – Acciaio ferritico 444	pag. 110
7.5 – Acciaio ferritico 470 LI	pag. 112

8 – CONCLUSIONI

pag. 115

9 – BIBLIOGRAFIA

pag. 118

Appendice 1

pag. 119

Appendice 2

pag. 121

Introduzione

La ricerca di materiali alternativi ai classici inossidabili austenitici al Cromo-Nichel continua ad essere tematica importante e attuale per il comparto dell'inossidabile.

I recenti episodi di forte fluttuazione del prezzo del Nichel hanno infatti indotto le acciaierie a non interrompere la ricerca di nuovi materiali.

Inox ferritici, austenitici al Cromo-Manganese, lean-duplex: queste le possibili alternative individuate.

Il problema che l'utilizzatore si trova ad affrontare, come diretta conseguenza di quanto appena detto, è che le conoscenze attuali riguardo al comportamento di questi acciai in determinate condizioni sono scarse o inesistenti e anche il materiale bibliografico, dato lo sviluppo relativamente recente di queste alternative, risulta limitato.

Questi materiali infatti offrono sicuramente un notevole risparmio in termini economici, ma per contro i punti interrogativi riguardo le loro caratteristiche tecnologiche rimangono ancora troppo elevati.

Per questi motivi quindi, in un precedente lavoro di ricerca, si è cercato di definire, tramite particolari prove di corrosione, quali e in che misura, questi acciai offrano una possibile alternativa ai tradizionali austenitici per gestire un più responsabile e consapevole processo di sostituzione.

Le conclusioni di questa ricerca avevano promosso la possibilità in ambito corrosivo, di utilizzare in taluni ambienti di lavoro e in determinate condizioni operative, le alternative studiate, in particolare la famiglia ferritica.

Gli studi presentati nel seguito della trattazione vogliono sviluppare un aspetto correlato e immediatamente successivo alle ricerche precedenti: valutare, in un'ottica di industrializzazione di prodotti reali, il comportamento di alcuni acciai inossidabili ferritici sotto l'aspetto della deformazione plastica a freddo, in particolare dell'imbutitura.

Nella prima parte del presente lavoro si introdurranno in termini generali gli acciai inossidabili e successivamente si presenterà il problema della deformazione plastica a freddo e dell'imbutitura, tutto questo in un'ottica teorica e prettamente bibliografica.

Nella seconda parte invece si esporrà in dettaglio la trattazione sperimentale condotta sul campo e si cercherà di trarre delle considerazioni che possano ampliare il bagaglio conoscitivo su queste

tipologie di metalli in modo da guidare i produttori, gli utilizzatori e gli utenti finali nella scelta degli acciai inossidabili più opportuni a seconda delle condizioni operative.

In ultimo si presenteranno sinteticamente le realtà che hanno promosso e permesso questa ricerca: il Centro Inox e la Davighi International srl.

Capitolo 1

ACCIAI INOSSIDABILI – GENERALITÀ

1.1 – INTRODUZIONE

Gli acciai inossidabili sono essenzialmente leghe Ferro-Cromo o Ferro-Cromo-Nichel. Prendono tale denominazione, quegli acciai che presentano una concentrazione di Cromo di almeno 10,5 %¹. La peculiarità di questi acciai è una notevole resistenza alla corrosione in svariati ambienti aggressivi, oltre naturalmente a possedere tutte le caratteristiche proprie della classe acciai. Essi presentano in lega percentuali variabili anche di altri elementi quali Molibdeno, Manganese, Silicio, Titanio, Niobio ecc... che conferiscono, a seconda delle concentrazioni, differenti caratteristiche metallurgiche intrinseche.

¹ Riferimento norma EN 10088

1.2 – INOSSIDABILI PERCHÈ ...

In effetti il termine non corrisponde alla vera natura di questi metalli, essi, infatti, sono "ossidabilissimi", vale a dire hanno la possibilità grazie al contenuto degli elementi di lega, essenzialmente alla percentuale di cromo, di "autopassivarsi", cioè di ricoprirsi di uno strato di ossidi invisibile, di dimensioni molecolari, che protegge il metallo sottostante dagli attacchi corrosivi.

Questo fenomeno si verifica ogni volta che l'ambiente è sufficientemente ossidante. La natura di questo strato è tale da garantire la copertura del metallo, anche se localmente si verificano abrasioni od asportazioni della pellicola, a patto di essere sempre in condizioni sufficientemente ossidanti.

Questo concetto è molto importante ai fini di una buona tenuta nel tempo e per contrastare in maniera adeguata i diversi casi di corrosione. E' necessario infatti consentire al materiale, sia in fase di lavorazione che di messa in opera, di poter scambiare con l'ambiente che lo circonda una sufficiente quantità di ossigeno in modo da poter essere considerato nelle ottimali condizioni di passivazione.

Naturalmente questo film passivo può essere più o meno resistente e più o meno ancorato al materiale a seconda della concentrazione di cromo presente nella lega ed a seconda dell'eventuale presenza di altri elementi quali il Nichel, il Molibdeno, il Titanio ecc.

E' chiaro quindi che esistono diversi gradi di inossidabilità e di resistenza alla corrosione, esiste pertanto nell'ambito degli acciai inossidabili una scala di nobiltà a seconda del contenuto in lega degli elementi sopra citati.

Il generico utilizzatore si trova di conseguenza di fronte una notevole gamma di acciai inossidabili ed il problema che spesso volte si pone è proprio quello di riuscire a scegliere il giusto materiale in funzione degli impieghi, in maniera tale da non "sottodimensionare" né "sovradimensionare" la scelta e riferirsi agli opportuni valori di nobiltà e di prestazioni meccaniche, adatti a un determinato servizio.

1.3 – LE FAMIGLIE PRINCIPALI

Come precedentemente detto, negli acciai inox entrano in gioco numerosi elementi in lega. Questi elementi, spostando il luogo dei punti critici all'interno del diagramma Ferro-Carbonio, modificano il campo di esistenza delle fasi durante la solidificazione rendendo stabili a temperatura ambiente fasi che in condizioni normali non sarebbero in equilibrio. Questo è il motivo per cui ritroviamo a fine solidificazione diverse caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dovute alla formazione di specifiche morfologie cristalline e diverse fasi: α , γ e la dannosissima σ (non ci si soffermerà nel trattato sulla sua formazione negli acciai inossidabili), oltre a possibili precipitazioni di innumerevoli carburi.

Ci sono due tipologie di elementi che influenzano tale comportamento in maniera diametralmente opposta; troviamo quindi:

- Elementi alfa-genitori o ferritizzanti sono quelli che restringono il campo di esistenza del ferro gamma per favorire il dilatarsi di quello del ferro alfa.
Tra questi elementi i più importanti sono il Cromo, il Silicio, il Molibdeno, il Niobio, il Titanio e il Tantalio.
- Elementi gamma-genitori o austenitizzanti sono quelli che allargano il campo di esistenza del ferro gamma riducendo quello del ferro alfa e del ferro delta.
- Tra questi elementi i più importanti sono il Carbonio, il Nichel, il Manganese, l'Azoto e il Rame.

In base alla presenza in lega di questi elementi abbiamo tre tipi di acciai inossidabili che presentano diverse strutture cristalline:

- gli acciai inossidabili MARTENSITICI
- gli acciai inossidabili FERRITICI
- gli acciai inossidabili AUSTENITICI

Oltre a queste tre famiglie ricordiamo anche altre due tipologie di acciai inossidabili meno diffuse:

- gli acciai inossidabili AUSTENO – FERRITICI
- gli acciai inossidabili INDURENTI PER PRECIPITAZIONE

1.3.1 – GLI ACCIAI INOSSIDABILI MARTENSITICI

Gli acciai inossidabili martensitici sono essenzialmente degli acciai al solo Cromo (indicativamente 11 – 19%) contenenti piccole quantità di altri elementi in lega quali, per esempio il Nichel, contenuto però in piccole quantità. Il tenore di Carbonio può invece arrivare ad un massimo di circa 1,20%.

Questi acciai sono gli unici inox che possono prendere tempra, infatti essi posseggono i punti critici A1 e A3 e quindi possono innalzare le loro caratteristiche meccaniche, resistenziali e di durezza mediante un trattamento termico di tempra. In seguito a questo trattamento termico si avranno strutture costituite da martensite, oppure martensite più carburi. Interessante è notare la morfologia dei grani costituenti tale struttura, da cui derivano molteplici caratteristiche fisiche e meccaniche di tale famiglia di acciai.

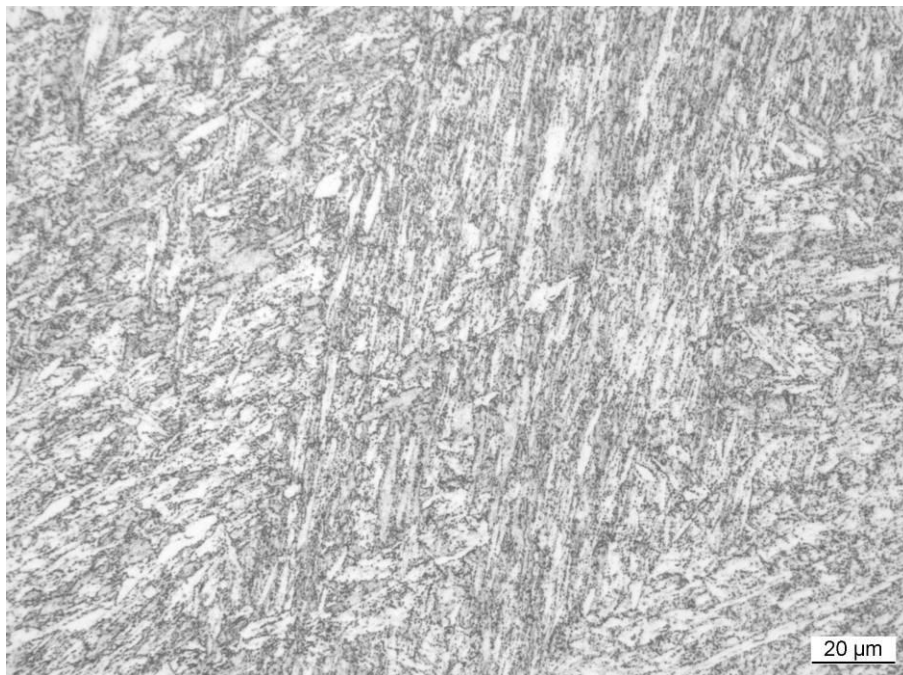


Figura 1.1 - Struttura metallografica di un campione di acciaio inossidabile martensitico.

La deformabilità a freddo è piuttosto limitata, mentre si riscontrano dei buoni risultati a caldo. La truciolabilità, ovvero la lavorabilità alle macchine utensili presenta difficoltà medie allo stato ricotto, ma discreti risultati si possono ottenere con acciai martensitici nelle versioni risolforate.

Gli impieghi tipici riguardano manufatti che necessitano, unitamente ad una certa resistenza alla corrosione, di un'elevata durezza, di resistenza meccanica all'abrasione e alla fatica, quali ad esempio: coltelleria, palette per turbine, utensili, ecc...

Gli acciai inossidabili martensitici non sono adatti ad essere impiegati a temperature al di sotto di quella ambiente, in quanto per la maggior parte di essi la temperatura di transizione è intorno a zero gradi centigradi, pertanto già a questa temperatura diventano fragili, perdendo gran parte della loro tenacità.

La permeabilità magnetica degli acciai inossidabili martensitici li classifica tra i materiali ferromagnetici.

1.3.2 – GLI ACCIAI INOSSIDABILI FERRITICI

Sono delle leghe Ferro-Cromo-Carbonio, eventualmente con lievi aggiunte di altri elementi come il molibdeno e che non posseggono i punti di trasformazione A1 e A3, la loro struttura è quindi ferritica anche se, in alcuni casi possiamo trovarvi dei carburi precipitati. La mancanza dei punti di trasformazione impedisce di ottenere degli aumenti di caratteristiche meccaniche mediante trattamenti termici.

Tali caratteristiche possono essere innalzata eseguendo delle lavorazioni per deformazione plastica a freddo (trafilatura, laminazione, ecc.) atte a generare un incrudimento.

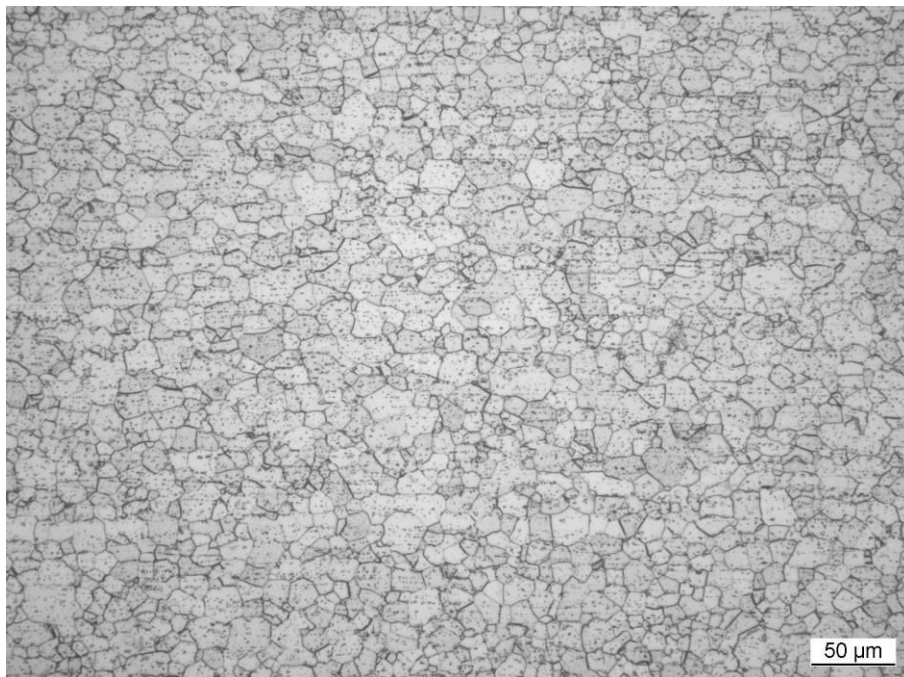


Figura 1.2 - Struttura metallografica di un acciaio inossidabile ferritico con precipitazione di carburi.

Si lavorano facilmente per deformazione plastica, sia a caldo che a freddo, possono essere lavorati alle macchine utensili (specie i tipi risolforati) e presentano inoltre una buona saldabilità.

E' possibile effettuare una ricottura di ricristallizzazione per conferire buone caratteristiche di duttilità. Anche per i ferritici come per i martensitici si sconsiglia l'impiego alle basse temperature. La deformabilità plastica sia a caldo che a freddo può considerarsi buona, la truciolabilità è comparabile a quella degli acciai martensitici, mentre migliora la saldabilità.

Apprezzabile è il loro aspetto lucente, che li rende piacevoli da un punto di vista estetico.

Infatti vengono utilizzati per quei manufatti in cui non solo è richiesta una più elevata resistenza alla corrosione, ma anche una buona finitura superficiale, quali: complementi di arredo, pannelli per l'architettura, lavastoviglie e per alcune rifiniture in campo automobilistico.

Anche questa tipologia di acciai inossidabili risulta essere ferromagnetica.

1.3.3 – GLI ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENITICI

Come i ferritici anche gli austenitici non posseggono i punti di trasformazione A1 e A3. La loro struttura austenitica è ottenuta in funzione degli opportuni bilanciamenti degli elementi ferritizzanti e austenitizzanti. Il grano cristallino è molto squadrato e si notano le caratteristiche germinazioni intragranulari.

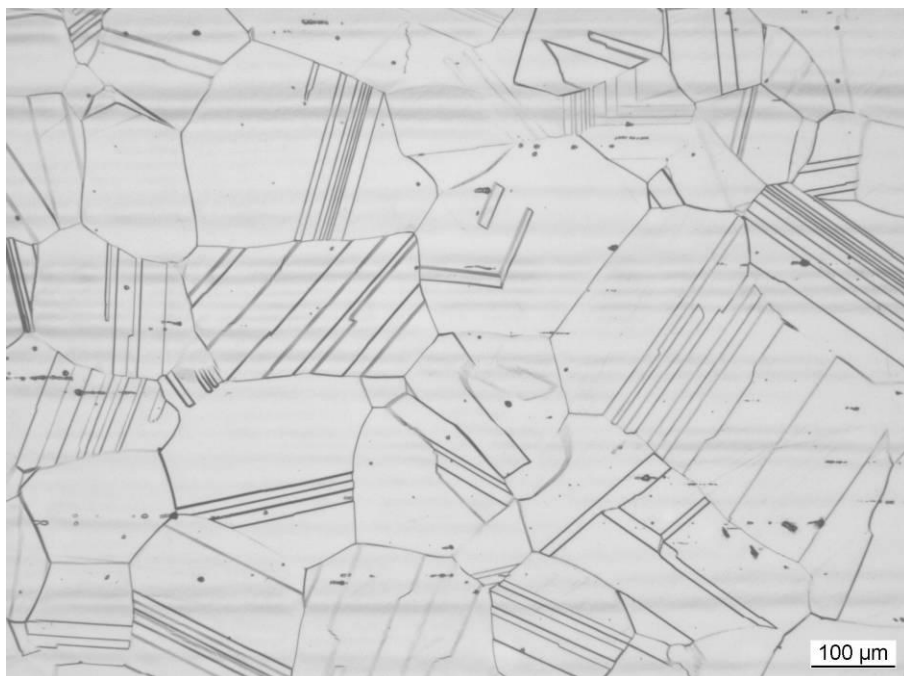


Figura 1.3 - Struttura cristallina di un campione di acciaio inossidabile austenitico.

Si distinguono due gruppi: quello al Cromo-Nichel e quello al Cromo-Manganese-Nichel.

Il primo gruppo è il più importante dato che ad esso appartengono la maggior parte degli acciai inossidabili impiegati ed è formato da leghe Ferro-Carbonio-Cromo-Nichel con l'aggiunta di eventuali elementi quali Molibdeno, Titanio, Niobio, ecc.

Il secondo gruppo è più modesto ed è formato da leghe Ferro-Carbonio-Cromo-Manganese-Nichel, negli ultimi anni però questa tipologia di austenitici sta acquistando sempre più importanza a causa del recente innalzamento del prezzo del nichel facendo diventare questa seconda tipologia di austenitici più concorrenziale in virtù del prezzo più economico dovuto ad una minor presenza in lega di nichel.

Gli acciai austenitici al Cromo-Nichel, contengono quantità di Carbonio comprese tra il 0,03% e lo 0,25%, Cromo in quantità comprese tra il 17% e il 26% e Nichel tra il 7% e il 22%; nella classificazione AISI sono indicati come "serie 300".

Gli acciai austenitici al Cromo-Manganese invece sostituiscono buona parte del nichel con Manganese presente in quantità comprese tra il 6% e il 10% e Azoto in quantità inferiore allo 0,25%, nella classificazione AISI sono indicati come "serie 200". Nel capitolo 3 si analizzerà più in dettaglio le caratteristiche di tale famiglia.

La struttura è sempre austenitica quindi non è possibile indurire il materiale con un trattamento termico di tempra. Questi acciai possono invece migliorare le caratteristiche meccaniche tramite incrudimento per deformazione plastica a freddo; in questo modo si aumenta il carico di rottura e il limite di snervamento con conseguenti diminuzioni degli allungamenti. L'unico trattamento termico possibile è la ricottura di solubilizzazione, che porta ad una omogeneizzazione del materiale e permette di ottenere una struttura composta da sola austenite senza la presenza di carburi, conferendo così al materiale tenacità e duttilità.

Il peso specifico di tali acciai è leggermente superiore a quello dei ferritici facendoli risultare un po' più pesanti a parità di dimensioni. Hanno un coefficiente di dilatazione termica superiore agli altri acciai, pertanto è necessario considerare i cambiamenti dimensionali sia in presenza delle alte che delle basse temperature. La conducibilità termica invece risulta inferiore di circa il 40% rendendo difficoltosa la diffusione del calore.

Ottima è la loro saldabilità e lavorabilità per deformazione plastica a freddo, specie per l'imbutitura, mentre buoni risultati si ottengono anche con lavorazioni alle macchine utensili per quegli acciai in versione risolforata.

Gli acciai inossidabili austenitici presentano una elevata resistenza alla corrosione sia in ambiente industriale che marino e in campo alimentare sono in grado di garantire un'igiene molto elevata.

A causa dell'alta percentuale di elementi leganti, gli acciai inossidabili austenitici risultano essere i più costosi, ma le loro prestazioni sono assai elevate e tali da far fronte ad un vastissimo campo di impiego.

In virtù della loro struttura austenitica questi acciai, a differenza dei precedenti, risultano essere non magnetici.

1.3.4 – GLI ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENO-FERRITICI

Gli acciai austeno – ferritici detti anche “duplex” o bifasici presentano una struttura mista di austenite e ferrite, essi sono caratterizzati da un contenuto di Cromo sempre maggiore del 16%, da valori di nichel compresi tra il 4% e 6% e valori del molibdeno dell'ordine dell'1,5 – 3%.

L'evoluzione nell'utilizzo di tali acciai è dovuta al fatto che presentano elevate caratteristiche meccaniche ed un miglior comportamento nei confronti della corrosione sotto tensione e per vaiolatura. Interessante è notare la struttura caratteristica di tali acciai.

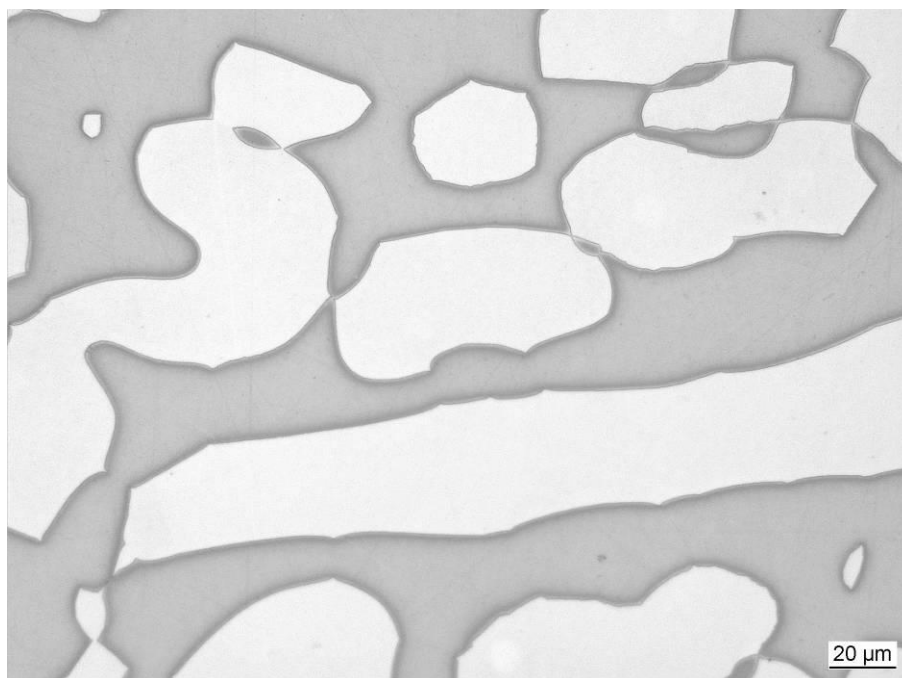


Figura 1.4 - Struttura cristallina di un campione di acciaio inossidabile duplex.

1.3.5 – GLI ACCIAI INOSSIDABILI INDURENTI PER PRECIPITAZIONE

Questo tipo di acciai inossidabili denominato anche PH (*precipitation hardening*) presenta la possibilità di innalzare notevolmente le caratteristiche meccaniche mediante trattamenti termici particolari di invecchiamento che consentono di far precipitare nella matrice del metallo degli elementi composti in grado di aumentare le proprietà meccaniche della lega. Anche la loro resistenza alla corrosione è ottima, paragonabile a quella degli acciai austenitici classici.

Capitolo 2

ACCIAI INOSSIDABILI FERRITICI

2.1 – INTRODUZIONE

Nell'80% circa delle applicazioni, in cui storicamente si è fatto uso di acciai inossidabili, la scelta finale del tipo di lega si era ristretta ai tipi austenitici al Cr – Ni o al Cr – Mn. In particolare i ben noti AISI 304 e AISI 316, con le relative varianti a basso carbonio o stabilizzate, sono quelli più impiegati per le caratteristiche di resistenza alla corrosione, resistenza meccanica, igienicità, saldabilità e lavorabilità.

Certamente è soprattutto a queste affermate tipologie che è dovuto il continuo sviluppo del mercato degli inox, le cui particolari condizioni attuali stanno però spingendo l'utilizzatore finale a ricercare, sempre nell'ambito della famiglia degli inossidabili, acciai con similari prestazioni ma che costituiscano una conveniente alternativa in termini economici. In particolare, data l'elevata incidenza del costo del Nichel e del Molibdeno sul prezzo finale degli inox, la ricerca di valide alternative si rivolge a materiali che ne contengano minori percentuali o non ne contengano affatto.

E' pure doveroso annotare che lo stato contingente del mercato ha spinto i tecnici del settore ad una più accurata critica valutazione delle caratteristiche di quelle leghe inossidabili che fino ad oggi venivano dedicate a specifici usi, ma che in taluni casi possono validamente sostituire i più noti "304" e "316" che, per retaggio storico – scientifico, in alcune applicazioni sono, per così dire, "sovradimensionati" rispetto alle reali necessità prestazionali, che l'uso finale effettivamente richiede.

In questo contesto è opportuno proporre una panoramica sugli acciai inossidabili ferritici per presentarne le diverse tipologie e proprietà, così da delineare le possibilità di utilizzo in taluni settori che, fino ad oggi, sono stati regno incontrastato dei tipi austenitici al Cr – Ni sopra menzionati.

2.2 – CARATTERISTICHE DEI FERRITICI

Da un punto di vista dell'analisi chimica, gli acciai inossidabili ferritici sono caratterizzati essenzialmente dal tenore di Cromo quale elemento fondamentale che ne garantisce la resistenza alla corrosione, mentre è assente il Nichel. In particolare, l'AISI 430 capostipite di questa famiglia di leghe, ne contiene circa il 17%.

Tenori più bassi, dell'ordine del 12% sono presenti in tipologie cosiddette "povere" le quali infatti, quando vengono utilizzate in applicazioni che devono soddisfare particolari garanzie, possono prevedere ulteriore verniciatura o altra protezione superficiale.

Così come nei tipi austenitici, sono state messe a punto tipologie contenenti elementi stabilizzanti quali Titanio e Niobio, al fine di prevenire fenomeni di corrosione intergranulare. In realtà la stabilizzazione dei ferritici conferisce anche una minore suscettibilità all'ingrossamento del grano durante la saldatura e contemporaneamente migliora la formabilità a freddo. Esempi comuni sono l'AISI 409, il 439 M e il 441 LI.

La presenza del Molibdeno incrementa invece la resistenza alla corrosione: l'AISI 434 e il 436, ne contengono circa l'1,5% mentre l'AISI 444 (o Type 444) con addirittura il 2% di media si pone su livelli di resistenza alla corrosione analoghi a quelli del 316.

Proprio la necessità di incrementare la resistenza alla corrosione ha condotto, negli anni, alla messa a punto dei cosiddetti "superferritici", caratterizzati da sempre più elevati tenori di Cromo e di Molibdeno mantenendo, al contempo, basso il valore di elementi interstiziali quali Carbonio e Azoto. Di qui i cosiddetti tipi ELI, *Extra Low Interstitials*. La riduzione degli interstiziali migliora sia la resistenza a corrosione, soprattutto intergranulare, sia la saldabilità e la lavorabilità in modo da ridurre il gap con i tradizionali austenitici. Il tenore di cromo è poi spinto a livelli dell'ordine del 26% per conferire la massima resistenza all'ossidazione a caldo, come nell'AISI 446, e per lo stesso motivo possono essere aggiunti silicio e alluminio. In tal modo si ottimizzano le caratteristiche di resistenza alla corrosione, di formabilità e di tenacità delle zone saldate.

Di seguito sono riportate le composizioni chimiche degli acciai inossidabili ferritici menzionati.

EN	AISI / Type ASTM	C max	Si max	Mn max	P max	S max	N max	Cr	Ni	Mo	Altri
1.4016	430	0,08	1,00	1,00	0,040	0,015	-	16,0 - 18,0	-	-	-
1.4512	409	0,030	1,00	1,00	0,040	0,015	-	10,5 - 12,5	-	-	Ti: da [6x(C+N)] a 0,65
1.4509	UNS S43932 (441)	0,030	1,00	1,00	0,040	0,015	-	17,5 - 18,5	-	-	Ti: 0,10 - 0,60; Nb: da [3xC+0,30] a 1,00
1.4513	Simile al 436	0,025	1,00	1,00	0,040	0,015	0,020	16,0 - 18,0	-	0,80 - 1,40	Ti: 0,30 - 0,60
1.4521	Type 444	0,025	1,00	1,00	0,040	0,015	0,030	17,0 - 20,0	-	1,80 - 2,50	Ti: da [4x(C+N)+0,15] a 0,80

Tabella 2.1 - Composizione chimica dei principali acciai inossidabili ferritici secondo EN 10088-1.

Capitolo 3

PROCESSO DI FORMATURA PLASTICA DI LAMIERE: IMBUTITURA

3.1 – INTRODUZIONE

Tutti i corpi continui, sollecitati da un sistema di forza esterno, producono una variazione della propria geometria (forme e dimensioni), tale da creare uno stato tensionale interno uguale e contrario alle forze esterne che lo hanno generato (principio di equilibrio dei corpi).

Facendo delle opportune prove, ma anche osservando moltissimi fenomeni della pratica quotidiana, si può rilevare che, finché la sollecitazione resta al di sotto di un determinato livello, la deformazione indotta nel corpo scompare completamente non appena il sistema di forze applicato cessa la propria azione. A tale comportamento si dà comunemente il nome di elasticità e il livello massimo di sollecitazione che consente il ritorno completo alla geometria iniziale è noto come limite elastico.

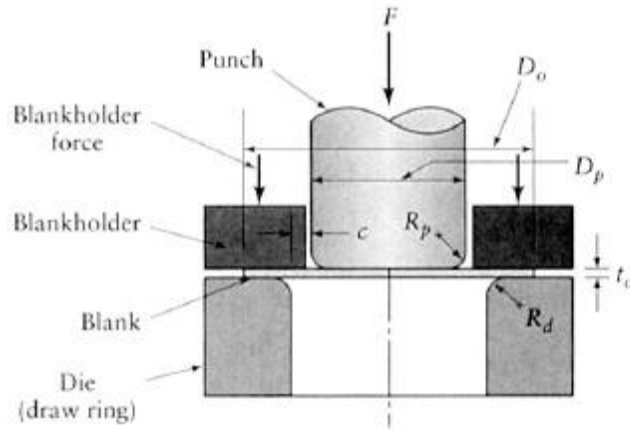
Se, al contrario, la sollecitazione supera tale limite elastico si possono verificare due diversi fenomeni: la rottura immediata oppure l'ulteriore deformazione del corpo che, in maniera più o meno parziale, resterà nel corpo stesso anche dopo la cessazione della sollecitazione. A tale secondo fenomeno si dà il nome di deformazione plastica e i materiali in grado di sopportarla vengono definiti materiali duttili.

Tutte le operazioni e i processi che impongono tale stato nel materiale e che si svolgono a temperatura ambiente prendono il nome di lavorazioni plastiche a freddo.

L'imbutitura si può classificare tra questi processi di deformazione (tra cui si possono annoverare lo stampaggio, la trafilatura...) e tra tutte quelle lavorazioni che coinvolgono l'utilizzo di lamiera (tranciatura, punzonatura, piegatura...).

Nata intorno al 1700, l'imbutitura prevede una trasformazione di forma di una lastra piana in un semifinito tridimensionale cavo. Nella sua accezione più semplice, questa lavorazione prevede che un punzone della forma desiderata sia premuto su una lamiera metallica che, vincolata a deformarsi in uno stampo, assuma la forma del suddetto in modo permanente. Tutto questo permesso da una pressa che garantisce la potenza necessaria a deformare permanentemente il laminato.

Per una schematizzazione iniziale si farà riferimento a sviluppi di semilavorati cilindrici che permetteranno uno studio più semplice delle caratteristiche del processo, una maggiore chiarezza delle problematiche relative e una più facile classificazione dei macchinari impiegati dai produttori.



3.1 - Schema dei componenti di un sistema per il processo di imbutitura.

Le parti fondamentali dell'attrezzatura necessaria per compiere la lavorazione sono:

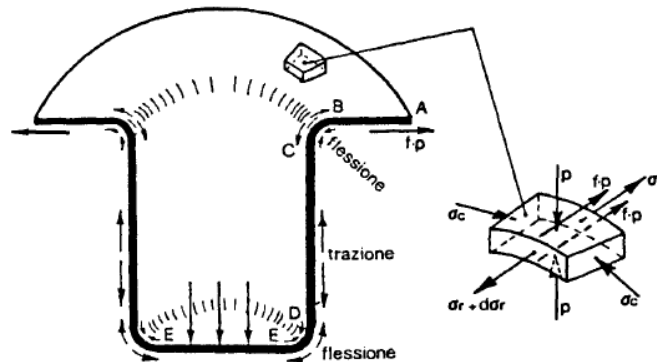
- un punzone o *punch*;
- una matrice o *die*;
- un premi lamiera o *blankholder*.

Questi componenti svolgono i compiti necessari per ottenere un pezzo finito. La prima fase è il posizionamento della lamiera (attentamente dimensionata per garantire il raggiungimento dello sviluppo iniziale) sulla matrice, sagomata opportunamente per permettere un flusso ragionevole. Si procede quindi con l'abbassamento del premi-lamiera che blocca il laminato al bordo. Quindi il punzone (opportunamente raccordato) viene azionato e la pressione generata costringe il materiale a scorrere entro la matrice. A questo punto, raggiunto il livello di deformazione desiderato, si procede con la risalita dei componenti e all'estrazione del finito.

I pezzi imbutiti assialsimmetrici sono quindi definiti da tre parti fondamentali: un fondello, una parte cilindrica e una flangia superiore (generalmente questa verrà asportata prima delle operazioni finali). Lo spessore del laminato, dopo la lavorazione non potrà risultare invariato in tutte le parti sopracitate. Nel fondello e agli estremi della flangia le dimensioni risulteranno analoghe a quelle del grezzo di partenza, mentre nella parte cilindrica e soprattutto sui raggi di raccordo inferiori e superiori si otterrà il maggiore assottigliamento.

3.2 – LO STATO TENSIONALE E LE SUE CONSEGUENZE

Interessante è valutare lo stato tensionale che si genera nel pezzo durante e al termine della lavorazione. Come si è commentato l'assottigliamento della lamiera a fine processo, così è opportuno valutare gli stati di sforzo nelle diverse parti dell'imbutito con l'aiuto della figura sottostante.



3.2 - Sezione di un ipotetico prodotto imbutito.

Flangia

Nella flangia superiore, con riferimento all'elemento infinitesimo rappresentato, si genera uno stato triassiale combinato. In questa zona chiamata A-B il materiale è costretto a muoversi centripetamente.

In direzione radiale si esercitano degli sforzi di trazione σ_r il cui valore si attenua allontanandosi dal centro, fino ad arrivare sul bordo esterno in cui il valore è uguale a zero. Il premi-lamiera impedisce lo scorrimento del materiale il quale è tirato nella direzione opposta dalla discesa del punzone dando luogo al gradiente sopra descritto.

In direzione circonferenziale invece lo sforzo indotto è di compressione: questo stato è causato dalla progressiva riduzione del diametro.

Infine si generano nella flangia degli sforzi assiali di compressione 'p' dovuti all'azione del premi-lamiera e una sollecitazione di attrito f-p (dove f indica il coefficiente di attrito) dovuta al movimento della lamiera rispetto alla matrice e al premi-lamiera. Questa azione è presente solo nelle superfici di contatto ed è molto limitata.

Raccordo superiore

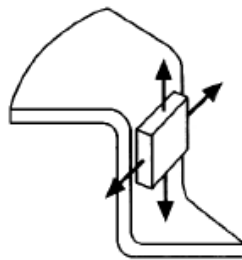
Questa zona denominata B-C subisce una flessione plastica piana (piegatura) e scorre sul bordo raccordato della matrice che reagisce con una pressione e una conseguente forza di attrito.

Parte cilindrica

Lo stato di sforzo che nasce in questa zona è di tipo biassiale ed è indicato come zona C-D.

Tensioni assiali di trazione sono dovute alla progressiva discesa del punzone che causa un allungamento del materiale.

In direzione radiale si sviluppano sforzi di trazione dovuti, anche in questo caso, al punzone rigido che impedisce contrazioni di diametro e vincola il materiale ad assumere la sua stessa forma.



3.3 - Elemento infinitesimo sul corpo del prodotto.

Raccordo inferiore

Denominata D-E, questa zona è soggetta ad uno stato di sollecitazione analogo a quello esistente nella zona B-C. In corrispondenza del raggio di raccordo del punzone si concentrano gli assottigliamenti ed è massima la probabilità di rottura per superamento dei limiti di formabilità del materiale.

Fondello

In questa zona chiamata E-E lo stato di sollecitazione è biassiale bilanciato al centro del manufatto. Il materiale risulta sostanzialmente rigido o al più subisce deformazioni assai limitate e per questo trascurabili.

Da questo complesso stato tensionale scaturiscono una serie di conseguenze che si ripercuotono sul pezzo finale. In primo luogo, come già osservato, gli spessori del semilavorato ottenuto risultano non uniformi su tutta la superficie. In secondo luogo queste sollecitazioni sono responsabili di tutti i difetti che si possono generare.

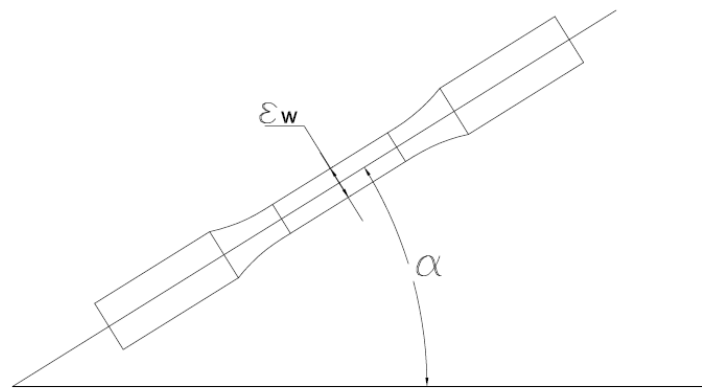
Se le sollecitazioni imposte risultano superiori alla resistenza offerta dal materiale nei punti di maggiore assottigliamento, si possono generare delle fratture. Come detto, le zone più pericolose risultano: l'interfaccia fondello-parete cilindrica e la zona di raccordo staffa-parete cilindrica.

Se la forza esercitata dai premi lamiera non fosse sufficiente, sulla flangia superiore si potrebbero formare le caratteristiche grinze che sono diretta conseguenza delle σ_c che si generano in maniera naturale (non è possibile, infatti, compenetrazione di materiale).

3.3 – ANISOTROPIA DEL MATERIALE

Nel processo di imbutitura vengono utilizzate normalmente lamiere prodotte mediante laminazione. Questa lavorazione lascia nella matrice metallica una testimonianza indelebile: esiste infatti una direzione preferenziale dei grani che vengono deformati secondo uno schema comune (tessitura). La conseguenza naturale di questa condizione è un comportamento anisotropo del materiale nelle differenti direzioni che si prendono in esame.

Prendiamo in esame un generico provino di trazione estratto da una lamiera laminata.



3.4 Schematizzazione di un provino di trazione

Si definisce anisotropia normale la quantità: $r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$

Dove ε_w rappresenta la deformazione lungo la larghezza del provino, mentre ε_t rappresenta la deformazione lungo lo spessore (figura).

Se il materiale è isotropo nella sezione normale a quella di trazione si ottiene $r = 1$, di conseguenza se nelle lamiere r è maggiore o minore di uno il materiale è anisotropo.

Il valore di r però dipende anche dall'angolo tra l'asse della provetta e la direzione di laminazione (angolo α in figura). Convenzionalmente quindi si determina la suddetta anisotropia normale nelle tre direzioni $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$.

Sono quindi tre le situazioni che si possono riscontrare:

- Il materiale risulta perfettamente isotropo quando $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$
- Il materiale è anisotropo nello spessore quando $r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1$
- Il materiale è anisotropo nel piano quando $r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$

Quindi in letteratura si trova una misura sintetica di questa anisotropia planare, definita con i due valori seguenti:

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad \text{e} \quad \Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

Il primo è una misura di anisotropia normale mentre il secondo definisce l'anisotropia planare; entrambi sono assunti come caratteristiche intrinseche del materiale.

