

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA E
MECCATRONICA**

TESI DI LAUREA

CARATTERIZZAZIONE MICROSTRUTTURALE E MECCANICA DI ACCIAI DA DEFORMAZIONE PLASTICA A FREDDO

RELATORE: CH.MO PROF. PAOLO FERRO

CORRELATORE: ING. FABIO BASSAN

LAUREANDO: MASSIMO VELLER

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Paolo Ferro e l'Ing. Fabio Bassan per la loro disponibilità per lo svolgimento di alcune prove sperimentali.

Un doveroso ringraziamento lo devo anche a tutte quelle persone che mi hanno assistito durante il lungo periodo da tesista. Per quanto riguarda le attività di laboratorio si ringraziano il sig. Giacomo Mazzacavallo e il sig. Enrico Della Rovere che con buone dosi di pazienza e sopportazione mi hanno assistito nel percorso di tesi.

Un ulteriore ringraziamento va a tutti i ricercatori, assegnisti e dottorandi che frequentano il laboratorio SIM, sempre pronti ad assistermi e consigliarmi.

Un ringraziamento di cuore va alla mia famiglia che ha saputo sostenermi ma anche mettermi in dubbio pur di spronarmi a proseguire gli studi.

Un ringraziamento va anche alla mia ragazza che mi sopportato e supportato in questi lunghi ultimi due anni di studi.

Per concludere ringrazio anche la mia tenacità per avermi permesso, nei momenti di difficoltà, di riprovarci ancora una volta.

INDICE

Sommario	1
Introduzione	3
Capitolo 1 – Zoppelletto S.p.A.....	5
1.1.L'azienda.....	5
1.2.Produzione e applicazioni.....	7
Capitolo 2 – Tecnologia dello stampaggio a freddo	9
2.1.Introduzione	9
2.2.Tecnologia di forgiatura	9
2.2.1.Generalità.....	9
2.2.2.Tipologie di forgiatura	11
2.3.Tecnologia di estrusione.....	13
2.3.1.Generalità.....	13
2.3.2.Tipologie di estrusione.....	14
2.4.Presse e magli	16
2.4.1.Introduzione.....	16
2.4.2. Velocità di deformazione e incrudimento	16
2.4.3.Magli.....	18
2.4.4.Presse	19
2.4.5.Presse ad eccentrico	21
Capitolo 3 – Filiera produttiva aziendale.....	25
3.1. Introduzione	25
3.2.Approvvigionamento delle macchine	25
3.3.Bonderizzazione.....	27
3.3.1.Introduzione.....	27
3.3.2.Realizzazione, qualità del risultato e regolazione del processo.....	27
3.3.3.Processi alternativi: polimerizzazione	29
3.4.Prodotto scelto e matrici.....	33
3.4.1.Scelta del prodotto e presentazione della geometria	33
3.4.2.Matrici.....	35

3.4.3.Rivestimento delle matrici.....	37
3.4.4.Disposizione e tecnologia di stampaggio	38
3.5.Presse utilizzate	38
3.5.1.Introduzione.....	38
3.5.2.Pressa monostazione Erfurt	39
3.5.3.Pressa multistazione National.....	41
Capitolo 4 – Gli acciai inossidabili.....	47
4.1.Introduzione	47
4.2.Gli acciai inossidabili	47
Capitolo 5 - Caratterizzazione meccanica dei materiali a diverse velocità di deformazione	53
5.1.Introduzione	53
5.2.Presentazione dei materiali	53
5.3.Trazione	55
5.3.1.Trattazione teorica della prova	55
5.3.2.Modalità di esecuzione della prova.....	62
5.3.3.Presentazione dei risultati.....	65
5.3.4.Analisi dei risultati.....	74
5.4.T-shape compression test	75
5.4.1.Attrito.....	75
5.4.2.Trattazione teorica della prova	77
5.4.3.Modalità di esecuzione della prova	81
5.4.4.Presentazione dei risultati.....	83
5.4.5.Analisi dei risultati.....	87
5.5.MTS 810	87
Capitolo 6 – Procedura sperimentale	89
6.1.Introduzione	89
6.2.Analisi metallografica	89
6.2.1.Preparazione metallografica	89
6.2.2.Caratterizzazione microstrutturale con il microscopio ottico (OM).....	92
6.3.Microdurezze e durezze	96
6.3.1.Durezze Vickers	96
6.3.2.Microdurezze Vickers	97