L'anisotropia del materiale nell'imbutitura è molto importante, in quanto può essere la prima causa della formazione delle caratteristiche "orecchie" della staffa superiore di pezzi assial-simmetrici. Nella realizzazione di pezzi non assial-simmetrici il problema dell'anisotropia è relativamente trascurabile in quanto si cerca di imbutire nella stessa direzione della laminazione, mantenendo una certa simmetria nel comportamento del materiale.

3.4 – ACCORGIMENTI PROGETTUALI E MACCHINARI

Quando si parla di imbutitura sono tre gli accorgimenti che unitamente ai parametri controllabili (forza del punzone, forza del premi-lamiera e velocità di lavoro), determinano la buona riuscita della lavorazione o l'incremento degli scarti: la lubrificazione, i raccordi delle parti di lavoro e il gioco tra punzone e matrice.

Durante la lavorazione si è visto come si generino all'interfaccia materiale-punzone delle tensioni tangenziali di attrito. A volte queste forze diventano molto elevate e quindi critiche per la buona riuscita del processo. Si interpone quindi, tra tutte le parti in relativo movimento, un lubrificante a scelta (specifico per ogni situazione) tra oli, saponi o emulsioni. Per casi difficili si utilizzano cere o rivestimenti solidi mentre dove la precisione è importante, si utilizzano dei punzoni non più in ghisa ma in particolari materiali compositi che hanno la caratteristica di auto-lubrificarsi; in questi casi si interpone solamente acqua.

Si valutino ora i raggi di raccordo che devono esistere sul punzone, sulla matrice e a volte sul premi-lamiera. Non si può prescindere da questi raccordi in quanto, durante la lavorazione, distribuiscono in maniera uniforme gli sforzi e evitano deformazioni localizzate troppo elevate. D'altro canto non si deve esagerare. Raggi troppo elevati lasciano molta lamiera non guidata, dando la possibilità di formazione di grinze e strappi tra punzone e matrice.

Infine il gioco tra punzone e matrice è l'ultimo accorgimento che un progettista deve valutare. Anche in questo caso esiste un compromesso. Giochi troppo elevati potrebbero portare alla formazione di ondulazioni sulla parete laterale, proprio per la mancanza di superfici guida. Se invece il gioco risulta essere troppo limitato si può andare incontro a problemi di eccessivo assottigliamento o al limite a strappi della lamiera.

Esiste una formula empirica che i progettisti utilizzano e che è frutto di sperimentazioni:

$$\text{gioco} = \text{spessore lamiera} + C \cdot \sqrt{\text{spessore lamiera}}$$

La costante C dipende del tipo di materiale lavorato (es: 0,22 per acciaio).

I componenti finora trattati sono guidati e movimentati da presse. Di seguito si introduce una classificazione sommaria dei macchinari più utilizzati nell'industria dell'imbutitura.

Si può distinguere ed etichettare una pressa secondo la disposizione degli effetti o in base al tipo di azionamento che garantisce la forza necessaria alla lavorazione.

Distinguiamo nel primo tipo:

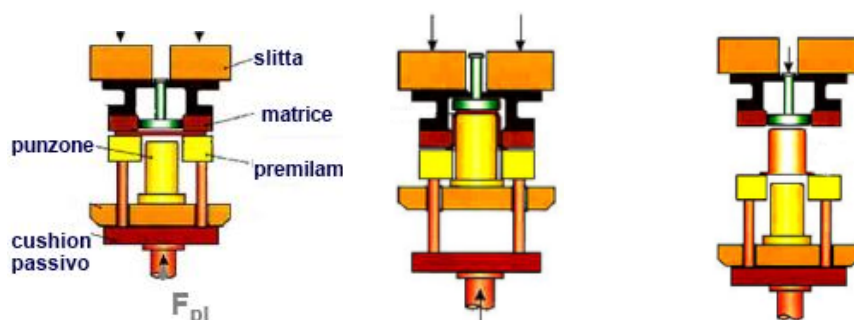
- a singolo effetto semplice;
- a singolo effetto con smorzamento passivo;
- a singolo effetto con smorzamento attivo;
- a doppio effetto.

La classificazione secondo l'azionamento prevede presse:

- meccaniche (a limitazione di corsa);
- idrauliche (a limitazione di forza).

Le presse a singolo effetto semplice presentano una struttura minimale, generalmente con punzone in discesa dall'alto; la peculiarità consiste nel fatto che la forza del punzone è la stessa di quella del premi-lamiera.

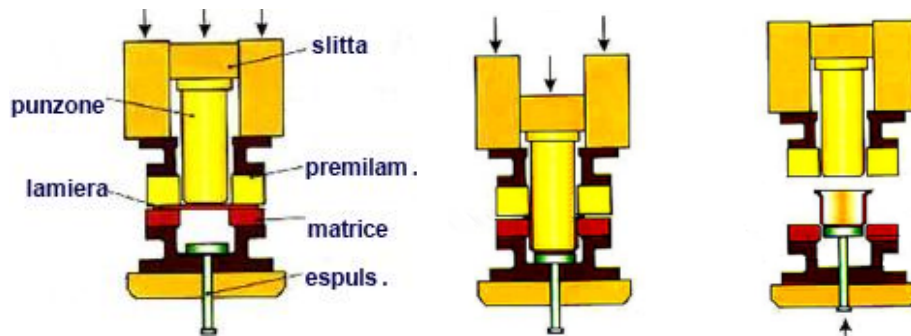
Le presse a singolo effetto con smorzamento passivo sono le più diffuse. In queste macchine il premi-lamiera, la cui forza è ancora dipendente da quella dell'imbutitura, scende dall'alto mentre il punzone è stazionario sul fondo della pressa. Un componente di materiale composito assicura sul fondo uno smorzamento passivo.



3.5 - Schematizzazione di una pressa meccanica a semplice effetto con smorzamento passivo.

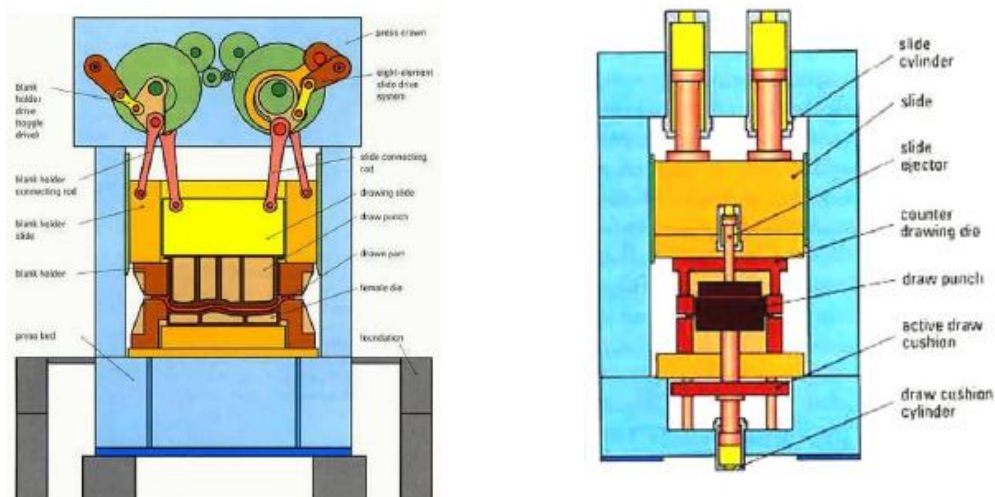
Una variante del macchinario sopra presentato consiste nell'inserimento tra punzone e struttura di uno smorzatore attivo. In queste presse la forza del premi-lamiera è svincolata dalla forza prevista per l'imbutitura.

In ultimo si vuole presentare il sistema a doppio effetto. In questo caso il premi-lamiera risulta stazionario rispetto alle staffe ma in movimento con la struttura verso il basso. Il punzone, in movimento anch'esso dall'alto, garantisce la forza per la lavorazione. A fine lavorazione un estrattore si occupa dell'espulsione del finito.



3.6 - Schematizzazione di una pressa meccanica a doppio effetto.

Per quanto riguarda invece il tipo di azionamento che garantisce la forza al processo, si inseriscono di seguito due immagini puramente illustrative sull'architettura di una macchina che sfrutta un azionamento meccanico e di una che invece si avvale di un azionamento idraulico.

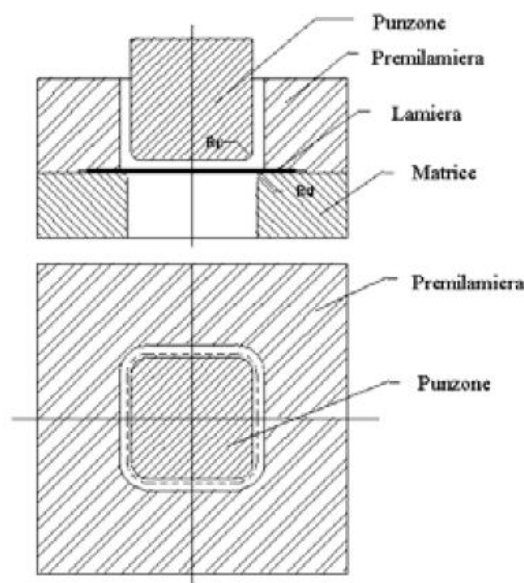


3.7 - Schematizzazione di un impianto pressa meccanico (sinistra) e di uno idraulico (destra).

3.5 – IMBUTITURA DI PEZZI NON ASSIALSIMMETRICI

Molte delle informazioni esposte nei paragrafi precedenti valgono per pezzi di forma assial-simmetrica; per forme semplici infatti lo studio bibliografico e teorico è efficiente e molto vicino alla realtà della lavorazione.

Al contrario, per forme tridimensionali (vaschette, lavandini, carcasse di lavatrici...) che si discostano dall'assial-simmetria, si vede necessario abbandonare molte delle conoscenze teoriche per affidarsi invece a molte regole empiriche e all'esperienza di chi lavora nel campo.



3.8 - Schematizzazione di uno stampo per l'imbutitura di pezzi non assial simmetrici.

I metodi utilizzati per la definizione della geometria degli stampi sono generalmente basati:

- sulla misura sperimentale delle deformazioni mediante la tecnica della griglia di cerchi.
(si tracciano sulla lamiera dei cerchi regolari e disposti secondo una griglia; in base alla deformazione di questi, a fine lavorazione, si possono tracciare delle curve relative al materiale in un sistema cartesiano di deformazioni per confrontarle con delle curve limite)
- sulla simulazione numerica.
(tramite programmi FEM si modella la realtà della lavorazione; rimangono molti limiti legati a questo approccio per la difficoltà di modellare le caratteristiche peculiari e puntuali del materiale)
- su un approccio combinato dei precedenti.

Capitolo 4

INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

4.1 – OBIETTIVO

Dopo aver introdotto l'argomento dell'imbutitura sotto i principali aspetti teorici, si vuole ora esporre la parte sperimentale svolta. Si parlerà quindi di acciai inossidabili, impiegati nella realizzazione di prodotti imbutiti.

La famiglia di acciai inossidabili più utilizzata nel campo dello stampaggio, è quella austenitica; grazie alle riconosciute proprietà intrinseche, si presta ottimamente a lasciarsi deformare e a seguire profili anche complessi.

Come già anticipato, si è voluta testare la tipologia ferritica nella realizzazione di prodotti usualmente imbutiti in inox austenitico. La fattibilità del progetto si basa su una premessa importante: la famiglia austenitica si presta a lasciarsi deformare in maniera localizzata, permettendo un marcato stiramento della sua struttura; gli acciai inox ferritici invece, non possedendo le stesse caratteristiche meccaniche (ad esempio l'allungamento a rottura), meglio si prestano a scorrere all'interno dello stampo, "alimentando" in tal modo la geometria voluta.

Un ricercatore giapponese, Eiichiro Ishimaru dell'università di Kyushu, ha condotto recentemente degli studi per cercare di confermare la tesi sopra esposta. L'analisi comparata tra austenitici e ferritici sulla base di alcuni valori indicativi, risultati di test di deformazione o proprietà del materiale, hanno permesso di ritenere fattibile, sempre secondo Ishimura, un passaggio di testimone tra le due famiglie di inox. Tali valori sono:

- LDR – Limiting drawing ratio.

Definito come il massimo rapporto tra il diametro del materiale di partenza e il diametro del punzone che possa essere formato senza rotture.

Questo valore per gli acciai inossidabili ferritici è del tutto comparabile con quello degli austenitici, a volte anche superiore.

- r-value – Lankford value.

Già introdotto nella parte sperimentale, tale valore rappresenta il rapporto tra due deformazioni dello stesso provino (in due differenti direzioni) ed è un indice di anisotropia.

I ferritici mostrano, in generale, valori di tale indice più elevati o al limite simili a quelli dagli austenitici.

- Er value – Ericksen value test.

La prova Ericksen fornisce un dato numerico, che rappresenta l'elongazione puntuale propria del materiale.

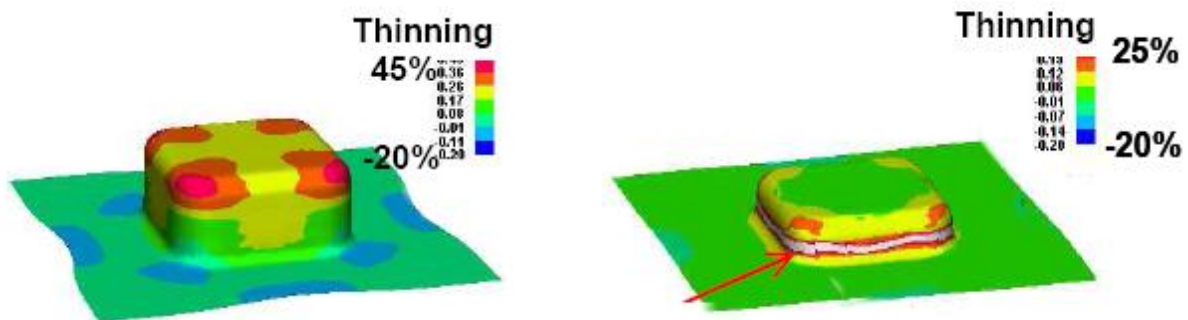
Questo valore è fortemente più alto per gli austenitici, prova del fatto che proprio questa famiglia è più propensa a stirarsi localmente.

- A % - Allungamento percentuale.

Caratteristica propria del materiale, ricavabile con prove di trazione. Gli acciai inox austenitici presentano valori notevolmente più alti rispetto ai ferritici.

Questi indici, secondo il ricercatore giapponese, sono lo specchio del modo di deformarsi delle due famiglie di inossidabili e per questo sono state intraprese alcune comparazioni.

Attraverso l'utilizzo di analisi FEM, Ishimaru si è immaginato di imbutire una lamiera ferritica e una lamiera austenitica con gli stessi parametri macchina e condizioni. Il risultato dell'analisi numerica è stato che il componente austenitico non ha presentato problematiche evidenti per tutta la corsa del punzone, mentre il componente ferritico ha mostrato una rottura già al 50 % della corsa prevista.



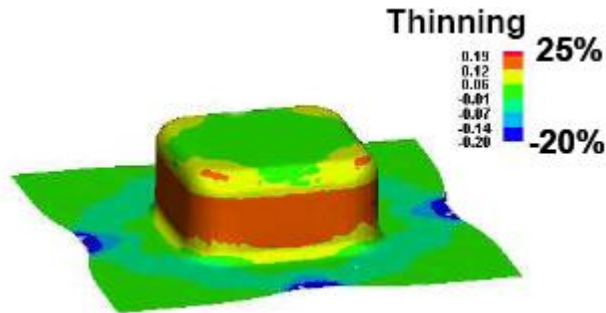
**4.1 - Risultato analisi FEM con le medesime condizioni al contorno.
Acciaio austenitico (sinistra) e acciaio ferritico (destra).**

Tenendo in considerazione questo tipo di risultato e gli indici sopra citati, la ricerca è proseguita modificando per la lavorazione ferritica i parametri macchina. Si è scelto di:

- diminuire la forza sul premi-lamiera per permettere un maggiore scorrimento del materiale;
- aumentare i raggi di raccordo nella matrice e del punzone, sempre al fine di favorire lo scivolamento della lamiera;
- aumentare le condizioni di lubrificazione;

- diminuire la velocità di imbutitura.

Con questi accorgimenti il ricercatore ha eseguito una nuova analisi e il risultato è stato il raggiungimento, da parte del ferritico, degli standard dell'austenitico. Di seguito l'immagine FEM:



4.2 - Risultato FEM su ferritico con parametri macchina modificati.

Lo studio del ricercatore è poi proseguita sulla strada dei test pratici.

Forti di questi risultati, seppur di carattere piuttosto teorici, si è voluto proseguire sulla strada indicata dagli studi citati.

L'impronta però che si è voluta dare al lavoro è quella della pura sperimentazione sul campo. Diversi tipi di acciai ferritici sono stati quindi testati nelle stesse condizioni di lavoro di acciai austenitici, in un reale ambito produttivo. I pezzi ottenuti sono stati confrontati con tecniche sperimentali per decifrarne le caratteristiche intrinseche di deformazione.

A questo punto si è tornati sul campo per l'obiettivo primario: regolare i parametri operativi per ottenere lo stesso finito con entrambe le famiglie inossidabili.

4.2 – ANALISI DEI MATERIALI A DISPOSIZIONE

I materiali a disposizione sono i seguenti:

- ferritico denominato commercialmente 439 M;
- ferritico 1.4509 denominato commercialmente 441 LI;
- ferritico 1.4521 denominato Type 444;
- ferritico di nuova generazione denominato commercialmente 470 LI;

- austenitico 1.4301 AISI 304.

Nel corso della trattazione, per indicare i suddetti materiali, si utilizzeranno solo le rispettive sigle seguenti: 439 M – 441 LI – 444 – 430 LI – 304.

Dei cinque materiali (quattro ferritici e un austenitico) si riportano di seguito tutte le caratteristiche chimiche, nonché le principali proprietà meccaniche.

439 M

Laminato fornito: 1270 x 3000 mm – spessore 2 mm.

% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% N	% P	% S	% Ti	% Nb
,018	17,65	,190	,030	,360	,210	,018	,023	,001	,160	,180

I dati più significativi, che è bene osservare sono: la bassa percentuale di Carbonio in lega che assicura una limitata formazione di carburi principale causa di corrosione intergranulare, una significativa percentuale di Cromo che caratterizza il materiale sotto l'aspetto meccanico e di resistenza alla corrosione. Inoltre, in tutte le tipologie ferritiche, il basso tenore di Carbonio e Azoto migliora la formabilità a freddo e la resistenza alla corrosione. Si osserva inoltre una bassa presenza di elementi austenitizzanti (Nichel, Manganese e Azoto). Per finire, si osserva la presenza di Titanio e Niobio (anche se in percentuale limitata) che incrementano, nel materiale, la resistenza alla corrosione intergranulare, la saldabilità e la formabilità a freddo.

Il certificato di questo materiale, fornito dall'azienda produttrice, indica come caratteristiche meccaniche minime, che la lega deve assumere, i seguenti parametri:

R_m	$R_p 0,2\%$	$A\%$ (Lo=80 mm)
420 – 600 N/mm^2	$\geq 240 N/mm^2$	≥ 23

Sono state quindi eseguite tre prove di trazione secondo la norma ASTM E 8/E 8M – 08, sezione relativa ai provini sottili, sia in testa che in coda al materiale laminato; i risultati sono stati mediati in due valori rappresentativi delle caratteristiche del materiale. Nella tabella seguente si sono riportati i risultati ottenuti e nell'ultima riga (in grassetto) si è inserita una media finale a cui si farà riferimento nella trattazione.

R_m	$R_p 0,2\%$	$A\%$ (Lo=80 mm)
478 N/mm^2	288 N/mm^2	31,2
457 N/mm^2	278 N/mm^2	33,7
467 N/mm^2	283 N/mm^2	32,4

441 LI

Laminato fornito: 1070 x 2000 mm – spessore 0,8 mm.

% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% N	% P	% S	% Ti	% Nb
,015	18,17	,160	,020	,370	,200	,015	,024	,001	,200	,400

Dalla tabella si osservano alcune caratteristiche peculiari: la bassa percentuale di Carbonio in lega (percentuale confrontabile con il 439 M e con gli altri materiali testati); il Cromo, che caratterizza il materiale sotto l'aspetto della resistenza alla corrosione, si aggira intorno al 18 %, in media con gli altri acciai. La presenza di Nichel, Manganese e Azoto è assai limitata. Per finire si osserva la presenza di Titanio in quantità confrontabile con il 439 M mentre il Niobio si presenta allo 0,4 % (superiore a tutti gli altri acciai valutati).

Il certificato di questo materiale indica come caratteristiche meccaniche minime, che la lega deve assumere, i seguenti parametri:

R_m	$R_p 0,2\%$	$A\%$ (Lo=80 mm)
430 – 630 N/mm^2	$\geq 250 N/mm^2$	≥ 18

Sono state quindi eseguite tre prove di trazione secondo la norma ASTM E 8/E 8M – 08, sezione relativa ai provini sottili, sia in testa che in coda al materiale laminato; i risultati sono stati mediati in due valori rappresentativi delle caratteristiche del materiale. Nella tabella seguente si sono riportati i risultati ottenuti e nell'ultima riga (in grassetto) si è inserita una media finale a cui si farà riferimento nella trattazione.

R_m	$R_p 0,2\%$	$A\%$ (Lo=80 mm)
470 N/mm^2	310 N/mm^2	29,0
485 N/mm^2	315 N/mm^2	29,0
477 N/mm^2	312 N/mm^2	29

444

Laminato fornito: 1520 x 3000 mm – spessore 1,5 mm.

% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% N	% P	% S	% Ti	% Nb
,015	18,17	,160	,020	,370	,200	,015	,024	,001	,200	,400

La più grande differenza che si apprezza confrontando la tabella relativa al 444 con quella degli altri materiali, è la presenza di Molibdeno: nel materiale in esame invece la percentuale è del 2,03 %. Il Molibdeno è un elemento ferritizzante che viene aggiunto in lega per aumentare la resistenza alla corrosione localizzata. Si osservano inoltre basse percentuali di Carbonio, Azoto e Manganese (valori confrontabili con quelli degli altri inox presi in esame). Il Cromo si attesta intorno al 18 %, in media con gli altri acciai. La presenza di Nichel rimane assai limitata. Titanio e Niobio sono presenti in concentrazioni simili al 439 M.

Di seguito si riportano i valori delle proprietà meccaniche indicate come requisiti minimi che questo materiale deve possedere.

R_m	$R_p 0,2\%$	A% (Lo=80 mm)
420 – 640 N/mm^2	$\geq 320 N/mm^2$	≥ 20

Sempre secondo la norma ASTM E 8/E 8M – 08 sono state condotte le prove di trazione in testa e in coda al laminato e i risultati sono stati mediati con le stesse modalità degli acciai testati.

R_m	$R_p 0,2\%$	A% (Lo=80 mm)
511 N/mm^2	346 N/mm^2	31,0
510 N/mm^2	346 N/mm^2	31,7
510 N/mm^2	346 N/mm^2	31,3

470 LI

Laminato fornito: 1250 x 3000 mm – spessore 1,2 mm.

Questo inossidabile ferritico è di nuovissima generazione e per questo scarsamente indagato in opere bibliografiche precedenti. Di seguito si riporta la composizione chimica rilevata.

% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% N	% P	% S	% Ti	% Nb
,010	24,20	,220	,052	,400	,200	,015	,025	,001	,130	,190

Tra tutti gli acciai ferritici indagati, questo presenta la percentuale di Cromo più elevata. Se la media relativa al 439 M, 441 LI e 444 è di circa il 18 %, nel 470 LI il valore è molto superiore: circa il 24 %. Anche in questo caso la somma di concentrazione degli elementi interstiziali (Carbonio e Azoto) non supera lo 0,04 %, limite superiore per considerare un acciaio inossidabile *low interstitials*. Nichel, Manganese, Fosforo e Zolfo si aggirano su valori del tutto confrontabili con gli altri materiali.

Sul certificato del materiale non si trovano i requisiti minimi delle proprietà meccaniche; a differenza degli altri acciai testati, il 470 LI non possiede un background storico di dati utilizzabili come limiti. Per questo si riportano solo le prove di trazione eseguite nelle modalità sopra citate.

R_m	$R_p 0,2\%$	A% (Lo=80 mm)
507 N/mm^2	343 N/mm^2	29,9
496 N/mm^2	338 N/mm^2	28,0
501 N/mm^2	340 N/mm^2	28,9

AISI 304

Per confrontare gli acciai ferritici sopra indicati si è scelto il ben noto AISI 304. Di seguito si riportano i dati chimici del materiale campione.

% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% N	% P	% S	% Ti	% Nb
,040	18,00	7,98	-	,300	1,24	,061	,027	,001	-	-

Per assicurare la peculiare struttura austenitica vi è la presenza di Nichel (quasi l'8 %) in notevoli quantità. Il Cromo è perfettamente in media con gli acciai ferritici analizzati mentre gli interstiziali Carbonio e Azoto si presentano in quantità più elevate (la loro somma si aggira intorno allo 0,1 %). Infine osserva l'assenza in lega di elementi come Molibdeno, Titanio e Niobio.

Di seguito si riportano i valori delle proprietà meccaniche indicate come requisiti minimi che questo materiale deve possedere.

<i>R_m</i>	<i>R_p 0,2%</i>	<i>A%</i> (Lo=80 mm)
450 – 670 <i>N/mm²</i>	≥ 190 <i>N/mm²</i>	≥ 40

In seguito alle prove di trazione condotte sul materiale laminato, si riporta la tabella delle caratteristiche, interpretabile come nel caso dei precedenti acciai:

<i>R_m</i>	<i>R_p 0,2%</i>	<i>A%</i> (Lo=80 mm)
591 <i>N/mm²</i>	247 <i>N/mm²</i>	55,6
582 <i>N/mm²</i>	235 <i>N/mm²</i>	54,4
586 <i>N/mm²</i>	241 <i>N/mm²</i>	55,0

Per concludere l'analisi si riporta lo stato in cui i materiali sono stati utilizzati.

Da certificato si evidenzia che i campioni di tutti gli inossidabili sopracitati si presentano con finitura 2B. Si ricorda che questa sigla fornisce indicazioni sulla lavorazione subita e sul trattamento a cui il materiale è stato sottoposto:

- 2 – laminazione a freddo;
- B – ricottura, decapaggio o skinpassatura.

4.3 – ORGANIZZAZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE

I materiali descritti nel paragrafo precedente presentano, come si può notare, spessori differenti. Per questo motivo si è deciso di procedere per le prove sperimentali, con dei “confronti a coppie”: ogni tipo di acciaio inossidabile ferritico è stato confrontato con l’AISI 304 austenitico in differenti prove di imbutitura. La sperimentazione con i ferritici è stata inserita nella programmazione di commesse standard della Davighi International: quando il direttore di produzione si è trovato ad operare con un prodotto austenitico di uno spessore compatibile ad un ferritico a disposizione, quest’ultimo è stato testato nelle medesime condizioni.

I manufatti ottenuti sono stati fotografati e documentati in ogni particolare sia nel caso di raggiungimento degli standard qualitativi, sia nel caso opposto. Quindi si sono individuate le sezioni più critiche, peculiari di ogni prodotto, tramite l’applicazione sul componente di una griglia, che ha permesso di valutare dove la deformazione del materiale era più spinta.

Dalle sezioni critiche sono stati quindi ricavati dei provini metallografici, su cui sono state eseguite le analisi per valutare la deformazione del grano oltre che delle prove di durezza che hanno permesso di valutare l’incrudimento sulla base di un profilo di incrudimento “base” individuato in precedenza.

Per una valutazione meno soggettiva e più quantitativa dei profili di incrudimento si è voluto procedere ad un’analisi statistica dei dati ottenuti.

In sintesi questi sono i passaggi che si sono seguiti:

- individuazione di un prodotto in austenitico comparabile per spessore ad uno ferritico;
- test sui materiali nelle medesime condizioni operative;
- documentazione fotografica dei prodotti;
- caratterizzazione metallografica dei materiali;
- valutazione qualitativa dell’incrudimento localizzato;
- prove di durezza sulle sezioni più significative;
- analisi dei risultati ottenuti;

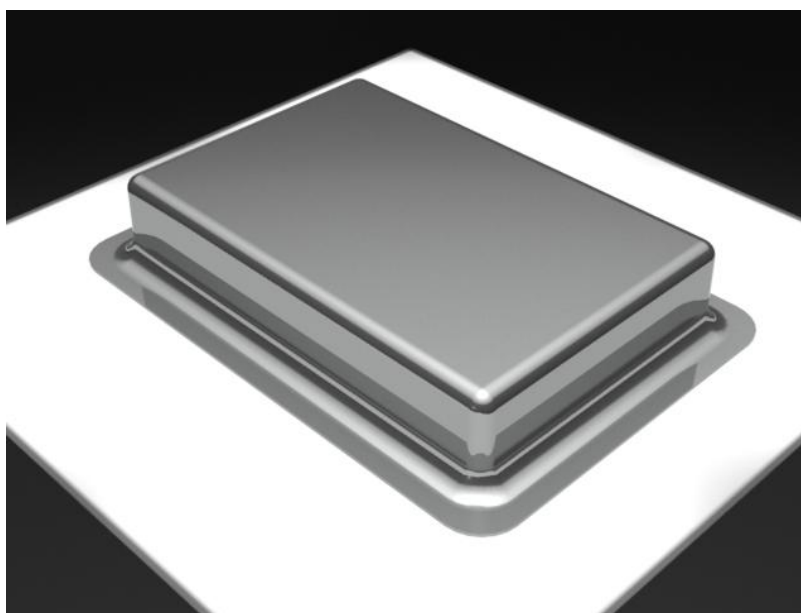
Capitolo 5

PROVE SPERIMENTALI

5.1 – PROVA 439 M vs 304

5.1.1 – SUL CAMPO

Per confrontare il ferritico 439 M con l'austenitico AISI 304 si è scelto un prodotto per uso alimentare, una vasca gastronom rettangolare 450 x 390 e profonda 90 *mm* (come già detto lo spessore di confronto è di 2 *mm*). Il materiale di partenza è stato tagliato a 680 x 540 *mm* con una scantonatura (taglio delle estremità angolari della lamiera per permettere un corretto flusso del materiale) a 800 *mm* sulla diagonale.



5.1 – Rappresentazione grafica della vasca per alimenti

Il prodotto finito è raggiunto in due step: una prima imbutitura a circa 84 *mm* (la pressa in frenata non è precisa, la misura varia di ± 1 *mm*) e un secondo stampaggio per arrivare ai 90 *mm* prestabiliti (in questo caso si inseriscono dei fine corsa che arrestano la discesa a misura corretta).

Il prodotto è stato ottenuto in una pressa Cavenaghi-Rodolfi, di tonnellaggio massimo 450, a doppio effetto e idraulica in modo da assicurare la pressione dovuta garantendo una velocità moderata.



5.2 – Pressa utilizzata per la lavorazione

Lo stampo che garantisce l'ottenimento della forma è in ghisa (sia la matrice sia il punzone) il tutto sorretto da colonne in acciaio per evitare inflessioni durante la fase di lavorazione. Questo particolare stampo è di tipo reversibile per effettuare i due passaggi sopra citati; per il secondo passaggio si inseriscono dei "rompigrinze", per consentire la corretta stiratura del materiale ed evitare ondulazioni e cambiamenti di forma.



5.3 – Particolare dello stampo

I parametri impostati sono i seguenti:

- forza del punzone e del premi-lamiera: 60 tonnellate;
- velocità di esecuzione massima;
- lubrificazione liquida di tipo ROLOIL – plasto – E/3 N depositata manualmente.

Di seguito si riportano le fotografie delle vaschette ottenute con i suddetti parametri.



5.4 – Prodotto ottenuto in AISI 304



5.5 – Prodotto ottenuto in 439 M

Come si può osservare, i prodotti della lavorazione sono risultati conformi agli standard qualitativi, sia la vaschetta in AISI 304 (i parametri macchina sono stati impostati sulla base dell'esperienza dell'imbutitura proprio su questo austenitico), sia quella in 439 M. In questo caso il set di dati impostati ha permesso di ottenere un finito privo di alcun difetto con entrambe le soluzioni.

Per valutare il flusso e il movimento del materiale, nonché per individuare le parti e le sezioni più soggette a deformazione, è stata applicata una griglia di quadrati 10 x 10 mm aderente alla superficie su una lamiera ferritica. Dopo la lavorazione si è quindi osservata la variazione di forma dei singoli quadratini, permettendo di evidenziare un andamento qualitativo del flusso di acciaio. Di seguito due particolari del pezzo finito.



5.6 – Immagini del flusso di materiale di una vaschetta di 439 M

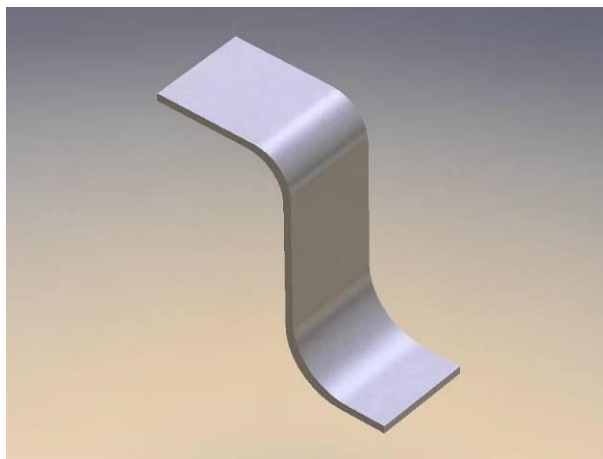
5.1.2 – STUTTURA METALLOGRAFICA

In seguito all'analisi visiva e prettamente qualitativa del flusso di materiale, si è scelto di procedere al taglio delle sezioni più deformate e quindi più pericolose.

Nel caso della vaschetta in esame sono state individuate due zone particolarmente interessanti: una a cavallo del profilo angolare e una lungo un lato maggiore del prodotto. Questa scelta ovviamente riguarda sia il finito austenitico che quello ferritico.

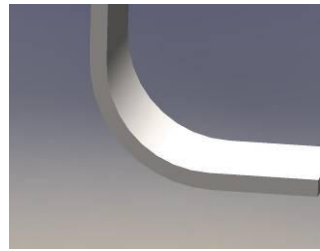
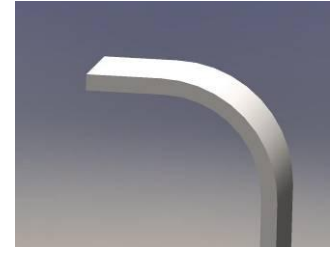


5.7 – Rappresentazione grafica della sezione angolare della vaschetta in 439 M



5.8 - Rappresentazione grafica della sezione centrale della vaschetta in 439 M

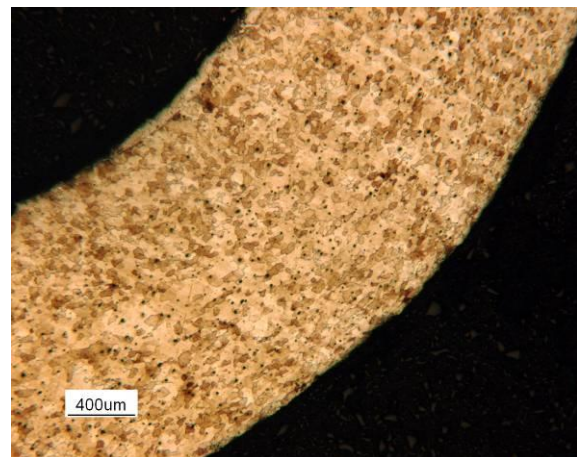
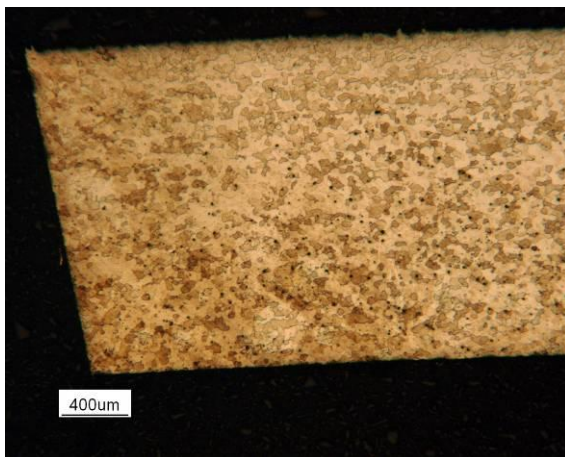
Nei profili sopra indicati sono stati ricavati due provini metallografici centrati nelle due curvature per un totale di quattro campioni per ogni materiale. Queste sezioni sono state inglobate in resina termoindurente e successivamente lucidati con carte abrasive con mesh sempre più fine: dalla carta grit 180 fino ad arrivare alla grit 2500. La lucidatura a specchio è stata ottenuta con un panno da $6\ \mu\text{m}$ e successivamente con un panno da $1\ \mu\text{m}$ lubrificato con liquido diamantato. La struttura del materiale è stata messa in evidenza con un attacco chimico



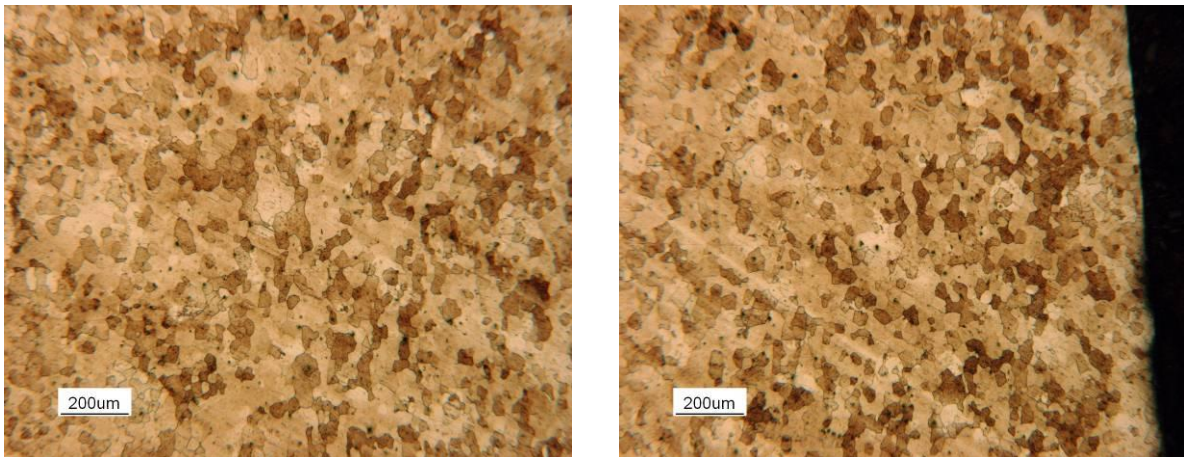
mediante gliceregia (acqua regia – tre parti di HCl contro una di HNO_3 – con aggiunta di glicerolo).

Di seguito si riportano solo alcuni degli ingrandimenti delle microstrutture osservate al microscopio ottico sia del ferritico 439 M, sia dell'austenitico 304; un'analisi critica delle strutture più interessanti e un confronto tra le due tipologie di inossidabili è riportata in seguito.

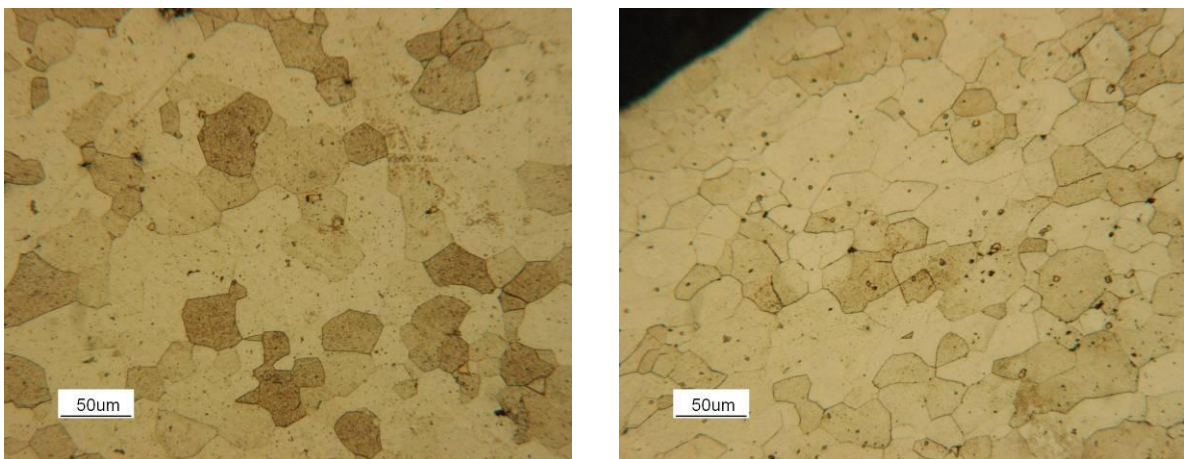
439 M – sezione centrale



5.9 - Micrografie ottenute a 25 X.