Capitolo 7 – Presentazione dei risultati.....	101
7.1.Introduzione.....	101
7.2.Campioni non deformati	102
7.3.Campioni realizzati con più stazioni di stampaggio.....	117
7.3.1.Risultati dei campioni che hanno subito le prime due stazioni di stampaggio	118
7.3.2.Risultati dei campioni che hanno subito tre stazioni di stampaggio.....	127
7.4.Campioni realizzati con una singola stazione di stampaggio	148
Capitolo 8 – Correlazione tra parametri microstrutturali e durezze	169
8.1.Introduzione.....	196
8.2.Correlazioni per tappi realizzati a più stazioni di stampaggio.....	170
8.3.Correlazioni per tappi realizzati a stazione di stampaggio singola	173
Capitolo 9 – Analisi dei risultati e conclusioni	177
9.1.Introduzione	177
9.2.Materiali non deformati.....	177
9.3.Campioni realizzati con più stazioni di stampaggio.....	179
9.4.Campioni realizzati con una singola stazione di stampaggio	182
9.5.Confronto tra tappi realizzati in multistazione e tappi in mono stazione	186
9.6.Conclusioni	188
Capitolo 10 – Azioni migliorative	189
10.1.Introduzione	189
10.2.Miglioramento teorico	189
10.3.Miglioramenti del sistema produttivo e orizzonti di industrializzazione	190
Bibliografia	191
APPENDICE A	193
APPENDICE B	195
APPENDICE C	209
APPENDICE D	225
APPENDICE E	233
APPENDICE F.....	239
APPENDICE G	247
APPENDICE H	251

APPENDICE I.....259
APPENDICE L.....267
APPENDICE M.....273

SOMMARIO

Il lavoro svolto in questa tesi di laurea tratta in modo approfondito lo studio e lo sviluppo di processi innovativi di deformazione plastica a freddo di acciai inossidabili, caratterizzando meccanicamente le leghe utilizzate e microstrutturalmente i componenti ricavati in lega AISI 304L, AISI 316L e SAF 2205, confrontandoli con quelli ottenuti in lega SAE 1005. Obiettivo principale di questa tesi è acquisire una concreta conoscenza del comportamento delle tre tipologie di acciai inossidabili soggetti a deformazione plastica a freddo, correlandoli con il medesimo componente stampato in acciaio SAE 1005 da deformazione plastica.

I componenti oggetto di indagine sono stati forniti da Zoppelletto S.p.A., che opera da oltre 50 anni nel settore dello stampaggio a freddo di acciai a basso tenore di carbonio. L'azienda collabora, già da diversi anni, con il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università degli Studi di Padova per lo studio e lo sviluppo di processi di stampaggio innovativi di acciai inossidabili.

La tesi è strutturata in tot capitoli:

Il *Capitolo Uno* vede la presentazione della realtà aziendale, dei prodotti e delle loro applicazioni

Il *Capitolo Due* descrive nel modo più generale le tecnologie di forgiatura e estrusione sia da un punto di vista teorico sia esponendo le tipologie più utilizzate. Segue una presentazione dei principali tipi di macchinari utilizzati per compiere queste lavorazioni, per poi presentare un focus sulle presse ad eccentrico in quanto sono la tipologia di macchine utilizzate nell'analisi.

Il *Capitolo tre* approfondisce nello specifico il processo produttivo utilizzato in Zoppelletto S.p.A. partendo dalla fornitura dell'acciaio, come quest'ultimo viene introdotto in macchina e il processo di saponatura eseguito. Viene presentato poi il prodotto selezionato e le due versioni di realizzazione, mono stazione e multistazione. Infine si ha sia un approfondimento sulle matrici utilizzate in azienda e una presentazione dettagliata delle macchine utilizzate in Zoppelletto durante la prova.