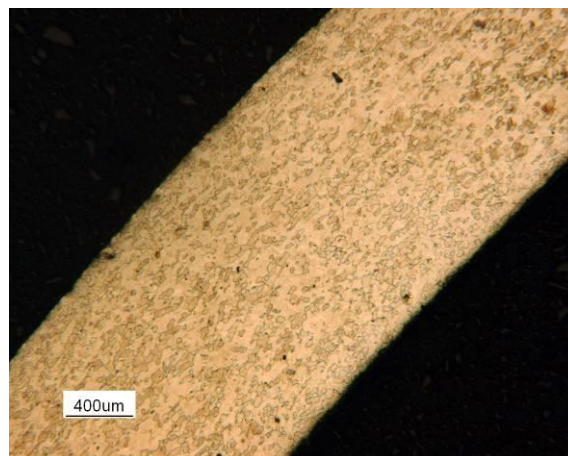
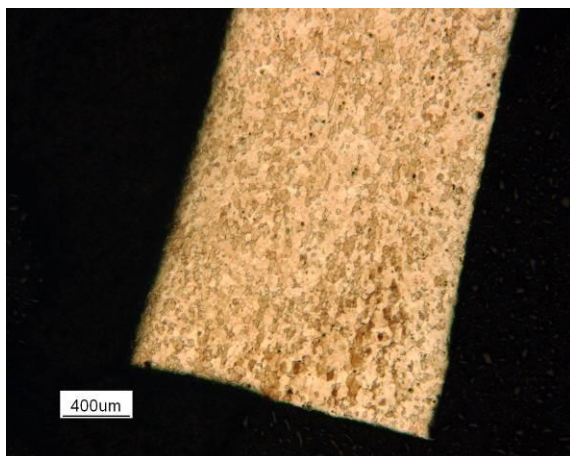
5.10 - Micrografie ottenute a 50 X della zona centrale e quella corticale.



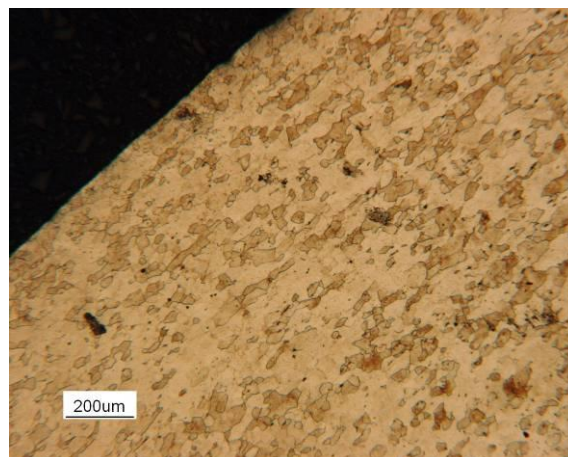
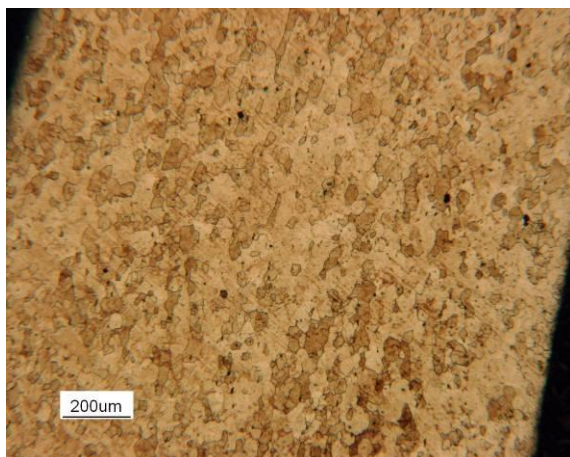
5.11 - Micrografie ottenute a 200 X della zona centrale e quella corticale.

I grani rilevati nella sezione centrale del prodotto ferritico risultano in entrambe le zone (superiore e inferiore) molto proporzionati e pressoché equiassici; peculiarità che rimane invariata anche nella zona a maggiore deformazione (piega). Questa caratteristica indica che l'incrudimento localizzato è stato limitato e che il materiale ha potuto scorrere all'interno dello stampo, inibendo lo stiramento puntuale della sezione. Inoltre, come si può osservare negli alti ingrandimenti, i grani della parte centrale dello spessore e della parte superficiale risultano in entrambi i casi equiassici, ma nella zona corticale si rilevano grani più fini.

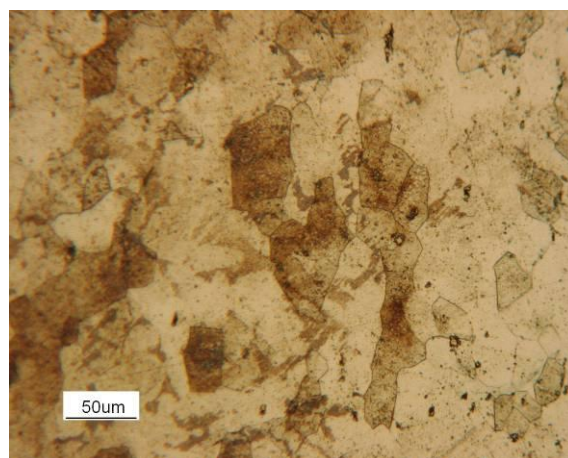
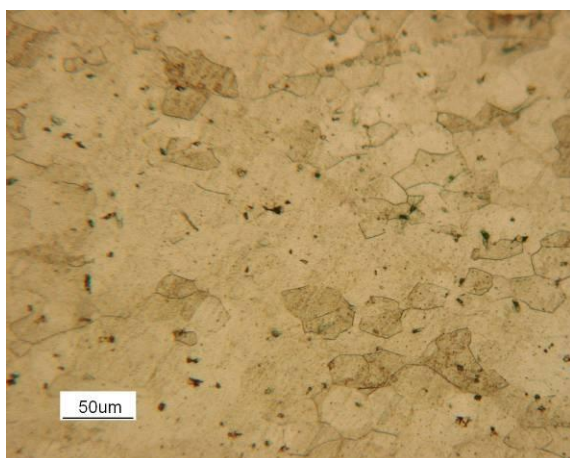
439 M – sezione angolare



5.12 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.13 - Micrografie ottenute a 50 X della zona centrale e quella corticale.

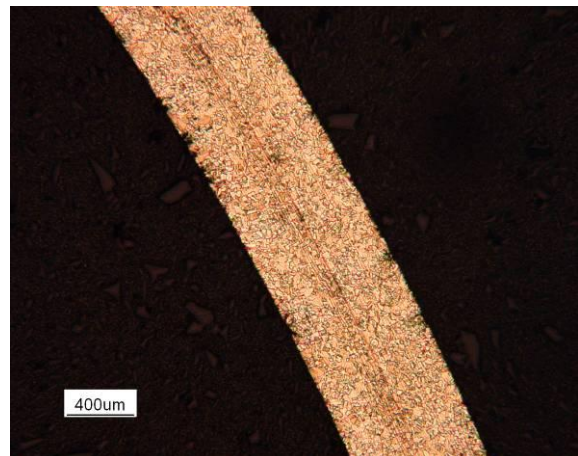
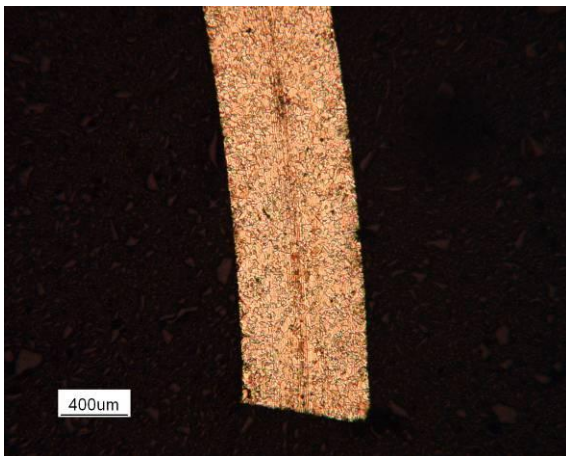


5.14 - Micrografie ottenute a 200 X della zona centrale e quella corticale.

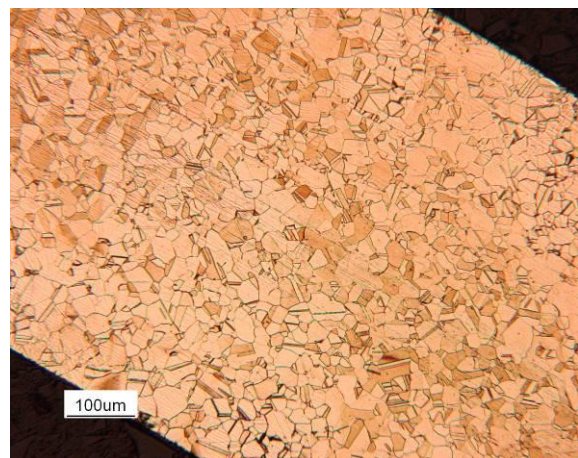
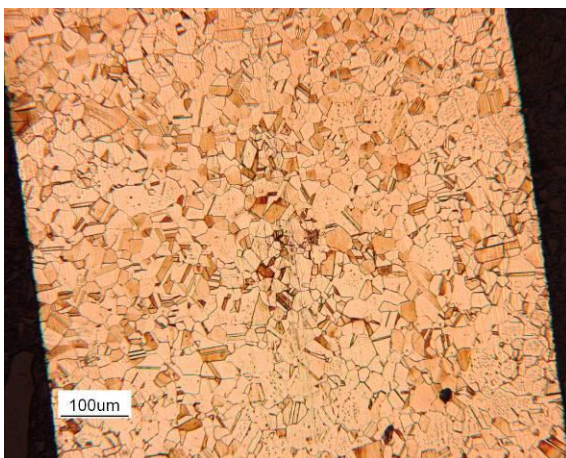
Anche nella sezione angolare (parte quindi maggiormente deformata) i grani risultano principalmente equiassici, anche se, a bassi ingrandimenti, si nota una certa direzionalità della struttura in zone localizzate. A colpo d'occhio si può notare un discreto bilanciamento tra zone ferritiche e perlitiche. Si può dedurre comunque che la deformazione è maggiore osservando gli ingrandimenti a 200 X: limitandosi alla zona corticale si possono notare dei grani più allungati e più attaccati chimicamente, segno dell'incrudimento maggiore della zona. In ogni caso il materiale ha saputo auto alimentarsi, evitando quindi di sollecitare delle zone localizzate in maniera eccessiva, permettendo alla lavorazione di avere un esito positivo.

Passiamo ora a valutare il prodotto austenitico.

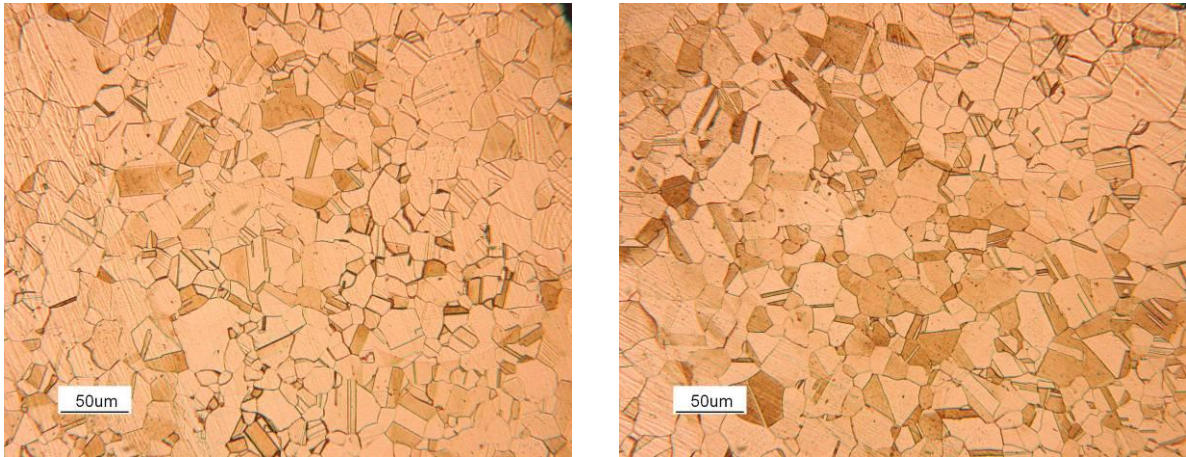
AISI 304 – sezione centrale



5.15 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.16 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.

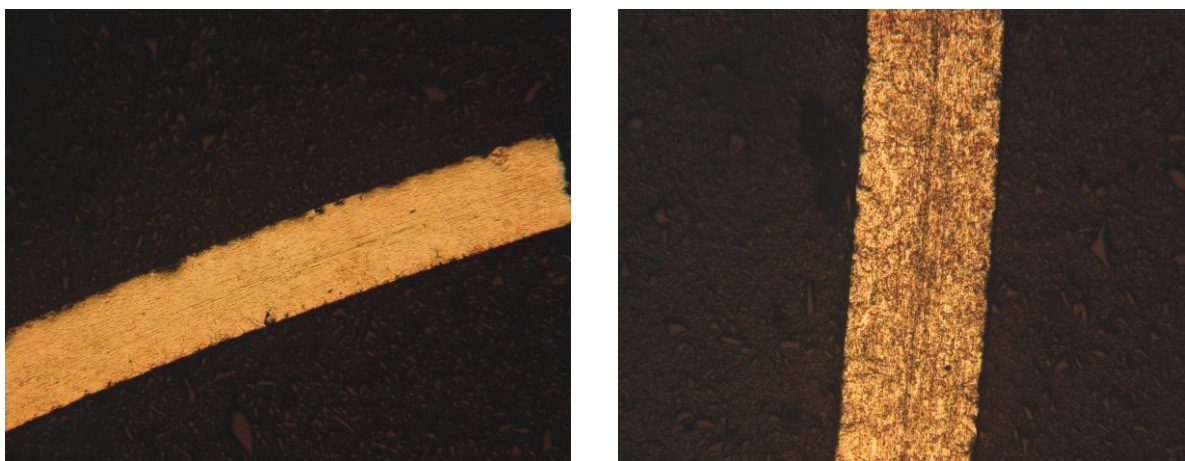


5.17 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana corticale e della sezione di piega corticale.

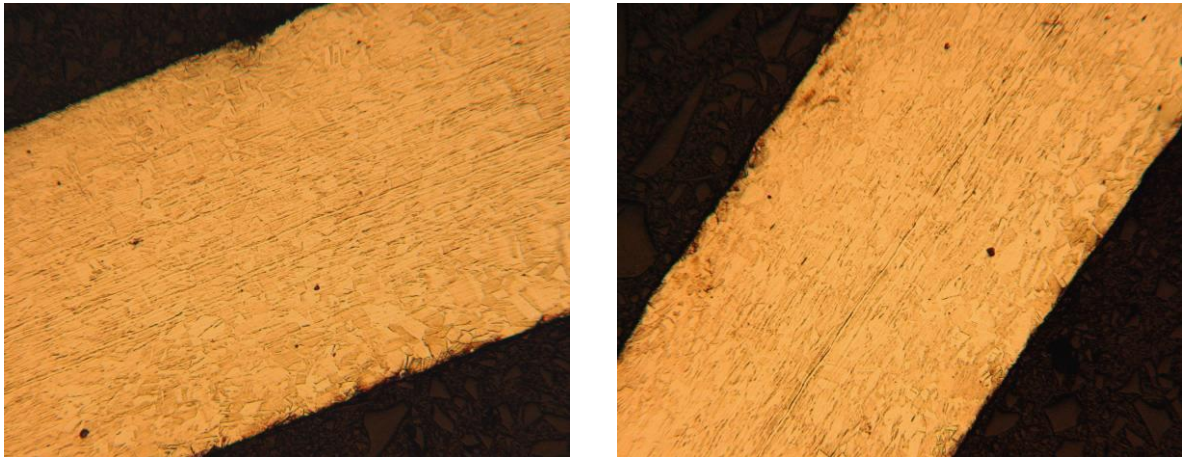
In queste immagini che si riferiscono alla sezione centrale del prodotto, i grani austenitici risultano abbastanza incruditi con una netta diversità di forma tra le zone piane e quelle maggiormente deformate. A bassi ingrandimenti si apprezzano le classiche bande di deformazione e la direzione preferenziale del grano. Una spiegazione plausibile di quanto detto è la seguente: l'austenitico è più incline a “stirarsi” localmente e non necessita di auto alimentazione, anche se le deformazioni imposte in questa parte di prodotto non sono particolarmente insidiose.

Ancora una volta si apprezza la differenza di grano tra parte superficiale e parte centrale: la zona corticale risente del contatto con lo stampo e quindi risulta leggermente più incrudita.

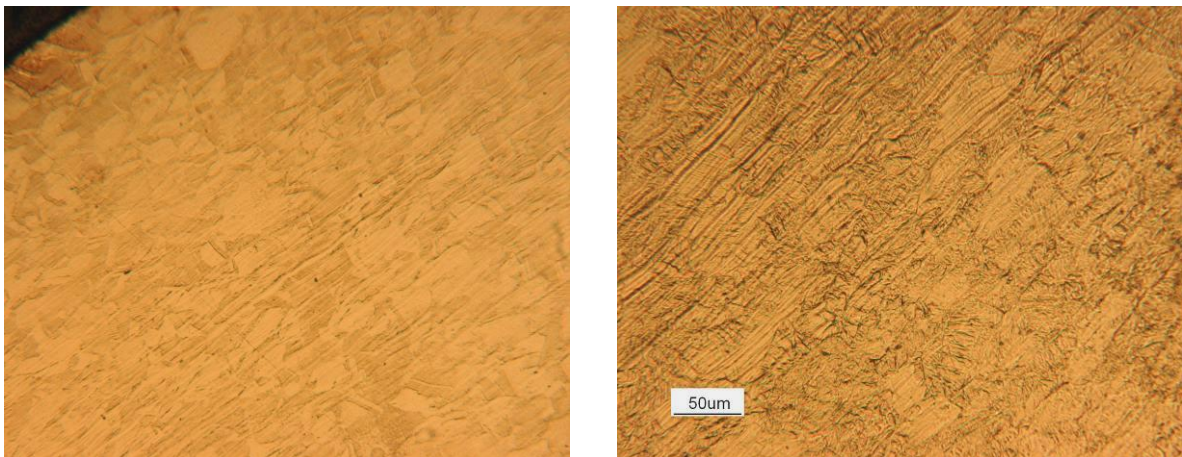
AISI 304 – sezione angolare



5.18 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.19 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



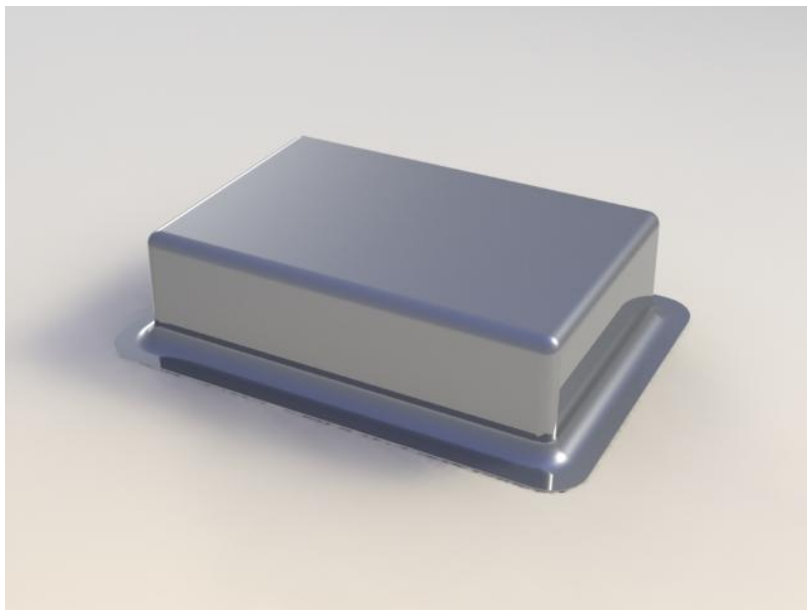
5.20 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana corticale e della sezione di piega corticale.

La struttura delle sezioni a cui si riferiscono le immagini sopra riportate, presentano un grano fortemente incrudito nelle zone di maggiore deformazione. A bassi ingrandimenti si può osservare come nella sezione curva l'incrudimento sia maggiore; questo è confermato dal fatto che l'attacco metallografico ha inciso nella zona a marcata deformazione (foto destra 25 X). Ad alti ingrandimenti infatti si può notare la marcata deformazione della struttura nella direzione di stiramento, localizzata però solo nella parte curva (si noti la differenza tra la foto di sinistra e quella di destra a 200 X). Anche in questo caso si può notare come la parte corticale del profilo sia leggermente più incrudita rispetto alla zona centrale.

5.2 – PROVA 441 LI vs 304

5.2.1 – SUL CAMPO

Il ferritico 441 LI laminato a $0,8\text{ mm}$ è stato confrontato con un austenitico dello stesso spessore, valutando i risultati dopo l'imbutitura di un lavello industriale. I materiali di partenza sono stati tagliati in fogli di $830 \times 800\text{ mm}$. In seguito sono state praticate le consuete scantonature per evitare sugli angoli l'arricciamento del materiale in eccesso, a 820 mm sulle diagonali della lastra. Il prodotto finito ($450 \times 390\text{ mm}$) è profondo 175 mm e la forma del pezzo è rettangolare.



5.21 - Rappresentazione grafica del prodotto lavello industriale.

Il lavello in acciaio austenitico pronto per le rifiniture finali è ottenuto generalmente in due passaggi di imbutitura, con la particolarità che tra le due lavorazioni è interposta una ricottura. Il primo step stampa la lamiera a 160 mm (con tutti i problemi di precisione in frenata già citati nella prova precedente); il prodotto viene poi decapato e ricotto in un forno in continuo a 1050 °C . L'ultimo passaggio è un'imbutitura finale che porta il materiale a misura definitiva: 175 mm (anche in questo caso il passaggio finale risulta preciso grazie all'utilizzo di finecorsa). Per gli studi di questa trattazione valuteremo e confronteremo i materiali semifiniti, sottoposti cioè, al solo primo passaggio (una ricottura infatti “cancellerebbe” le distorsioni e l'incrudimento che si vogliono studiare in questo lavoro).

Il prodotto è stato ottenuto in una pressa Cavenaghi-Rodolfi, di tonnellaggio massimo 450, a doppio effetto e idraulica in modo da assicurare la pressione dovuta garantendo una velocità moderata.



5.22 - Pressa utilizzata per la lavorazione.

Lo stampo che garantisce l'ottenimento della forma è in ghisa (sia la matrice sia il punzone) il tutto sorretto da diciotto colonne in acciaio per evitare inflessioni durante la fase di lavorazione. A differenza dello stampo utilizzato nella prova precedente, questo non è reversibile. Al contrario questo si utilizza per entrambi i passaggi, con la particolarità che per il secondo si applicano dei rompi grinze inseriti in apposite sedi.



5.23 - Particolare dello stampo utilizzato.

I parametri impostati sono i seguenti:

- forza del punzone e del premi-lamiera: 60 tonnellate;
- velocità di esecuzione massima;
- lubrificazione liquida di tipo ROLOIL – plasto – E/3 N depositata manualmente.

Di seguito si riportano le fotografie delle vaschette ottenute con i suddetti parametri.



5.24 – Prodotto austenitico ottenuto.



5.25 - Prodotto ferritico ottenuto.

Come si può osservare, il prodotto in AISI 304 risulta conforme e privo di difetti; si ricorda infatti che i parametri macchina sono stati impostati su dati storicamente conformi a questo tipo di materiale.

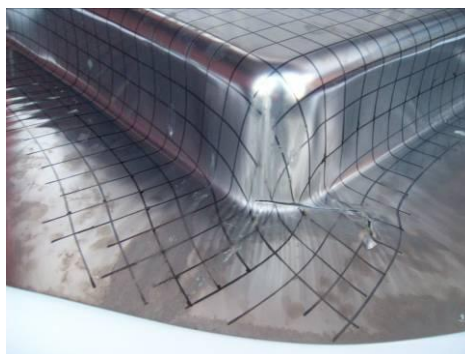
Il prodotto in 441 LI invece, imbutito con la stessa forza, velocità e lubrificazione, è arrivato a rottura ad una profondità di soli 100 mm (contro 160 richiesti). Le cricche si sono sviluppate dalle sezioni presumibilmente più sollecitate e quindi soggette a maggiore deformazione: in questo caso sono germinate alla base della flangia superiore nella sezione angolare, per poi propagarsi lungo la parte interposta tra matrice e premi lamiera.

Con i parametri standard per l'austenitico, non è stato possibile quindi imbutire il ferritico 441 LI. Di seguito un particolare della rottura.



5.26 - Particolare di un punto di rottura del pezzo realizzato in ferritico.

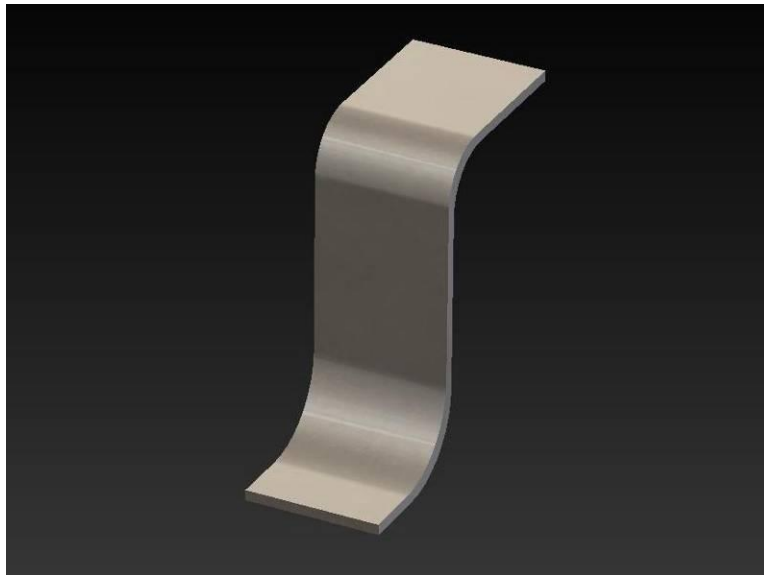
Per valutare il flusso e il movimento del materiale, oltre che per confermare la scelta della sezione più a rischio, è stata imbutita nuovamente una lamiera di ferritico con la griglia di quadrati già citata per la precedente prova, con gli stessi dati macchina. Si è potuto confermare che le parti più sollecitate sono quelle nella piega che interfaccia la flangia e le pareti del lavello; in particolare si riscontra maggiore deformazione nella zona angolare soggetta a stiramento nelle tre direzioni spaziali.



5.27 – Particolare della deformazione della griglia sul prodotto ferritico.

5.2.2 – STUTTURA METALLOGRAFICA

Il taglio delle sezioni maggiormente deformate e rischiose è avvenuto quindi nella parte angolare del prodotto e in quella centrale sul lato del lavello. La forma di questi profili è simile a quella della prova precedente anche se ovviamente cambiano dimensioni e spessori.

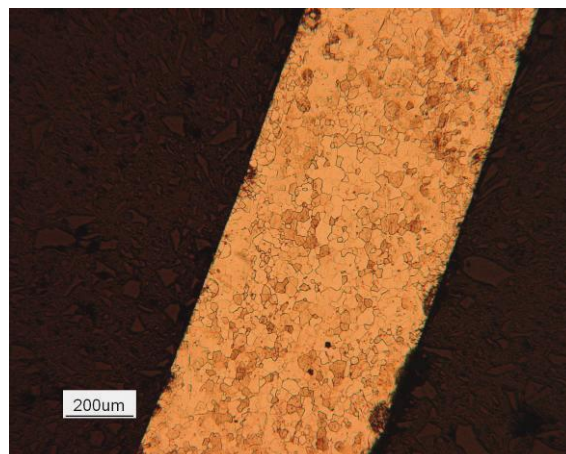
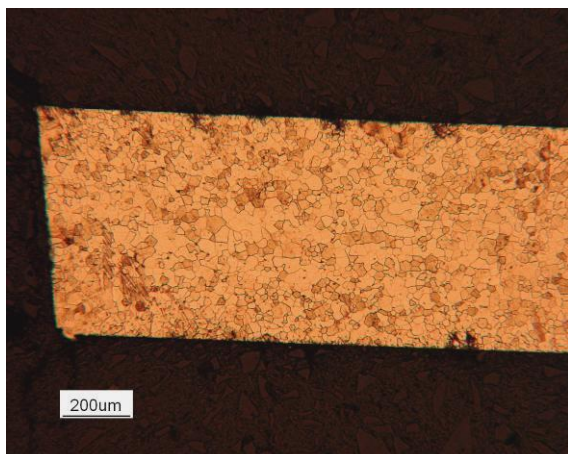


5.28 – Rappresentazione grafica di una sezione estratta dal lavandino industriale.

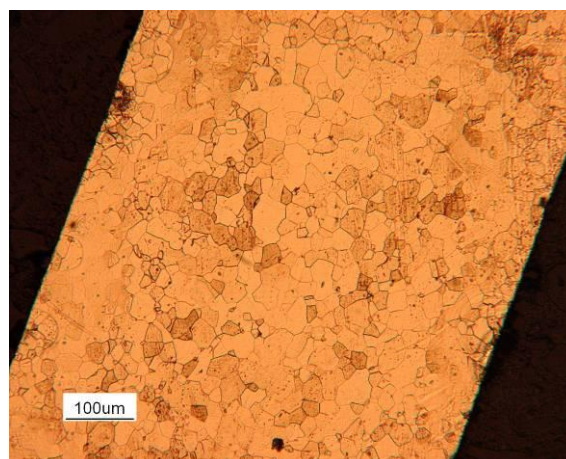
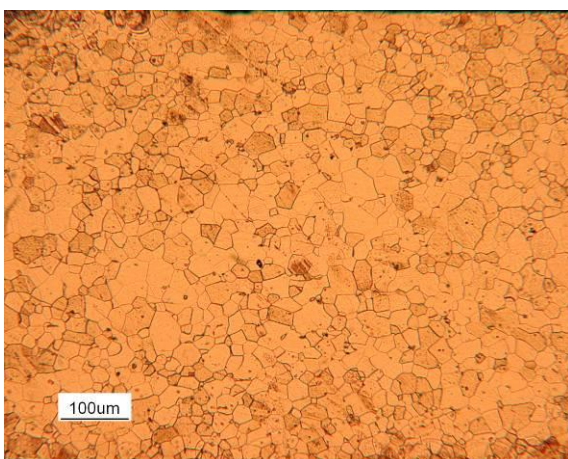
Nei profili sopra indicati sono stati ricavati due provini metallografici centrati nelle due curvature per un totale di quattro campioni per ogni materiale. Queste sezioni, allo stesso modo della prova precedente, sono state inglobate in resina termoindurente e successivamente lucidati con le carte abrasive sopracitate e con i panni da $6\ \mu\text{m}$ e da $1\ \mu\text{m}$ lubrificati con liquido diamantato. La struttura del materiale è stata messa in evidenza con un attacco chimico utilizzando gliceregia (acqua regia – tre parti di HCl contro una di HNO_3 – con aggiunta di glicerolo).

Di seguito si riportano alcuni degli ingrandimenti più significativi delle microstrutture osservate al microscopio ottico sia del ferritico 441 LI, sia dell'austenitico 304; un'analisi critica delle strutture più interessanti e un confronto tra le due tipologie di inossidabili è riportata in seguito.

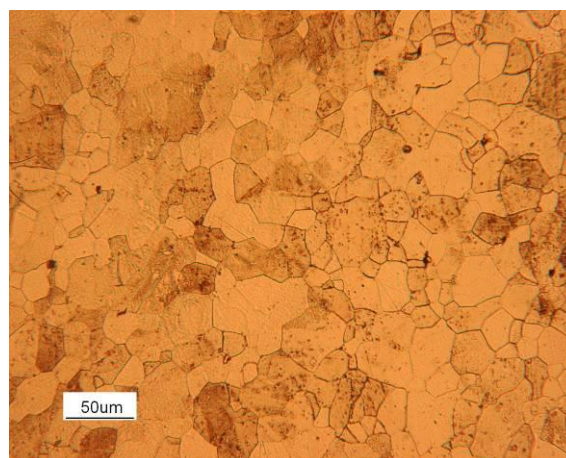
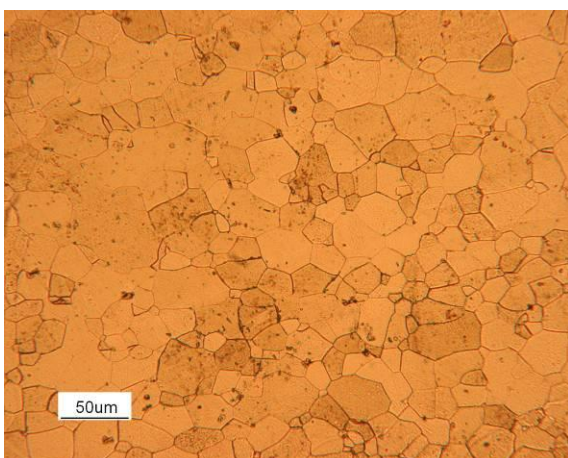
441 LI – sezione centrale



5.29 - Micrografie ottenute a 50 X.



5.30 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.

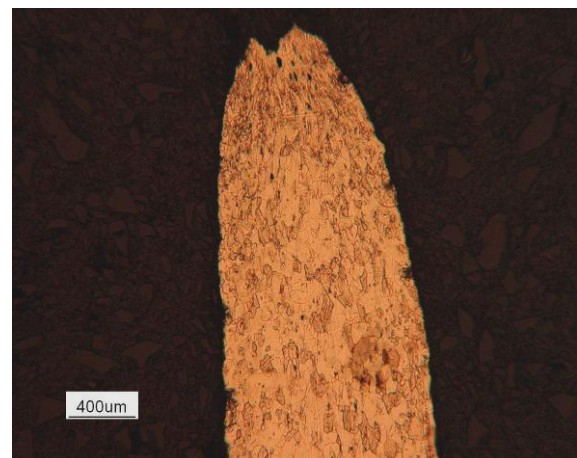
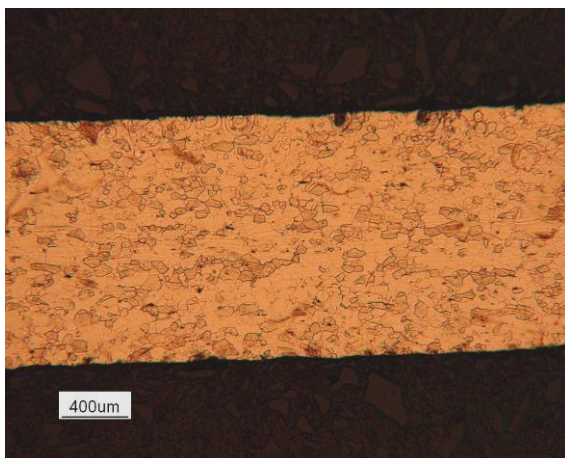


5.31 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega.

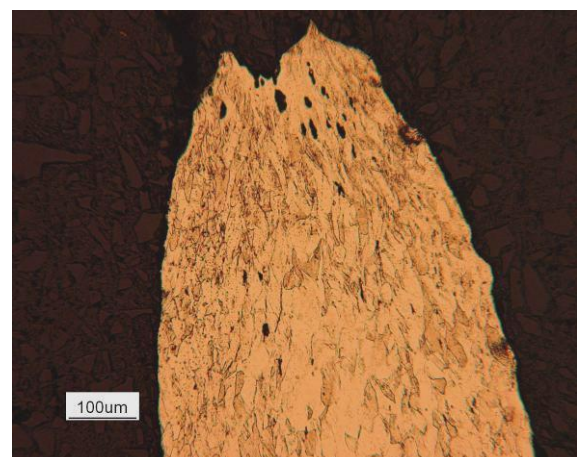
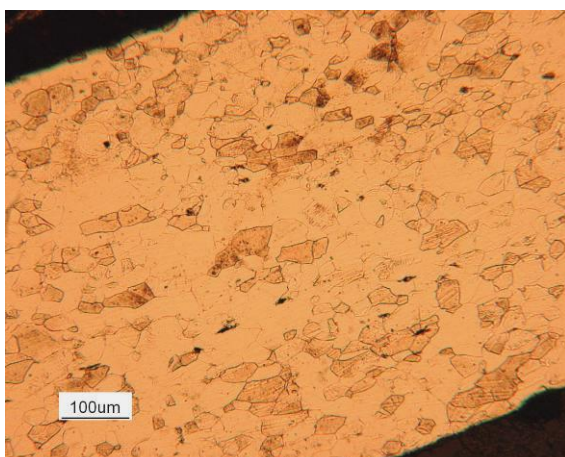
I grani della struttura nella sezione centrale del prodotto ferritico risultano in entrambe le zone (superiore e inferiore) molto proporzionati ed equiassici; peculiarità che rimane invariata anche nella zona a maggiore deformazione (piega), come si può notare dal confronto degli ingrandimenti a sinistra (zona piana) e a destra (zona di piega). Questa caratteristica indica che l'incrudimento localizzato è stato limitato e che il materiale ha potuto scorrere all'interno dello stampo, inibendo lo stiramento puntuale della sezione, almeno in questa parte centrale, sollecitata in modo più blando rispetto alla zona angolare.

Si rileva inoltre una lieve differenza tra i grani nella parte centrale dello spessore e i grani della parte corticale, segno che lo sfregamento materiale matrice può incrudire leggermente le zone di interfaccia.

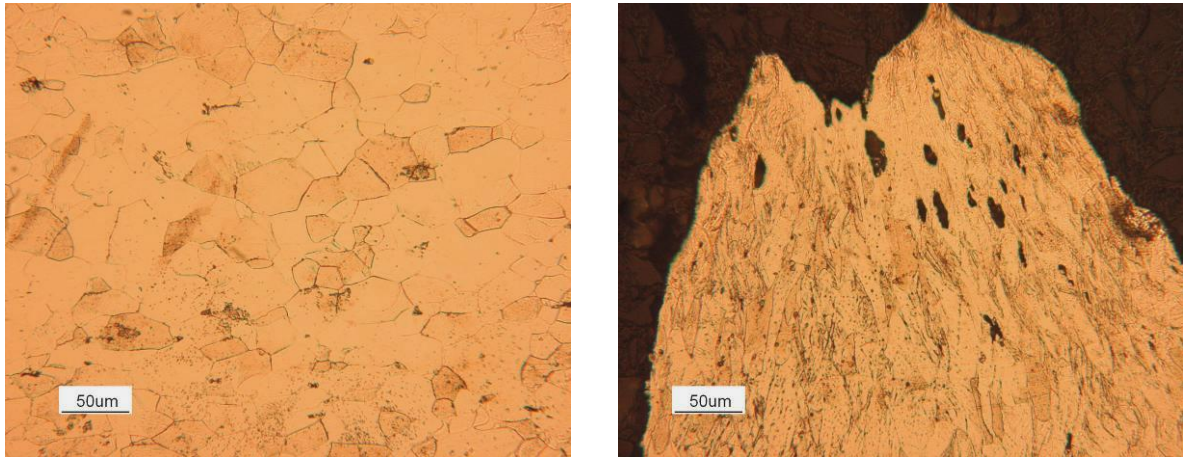
441 LI – sezione angolare



5.32 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.33 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega (fratturata).



5.34 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega (fratturata).