Il *Capitolo quattro* presentazione degli acciai inossidabili, partendo da considerazioni sul diagramma ferro-carbonio e giungendo alla esposizione delle principali caratteristiche correlate dalle specifiche proprietà

Il *Capito cinque* presentazione delle prove meccaniche eseguite sui materiali in esame. Si inizia con prove di trazione a diversa velocità in modo da caratterizzare meccanicamente il materiale nelle diverse situazioni deformative. Segue un secondo test sui materiali utilizzati, il T-shape compression test, con lo scopo di ricavare informazioni utili sull'interazione provino-matrice.

Il *Capitolo sei* descrive il procedimento eseguito per l'analisi microstrutturale di ogni campione, la caratterizzazione microstrutturale viene poi completata con la presentazione delle prove di durezza eseguite.

Il *Capitolo sette* è dedicato all'esposizione dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione microstrutturale descritta nel capitolo precedente; rispettivamente per i campioni non deformati, per i campioni che hanno subito ciascun stadio di deformazione in multistazione e infine quelli realizzati in stazione singola. Ogni provino prevede l'analisi dei parametri microstrutturali e di durezza scelti per caratterizzarlo.

Il *Capitolo otto* è riservato ad un approfondimento sulla relazione che intercorre tra i parametri microstrutturali scelti e le durezza Vickers. Tale analisi viene riservata al confronto tra il comportamento del materiale attualmente utilizzato con l'inossidabile che viene considerato meno attitudinale per lo stampaggio a freddo.

Il *Capitolo nove* è dedicato alla presentazione dell'analisi dei risultati e a tutte le considerazioni che si possono trarre osservando le immagini calibrate e gli andamenti dei parametri caratterizzanti, per chiudere con lo spazio riservato alle conclusioni dell'indagine.

Il *Capitolo dieci* riassume tutte azioni migliorative che a ogni livello possono essere realizzate per il mantenimento delle specifiche del prodotto finito.

INTRODUZIONE

È innegabile che la forgiatura a freddo di acciai inossidabili sia una delle sfide principali nel panorama ingegneristico, in quanto la sua realizzazione permetterebbe un'evoluzione sia per quanto riguarda il processo produttivo, per quanto riguarda la qualità ultima del prodotto.

L'allettante prospettiva industriale è quella di ottenere un prodotto che vede le qualità del processo di stampaggio a freddo come: prodotto near-net-shape, risparmio di materia prima e riduzione/eliminazione dello sfrido, miglioramento delle caratteristiche meccaniche del prodotto finito, miglioramento del rapporto resistenza/peso (riferimento sito stampaggio a freddo National). Unite a queste proprietà del processo oggetto di studio si associano quelle derivanti dal passaggio da un acciaio a basso tenore di carbonio a un inossidabile, qualità resistenza alla corrosione e le maggiori proprietà meccaniche.

Lo scopo dell'indagine è quello di caratterizzare microstrutturalmente i componenti ottenuti in modo da comprenderne i meccanismi di deformazione dei materiali trattati, adattando i processi produttivi attuali della lega SAE 1005 agli acciai inossidabili considerati, valutandone qualità e specifiche dimensionali dei prodotti e mantenendo nello stesso tempo gli stessi parametri operativi.

Per una maggiore comprensione del meccanismo deformativo, è stato inoltre studiato il comportamento meccanico delle diverse tipologie di acciaio oggetto di studio a diverse velocità di deformazione e la deformabilità delle stesse in condizioni di differenti parametri di processo tramite T-shape test

La premessa fondamentale è quella che quanto segue riguarda uno specifico componente e che dunque i risultati ottenuti saranno applicabili in toto esclusivamente per il suddetto, mentre per altri prodotti dell'azienda si dovrà procedere poi ad opportuni adattamenti sulla base della specifica storia deformativa

Zoppelletto S.p.A.