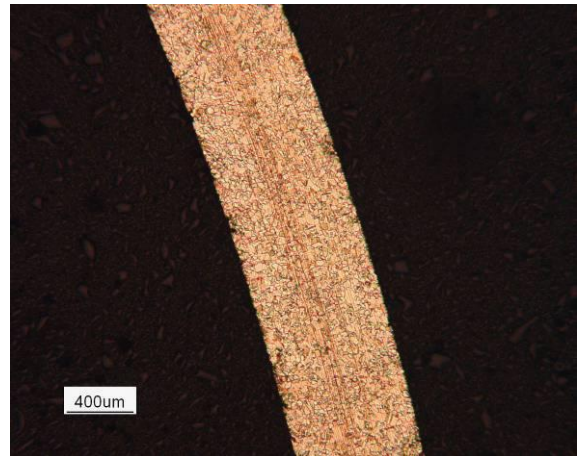
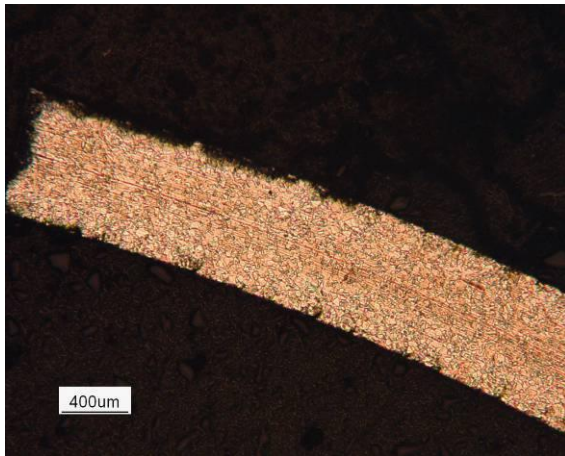
La sezione angolare che ha subito rottura rivela caratteristiche differenti, ma che ancora una volta confermano qualitativamente le modalità di deformazione dei ferritici. Il profilo superiore, quello spinto dal punzone, risulta uniformemente incrudito, anche se lievemente. Il profilo inferiore, quello prossimo all'interfaccia materiale-premi lamiera, è la parte più interessante da commentare; le immagini sopra si riferiscono proprio a quella zona.

Nella parte piana del campione infatti la struttura appare poco deformata con dei grani equiassici. Questi si mantengono regolari per tutto il campione, modificandosi però marcatamente nella zona di piega. Si osserva infatti una netta diversificazione del grano tra le due zone. Nelle immagini di destra si può osservare la zona di rottura. Qui i grani risultano molto allungati nella direzione di massimo sforzo; l'attacco metallografico è stato molto efficace in questa zona, segno che l'incrudimento puntuale è stato importante. Si capisce quindi come il materiale abbia tentato di auto alimentarsi (mantenimento del grano equiassico) fino al punto in cui le sue caratteristiche meccaniche non hanno potuto sopportare localmente gli sforzi e le deformazioni, portando a rottura il prodotto. Questa parte di forte incrudimento si esaurisce nei primi 600 μm circa (si veda la foto a 25 X di destra).

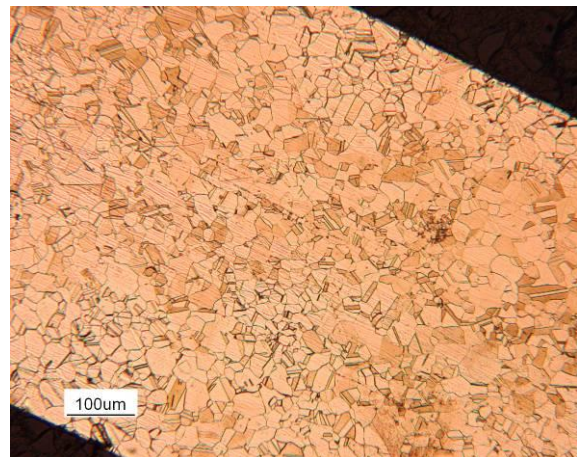
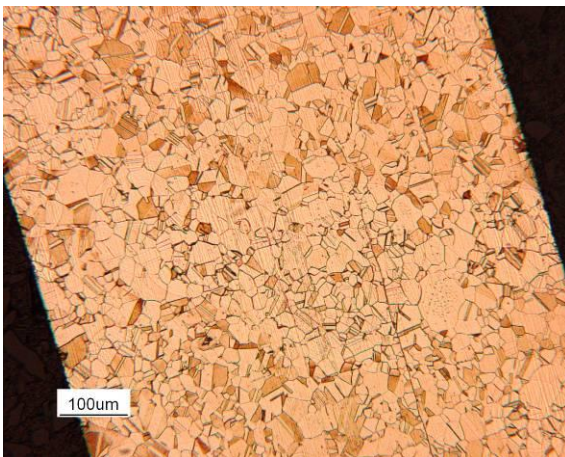
Si notino gli ingrandimenti a 200 X, dove questa diversificazione di grano tra zona piana e zona di piega appare molto marcata.

Passiamo ora a valutare il prodotto austenitico.

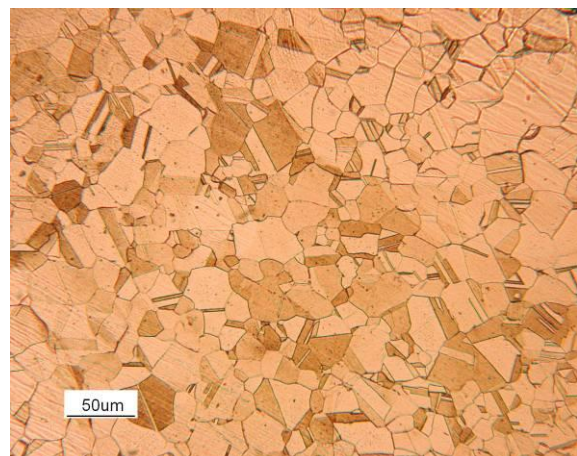
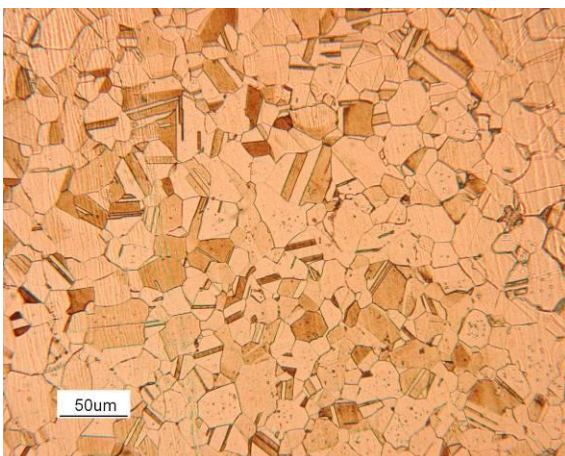
AISI 304 – sezione centrale



5.35 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.36 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.

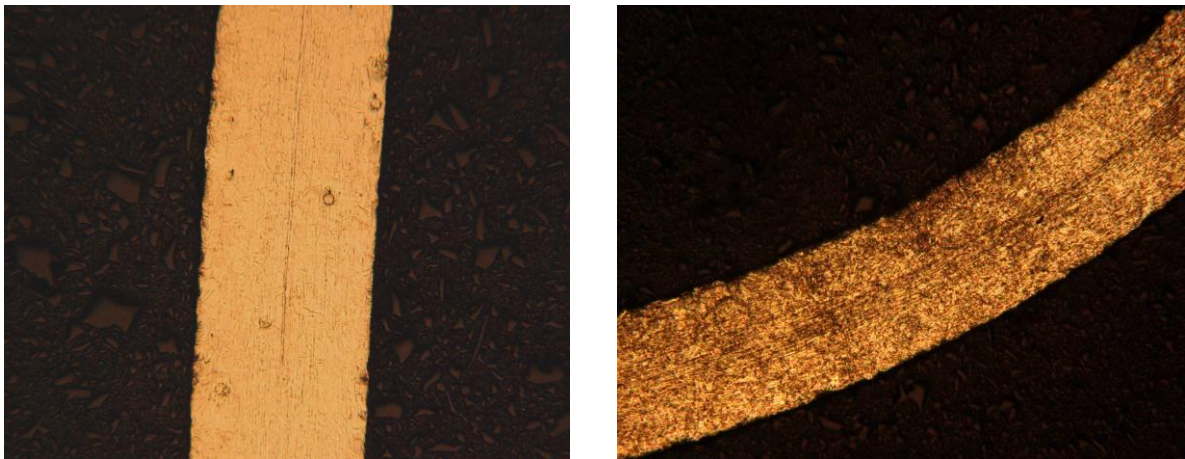


5.37 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana corticale e della sezione di piega centrale.

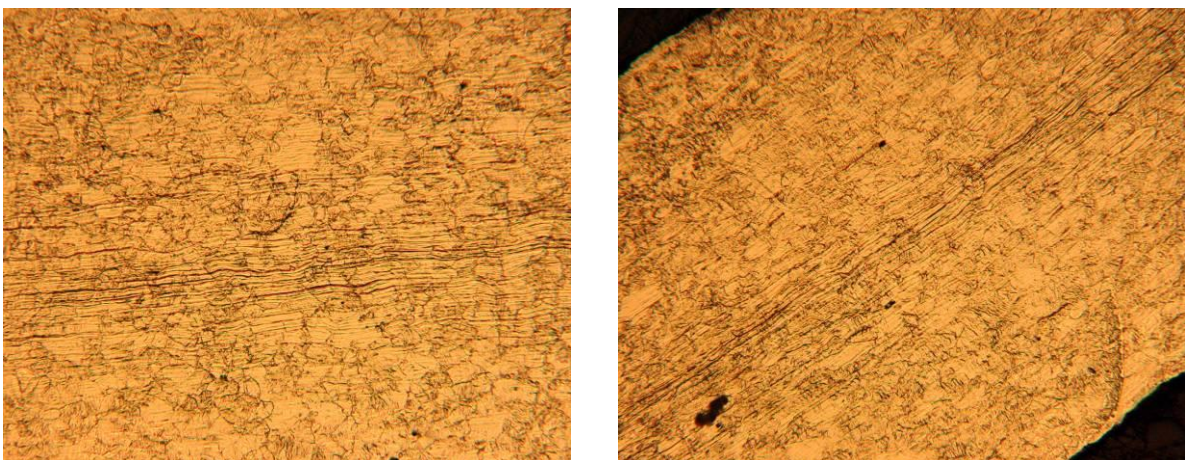
In queste immagini che si riferiscono alla sezione centrale del prodotto, i grani austenitici risultano abbastanza incruditi, con una netta diversità di forma tra le zone piane e quelle maggiormente deformate della piega. A bassi ingrandimenti si apprezzano le classiche bande di deformazione e la direzione preferenziale del grano. Nelle parti piegate, dove il prodotto cambia direzione seguendo il profilo del punzone, si apprezza un notevole incrudimento localizzato segno che la modalità di deformazione per “stretch forming” ha agito sul materiale.

Ancora una volta si apprezza la differenza di grano tra parte superficiale e parte centrale: la zona corticale risente del contatto con lo stampo e quindi risulta leggermente più incrudita (la netta diversificazione del grano è valutabile nell’ingrandimento a 200 X nella foto di sinistra).

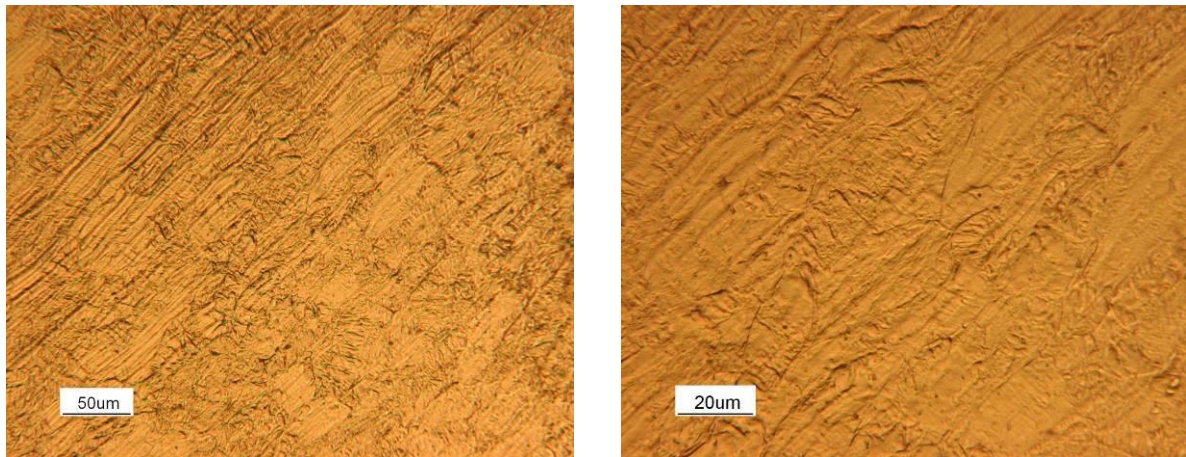
AISI 304 – sezione angolare



5.38 - Micrografie ottenute a 50 X.



5.38 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



5.39 - Micrografie ottenute: a 200 X della sezione di piega; a 500 X della sezione di piega.

La struttura delle sezioni a cui si riferiscono le immagini sopra riportate, presentano un grano fortemente incrudito nelle zone di maggiore deformazione, al contrario delle parti a deformazione limitata (sezione piana). Questa diversificazione è apprezzabile a bassi ingrandimenti ed è molto più visibile in tale parte angolare rispetto alla precedente zona centrale del prodotto.

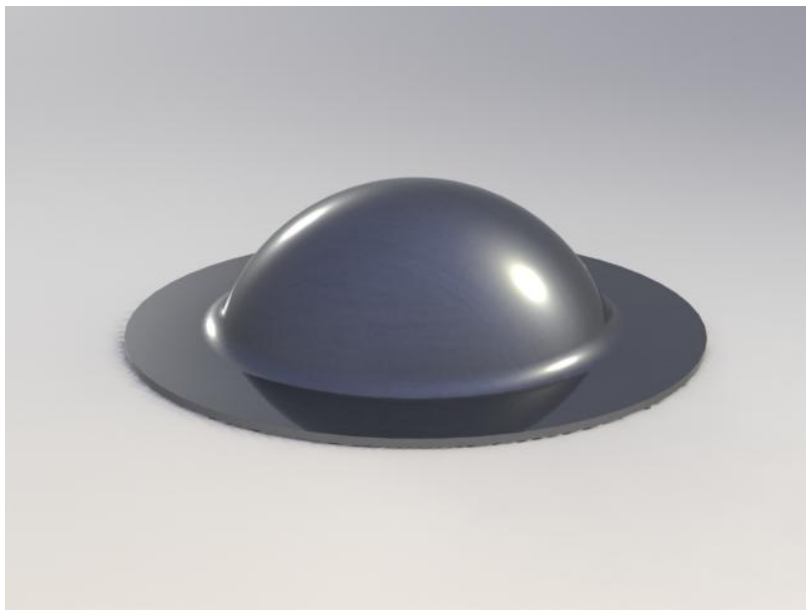
Le immagini ad alti ingrandimenti invece, mostrano come il grano nella sezione di piega sia altamente incrudito. La struttura austenitica infatti risulta stirata e la bande di deformazione risultano marcate e perfettamente visibili (si noti l'ingrandimento a 500 X).

Anche in questo caso si può notare come la parte corticale del profilo sia leggermente più incrudita rispetto alla zona centrale.

5.3 – PROVA 444 vs 304

5.3.1 – SUL CAMPO

L'acciaio inossidabile ferritico Type 444 è stato confrontato con l'AISI 304 avente il medesimo spessore. I materiali sono stati laminati fino a 1,5 *mm*. Il prodotto scelto per il confronto è un imbutito semisferico per lavandini di limitate dimensioni, usualmente installati nel settore dei trasporti. Le lamiere delle due famiglie di inox sono state preparate a 500 x 500 *mm* e successivamente scantonate a 485 x 485 *mm* sulle diagonali, per le motivazioni già espone in precedenza. Il prodotto finito è quindi una semisfera irregolare troncata alla base, in cui il raggio massimo non corrisponde alla profondità imbutita. Si vuole raggiungere quindi un finito di diametro 335 *mm* e un altezza di lavorazione di 110 *mm* in una sola passata.



5.40 – Rappresentazione grafica del prodotto lavamani compatto.

Il prodotto è stato ottenuto in una pressa Cavenaghi-Rodolfi, di tonnellaggio massimo 650 (macchina quindi con prestazioni maggiori della pressa utilizzata per le due lavorazioni precedentemente descritte), a doppio effetto e idraulica in modo da assicurare la pressione dovuta garantendo una velocità moderata .

Lo stampo che garantisce l'ottenimento della forma è composto da una matrice di ghisa e da un punzone in materiale composito (super lega). Questa particolare lega ha la caratteristica di essere

auto lubrificante: non necessita quindi del ROTOIL plasto E/3 N utilizzato per le precedenti prove. Sulla lamiera si depone soltanto un leggero strato di acqua. Per contrastare la deformazione naturale della ghisa della matrice, il sistema è sorretto da 20 colonne di acciaio che evitano inflessioni dello stampo.



5.41 - Momento di esecuzione delle prove.

I parametri impostati sono i seguenti:

- forza del punzone e del premi-lamiera: 400 tonnellate (un ordine di grandezza in più rispetto alle prove precedenti);
- velocità di esecuzione massima;
- lubrificazione minima con acqua.

Di seguito si riportano le fotografie dei lavamani ottenuti con i suddetti parametri.



5.42 - Manufatto ottenuto in austenitico.



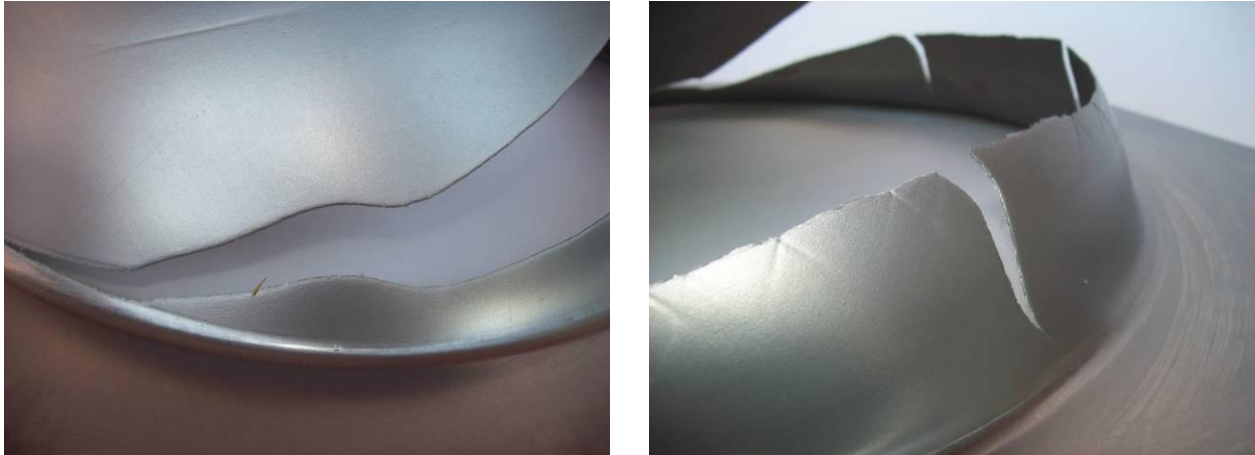
5.43 - Manufatto ottenuto in ferritico.

Come per le due precedenti prove, anche in questo caso il prodotto in AISI 304 risulta conforme e privo di difetti.

Il pezzo ottenuto in 444, invece, presenta una marcata frattura scaturita ad una profondità di imbutitura di 100 mm. Si ricorda che le condizioni di operatività (forza, velocità e lubrificazione) sono state le medesime per entrambe le famiglie di acciaio.

Anche in questo caso le cricche si sono sviluppate partendo dalla sezione di interfaccia lamiera premi lamiera (sul raccordo) e si sono propagate dove il materiale ha offerto minore resistenza.

Non è stato possibile quindi con i dati macchina suddetti, ottenere un prodotto finito in ferritico conforme alle specifiche. Di seguito si riportano dei particolari del pezzo in 444 della zona di frattura.

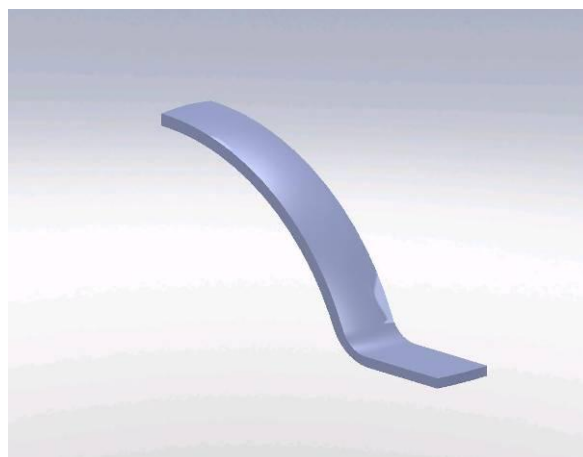


5.44 - Particolari della zona di frattura del prodotto in ferritico.

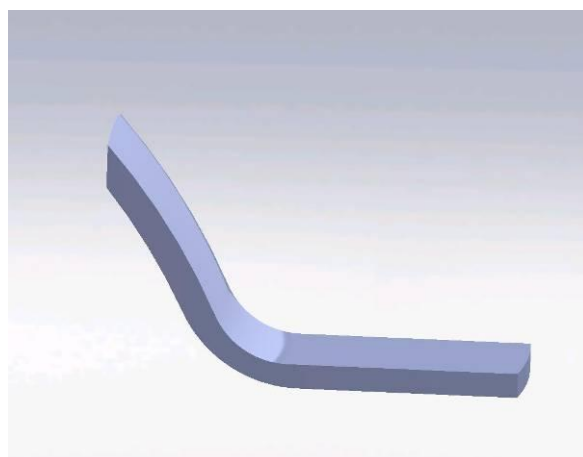
Senza procedere con il metodo della griglia per la valutazione del flusso si è capito (anche valutando le foto precedenti e le prove sopra citate) che la sezione più a rischio e pericolosa è la zona di curvatura.

5.3.2 – STUTTURA METALLOGRAFICA

Come già specificato in precedenza, le zone più deformate e rischiose sono quelle di interfaccia flangia - corpo imbutito; per questo sono state troncate due sezioni per ogni materiale (nonostante non vi siano parti angolari), per avere una maggiore quantità di informazioni e immagini. Un campione è stato ricavato nella zona limitrofa alla frattura, mentre un provino è stato preso in una zona non interessata dalla rottura. Ecco una rappresentazione grafica dei profili tagliati.



5.45 - Rappresentazione grafica di una sezione estratta dal prodotto lavamani compatto.



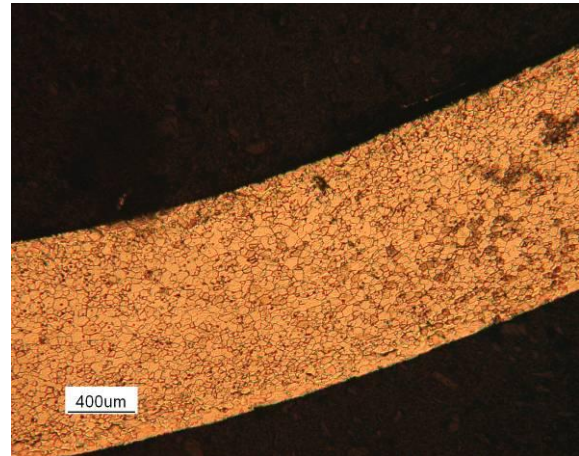
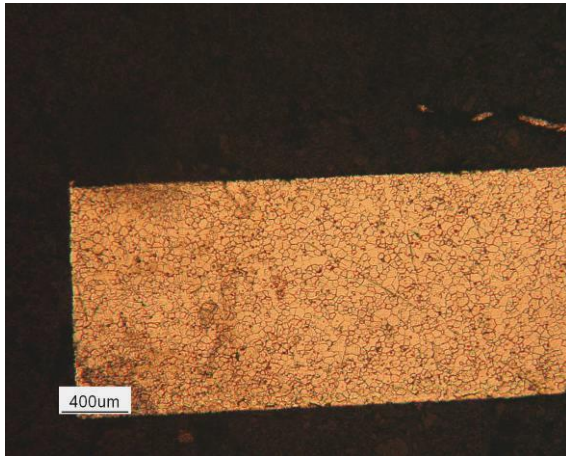
5.46 - Particolare grafico della zona di interesse.

Nei profili sopra indicati sono stati ricavati due provini metallografici centrati in due punti della curvatura per un totale di due provini per ogni materiale. Queste sezioni, allo stesso modo delle prove precedenti, sono state inglobate e successivamente lucidate con carte abrasive e con panni da

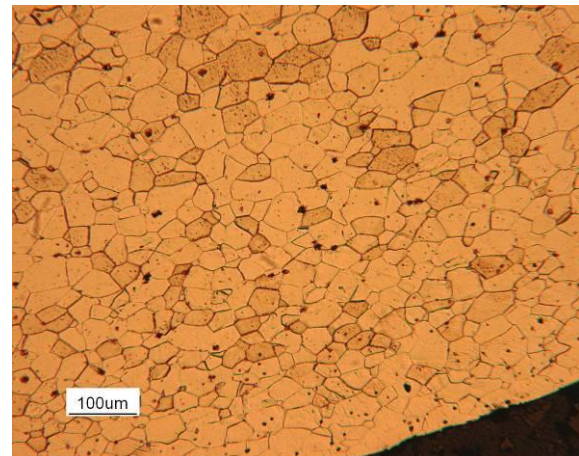
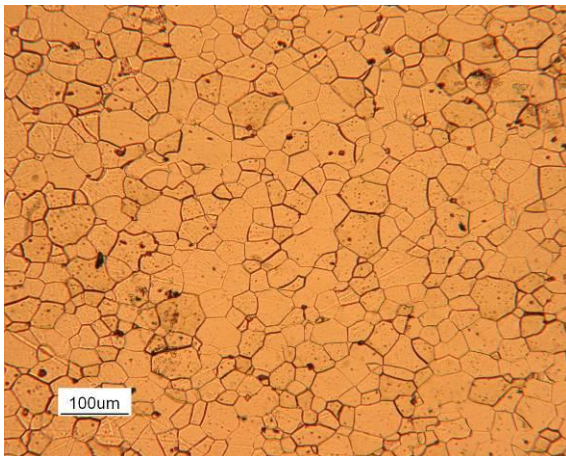
6 μm e da 1 μm . La struttura del materiale è stata messa in evidenza con un attacco chimico mediante gliceregia.

Di seguito si riportano alcuni degli ingrandimenti più significativi delle microstrutture osservate al microscopio ottico sia del ferritico 444 e sia dell'austenitico 304.

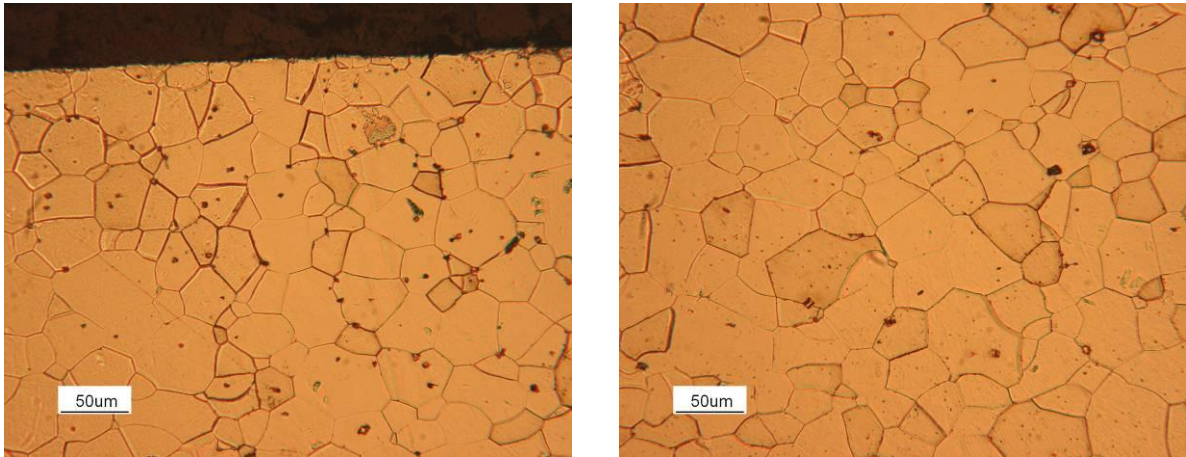
444 – sezione lontana dalla frattura



5.47 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.48 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.

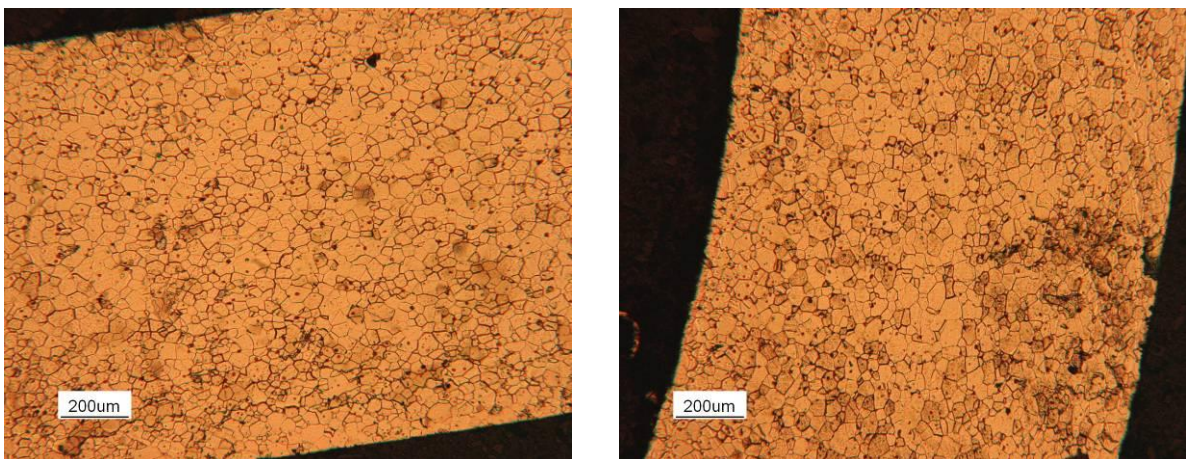


5.49 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega.

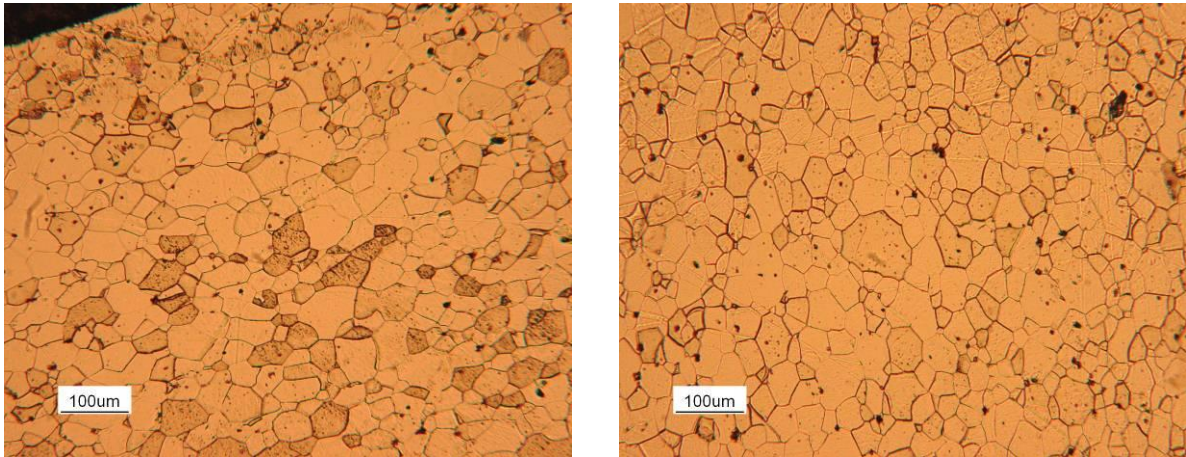
I grani della struttura ferritica, nella sezione non interessata dalla frattura, risultano molto proporzionati e equiassici, con un incrudimento distribuito ed uniforme; peculiarità che finora è comune ai ferritici e che rivela una auto alimentazione del materiale durante la deformazione. Non si riscontrano particolari differenze tra parte piana a contatto con il premi lamiera e parte di piega (foto di sinistra la prima e foto di destra la seconda).

L'attacco metallografico inoltre ha aggredito le parti del provino con uguale intensità, sinonimo di uniforme deformazione.

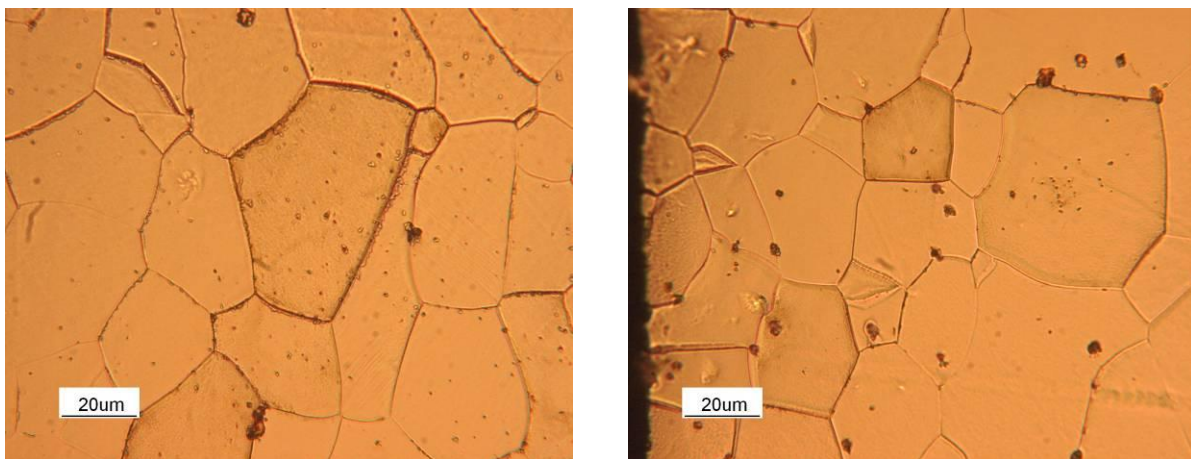
444 – sezione prossima alla frattura



5.50 - Micrografie ottenute a 50.



5.51 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



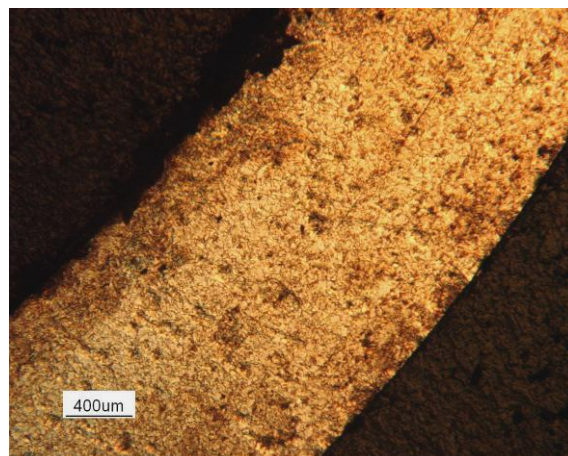
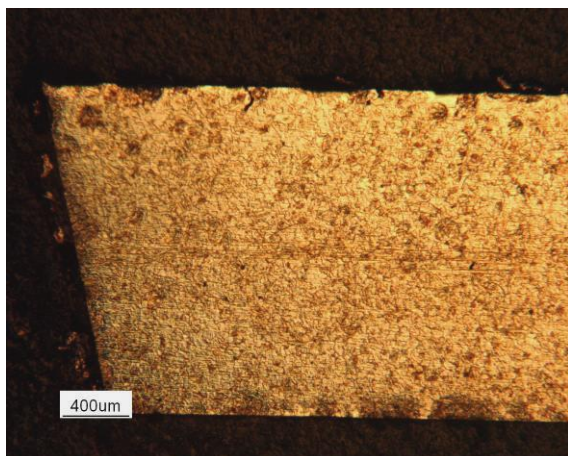
5.52 - Micrografie ottenute a 500 X della sezione centrale e corticale della zona piana.

La sezione a cui le immagini sopra si riferiscono, è caratteristica della zona prossima alla rottura. Anche in questo caso l'incrudimento si presenta in forma generalizzata ed uniforme tra la parte piana e la parte curva, anche se l'intensità globale sembra maggiore rispetto alla parte distante dalla frattura. Il materiale quindi sta tentando di auto alimentarsi causando un incrudimento globale della sezione; come riscontrato però, i parametri di imbutitura sono troppo gravosi per il ferritico il quale ha ceduto nella parte subito prossima a quella indagata.

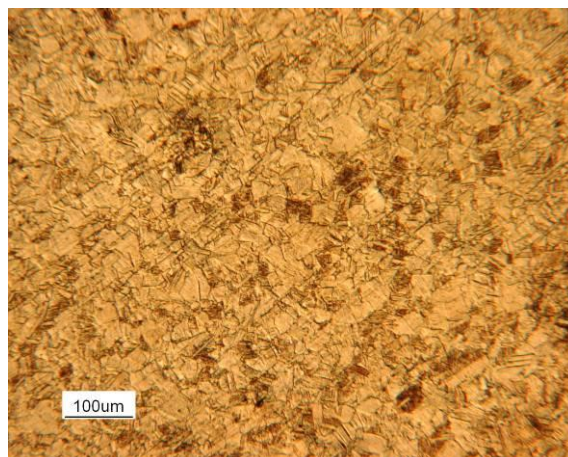
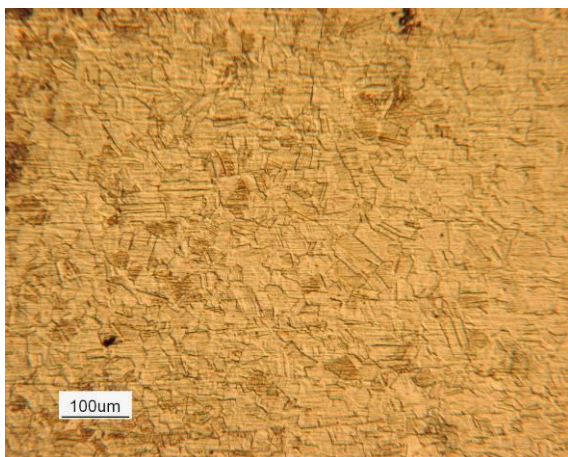
Infine si è voluto mostrare la struttura del 444 a forte ingrandimento (500 X), sia nella parte centrale dello spessore (foto sinistra), sia nella parte corticale (foto destra). Si noti come il grano nella parte superficiale risulti più fine e schiacciato.

Passiamo ora a valutare il prodotto austenitico.

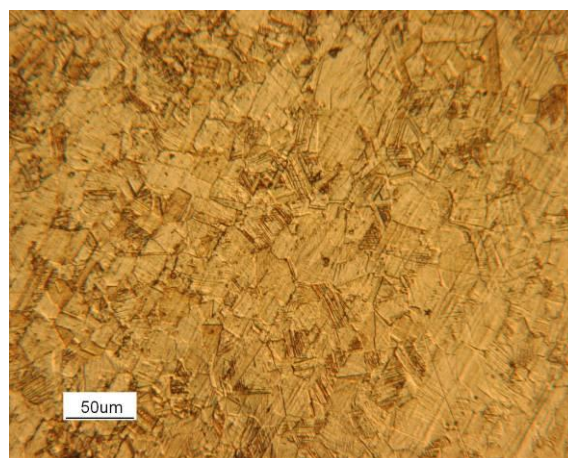
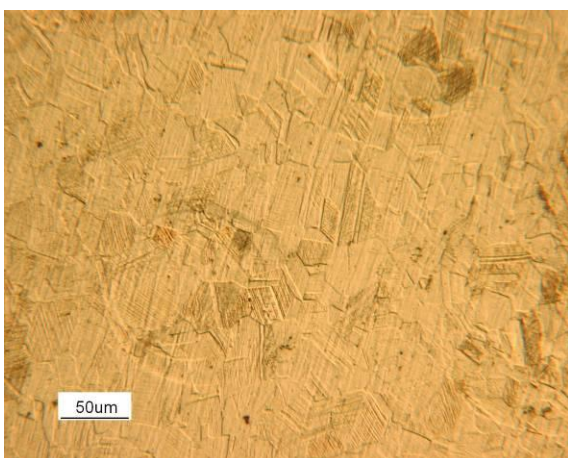
AISI 304



5.53 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.54 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



5.55 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega.