1.1.L'azienda

Zoppelletto S.p.A. è una piccola-media impresa veneta, con sede a Torri di Quartesolo (Vicenza), che opera nel settore della forgiatura a freddo da oltre 50 anni (Fig. 1). La sua fondazione risale ai primi anni '60, grazie al lavoro dei fratelli Floriano e Bruno Zoppelletto utilizzando una fresa nel garage dell'abitazione di famiglia. Grazie alla spinta data dal boom economico della fine del decennio, la società ha assunto i connotati di una vera e propria azienda strutturata e competente, affacciandosi anche sul mercato europeo, e diversificandosi all'inizio degli anni '70 con introduzione della tecnologia dello stampaggio a freddo. Da questi anni in poi Zoppelletto S.p.A. ha puntato molto al miglioramento della qualità del prodotto e all'inglobamento dei processi che precedono e/o seguono la realizzazione del prodotto. Negli anni si sono poi susseguite due generazioni di imprenditori i quali hanno sempre di più potenziato l'azienda fino a farla divenire la Zoppelletto S.p.A. che oggi vende i suoi componenti in tutto il mondo.

Attualmente, il cuore tecnologico della azienda e' la produzione capace di realizzare fino a 200000 pezzi al giorno. La mente di questo sistema è l'ufficio tecnico che dispone all'interno di aggiornati CAD-CAM per la costruzione delle attrezzature e degli stampi, che vengono sviluppati e creati internamente.

L'essenza del ciclo produttivo è lo stampaggio a freddo, dove il materiale viene deformato fino al raggiungimento della forma desiderata con un duplice vantaggio di costo: un risparmio in termini di materiale e di lavorazione (durante questo processo il materiale viene plasmato senza essere riscaldato). Grazie a questo processo, i componenti presentano una finitura superficiale costante su vasta scala e soprattutto un risparmio di materiale e di lavorazione, garantendo così' minori costi e un abbattimento delle emissioni inquinanti.

Inoltre, negli ultimi anni, la continua ricerca in materiali, lubrificanti e attrezzature ha consentito all'azienda di produrre particolari sempre più complessi. Per il completamento del ciclo produttivo, Zoppelletto S.p.A. si è inoltre attrezzata con macchine Transfer a CNC per l'asportazione e deformazione di truciolo.

L'azienda impegna attualmente 44 dipendenti e dalla sua fondazione è stato costante l'impegno per la realizzazione di prodotti con un elevato standard qualitativo.

Uno degli interventi più importanti è stata l'adozione e l'implementazione di un Sistema di gestione per la Qualità. Attualmente il Sistema di Gestione della Qualità di Zoppelletto S.p.A. ha ottenuto la certificazione UNI EN ISO 9001:2008, mentre il Sistema di Gestione Ambientale aziendale ha ottenuto la certificazione UNI EN ISO 14001:2004.

Ma la spinta al continuo miglioramento non si arresta come dimostra l'ambiziosa collaborazione dell'azienda con il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università degli Studi di Padova che punta allo sviluppo di processi produttivi di stampaggio a freddo di acciai inossidabili, considerati da molti meno lavorabili della lega a basso tenore di carbonio attualmente utilizzata (SAE 1005)



Fig. 1.1 Esterno della ditta Zoppelletto spa

1.2. Produzione e applicazioni

La produzione Zoppelletto S.p.A. consiste nella lavorazione a freddo con processi di stampaggio mediante presse monostazione e multistazione di diverse tipologie di componenti, che sono talvolta accomunati da lavorazioni per asportazione di truciolo rifinitrici del componente uscente dal processo di forgiatura a freddo.

A seconda della geometria abbiamo ovviamente prodotti che vengono realizzati a forma netta (*near-net-shape*), tramite singola stampata (presse monostazione) e prodotti che devono subire più passaggi in modo da raggiungere gradualmente la forma desiderata (presse multistazione). La produzione Zoppelletto S.p.A. comprende:

- riduzioni, tappi e raccordi utilizzati nel settore termoidraulico
- dadi e componenti per l'oleodinamica

ruote carrello, bussole, supporti sedia e schienali per arredamento da ufficio

spinotti per meccanismi biella - manovella, boccole, manicotti, pressacavi, bussole.

L'azienda quindi offre un catalogo completo e diversificato, ma flessibile in quanto ogni prodotto può essere realizzato in diverse varianti [1].

Tecnologia dello stampaggio a freddo

2.1.Introduzione

.Il processo analizzato in Zoppelletto S.p.A. viene chiamato generalmente “stampaggio a freddo” e rappresenta l'insieme di due lavorazioni ben definite: la forgiatura e l'estrusione inversa.

La scelta della corretta operazione/i di stampaggio è assunta in fase di progettazione, una volta definita la geometria del prodotto e come avviene il ciclo produttivo. Per comprendere completamente le caratteristiche del processo e del prodotto segue una breve introduzione nella teoria delle due lavorazioni, per poi continuare sulle tipologie di macchine che le permettono, approfondendo così il funzionamento di quelle effettivamente trattate in questa tesi.

2.2.Tecnologia della forgiatura

2.2.1.Generalità

La forgiatura è classificata come una lavorazione primaria in quanto vede come protagonisti componenti come billette e/o spezzoni, ma viene definita anche lavorazione massiva in quanto gli stessi hanno un rapporto area su volume molto ridotto.

Nella pratica la forgiatura è un processo che permette di deformare plasticamente le billette e spezzoni all'interno di due stampi per conferire la forma desiderata, passando due da un semilavorato di forma semplice ad uno con forma più complessa.

Una delle caratteristiche peculiari del processo è la minimizzazione dello scarto di materiale per pezzo prodotto, arrivando in alcuni casi a essere nullo, mantenendo tempi di realizzazione molto contenuti. A volte si ottiene la geometria finale con pochi cicli di lavorazione, soluzione che è molto adottata per lotti medi e grandi in quanto i costi delle attrezzature possono essere facilmente ammortizzati [2].

Ma il vero valore aggiunto ai prodotti realizzati è quello che le fibre del materiale risultano orientate seguendo la forma nella sua completezza, massimizzando le caratteristiche meccaniche del materiale.(Fig. 2.1)

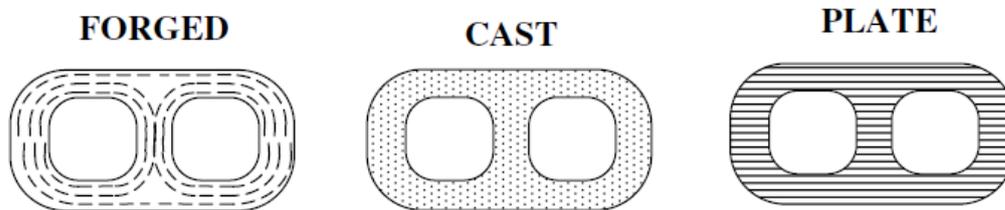


Fig. 2.1 Una corretta forgiatura orienta la grana cristallina in modo da massimizzare le proprietà meccaniche. Nel fuso i grani sono disposti casualmente, mentre nel pezzo lavorato alle macchine segue la direzione di laminazione.

I fenomeni fisici che descrivono i vari stadi di forgiatura sono difficili da tradurre con precisione in forma analitica. Il flusso di metallo, l'attrito tra il pezzo e lo stampo, la generazione ed il trasferimento di calore durante il flusso plastico sono tutti parametri complessi da valutare e risulta difficile prevedere l'andamento e fare un'analisi economica.

Molte volte la produzione di pezzi dalle geometrie complesse sono necessari più stadi di deformazione per non degradare le proprietà dei materiali; in tutte queste operazioni risulta essere un valido supporto l'utilizzo di software di simulazioni agli elementi finiti che permettono di capire l'evoluzione della deformazione.

La attitudine del materiale a essere soggetto a questa lavorazione è detta forgiabilità, che può essere verificata sottoponendo il materiale a prove di compressione tra due stampi piani o tramite una prova di torsione a caldo fino a rottura. Nel primo caso il materiale maggiormente adatto è quello che, in deformazione, vede con più ritardo la formazione di cricche; nel secondo quello che permette più rotazioni complete attorno a suo asse.

2.2.2. Tipologie di forgiatura

Il panorama delle geometrie da realizzare, i macchinari utilizzati e i materiali in gioco hanno permesso l'evoluzione di differenti modi nella conduzione della lavorazione, che mantiene comunque la funzione di formatura del materiale tramite stampi e grazie alla forza impressa da un pistone.

Considerando come parametro discriminante la temperatura è possibile distinguere tre tipi di forgiatura:

-*forgiatura a freddo* in cui il rapporto tra la temperatura di realizzazione e quella di fusione sia inferiore allo 0,3.