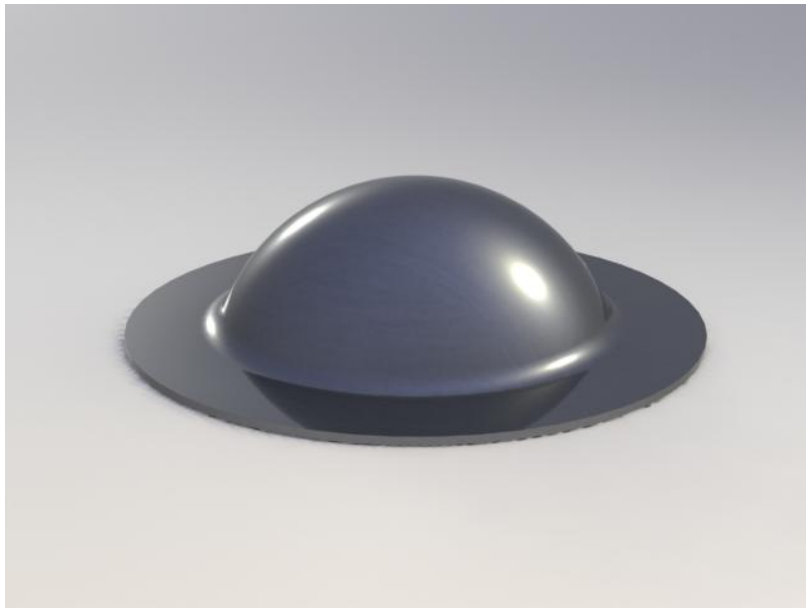
In queste immagini che si riferiscono a una sezione delle infinite possibili del pezzo (ricordiamo che il finito di forma emisferica non presenta parti angolari), i grani austenitici risultano molto incruditi nella sezione di piega, con una netta diversità di forma rispetto alla parte piana del provino. A bassi ingrandimenti, come ad alti ingrandimenti, si apprezzano le classiche bande di deformazione e la direzione preferenziale del grano. Nelle parti piegate (foto di destra), si apprezza un notevole incrudimento localizzato, segno che il materiale si è “stirato” in forma puntuale (l’attacco metallografico risulta più marcato).

Una lieve differenza si apprezza ancora una volta tra struttura centrale e struttura corticale della sezione (si noti l’ingrandimento a 25 X, foto di destra).

5.4 – PROVA 470 LI vs 304

5.4.1 – SUL CAMPO

L'acciaio inossidabile di nuova generazione, 470 LI ferritico, è stato confrontato con l'AISI 304 con la stessa procedura operativa delle altre prove. Questa volta lo spessore di confronto è stato 1,2 *mm*. Dato che la prova che ha visto a confronto l'austenitico e il ferritico 444 è stata ricca di spunti preziosi e dati significativi, si è deciso di procedere alla comparazione dei materiali suddetti utilizzando lo stesso prodotto. Ancora una volta quindi è stato imbutito il lavello compatto semisferico (335 *mm* di diametro) della profondità di stampaggio di 110 *mm*, ma con lo spessore dei nuovi metalli campione. Per tutte le specifiche sulla forma del prodotto e sulle peculiarità della geometria, si rimanda al paragrafo precedente.



5.56 - Rappresentazione grafica del manufatto lavello lavamani.

Il prodotto, ancora una volta, è stato ottenuto grazie alla pressa Cavenaghi-Rodolfi da 650 tonnellate, a doppio effetto e idraulica in modo da assicurare la pressione dovuta garantendo una velocità moderata .

Lo stampo utilizzato è il medesimo della prova precedente (composto da una matrice di ghisa e da un punzone in materiale composito).

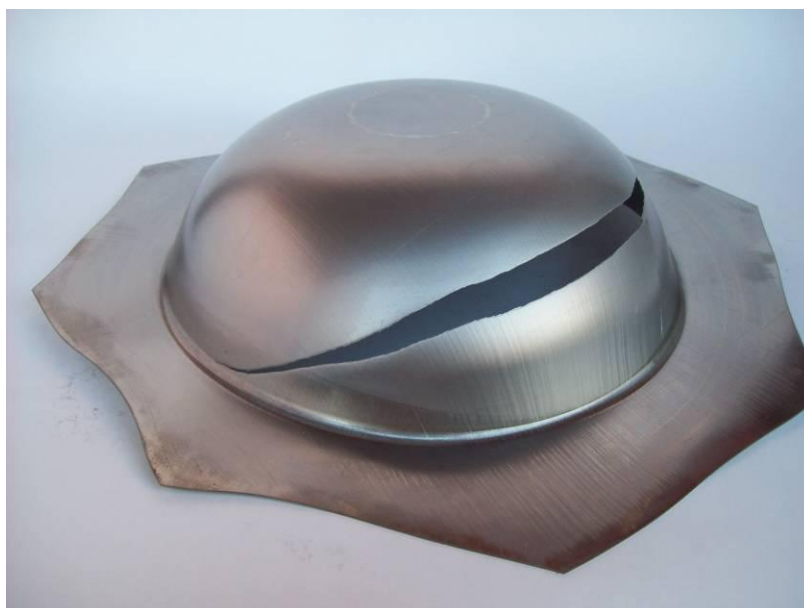
I parametri impostati sono gli stessi del test sul 444 a differenza della lubrificazione:

- forza del punzone e del premi-lamiera: 400 tonnellate;
- velocità di esecuzione massima;
- lubrificazione minima con olio
(dato lo spessore inferiore di 3 decimi si è ritenuto più opportuno questo lubrificante).

Di seguito si riportano le fotografie delle vaschette ottenute con i suddetti parametri.



5.57 - Prodotto ottenuto in austenitico.



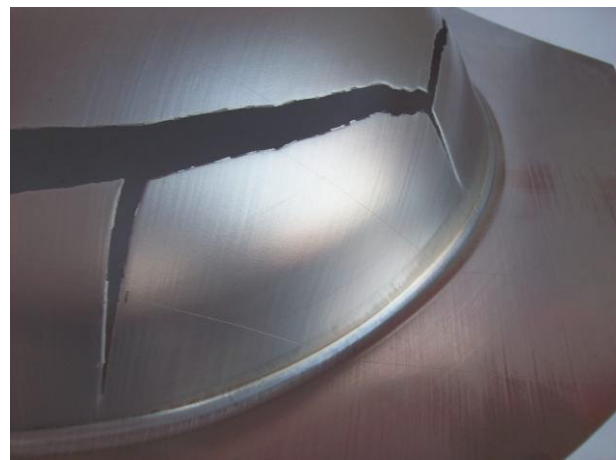
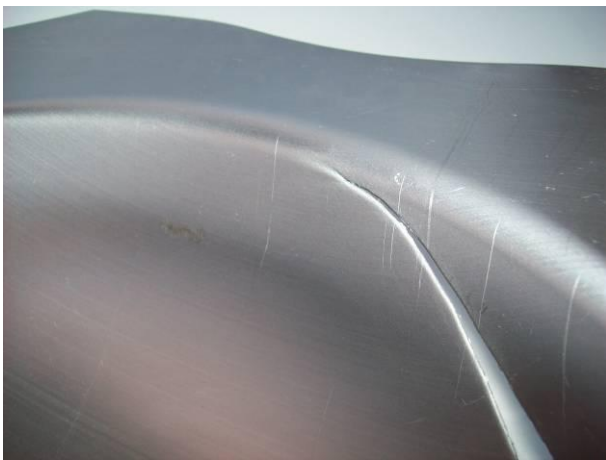
5.58 - Prodotto ottenuto in ferritico.

Come per le tre precedenti prove, anche in questo caso il prodotto in AISI 304 risulta conforme e privo di difetti.

Il pezzo ottenuto in ferritico 470 LI, invece, presenta una frattura scaturita ad una profondità di imbutitura di circa 103 mm. Anche in questo caso, come con il test sul 444, le cricche si sono sviluppate partendo dalla sezione di raccordo tra flangia e corpo semisferico; la propagazione poi è avvenuta analogamente al ferritico precedente, ma in maniera meno marcata.

Con i parametri impostati *ad hoc* per l'austenitico, non si è potuto ottenere il medesimo prodotto con il ferritico 470 LI.

Di seguito si riportano dei particolari del pezzo in 470 LI.



5.59 - Particolari della zona di rottura del manufatto ottenuto in ferritico.

5.4.2 – STUTTURA METALLOGRAFICA

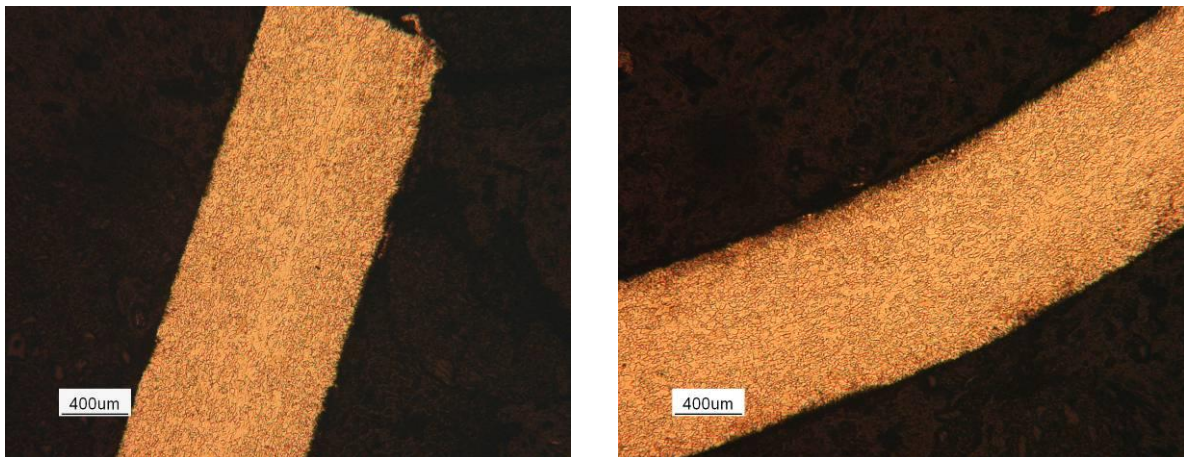
Come già specificato in precedenza, per la prova del ferritico 444, le zone più deformate e rischiose sono quelle di interfaccia flangia - corpo imbutito. Anche in questo caso quindi, sono state scelte due sezioni analoghe alla precedente prova: un provino è stato ricavato nella zona limitrofa alla frattura, mentre un provino è stato preso in una zona non interessata dalla rottura. Per l'austenitico invece è stato ricavato un solo provino in una sezione casuale. Per una rappresentazione grafica delle sezioni si rimanda al paragrafo precedente.

Nei profili di interesse sono stati ricavati i provini metallografici centrati in due punti della curvatura per un totale di due provini per il ferritico e uno per l'austenitico.

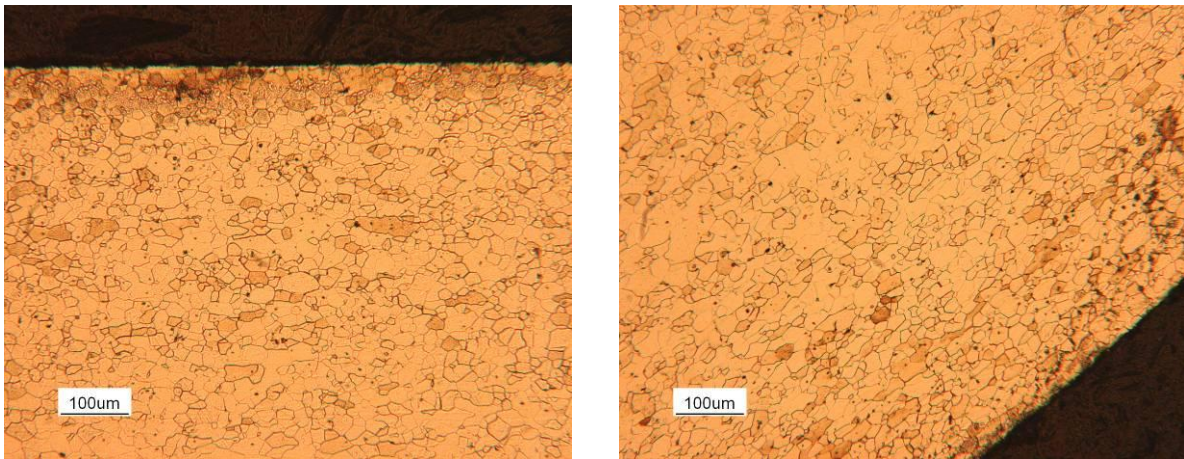
Queste sezioni sono state preparate con le stesse modalità dei test precedenti (inglobatura, passaggio alle carte e ai panni) e in seguito sono state attaccate con la consueta gliceregia per evidenziare la struttura.

Di seguito si riportano alcuni degli ingrandimenti più significativi delle microstrutture osservate al microscopio ottico di entrambi i materiali.

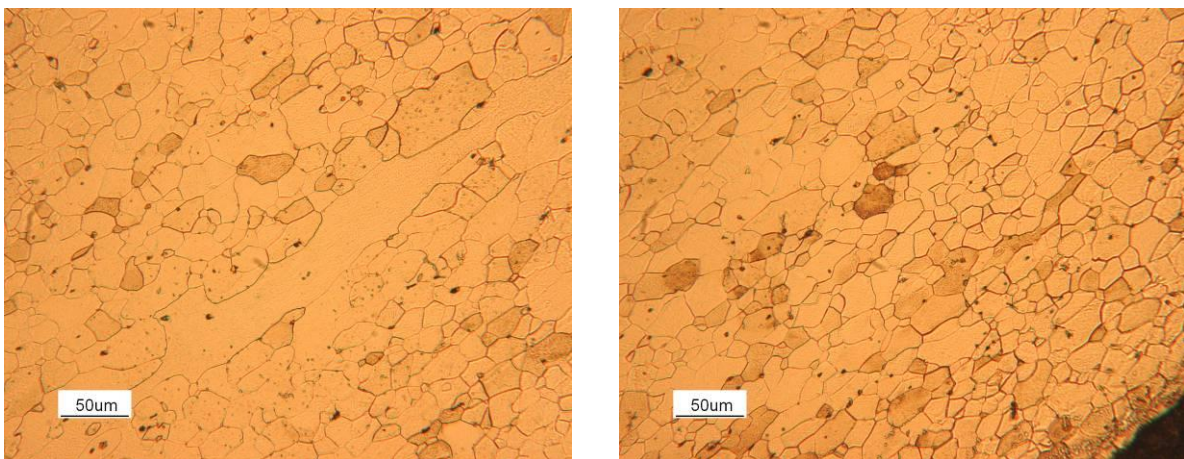
470 LI – sezione lontana dalla frattura



5.60 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.61 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana corticale e della sezione di piega corticale.



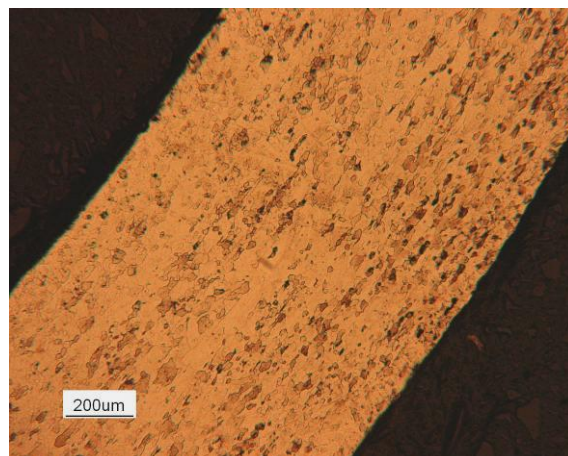
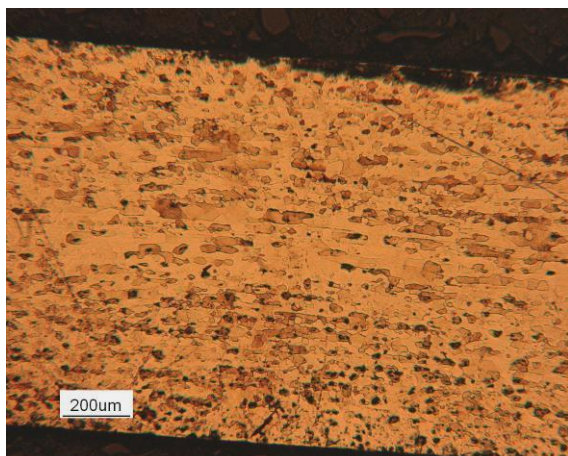
5.62 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega corticale.

La struttura si presenta totalmente confrontabile con i ferritici sopraccitati (pressoché equiassica).

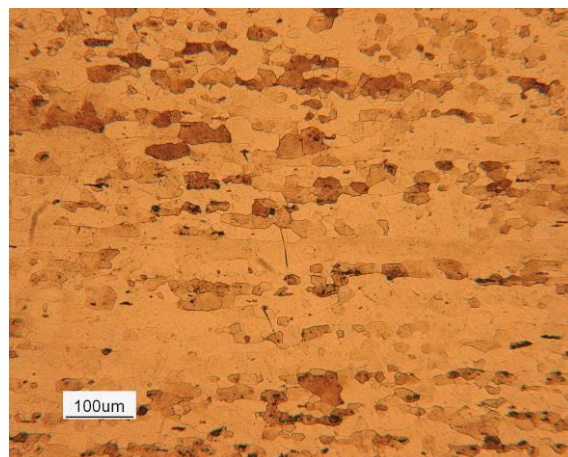
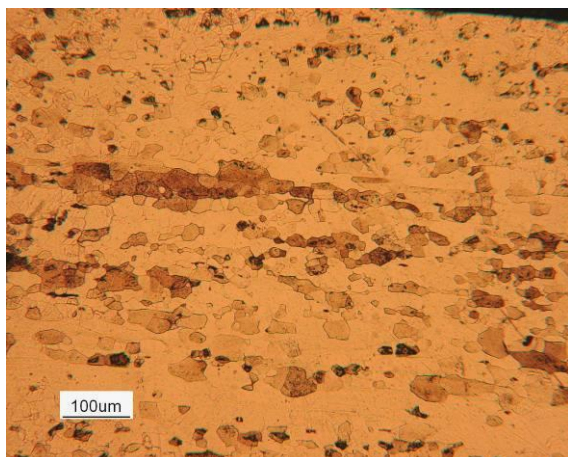
Si nota ancora una volta un incrudimento distribuito tra la zona piana e la zona di piega. In questa parte del prodotto il materiale si è auto alimentato con successo, inibendo la deformazione localizzata nella zona più sollecitata, che avrebbe portato a rottura il materiale. A bassi ingrandimenti infatti si nota come l'attacco chimico abbia evidenziato ogni zona del provino con la stessa intensità.

Un po' più marcata invece è la differenza tra la zona di piega superficiale e la zona di piega centrale. Ad alti ingrandimenti si nota un incrudimento maggiore nella parte corticale.

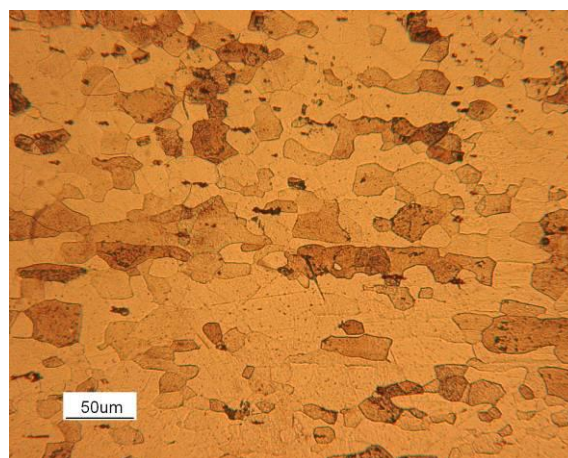
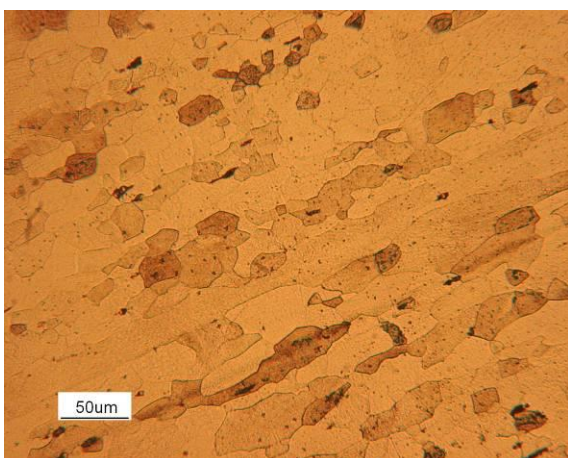
470 LI – sezione prossima alla frattura



5.63 - Micrografie ottenute a 50 X.



5.64 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



5.65 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione di piega centrale e della sezione di piega corticale.

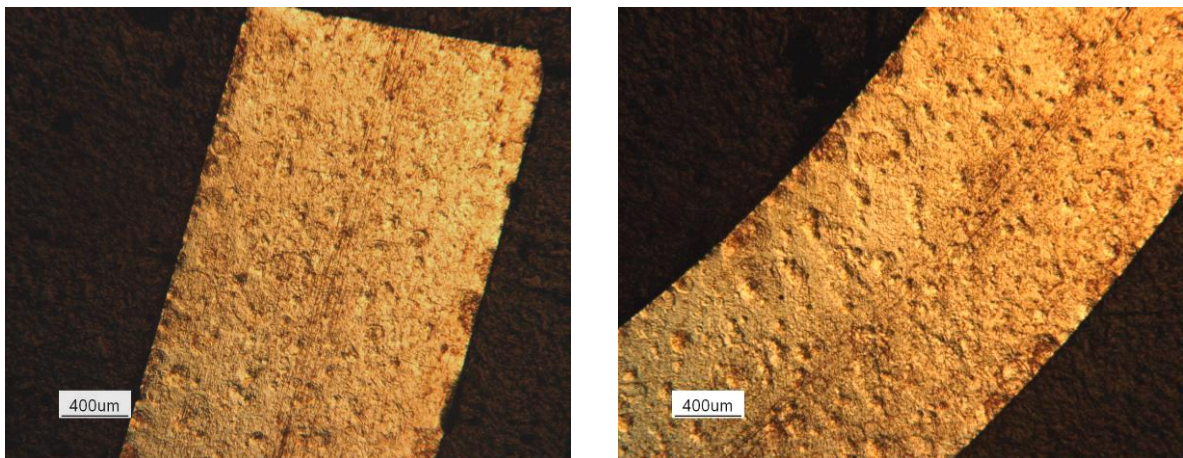
La sezione, a cui le immagini sopra si riferiscono, è caratteristica della zona prossima alla sezione. I grani dell'acciaio si presentano ancora una volta equiassici e non particolarmente deformati in una direzione. L'incrudimento quindi non è localizzato ma si presenta in modo distribuito a causa delle tensioni che il materiale ha sviluppato per auto alimentarsi.

Si nota comunque un incrudimento maggiore rispetto alla sezione lontana dalla frattura, segno che il materiale era prossimo a subire una deformazione localizzata a cui non avrebbe potuto resistere (infatti nella sezione adiacente si è verificata frattura).

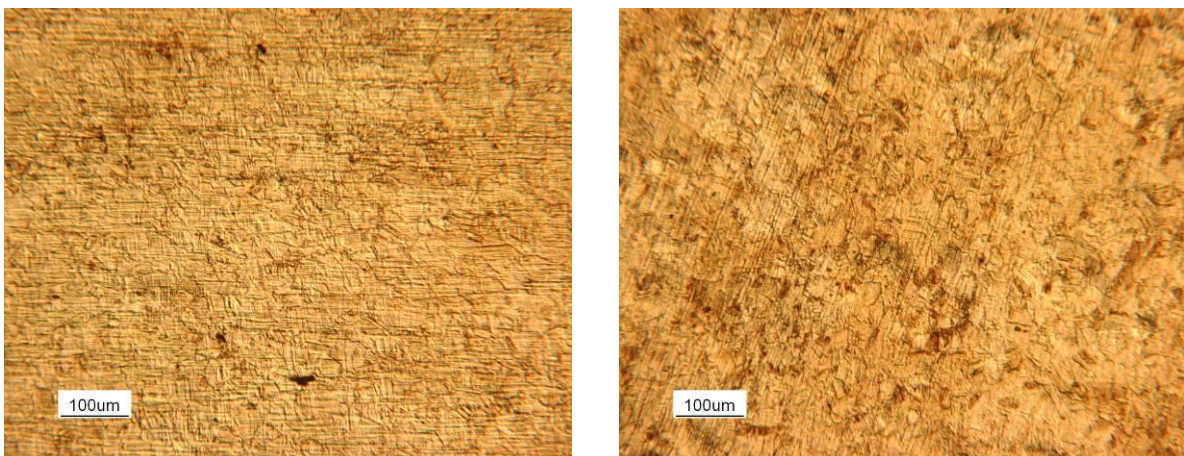
Ancora una volta si riscontra, nella zona superficiale, una struttura con grani più fini rispetto alla zona centrale.

Passiamo ora a valutare il prodotto austenitico.

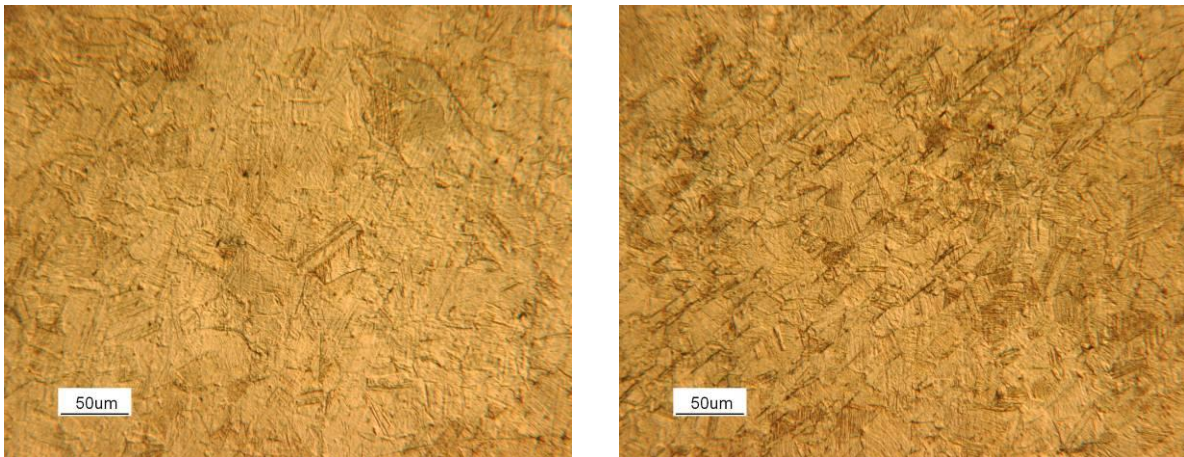
AISI 304



5.66 - Micrografie ottenute a 25 X.



5.67 - Micrografie ottenute a 100 X della sezione piana e della sezione di piega.



5.68 - Micrografie ottenute a 200 X della sezione piana e della sezione di piega.

Il grano austenitico, in queste immagini che si riferiscono ad una sezione delle infinite possibili del pezzo, risultano molto incrudite nella sezione di piega, con una netta diversità di forma dei grani rispetto alla parte piana del provino. Si notano infatti nelle micrografie a destra, dei grani molto più schiacciati e deformati, con delle bande di deformazione molto più marcate rispetto alle immagini a sinistra riferite alla sezione piana. L'attacco infatti è risultato più efficace nelle zone a maggiore deformazione, segno che l'incrudimento risulta più marcato. Il materiale quindi non ha avuto bisogno di auto alimentarsi in quanto possiede tutte le caratteristiche necessarie per sopportare una deformazione spinta nei punti più sollecitati.

Capitolo 6

PROVE DI DUREZZA

6.1 – INTRODUZIONE

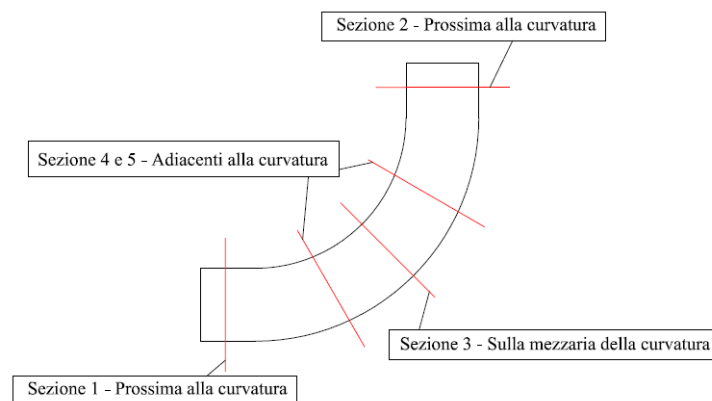
In questo capitolo si cercherà di approfondire la teoria secondo cui gli acciai inossidabili ferritici possiedono intrinsecamente un diverso modo di deformarsi, rispetto agli austenitici.

Se le micrografie esposte nel capitolo precedente hanno fornito delle valutazioni pressoché qualitative, nella trattazione che segue si sono voluti indagare dei dati più quantitativi.

Il punto centrale della ricerca è stato quello di cercare un parametro che possa fornire indicazioni sull'incrudimento puntuale delle sezioni di maggiore interesse. Si è deciso pertanto di eseguire delle prove di microdurezza nei punti più significativi di ogni prodotto realizzato in ferritico e in austenitico, per poter confrontare i dati ottenuti e di conseguenza trarre eventuali indicazioni utili a inquadrare il problema.

Per ogni materiale si sono preparati i campioni delle sezioni più significative; ogni profilo di durezza individuato in una singola sezione è stato poi valutato in rapporto a un determinato profilo, chiamato "base", scaturito cioè da microdurezze eseguite su una parte non interessata da deformazione.

In ogni campione di acciaio sono state scelte cinque sezioni distribuite sulle caratteristiche zone di piega. Di seguito si riportano due immagini nelle quali si nominano le zone scelte nelle due tipologie di provini che si studieranno nel seguito.



6.1 – Schema delle nomenclature delle sezioni individuate nel provino

L'immagine di sinistra si riferisce ai campioni estratti dalle zone di piega tra flangia e corpo del prodotto; la foto di destra invece rappresenta la zona di raccordo generata dal punzone dell'imbutitura (questa zona quindi sarà indagata solo nelle prove del 439 M e del 441 LI, non essendo presenti nel prodotto testato per gli altri ferritici).

Per poter trarre delle indicazioni utili, si è proceduto con i seguenti criteri:

- prove di microdurezza per ogni sezione del campione ferritico in esame; elaborazione dei dati e inserimento di questi in un grafico riassuntivo dell'intero campione ferritico;
- prove di microdurezza per ogni sezione del campione austenitico in esame; elaborazione dei dati e inserimento di questi in un grafico riassuntivo dell'intero campione austenitico;
- analisi e confronto dei dati relativi ad una determinata zona del prodotto;
- ripetizione del suddetto iter procedurale per tutte le zone caratteristiche del prodotto;
- analisi critica dei dati di microdurezza relativi all'intero prodotto in esame;

Per ogni prova di imbutitura si sono ripetuti i suddetti passaggi.

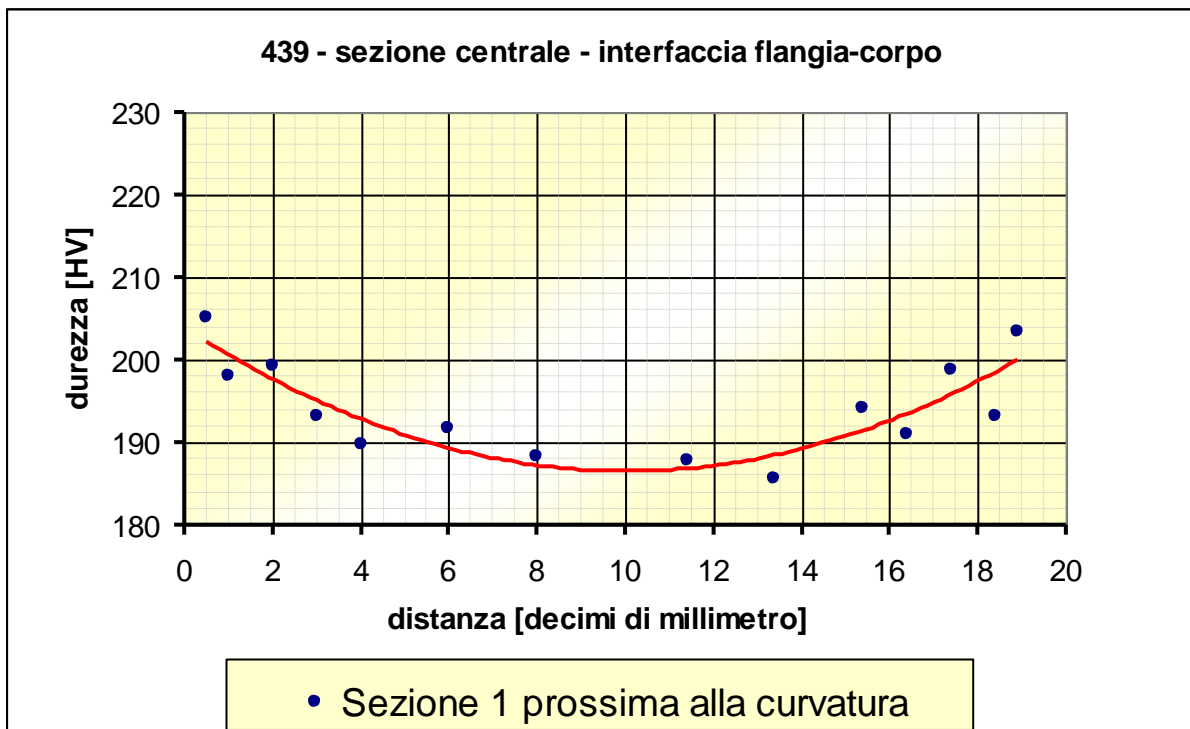
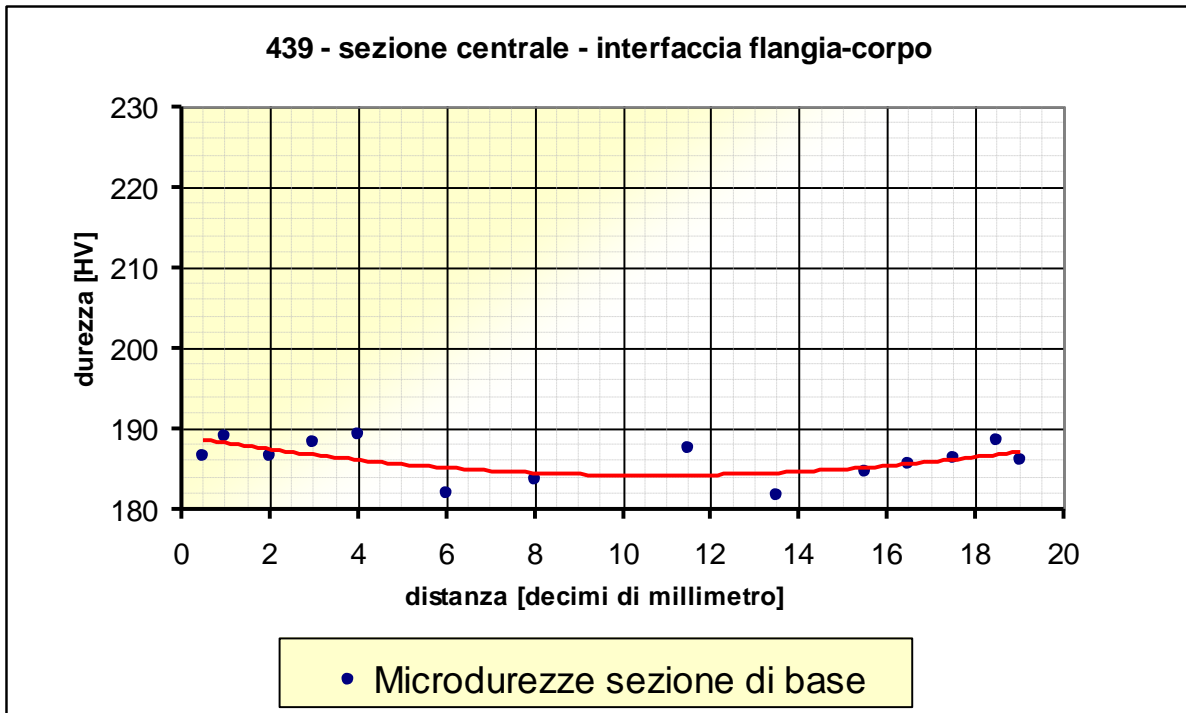
Per non appesantire l'elaborato di grafici e informazioni si è deciso di inserire i dati relativi a ogni sezione solo nell'esposizione della prima prova del ferritico 439 M. Per le altre prove si è riportato esclusivamente l'immagine riassuntiva del campione studiato, la quale è più che sufficiente per valutare eventuali differenze e peculiarità.

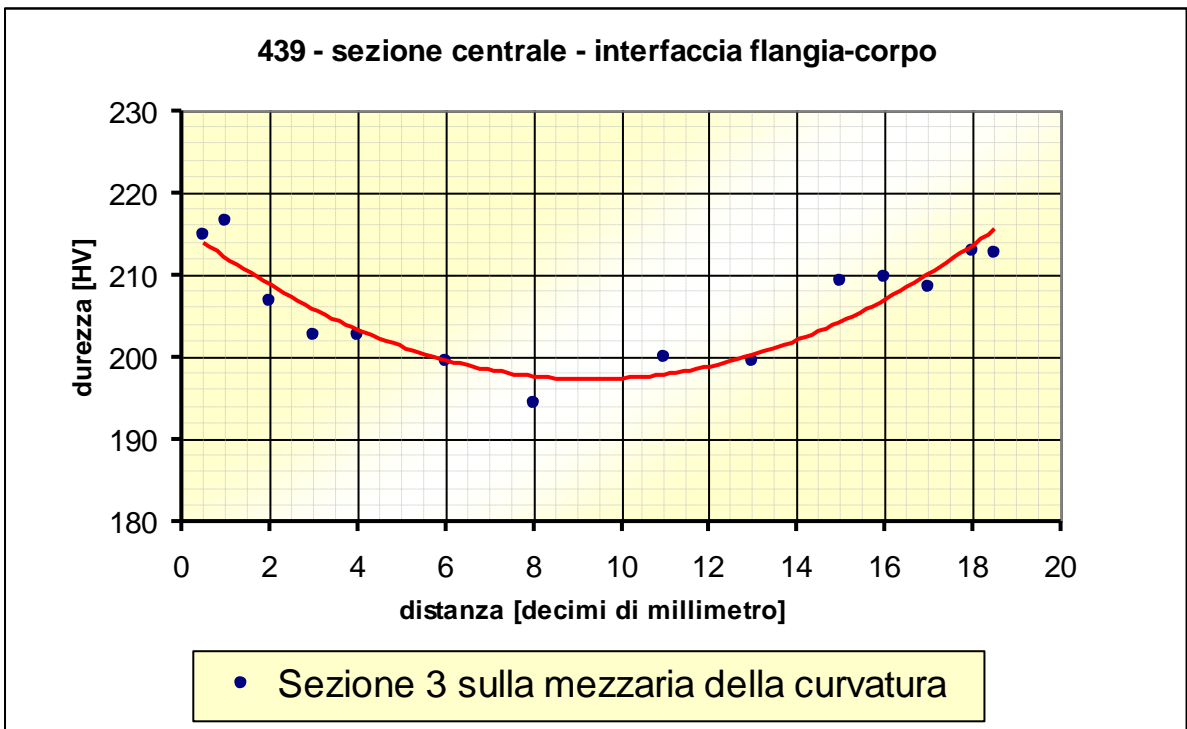
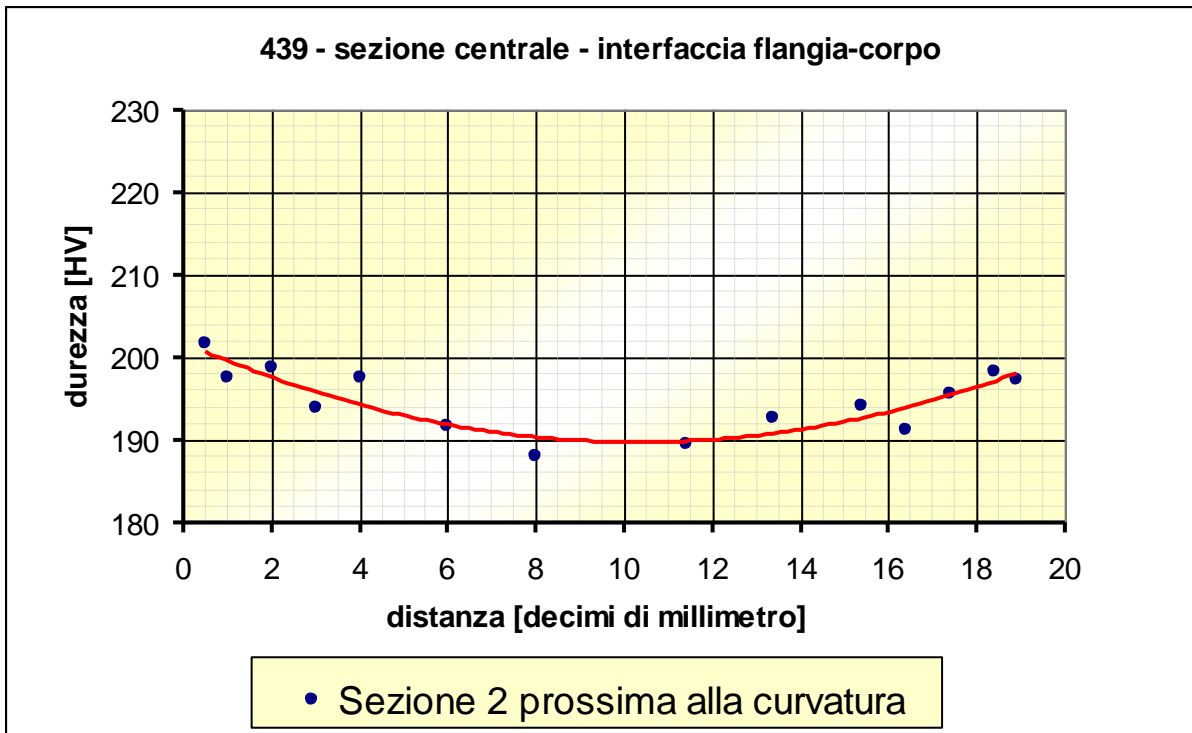
6.2 – PRIMA PROVA – VASCA IN 439M E 304

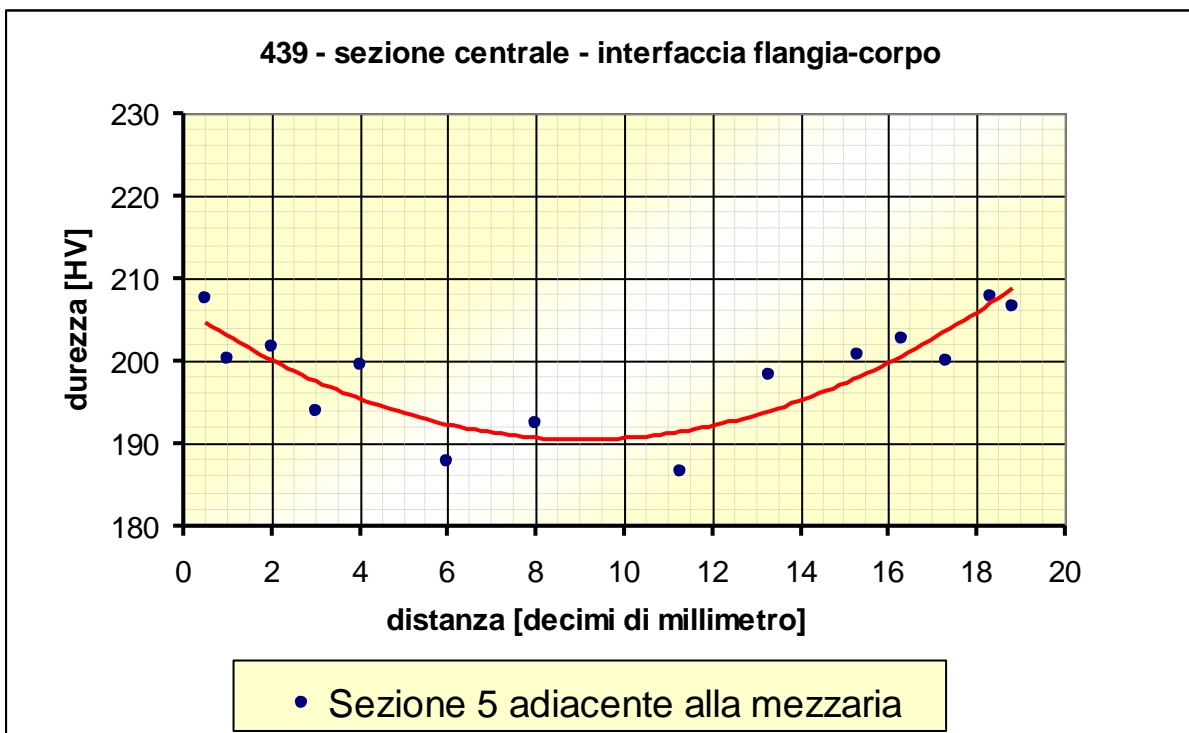
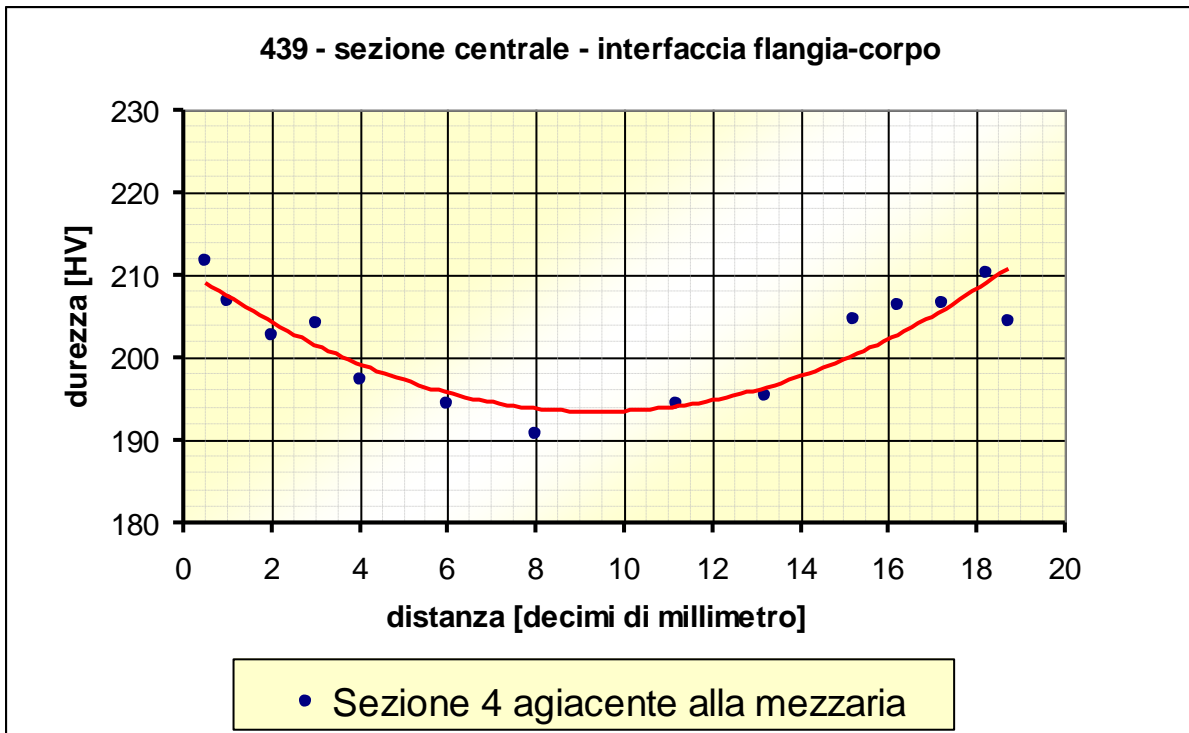
Parte centrale – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

439 M

Di seguito si riportano i grafici relativi a tutti i profili riscontrati in ogni sezione presa in considerazione.

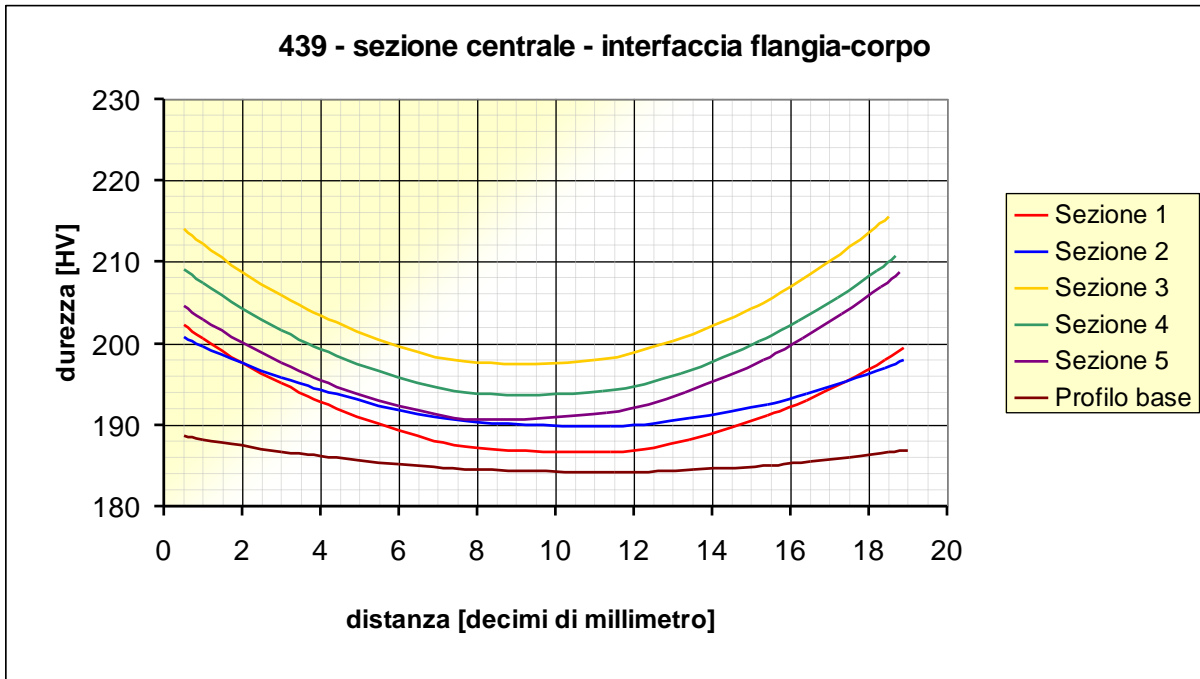






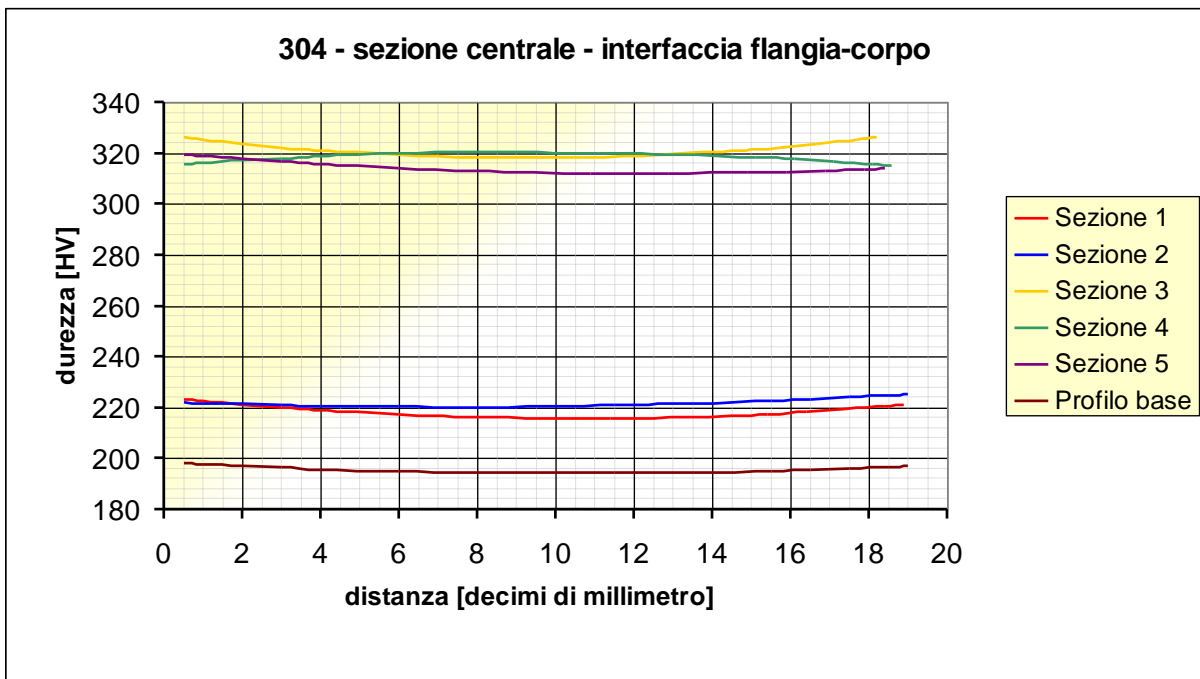
Si vuole ribadire che nel seguito della trattazione si è evitato di inserire i grafici relativi a tutte le sezioni. I grafici riassuntivi che raccolgono le linee di tendenza trovate sono quindi privi delle stime puntuali di durezza, che renderebbero confusa l'interpretazione dell'immagine. Va però ricordato che le linee continue che sono state evidenziate non hanno in alcun modo valore statistico, ma sono puramente di carattere matematico per una più facile visualizzazione dei risultati.

Di seguito si riporta il grafico riassuntivo relativo alla parte centrale del prodotto in 439 all'interfaccia flangia-corpo imbutito.



AISI 304

Si riporta il grafico relativo alla sezione sopracitata.



Prima di valutare i grafici riassuntivi è bene commentare quelli relativi alle singole sezioni. Si nota come i dati puntuali assumano valori oscillanti intorno a un valor medio. La linea di tendenza offre una visione facilitata di tale media.

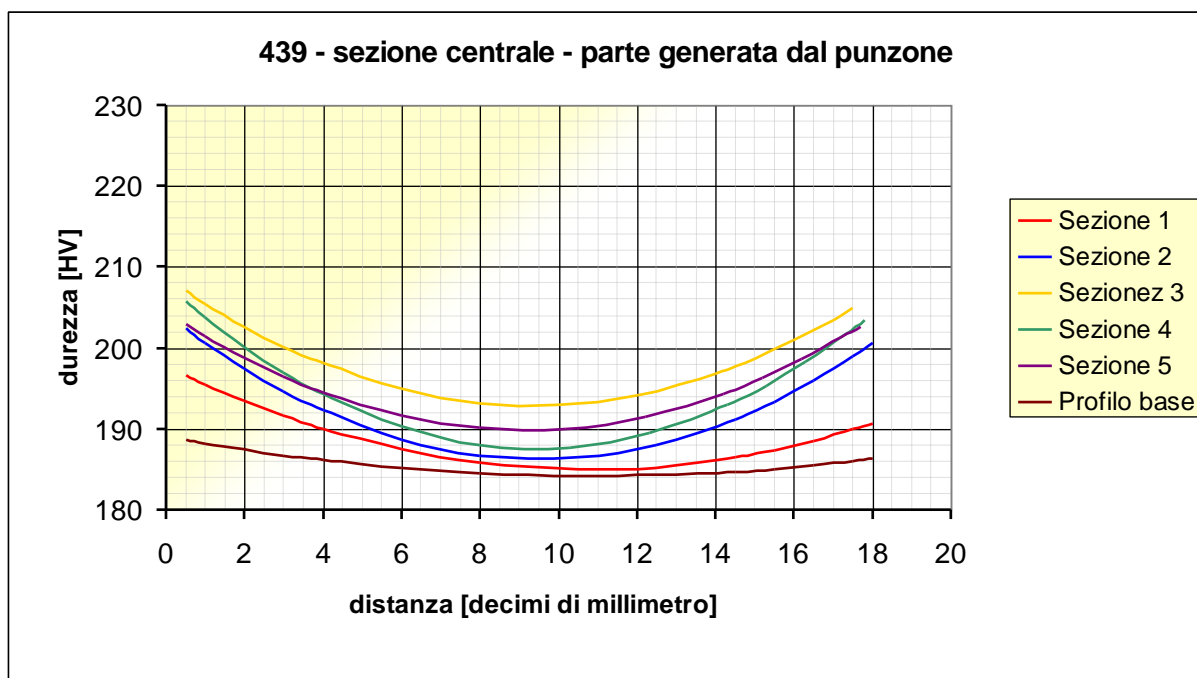
Osservando invece i due grafici riassuntivi relativi al 439 M e al 304 si notano delle sostanziali differenze. Innanzitutto il valore assoluto delle micro durezze risulta differente; ciò è da considerarsi normale in quanto le durezze dei materiali di partenza sono differenti (si noti il profilo base di entrambi i materiali).

La peculiarità che è bene far notare, è la diversa distribuzione dei valori delle microdurezze nelle varie sezioni. Nel ferritico queste risultano simili a livello di valore assoluto, quindi presentano un incremento di incrudimento sostanzialmente uguale rispetto al profilo base. Per l'austenitico 340 le considerazioni sono opposte. La sezione 1 e la sezione 2 si riferiscono a durezze di poco superiori al profilo base, mentre le sezioni centrate sulla curvatura presentano un notevole incremento di micro durezza.

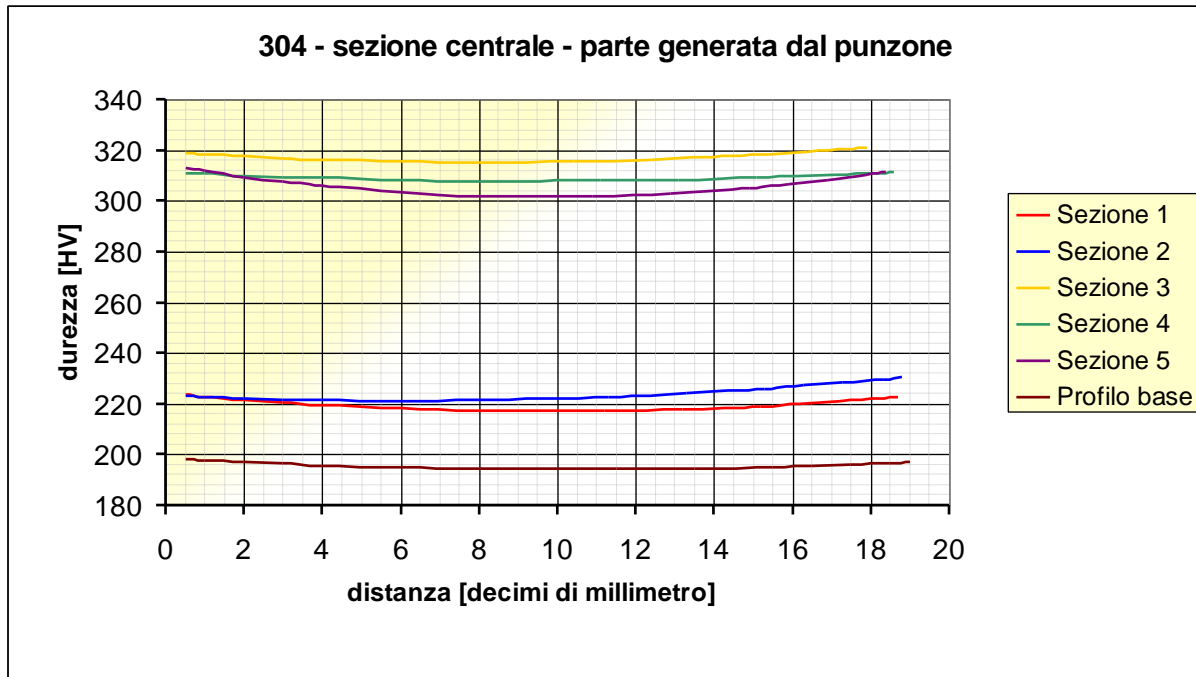
Quindi, mentre il ferritico presenta un incrudimento generalizzato che interessa allo stesso modo le sezioni limitrofe alla piega, l'austenitico invece coinvolge nella deformazione solo una parte limitata di prodotto.

Parte centrale – generata dal punzone

439 M



AISI 304



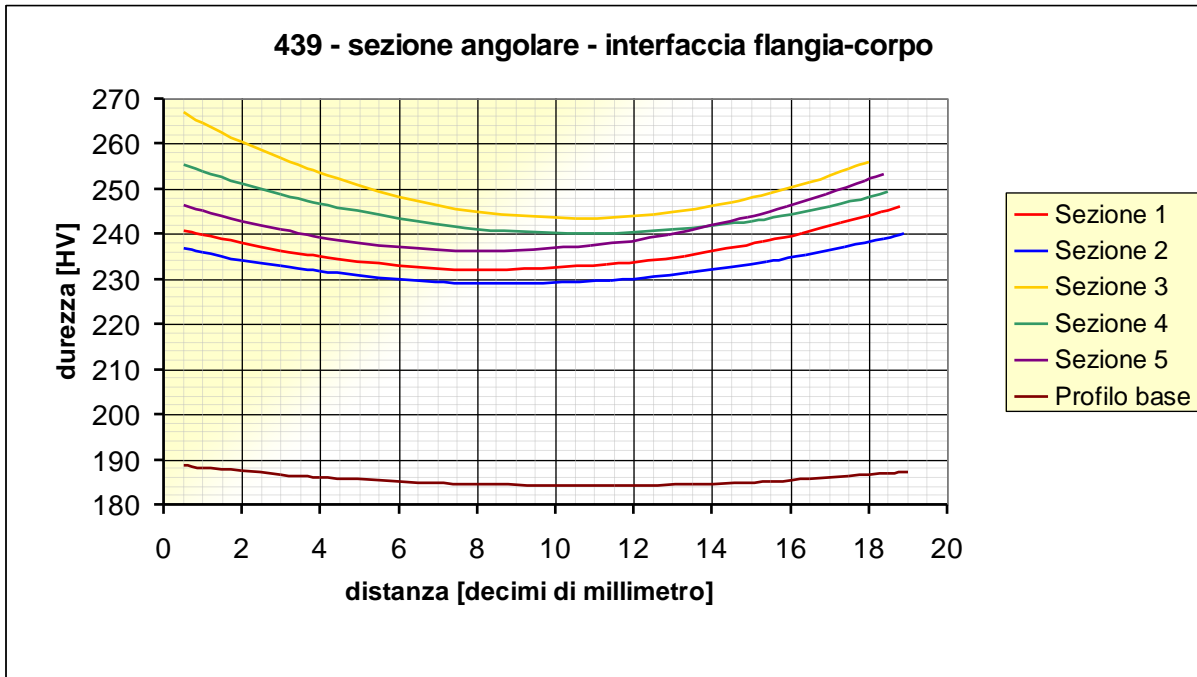
Le considerazioni sui grafici presentati sono sostanzialmente le stesse di quelle esposte per la parte del prodotto riguardante l'interfaccia flangia-corpo del pezzo. Anche in questo caso l'incrudimento del ferritico risulta generalizzato e uniforme (non si notano marcate differenze sui valori di durezza delle varie sezioni); d'altro canto, l'austenitico presenta un evidente incremento della durezza puntuale nei profili di piega, mentre i valori nelle zone adiacenti sono equiparabili al profilo base.

Il 439 M quindi ha provveduto ad auto alimentarsi mentre il 304 è stato più incline a deformarsi puntualmente, stirandosi ed assottigliandosi.

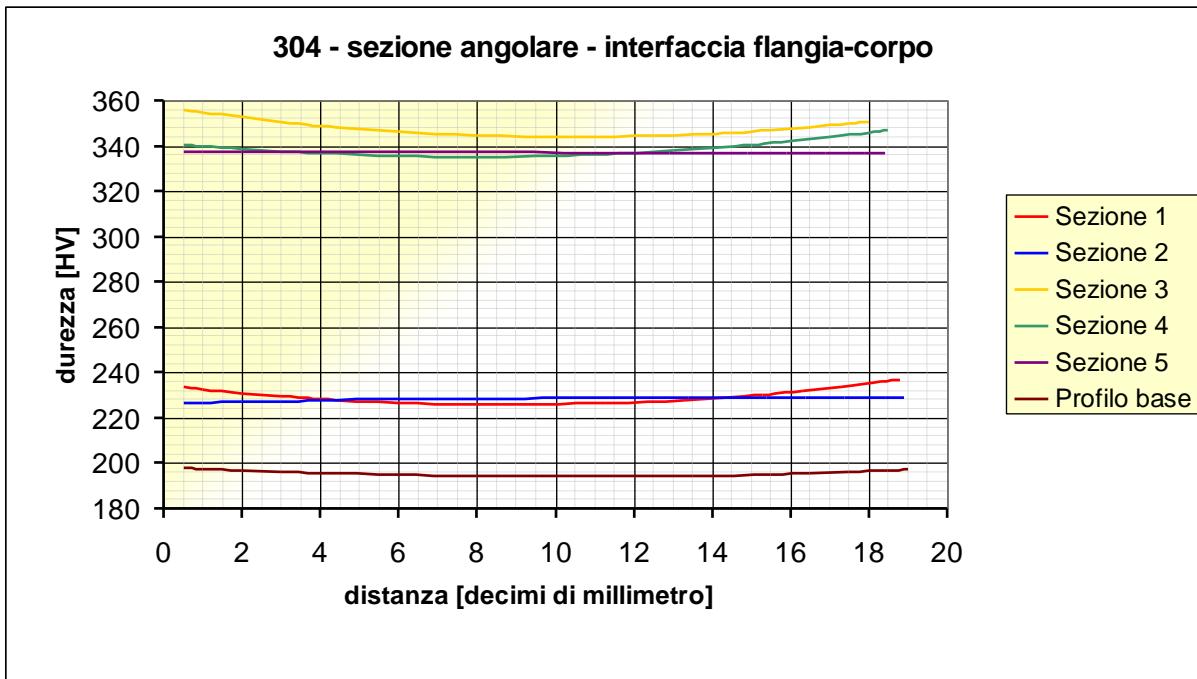
Si notino i dati di picco di entrambi i grafici. Nei due casi risultano più bassi rispetto alla sezione valutata precedentemente, in quanto la deformazione generale imposta è stata più bassa (raccordo meno marcato).

Parte angolare – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

439 M



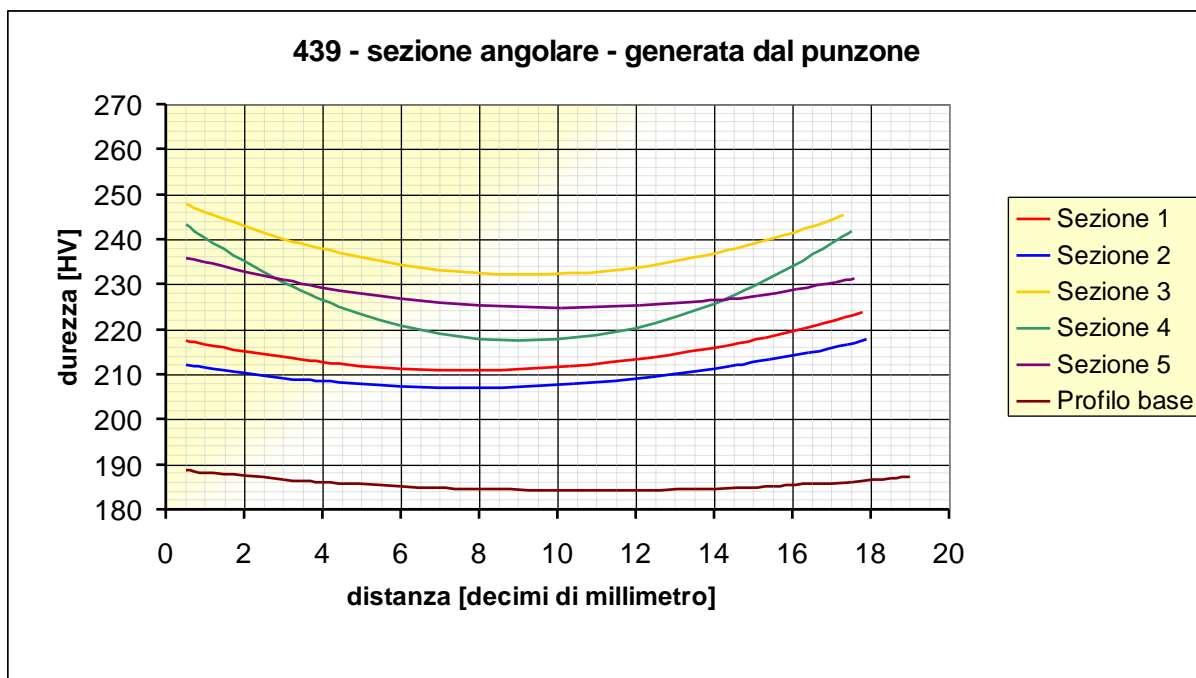
AISI 304



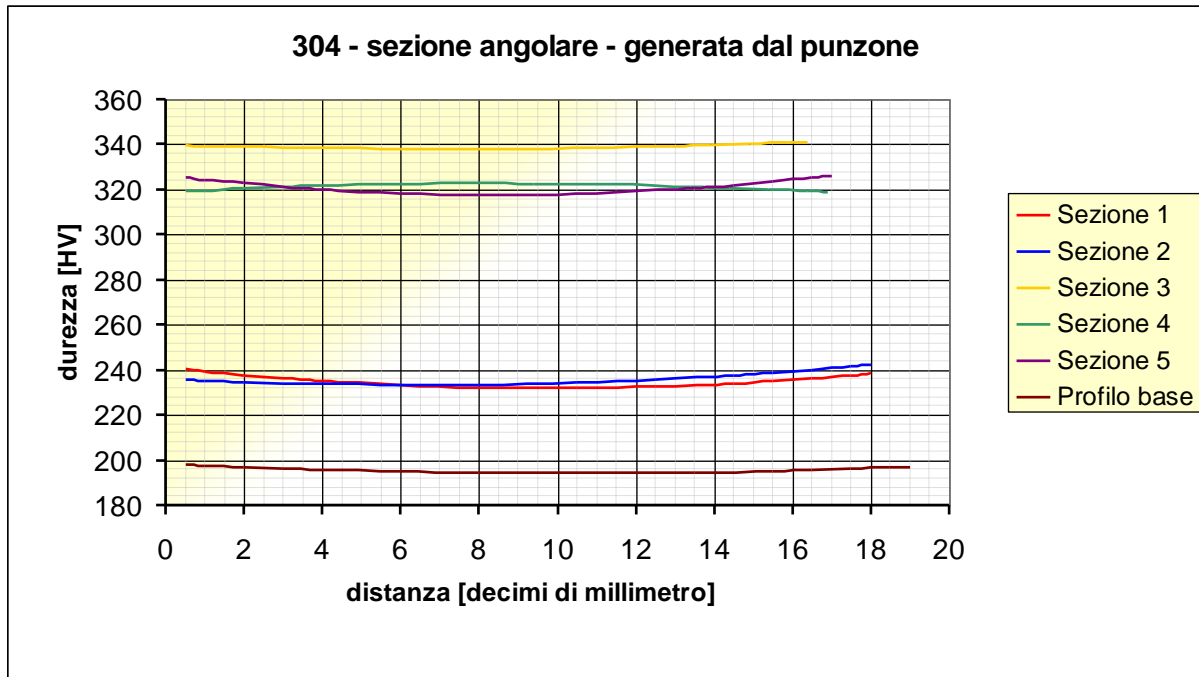
Come già compreso, si può notare come il ferritico si sia incrudito uniformemente. Ciò non significa che non abbia incrementato le sue caratteristiche di durezza: si osservi come tutte e cinque le sezioni si aggirino in valori compresi tra i 230 e i 260 HV contro un profilo base di circa 190 HV. Discorso opposto per il 304. Si evidenzia come le sezioni più lontane dal punto di maggiore deformazione si siano poco incrudite (intorno ai 230 HV), mentre le sezioni coinvolte nel processo di piega abbiano incrementato notevolmente l'incrudimento.

Parte angolare – generata dal punzone

439 M



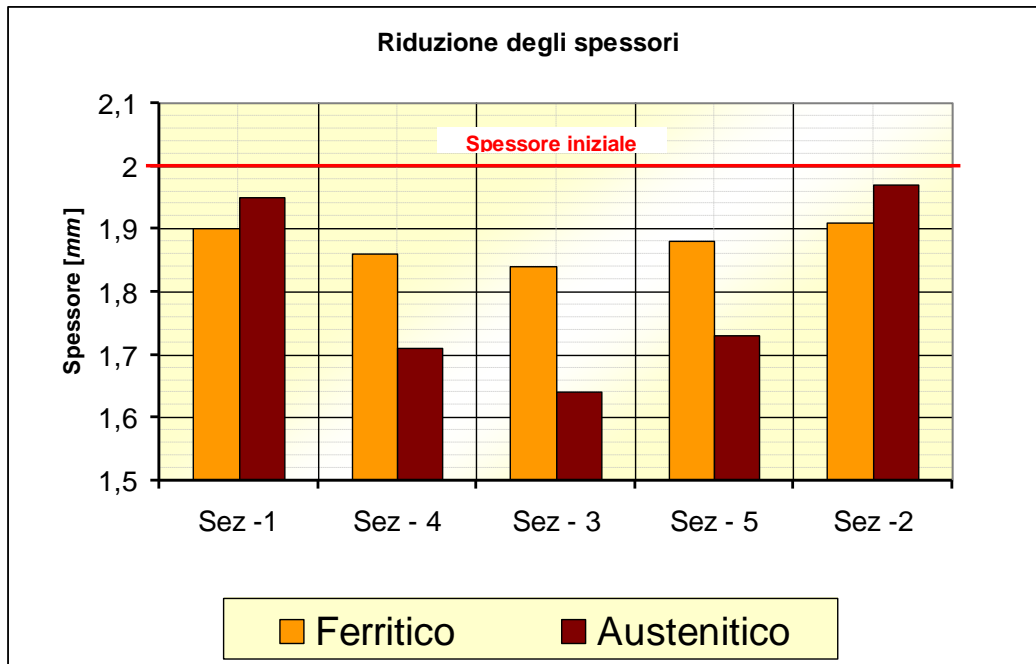
AISI 304



Le considerazioni evidenziabili dall'osservazione dei suddetti grafici sono le stesse possibili per le parti sopra citate. Si noti ancora una volta come i valori massimi di durezza siano più bassi rispetto alle parti di piega più gravose.

Per quanto riguarda quindi il prodotto vaschetta per alimenti, si è riscontrata una profonda diversità tra ferritico e austenitico. La modalità di deformazione nei due tipi di inossidabile è risultata essere diametralmente opposta. Da una parte l'austenitico è più incline a lasciarsi deformare localmente e per stiramento; dall'altra il ferritico necessita di poter scorrere all'interno dello stampo. I dati ottenuti confermano questa tendenza.

Tale tendenza è confermata dalle variazioni di spessore riscontrati sulle varie sezioni, come da diagramma di seguito riportato:



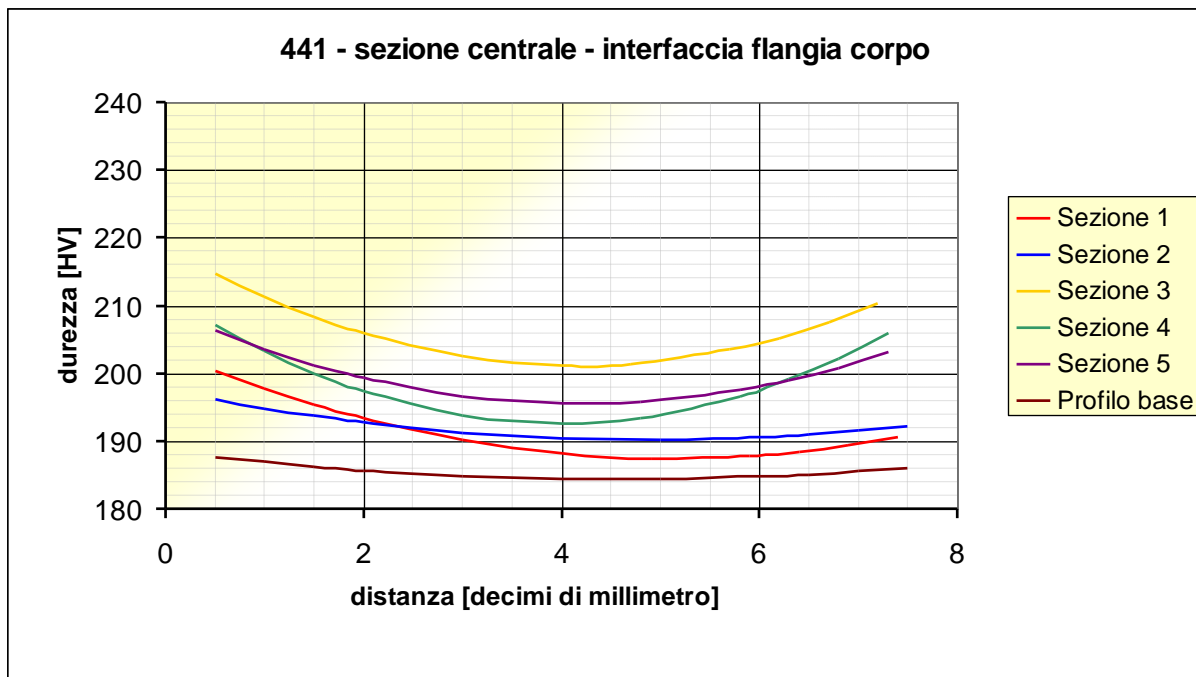
Il grafico si riferisce alle misure di spessore eseguite sulle diverse sezioni della zona angolare, ovvero sullo spigolo presente al fondo del prodotto finito di una delle vaschette rettangolari. Tale andamento, però, è stato riscontrato più in generale su tutte le sezioni di tutti i prodotti ottenuti. Si nota come l'austenitico AISI 304 ha dato origine ad una maggiore riduzione dello spessore nella zona maggiormente deformata, in ragione della tendenza allo "stiramento", piuttosto che allo "scorrimento".

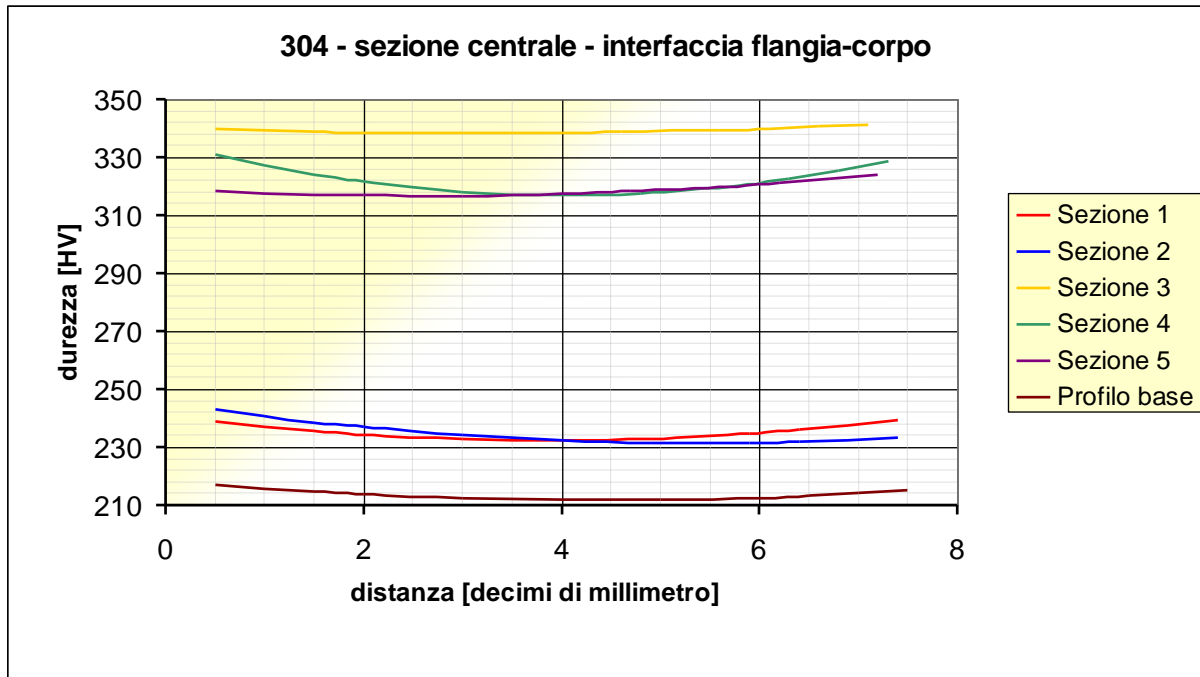
6.3 – SECONDA PROVA – LAVANDINO INDUSTRIALE IN 441 LI E 304

In accordo con la prova precedente, si è provveduto ad individuare i profili di durezza in tutte le zone principali, in entrambe le tipologie di materiali. Si mantiene nel seguito lo schema logico e organizzativo già utilizzato nell’elaborato.

Parte centrale – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

441 LI



AISI 304

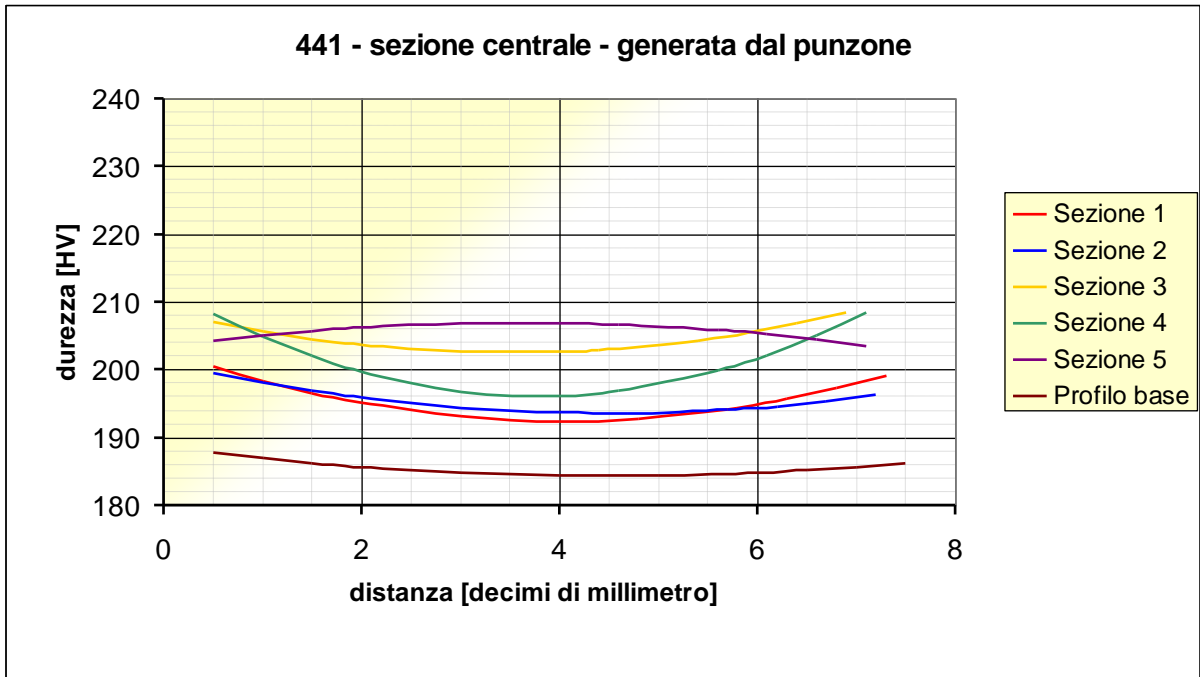
La chiave di lettura dei suddetti grafici è la stessa utilizzata per la prova precedente. Valutando i profili di durezza nelle diverse sezioni si può stimare l'incrudimento all'interno del campione in esame.

Anche in questo caso il grafico relativo al ferritico differisce marcatamente da quello austenitico. Le curve relative al 441 LI risultano pressoché schiacciate: non sembra che il fattore "posizione della sezione" influisca sull'incrudimento. Il materiale quindi ha tentato di auto alimentarsi incrementando la durezza in modo uniforme. Inoltre si nota come tutte le durezze non differiscono dal profilo base, sintomo che la deformazione non è stata proibitiva per l'acciaio.

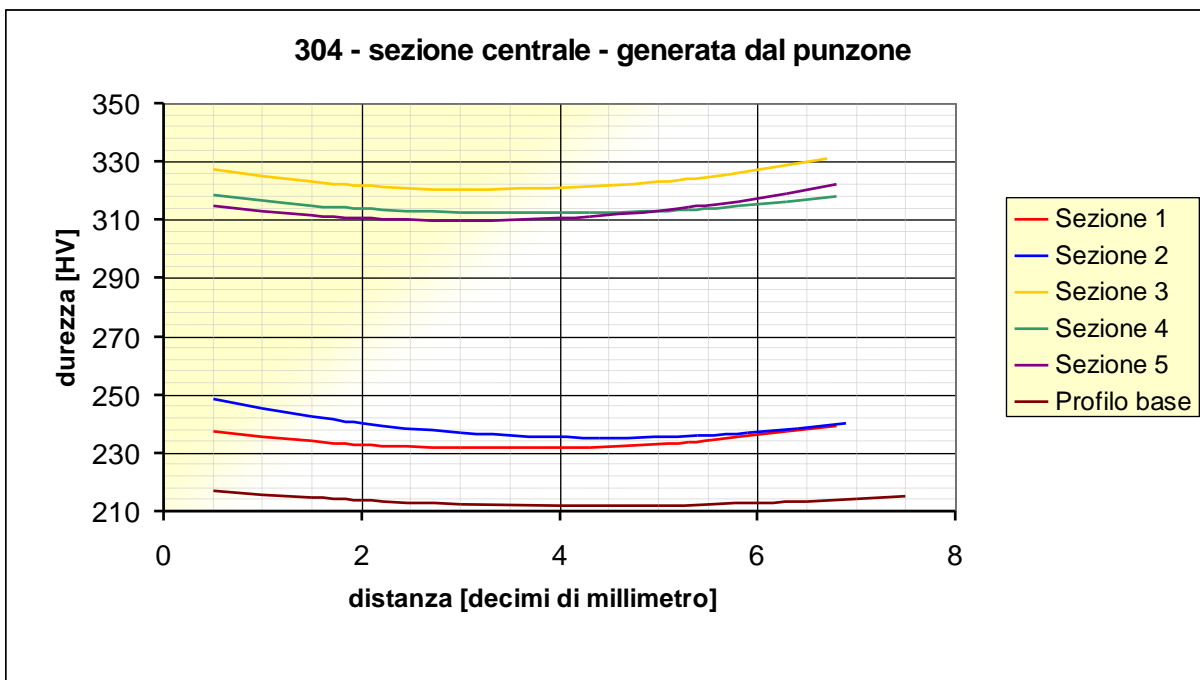
Il grafico relativo all'austenitico, mostra invece una tendenza diversa di questo materiale: le sezioni 3, 4 e 5 (sezioni individuate nel punto di maggiore deformazione) presentano una durezza, e quindi un incrudimento, spiccatamente superiore alle altre sezioni. L'austenitico quindi si è stirato in maniera molto puntuale, non interessando cioè le sezioni limitrofe.

Parte centrale – generata dal punzone

441 LI



AISI 304



Le immagini sopra riportate sono relative alla zona generata dal punzone e quindi aventi un raggio di curvatura più dolce e una deformazione imposta leggermente più bassa rispetto alla zona precedente.

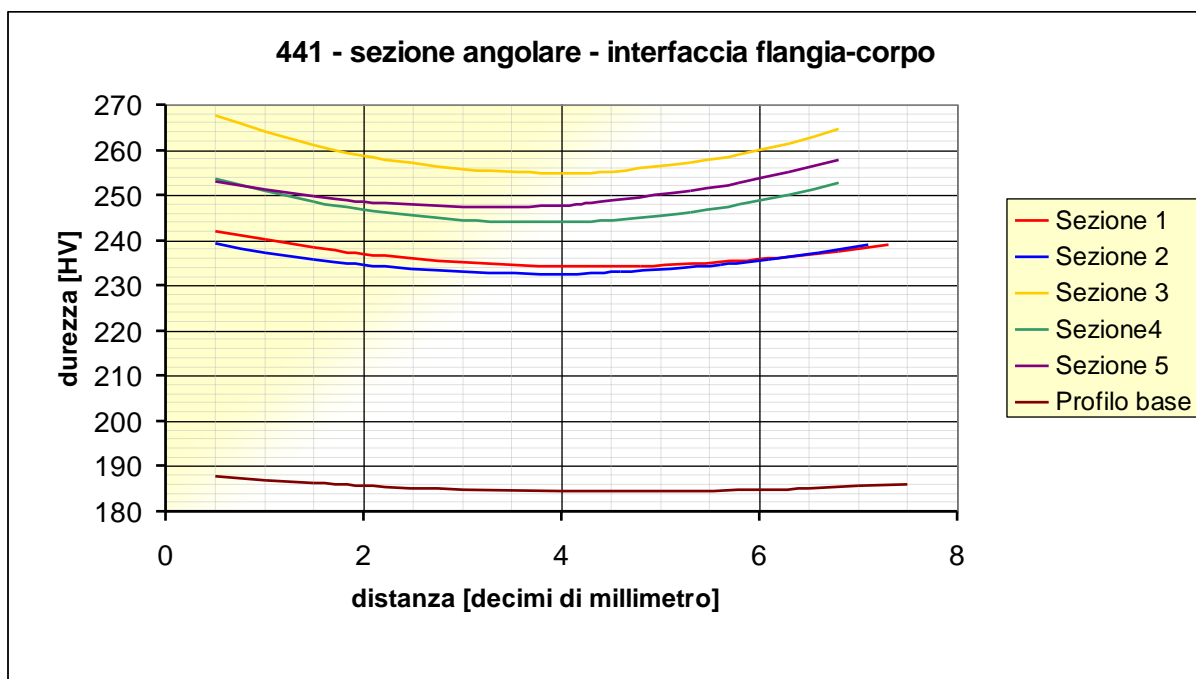
Anche in questo caso i grafici sono chiari. L'austenitico presenta tre profili molto incruditi (quasi 100 HV in più rispetto alle zone limitrofe alla curvatura); la durezza infatti diminuisce drasticamente man mano che ci si discosta dalla zona maggiormente deformata.

Il grafico relativo al 441 LI invece presenta i cinque profili di durezza pressoché compatti e molto schiacciati verso il profilo base.

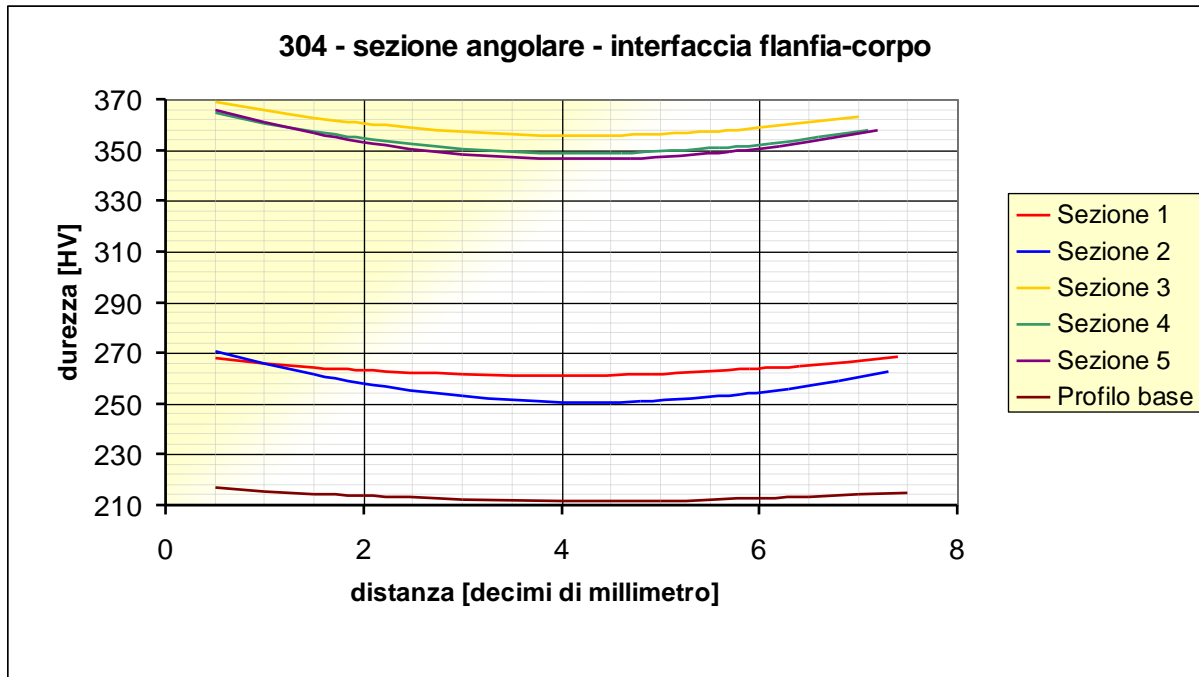
I dati di picco di entrambi i grafici sono più bassi rispetto alla zona precedentemente studiata.

Parte angolare – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

441 LI



AISI 304



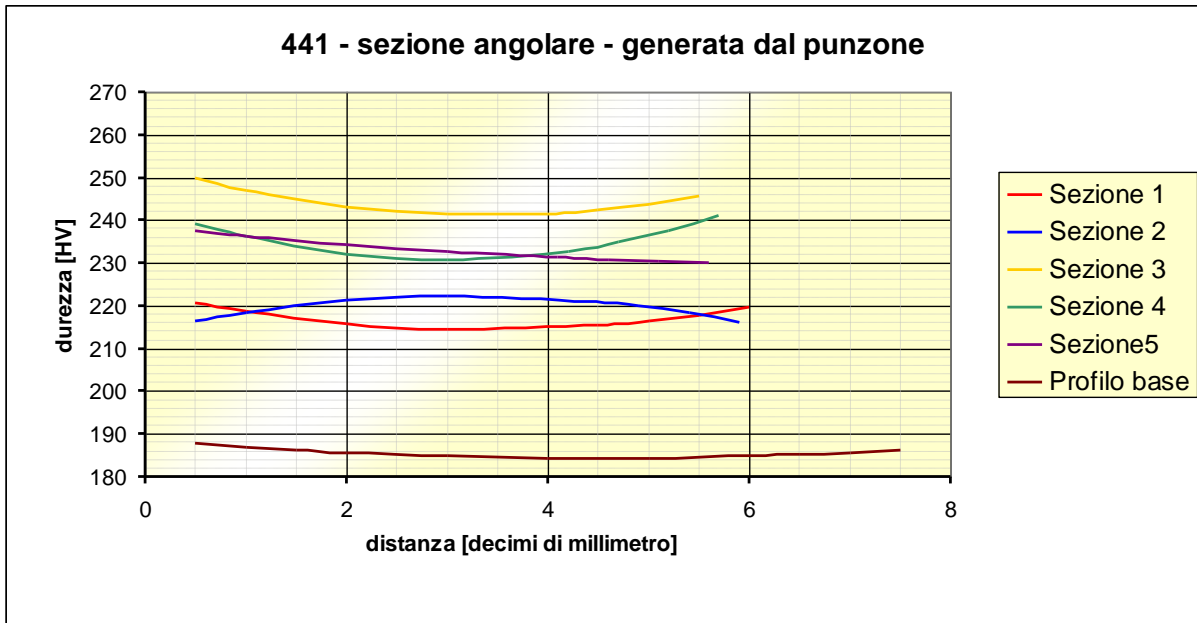
Come noto, la zona indagata è la più gravosa del pezzo. In questa zona infatti è avvenuta la frattura del ferritico, mentre l'austenitico è risultato essere conforme alle specifiche.

Osservando i grafici si capisce che l'incrudimento è stato particolarmente elevato in entrambi i materiali; si raggiungono livelli, soprattutto nel ferritico, di notevole pericolosità.

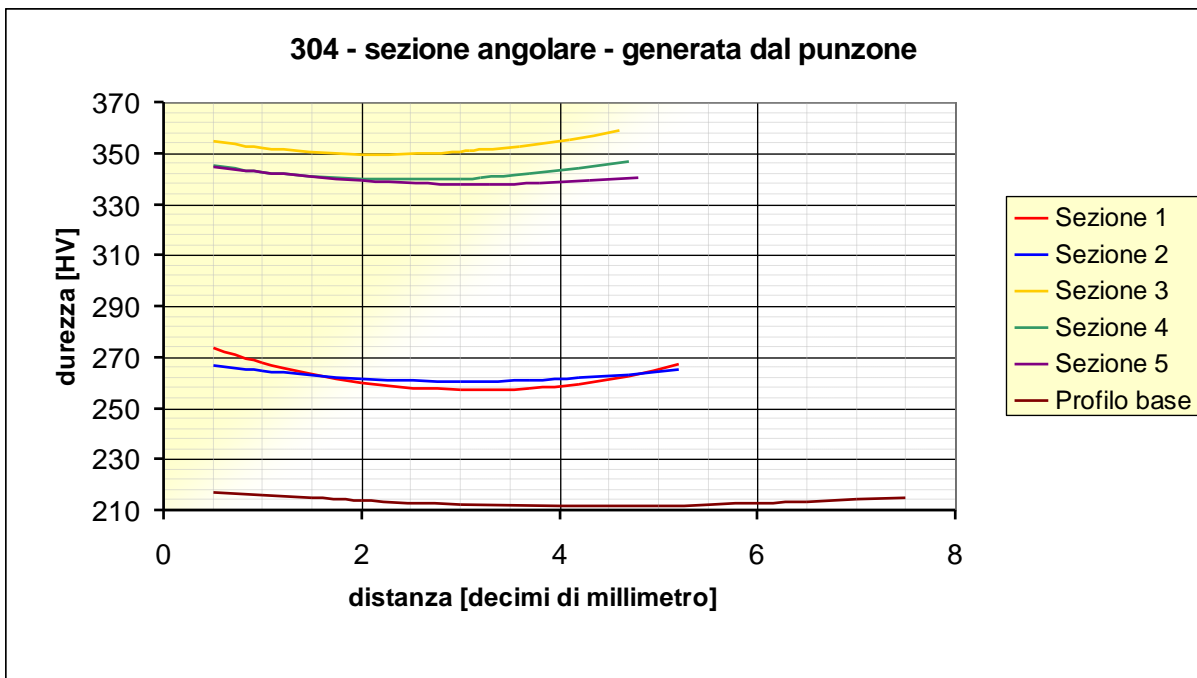
Nel complesso, però, i grafici rispecchiano quanto finora asserito: il ferritico presenta i cinque profili di durezza pressoché uguali (nell'ordine dei 30 HV), anche se molto distanti dal profilo base; il 304 invece mostra come le sezioni sulla curvatura siano molto più incrudite delle sezioni immediatamente adiacenti alla curvatura (differenza intorno ai 100 HV). L'austenitico quindi ha potuto deformarsi localmente, mentre il ferritico (poco incline a questa caratteristica) ha dovuto autoalimentarsi (sappiamo però che in questa prova lo scorrimento non è stato sufficiente, facendo giungere a rottura il pezzo).

Parte angolare – generata dal punzone

441 LI



AISI 304



Per questa zona del prodotto le considerazioni sono del tutto simili a quelle riscontrate nelle analisi precedenti. Si registra però, oltre alla diversa distribuzione delle durezze nei due materiali, un leggero innalzamento dell'incrudimento rispetto alle aspettative: sia nel ferritico che nell'austenitico

si sono registrate delle forti diminuzioni di spessore in questa zona (si osservano durezza leggermente maggiori del normale).

Per concludere il resoconto sul lavello industriale, che ha visto impegnati il ferritico 441 LI e l'AISI 304, si può affermare, anche in questo caso, che le prove di durezza eseguite confermano la teoria motore di questa ricerca: l'austenitico possiede caratteristiche intrinseche tali da permettere alla lamiera una forte deformazione puntuale, mentre il ferritico deve essere libero di alimentarsi e di scorrere all'interno dello stampo, per supplire alle limitate proprietà di "stretch forming".

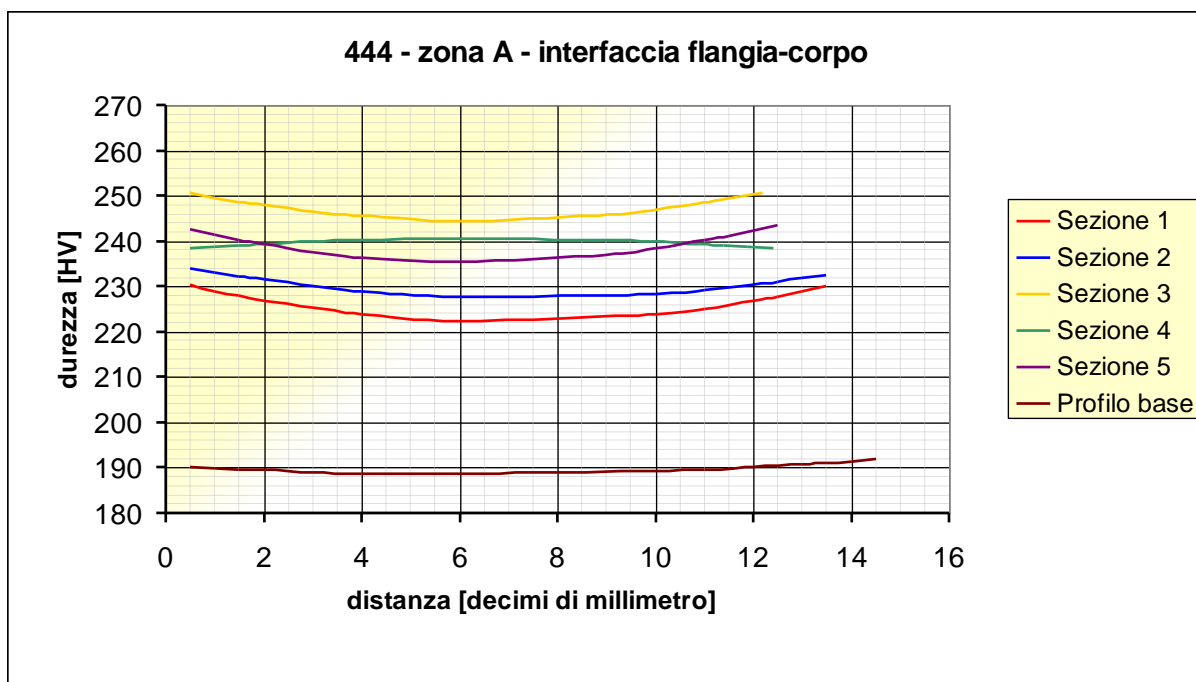
6.4 – TERZA PROVA – LAVAMANI COMPATTO IN 444 E 304

Nella prova che ci si appresta a discutere, cambia totalmente la forma del manufatto. Come già anticipato, si sono estratti dal prodotto due campioni, in altrettante generiche sezioni caratterizzate dalla stessa forma (data l’assial-simmetria del prodotto), per entrambi i materiali. Per chiarezza, nel prosieguo della trattazione, tali parti verranno chiamate zona A e zona B.

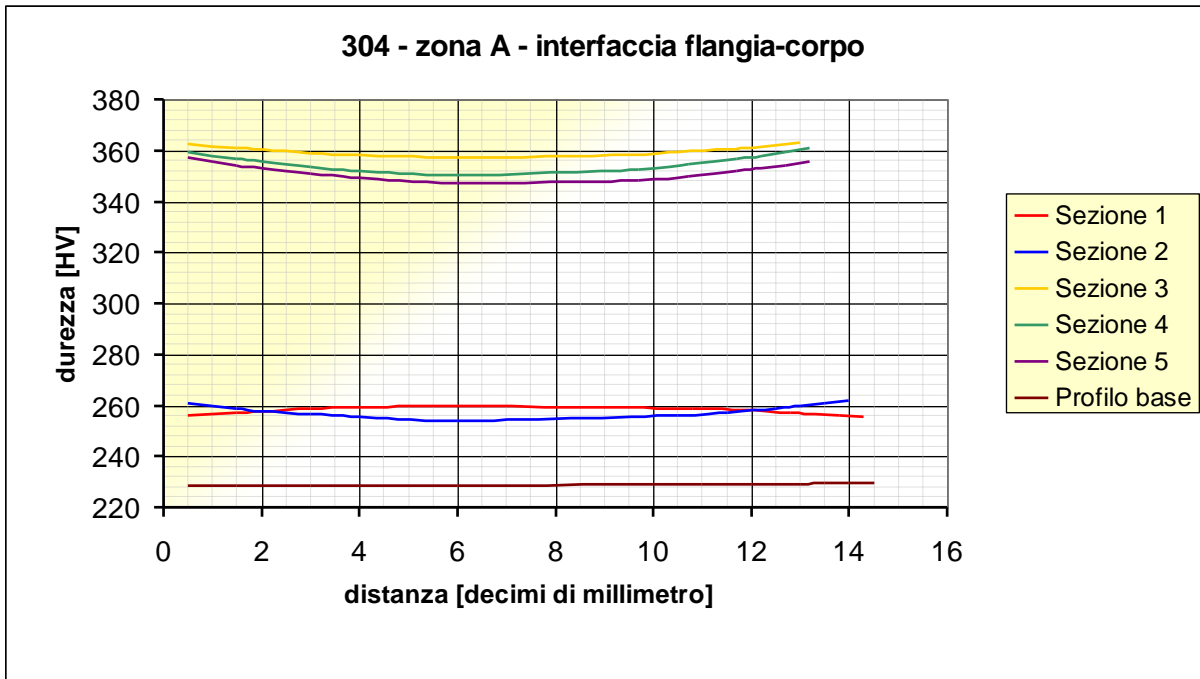
Anche in questo caso la procedura seguita è stata la medesima.

Zona A – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

444



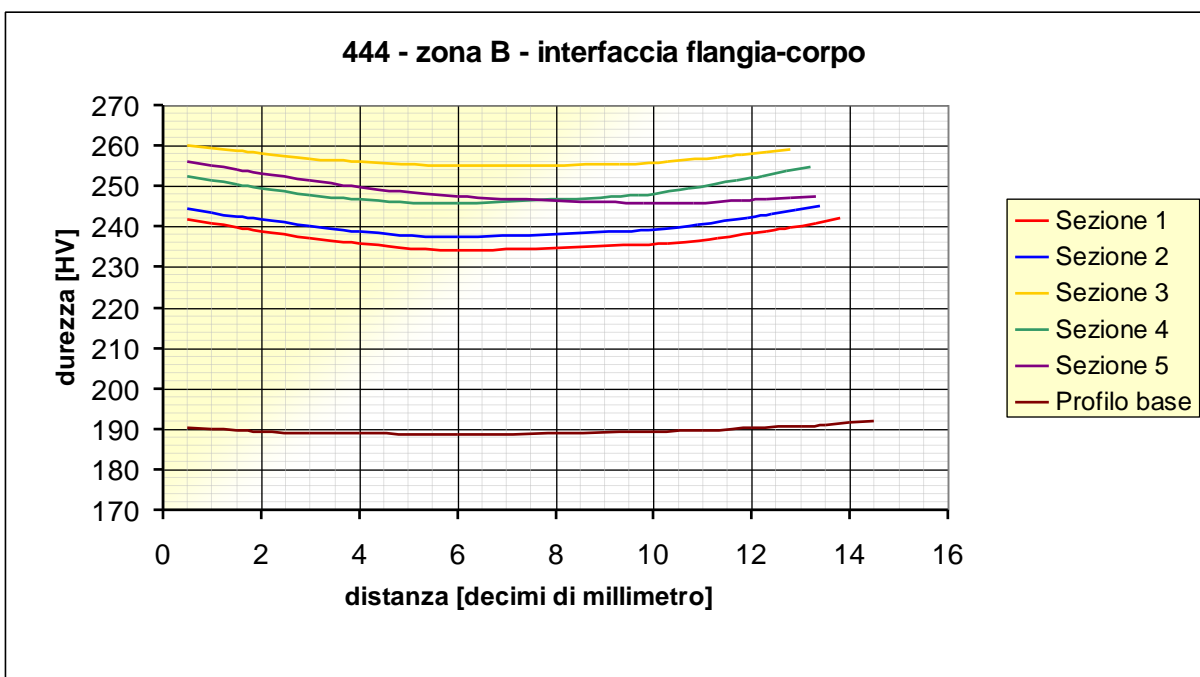
AISI 304



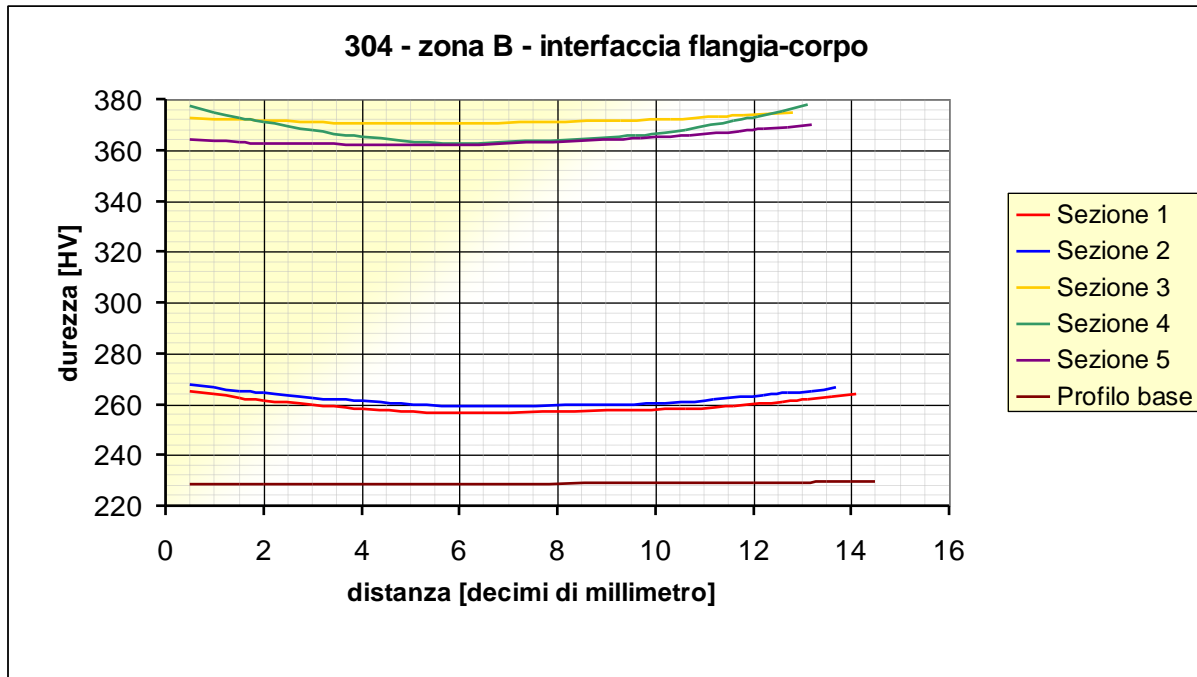
Dato che le zone A e B non presentano sostanziali diversità morfologiche, si è preferito esporre di seguito i risultati della zona B succerrivamente commentare tutti i grafici relativi a questa prova.

Zona B – sezione di interfaccia flangia-corpo

444



AISI 304



Si anticipa fin da ora che la zona B nei ferritici è stata troncata in una sezione immediatamente limitrofa alla frattura riscontrata nel pezzo; la zona A invece è stata tagliata in una generica posizione integra.

Per gli austenitici sia la zona A che zona B sono state scelte in maniera del tutto casuale (data l'integrità del prodotto).

Per prima cosa si riscontra la naturale tendenza dei due materiali. Se il ferritico presenta profili di incrudimento generalmente simili in tutte le cinque sezioni, gli austenitici invece mostrano in tutti i grafici delle durezze molto diverse tra le sezioni limitrofe alla deformazione (bassi valori di HV) e le sezioni coinvolte specificatamente nella piega (alti valori di HV).

In secondo luogo si nota come nei campioni in 444, vi sia una discreta differenza tra zona A, sezione generica) e zona B (parte vicino alla frattura). Si può osservare come le durezze, e di conseguenza l'incrudimento, siano maggiori nella sezione vicino alla frattura (confrontando i grafici si notano differenze nell'ordine dei 15 HV).

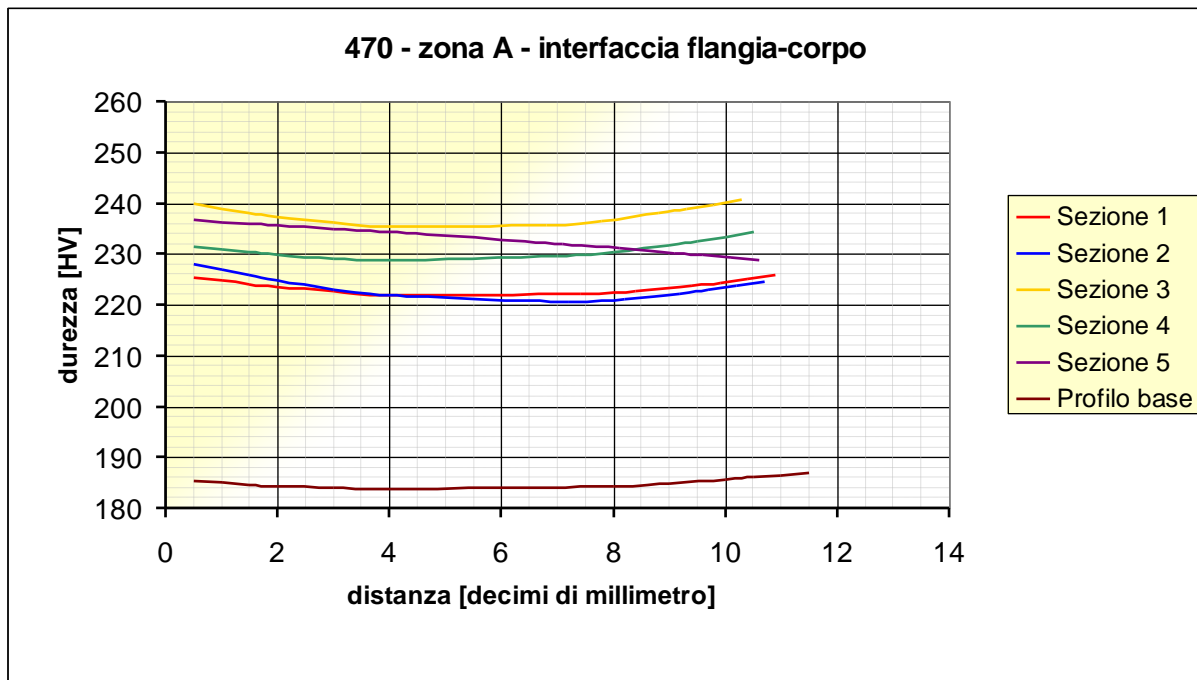
6.5 – QUARTA PROVA – LAVAMANI COMPATTO IN 470 LI E 304

La prova condotta sul 470 LI è sostanzialmente la stessa del test sul 444 (cambiano gli spessori in gioco, ma la forma del prodotto risulta la stessa).

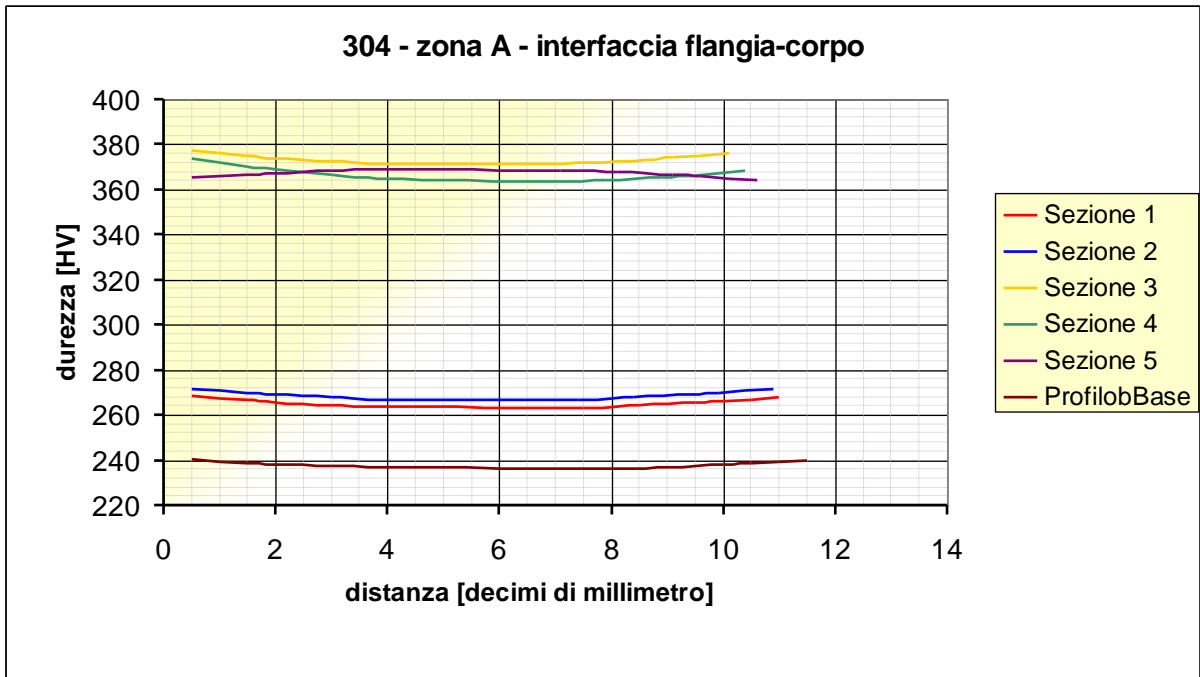
Per questo motivo le considerazioni fatte nella seguente prova, trovano valore anche in quella che si va a descrivere. Allo stesso modo la scelta delle sezioni nei pezzi segue le stesse linee guida già indicate.

Zona A – sezione di interfaccia flangia-corpo imbutito

470 LI

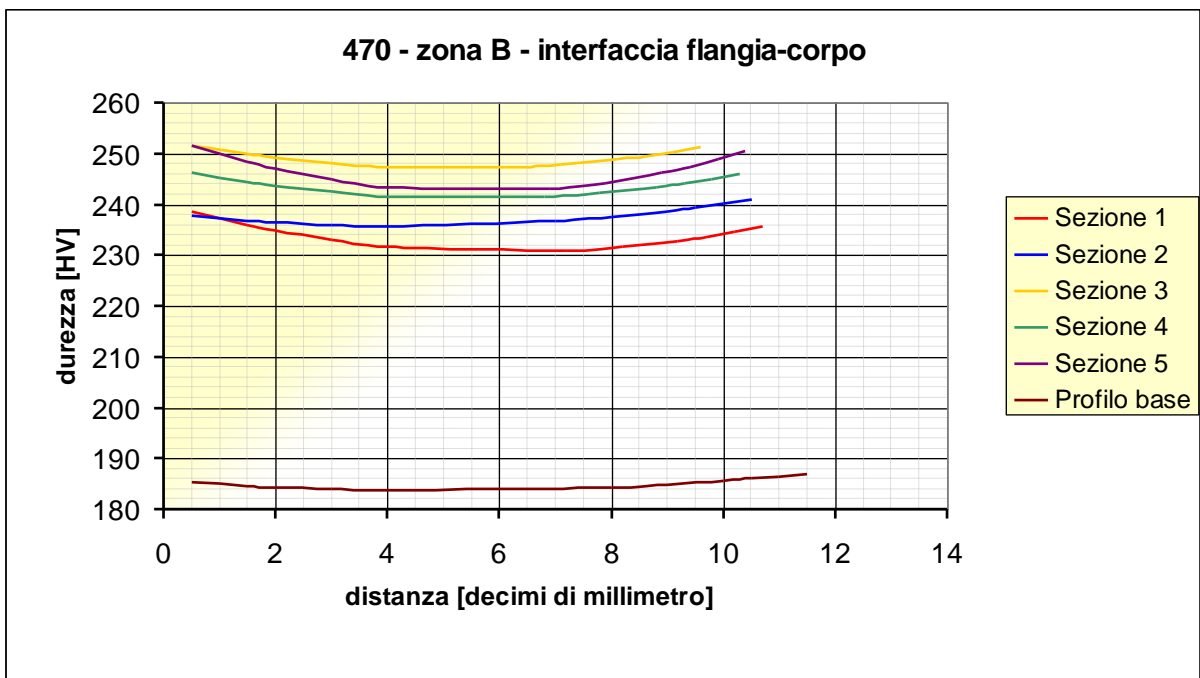


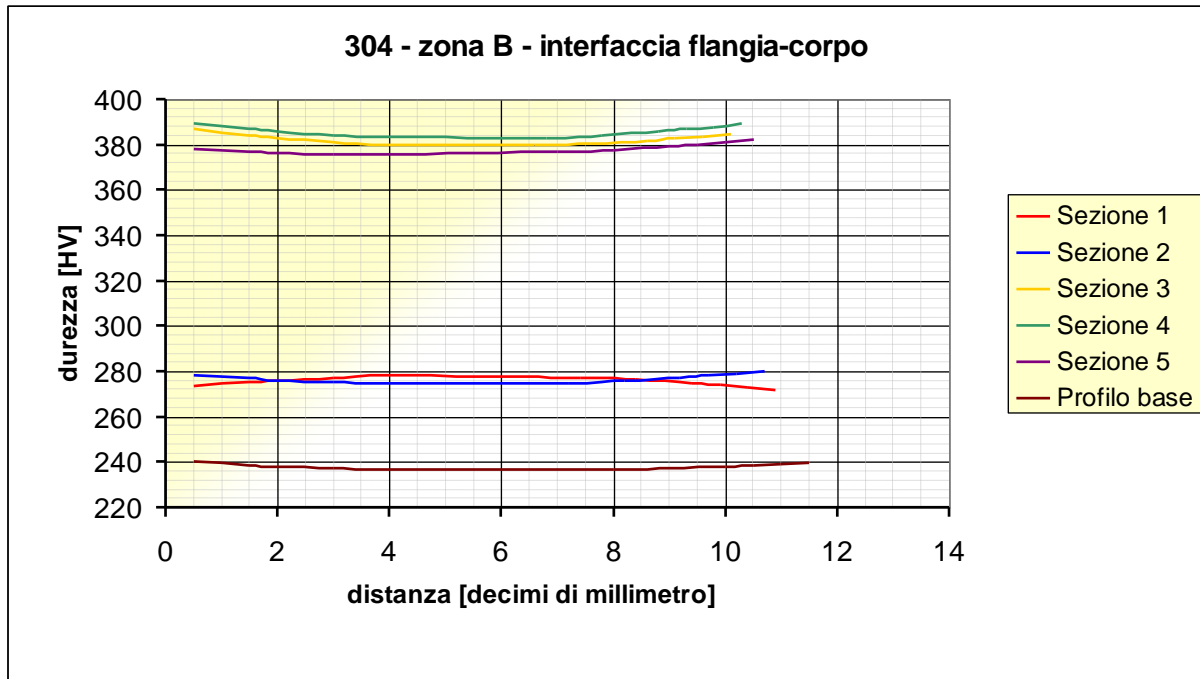
AISI 304



Zona B – sezione di interfaccia flangia-corpo

470 LI



AISI 304

I due materiali testati presentano le ormai ben note caratteristiche.

Il ferritico presenta profili di incrudimento generalmente simili in tutte le cinque sezioni; gli austenitici invece mostrano in tutti i grafici delle durezze molto diverse tra le sezioni limitrofe alla deformazione e le sezioni coinvolte specificatamente nella piega. Si può osservare infatti un divario di più di 100 HV tra le sezioni 1, 2 e le sezioni 3, 4, 5.

Ancora una volta quindi, la convinzione che le due tipologie di materiali presentino un diverso modo di deformarsi se soggetti a sollecitazioni, ha trovato fondamento anche in questa ultima prova.

Quindi è chiaro che i ferritici necessitano di lavorazioni con parametri che permettano lo scorrere del materiale all'interno dello stampo; il materiale deve essere in grado di auto alimentarsi.

Scopo finale di questa trattazione è trovare il giusto set di parametri per permettere a questa caratteristica di emergere.

Capitolo 7

PROVE FINALI

7.1 – CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Le osservazioni delle micrografie sui materiali svolte nel capitolo 5 e l'analisi delle stime di incrudimento del capitolo 6 e 7 hanno contribuito a dimostrare la teoria di deformazione delle due famiglie di acciai inossidabili. Gli acciai austenitici (AISI 304) sono più inclini a deformarsi per "stretch forming", mentre gli acciai ferritici tendono ad auto alimentarsi durante il processo di deformazione.

Le prove di imbutitura hanno dimostrato che non sempre si può ottenere un prodotto in ferritico privo di difetti, con le impostazioni macchina tarate su parametri pensati per deformare gli acciai austenitici.

Sfruttando quindi le conoscenze acquisite dalla campagna di test e prove esposte nei capitoli precedenti, si è deciso di tornare in azienda per modificare i parametri macchina per cercare di ottenere prodotti conformi anche con i ferritici.

Molte sono le strade percorribili per perseguire tale scopo:

- diminuire la forza di imbutitura e quindi la forza agente sul premi lamiera;
- diminuire la velocità di lavorazione;
- aumentare le condizioni di lubrificazione.

Oltre a questi parametri, la teoria ci indica anche di agire sulla geometria dello stampo per:

- aumentare i raggi di raccordo della matrice e del punzone;
- aumentare il gioco matrice – punzone.

Queste ultime possibilità non sono state prese in considerazione in quanto avrebbero comportato una completa e nuova ingegnerizzazione delle attrezzature.

Nel seguito della trattazione valuteremo la fattibilità operativa di ogni tipologia di acciaio preso in considerazione.

7.2 – ACCIAIO FERRITICO 439 M

Come già osservato precedentemente, il test sul ferritico 439 M ha dato esito positivo con i dati settati sull'esperienza riguardante l'austenitico. La forma del prodotto, unitamente alle condizioni di esercizio, non sono state così gravose da comportare la rottura delle vaschette gastronom in ferritico.

Più per scrupolo che per motivi di ricerca si è voluto indagare sull'effetto dei cambiamenti di parametri sul prodotto finito. Si anticipa fin da ora che produttivamente parlando non conviene cambiare i dati macchina della prima prova, in quanto questi garantiscono all'azienda la produttività massima contro i costi minimi.

Si può osservare di seguito, nella foto di sinistra, la vasca in ferritico 439 M ottenuta con una riduzione del 50 % della forza (da 60 tonnellate a 30 tonnellate) e con una velocità di esecuzione minima.



7.1 - Prodotti ottenuti avendo modificato i parametri operativi.

Nella foto di destra invece, si riporta l'immagine di una seconda vaschetta ottenuta con i medesimi parametri della precedente prova ma con una lubrificazione spinta (garantita dalla deposizione tra lamiera e stampo di un foglio di plastica).

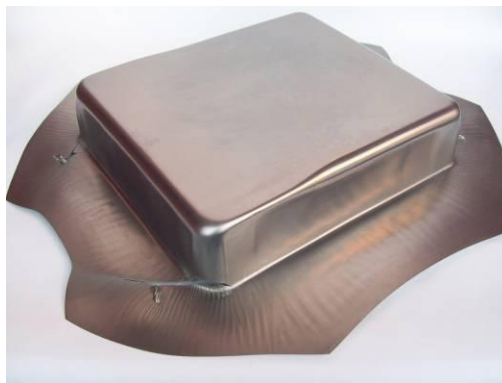
Come si auspicava, i prodotti ottenuti non presentano difetti, risultando del tutto conformi.

7.3 – ACCIAIO FERRITICO 441 LI

La prova eseguita sul lavello industriale in 441 LI aveva dato esito negativo. Il prodotto in ferritico, cioè, aveva subito uno strappo dopo soli 100 *mm* (contro i 160 richiesti). Si è quindi tornati in azienda per eseguire una campagna di prove andando a modificare volta per volta i parametri.

Il primo test è stato eseguito riducendo la forza di imbutitura da 60 tonnellate a 42 tonnellate, mantenendo costante la velocità di discesa e la lubrificazione.

Il risultato è riportato sotto.



7.2 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al primo test.

Il pezzo risulta fratturato in due delle quattro zone angolari sempre nella parte di piega all'interfaccia flangia inferiore e corpo del lavandino. Questa volta la rottura è avvenuta però a 110 *mm* di profondità ottenuta.

Una seconda prova è stata eseguita impostando la forza a 32 tonnellate con la velocità di discesa ridotta al minimo. Il parametro lubrificazione è stato lasciato invariato.

Di seguito il prodotto ottenuto:



7.3 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al secondo test.

Il prodotto presenta un solo strappo marcato in una zona angolare e una minima frattura in un'altra zona simile alla precedente. Questa volta il pezzo è risultato conforme fino a 128 *mm*, criccandosi poi continuando la discesa.

Un ulteriore imbutitura è stata eseguita riducendo di 1/3 la forza iniziale (da 60 tonnellate a 20 tonnellate), mantenendo una velocità di discesa minima e lasciando inalterata la lubrificazione.

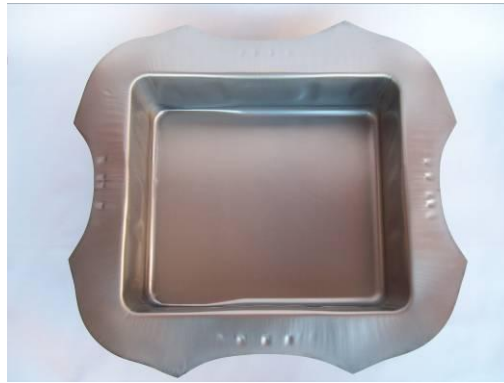
Di seguito l'immagine del pezzo.



7.4 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al terzo test.

Si è rilevato anche in questa prova, uno stappo in una zona angolare, ma si è riusciti a imbutire fino a 135 *mm* contro i 160 richiesti.

Come ultimo tentativo sono stati impostati i seguenti parametri: 20 tonnellate di forza di imbutitura, velocità minima di discesa e lubrificazione spinta grazie alla deposizione di una pellicola plastica tra lamiera e stampo.



7.5 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al quarto test.

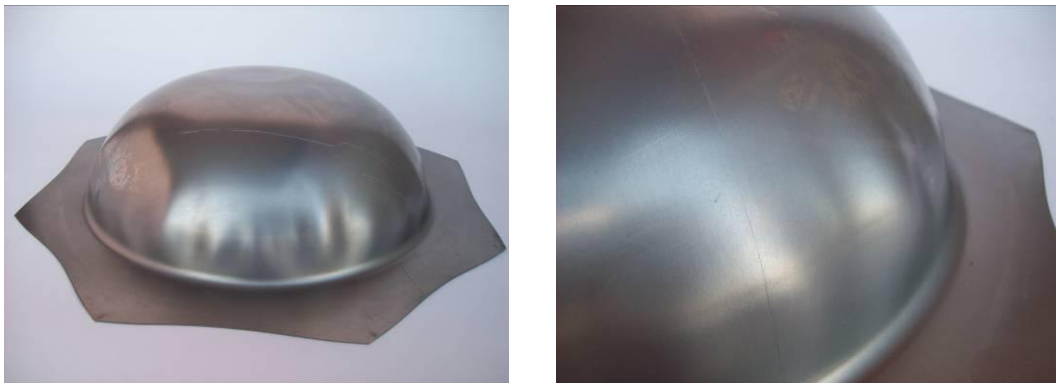
Si è riusciti a ottenere un prodotto finito e senza strappi ad una profondità di imbutitura di 150 *mm*. Non si è riusciti a superare questa soglia, forse per la particolare aggressività dalla forma dello stampo.

7.4 – ACCIAIO FERRITICO 444

Il test che ha visto coinvolto l'inossidabile Type 444 a confronto con l'AISI 304, ha dato esito negativo. I parametri macchina impostati per la conduzione della prova sono risultati pertanto troppo aggressivi per il ferritico in esame. La spiccata frattura sul lavamani è il risultato del set di dati impostati sulla pressa: 400 tonnellate, velocità di esecuzione massima e lubrificazione pressoché inesistente (acqua).

Per ottenere un pezzo conforme alle specifiche, si è quindi testato il materiale con nuove specifiche macchina: tonnello macchinario invariato (400 tonnellate), velocità massima invariata e aumento della lubrificazione tramite la deposizione di due film plastici, uno tra punzone e lamiera e uno tra lamiera e matrice superiore.

Il prodotto ottenuto si riporta sotto.



7.6 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al primo test.

L'imbutitura è arrivata a termine senza mostrare fratture nel prodotto finito. Il pezzo ottenuto, però, non risulta conforme alle specifiche estetiche e pratiche: si notano infatti, nel particolare a destra, delle marcate ondulazioni della lamiera nel corpo semisferico. Tale difetto può essere conseguenza dell'eccessivo scorrimento del materiale, che ha provveduto ad auto alimentarsi troppo..

Quindi è stata condotta una seconda prova mantenendo invariati il set di dati pressa ma limitando la lubrificazione ad un solo strato di plastica tra punzone e lamiera.

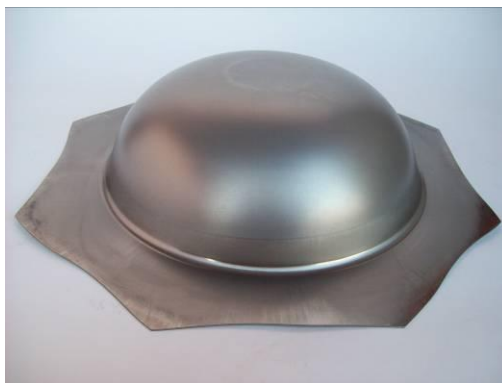
Ecco il prodotto ottenuto:



7.7 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al secondo test.

Questa volta il pezzo risulta conforme alle specifiche geometriche globali, anche se si notano sulla curvatura delle striature.

Si è voluto quindi imbutire una nuova lamiera di ferritico 444 agendo questa volta sui parametri relativi alla macchina e non sull'attrito stampo-materiale. Si è impostato perciò un tonnellaggio inferiore: è stata impiegata il 50 % della forza (200 tonnellate), mentre velocità e lubrificazione sono rimasti gli stessi della prova iniziale.



7.8 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al terzo test.

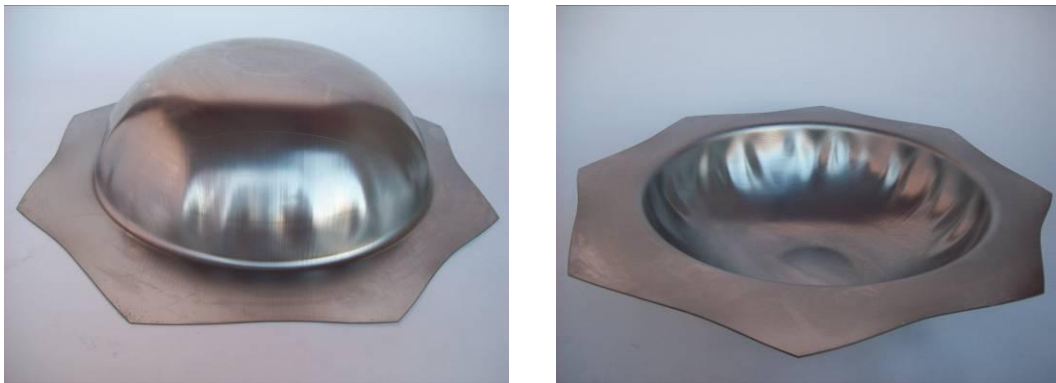
Il pezzo così ottenuto risulta del tutto simile al prodotto finito in austenitico, privo quindi di striature e imperfezioni.

7.5 – ACCIAIO FERRITICO 470 LI

Come osservato nel capitolo 5, la prova di imbutitura sul lavello lavamani, ottenuto con lamiera da 1,2 mm, aveva fornito una netta diversità di prodotto finito tra austenitico e ferritico. Il campione in 470 LI infatti, ha presentato una profonda frattura nei punti di maggiore sollecitazione. I parametri impostati per il confronto erano: 400 tonnellate, velocità di esecuzione massima e lubrificazione minima con olio deposto dall'operatore.

Il nuovo set di dati, scelto per cercare di ottenere un pezzo finito conforme in ferritico, vede il mantenimento dei dati riguardanti la pressa (tonnellaggio e velocità) e l'innalzamento delle condizioni di lubrificazione. Anche in questo caso quindi si è depositato tra le due parti dello stampo un doppio strato di pellicola plastica per rivestire entrambe le superfici della lamiera.

Il prodotto ottenuto si riporta di seguito.



7.9 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al primo test.

Come riscontrato nella prova del 444, l'imbutitura ha prodotto un pezzo privo di fratture, ma allo stesso tempo non conforme agli standard austenitico. Si notano anche in questo caso, ma in maniera più marcata, delle vistose ondulazioni sul corpo semisferico. Come nel caso precedente, il materiale ha avuto modo di auto alimentarsi e di scorrere in maniera eccessiva.

A questo punto, ricordando la soluzione a questa problematica nel caso del 444, si è deciso di limitare le modifiche procedurali ai parametri macchina e non alla lubrificazione. È stata condotta quindi una seconda prova tornando alla deposizione sulla lamiera di un sottile strato di olio, mentre si sono variati i dati macchina: il tonnellaggio è stato ridotto del 50 %, da 400 a 200 *tonn*, mentre la velocità è stata mantenuta massima.

Ecco il prodotto ottenuto.

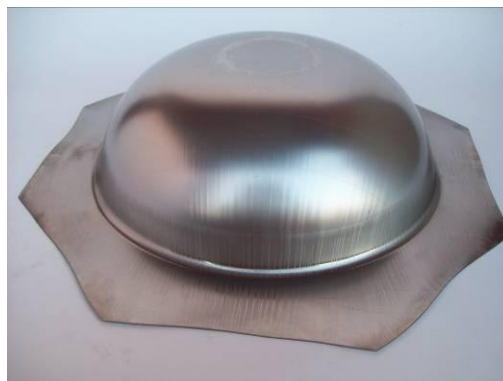


7.10 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al secondo test.

Al contrario di quanto riscontrato per il Type 444, il prodotto ottenuto risulta gravemente danneggiato. Una profonda frattura si è generata nella zona di piega, compromettendo il risultato. Per il 470 LI, i parametri impostati sono risultati troppo gravosi. Si noti come vi sia abbondanza di materiale nella flangia esterna, segno che il materiale non è riuscito ad alimentarsi in modo corretto.

Un'ulteriore prova è stata condotta mantenendo invariato il set di dati riguardanti la pressa, mentre uno strato di film plastico è stato interposto tra punzone e lamiera.

Il risultato è stato il seguente.

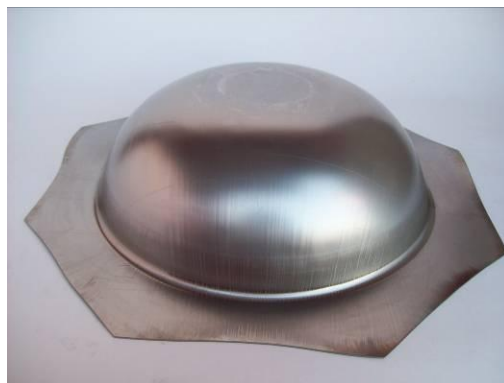


7.11 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al terzo test.

Il pezzo ottenuto risulta esteticamente identico al prodotto finito austenitico.

Per svincolarsi dall'uso dei film plastici si è voluta tentare una strada nuova che prescindesse dalla lubrificazione. Si è imposta una forza di imbutitura di sole 120 tonnellate, si è utilizzata una velocità di esecuzione ridotta del 40 %, mentre la lubrificazione è tornata ad essere garantita solo da olio.

Il pezzo ottenuto è riportato nella foto seguente.



7.12 - Manufatto ottenuto con i parametri relativi al quarto test.

Come si può osservare, il prodotto non ha presentato segni visibili di difetti o imperfezioni estetiche.

Si è potuto quindi ottenere dei finiti del tutto identici a quelli realizzati in austenitico, agendo esclusivamente sui singoli parametri di lavorazione (molte sono le combinazioni possibili che possono portare a un risultato soddisfacente).

Capitolo 8

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi presentato si è prefisso un duplice scopo:

- evidenziare le differenti modalità di risposta alla deformazione plastica a freddo di acciai inossidabili ferritici rispetto al classico acciaio inossidabile austenitico AISI 304;
- individuare i parametri operativi per la produzione di imbutiti di acciaio inossidabile ferritico, partendo da quelli di riferimento impiegati per l'acciaio inossidabile austenitico AISI 304.

Risposta alla deformazione

I risultati ottenuti dall'analisi delle micrografie, eseguite su prodotti ferritici e austenitici ottenuti nelle medesime condizioni, mostrano come la struttura austenitica sia più incline a deformarsi localmente mediante stiramento e conseguente assottigliamento.

L'esame visivo delle immagini realizzate mostra, per la struttura austenitica, la presenza di un marcato "gradiente di incrudimento"; le aree soggette a maggiore deformazione risultano marcatamente incrudite, contrariamente alle zone immediatamente adiacenti per le quali il fenomeno rimane limitato..

Le micrografie sui campioni ferritici, invece, mostrano una maggiore uniformità e gradualità nella distribuzione dell'incrudimento delle zone maggiormente sollecitate e di quelle ad esse adiacenti.

I dati numerici relativi ai profili di durezza e agli spessori confermano quanto già evidenziato dall'analisi micrografica:

- variazioni molto marcate dei profili di durezza per l'austenitico AISI 304, contrariamente ad una maggiore uniformità degli stessi per gli acciai inossidabili ferritici presi in esame;
- maggiore assottigliamento delle zone più deformate per l'acciaio inossidabile austenitico AISI 304, rispetto agli acciai inossidabili ferritici.

I risultati confermano pienamente quanto previsto dalla teoria della deformazione plastica a freddo degli acciai inossidabili: maggiore attitudine dei tipi austenitico alla deformazione per “stiramento” (stretch-forming) rispetto ai tipi ferritici e comportamento diametralmente opposto nel caso di deformazione “per scorrimento” (“drawing”).

Prove sul campo

In generale si è verificato che, modificando i parametri operativi, si possono assecondare le diverse modalità di deformazione delle diverse tipologie di materiali in lavorazione. Nel caso specifico si è potuto agire su:

- forza di imbutitura e del premi lamiera;
- velocità di deformazione;
- lubrificazione.

La giusta combinazione dei suddetti parametri ha permesso di ottenere buoni risultati anche con gli acciai inossidabili ferritici testati, se paragonati con quelli dell’AISI 304 preso come riferimento.

In particolare:

- con l’acciaio ferritico 439 M si sono ottenuti imbutiti senza difetti con le medesime condizioni operative dell’austenitico ASI 304;
- con l’acciaio ferritico 441 LI, pur modificando i parametri ci si è solo avvicinati agli standard dell’AISI 304, senza però arrivare alla stessa profondità di imbutitura finale, per cui si renderebbero necessari ulteriori accorgimenti, quali la modifica della geometria del componente finale (es. raggi di raccordo);
- con l’acciaio ferritico Type 444 si è arrivati a un prodotto finito equivalente a quello in AISI 304 riducendo la forza della pressa e agendo sulla lubrificazione;
- con l’acciaio inossidabile ferritico 470 LI si sono raggiunti gli stessi risultati dell’austenitico AISI 304. Si è agito sulla forza della pressa, sulla lubrificazione e, in questo caso, anche sulla velocità di deformazione.

Considerazioni aggiuntive

Poiché gli sforzi residui su un manufatto possono diventare determinanti per l'insorgere di fenomeni quali la stress-corrosion cracking e le delayed-cracks, sarebbe importante approfondire quanto già evidenziato dalle analisi svolte, mediante la misurazione degli sforzi residui.

Le prove svolte hanno interessato particolari forme e geometrie; un'ulteriore indagine potrebbe focalizzarsi sulla modifica dei parametri geometrici del manufatto e quindi degli utensili, al fine di ottimizzare lo sfruttamento delle caratteristiche degli acciai inossidabili ferritici.

Infine, poiché la fase conclusiva della produzione dei manufatti è generalmente costituita da un'operazione di finitura superficiale, occorrerebbe completare lo studio valutando anche gli effetti di quest'ultima lavorazione; ciò con lo scopo di individuare l'effettiva rispondenza dei componenti in acciaio inossidabile ferritico agli standard qualitativi richiesti dal mercato a cui sono destinati.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2007 – The Ferritic Solution – manuale – ISSF International Stainless Steel.
- Bernstein, I.M., Peckner, D., 1977 – Handbook of stainless steels – McGraw-Hill
- Capelli, Fausto – INOX conoscerlo sceglierlo trattarlo – manuale – Centro Servizi SLLP S.p.a..
- Di Caprio, Gabriele, 1997 – Gli acciai inossidabili – Biblioteca Tecnica Hoepli. Terza edizione.
- Ishimaru, Eiichiro – Effect of Material Properties and Forming Conditions on formability in High-purity Ferritic Stainless Steels – Master degree on Material Science and Engineering, Kyushu University, Japan.
- Lacombe, P., Baroux, B. e Beranger, G, 1993 – Stainless Steels – Les Editions de Physique
- Nicodemi, Walter, 1996 – Introduzione agli acciai inossidabili – AIM Associazione Italiana di Metallurgia.

Norme consultate:

- ASTM International – Designation: E 517 – 00 (Reapproved 2006) Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal.
- ASTM International – Designation: E2218 – 02 (Reapproved 2008) Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves.
- International Standard – ISO 16630
Metallic materials – Sheet and strip – Hole expanding test.

APPENDICE I – PRESENTAZIONE DAVIGHI INTERNATIONAL

Tutte le prove di imbutitura, menzionate nel presente lavoro di tesi, sono state condotte presso la Davighi International. Di seguito una breve presentazione dell'azienda.

La Davighi International è una realtà industriale che si occupa dello stampaggio e dell'imbutitura profonda di acciai inossidabili.

Storica azienda Milanese, nata nel 1939 come costruttrice di stampi, usò negli anni 50 il suo *know how* in questo settore per allargare l'attività all'imbutitura degli inox. Negli anni 90 è cresciuta nella sua nuova sede di Milano Sud e, dopo un recente *restyling* interno, oggi è la prima produttrice italiana in questo settore.

La Davighi si propone di fornire ai propri clienti prodotti stampati in acciaio inossidabile di ottima fattura e finitura. Per questo il valore aggiunto in termini di tecnologia che l'azienda mette a disposizione, rende possibile il concretizzarsi di prodotti complessi che l'utilizzatore necessita. L'alta qualità delle lavorazioni e l'ottimo materiale utilizzato completa il quadro che colloca la Davighi come uno dei principali *leader* nel settore.

La Davighi International infatti utilizza unicamente Acciaio Inox Italiano certificato AISI304DDQ/1.4301, AISI316L/1.4404. Anche per questo motivo quindi tutti i prodotti aziendali risultano essere totalmente *Made in Italy*.

Il personale altamente specializzato cura tutte le fasi del processo: dal progetto di un finito, passando per la sua ingegnerizzazione tramite software all'avanguardia e studiando la sua concreta produzione nelle varie fasi di lavorazione, fino alla consegna al cliente finale.

I maggiori realizzatori di cucine professionali, macchine per la produzione del gelato e quindi i maggiori produttori nel settore gastronomico, ma anche produttori di impianti di lavaggio, sterilizzazione e componenti per il catering, oggi si rivolgono alla Davighi International per trovare soluzioni efficaci e di durata alle loro esigenze.

Di seguito si riportano le maggiori produzioni attualmente realizzate:

- contenitori gastronom;
- vasche bagnomaria gastronom;
- vasche a saldare;
- cuocipasta cottura diretta;
- complementi termici;
- vasche per impastatrici;
- lavelli;
- lavamani;
- sterilizzatori;
- complementi d'arredo;
- prodotti a commessa.

APPENDICE II – PRESENTAZIONE CENTRO INOX



CENTRO INOX

Associazione italiana per lo sviluppo degli acciai inossidabili

Il presente lavoro di tesi, per la laurea specialistica, in ingegneria meccanica è stata patrocinata dal Centro Inox. Di seguito una breve presentazione di questa realtà.

II.1 – STRUTTURA DEL CENTRO INOX

Il Centro Inox è l'Associazione Italiana per sviluppo delle applicazioni degli acciai inossidabili in Italia, dal 1962. In particolare il Centro Inox, si interessa dello sviluppo generale di tutti i tipi di acciai inossidabili e di tutti i tipi di semilavorati: piani, lunghi e tubi.

Attualmente i soci del Centro Inox sono costituiti da acciaierie, trasformatori e istituti di sviluppo:

- Acciaierie Valbrona
- Acroni Italia
- A.D. Tubi Inossidabili
- ArcelorMittal
- Arinox
- CalviNetwork
- Cogne Acciai Speciali
- Ilta Inox
- Marcegaglia – Divisione Inox
- Nickel Institute
- Olarra – Rodacciai
- Salzgitter Mannesmann Stainless tubes
- Tecnofar
- ThyssenKrupp - Acciai Speciali Terni
- Ugitech

E' organizzato in forma di una piccola unità operativa (3 professionisti e 3 impiegati), che permette un'estrema flessibilità.

II.2 – FILOSOFIA E ATTIVITÀ DEL CENTRO INOX

La filosofia operativa che il Centro Inox ha sviluppato nel tempo è basata sul principio che la promozione dell'acciaio inossidabile è parte della sua qualità e che il mercato italiano dell'acciaio inossidabile ha la sua specifica identità, diversa da quella degli altri tipi di acciaio.

Le principali attività del Centro Inox sono:

1. Conoscenza del mercato
 - valutazione qualitativa dei settori attuali e potenziali di utilizzazione dell'acciaio inossidabile;
 - ricerche di mercato relative a settori specifici;
 - visite a fiere settoriali.
2. Servizio di informazione e consulenza per il mercato
 - orienta gli utilizzatori verso il corretto sviluppo e impiego degli acciai inossidabili;
 - attraverso i contatti quotidiani con gli operatori, permette l'acquisizione di utili informazioni.
3. Normazione del mercato
 - è ottenuta partecipando ai lavori delle commissioni nazionali e europee;
 - costituisce la base dello sviluppo di molti settori di mercato
4. Educazione del mercato.

E' un'attività promozionale molto importante sulla quale il Centro Inox ha sempre focalizzato propri sforzi ed è condotta attraverso :

 - il trimestrale "Inossidabile";
 - pubblicazioni di articoli su riviste specializzate;
 - la distribuzione di pubblicazioni tecniche;
 - l'organizzazione di corsi di base avanzati;
 - l'organizzazione di incontri tecnici e convegni.

Queste quattro attività sono strettamente collegate tra loro tanto che non è possibile dire quale sia la più importante: devono essere sviluppate contemporaneamente per poter formare una "cultura dell'acciaio inossidabile" nel mercato.

Oltre all'attività in campo nazionale, il Centro Inox mantiene continui rapporti di scambio di informazioni e di collaborazioni con altri enti esteri in tutto il mondo e partecipa in qualità di socio all'attività promozionale di Euro Inox, l'associazione di sviluppo degli acciai inossidabili.

II.3 – OBIETTIVI PROMOZIONALI

Lo sviluppo dell'acciaio inossidabile in Italia non è stato casuale; è il risultato di un insieme di metodi e obiettivi promozionali basati sulla stretta collaborazione tra il Cento Inox e i suoi soci.

Senza dimenticare la peculiarità del mercato Italiano, il Centro Inox dirige i suoi sforzi promozionali verso quei segmenti che già godono di una naturale forte tendenza all'espansione. Agendo in questo modo il Centro Inox può verificare il più efficace sistema di sviluppo delle applicazioni dell'acciaio inossidabile coincida con l'adempimento delle esigenze umane primarie: nutrimento, energia, trasporto, costruzione, sicurezza, salute e ambiente.

II.4 – DATI STATISTICI

Vediamo ora alcuni dati statistici relativi al mercato italiano degli acciai inossidabili, aggiornati all’anno 2009. Il primo grafico mostra il totale della produzione di tutti i prodotti inox, piani e lunghi, ammontante a 1.061.581 tonnellate/anno.

Nel secondo grafico è riportato il consumo apparente, per un totale di 1.035.089 tonnellate/anno.

Nel terzo grafico possiamo vedere l’andamento del consumo apparente pro-capite, risultante in circa 18,0 kg/persona. Quest’ultimo dato indica che in Italia esiste una grande capacità di trasformare l’inox in “prodotti finiti”, in ogni settore industriale.

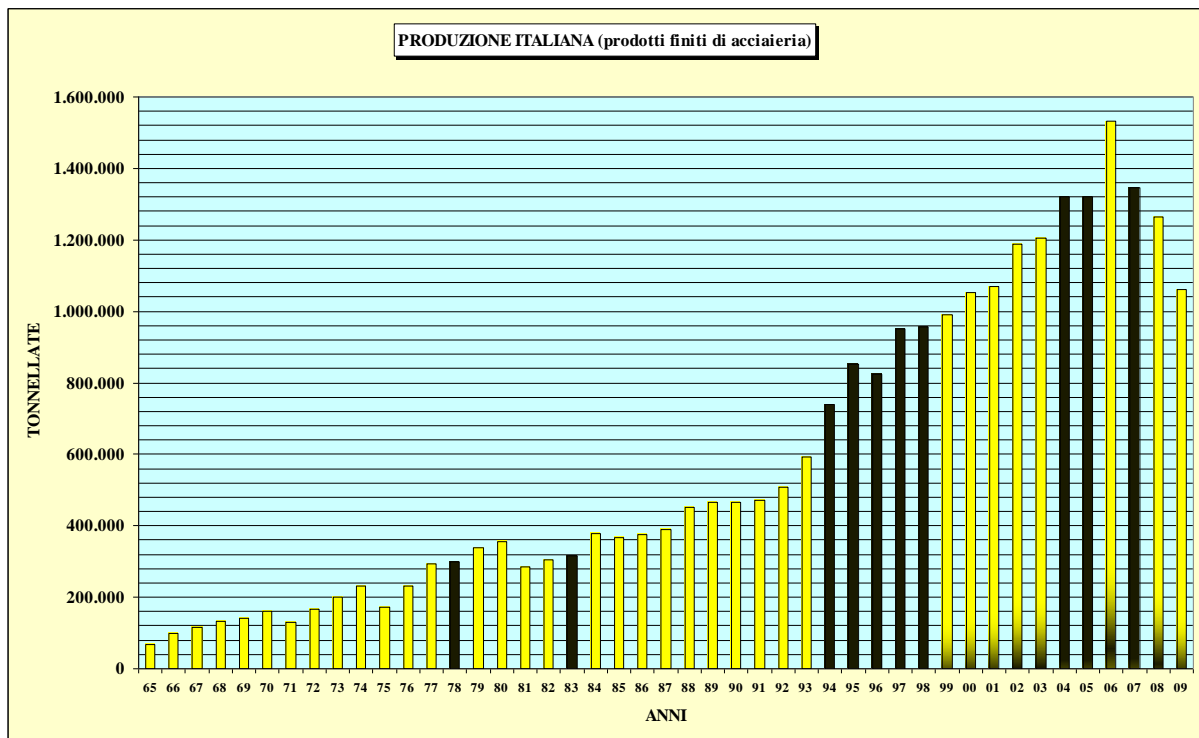


Figura 1.1 - Andamento delle produzioni di acciaio inossidabile in Italia dal 1965 al 2009.

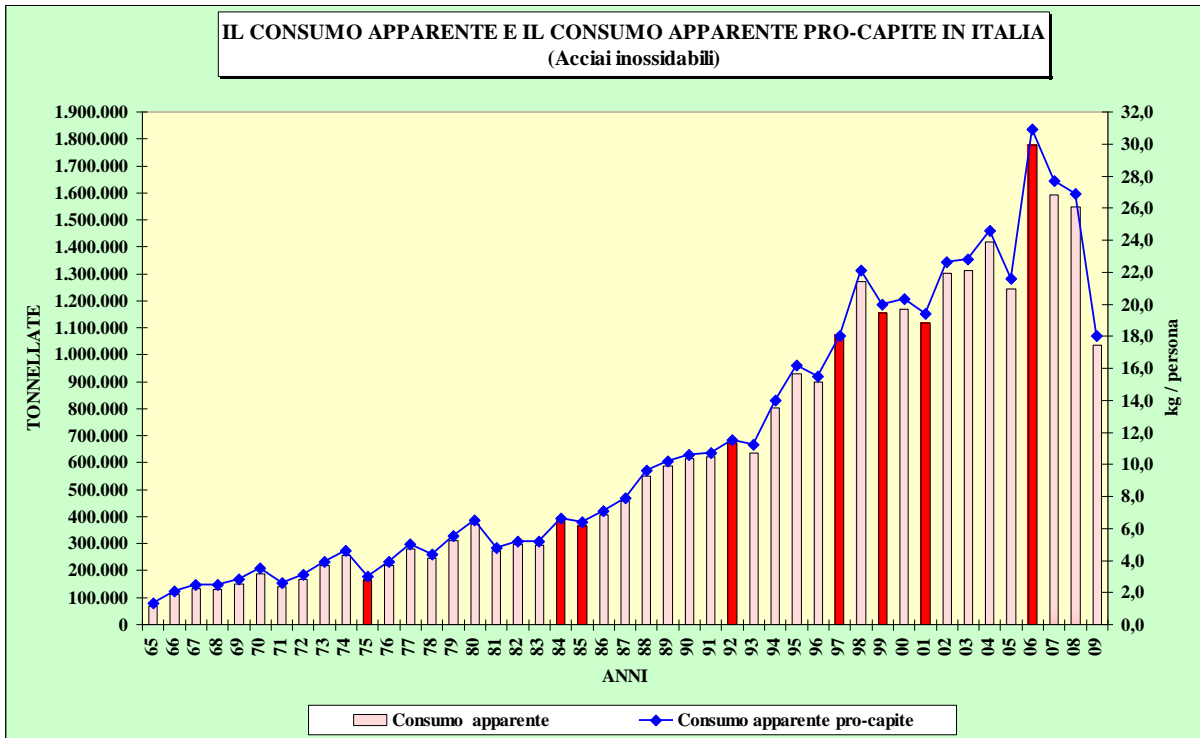


Figura 1.2 - Andamento del consumo apparente e del consumo pro-capite di acciaio inossidabile in Italia dal 1965 al 2009.

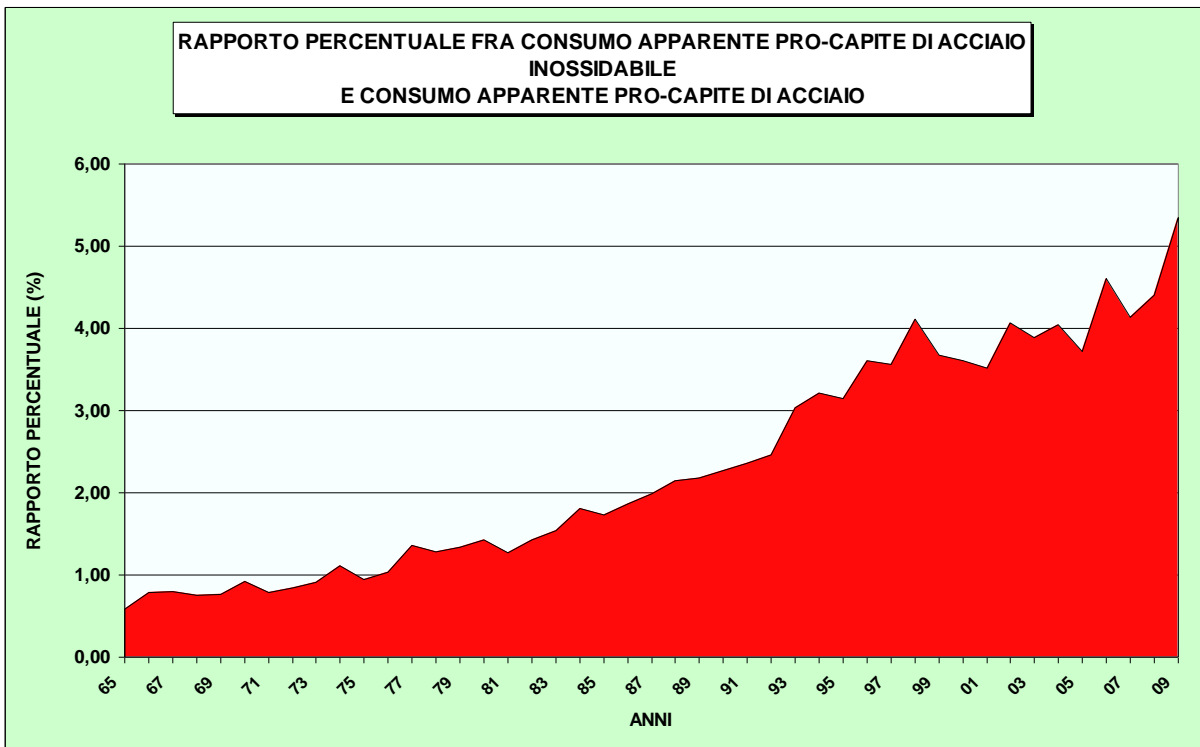


Figura 1.3 - Rapporto tra consumo apparente pro-capite di acciaio inossidabile e consumo apparente pro-capite di acciaio.