-*forgiatura a media temperatura* il cui il rapporto citato è compreso tra 0,3 e 0,5

-*forgiatura a caldo* quando il parametro in questione supera i 0,5

Optando invece ad una classificazione basata sullo stampo utilizzato si ottengono altre varianti del processo:

-*forgiatura a stampo aperto* in cui l'impressione sul materiale in lavorazione viene seguita tramite due stampi che si accostano parallelamente senza giungere mai alla chiusura degli stessi. Il processo di formatura avviene sottoponendo il pezzo a compressione, sollecitazione con la quale per attrito o gradienti di temperatura è possibile il verificarsi del fenomeno dell'imbarilimento, determinando una deformazione non uniforme del pezzo in lavorazione, per ridurlo si ricorre a lubrificazione e/o vibrazioni. (Fig 2.2)

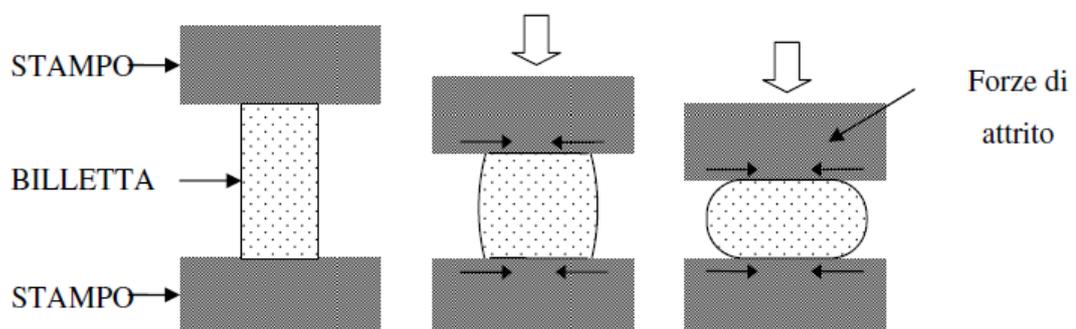


Fig. 2.2 Processo di forgiatura a stampo aperto

-*forgiatura a stampo* processo nel quale in pezzo assume la forma della cavità dello stampo da cui viene compresso. Tratto distintivo della lavorazione è la fuoriuscita di materiale, detta bava, che non essendo contenuta nella cavità viene incrudita per compressione non permettendo altra fuoriuscita di materiale, favorendo così il buon riempimento della forma. Il contatto tra le due parti dello stampo potrebbe portare alla rottura degli stessi, ma è la bava stessa a evitare che ciò accada fungendo da cuscinetto tra i due semi stampi, come è possibile osservare dalla *Fig. 2.3*

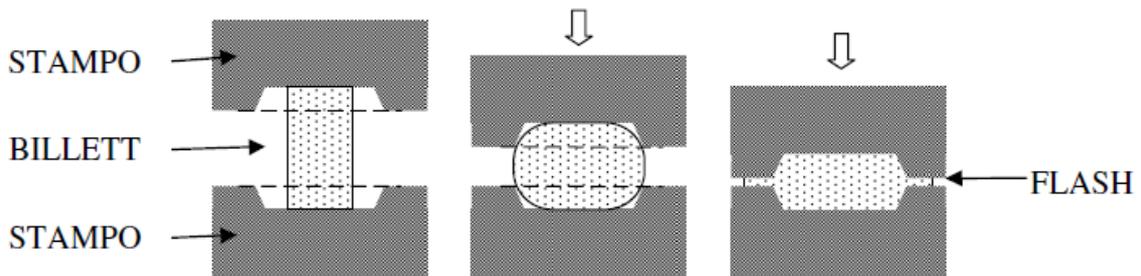


Fig. 2.3 Processo di formatura a stampo

-*formatura a stampo chiuso* che richiede un più attento dosaggio del materiale in quanto, la procedura è quella della forgiatura a stampo ma vede un riempimento completo senza la formazione di bava. Richiede sforzi inferiori e permette l'ottenimento di maggiore precisione rientrando nella categoria near-net-shape. (Fig. 2.4)

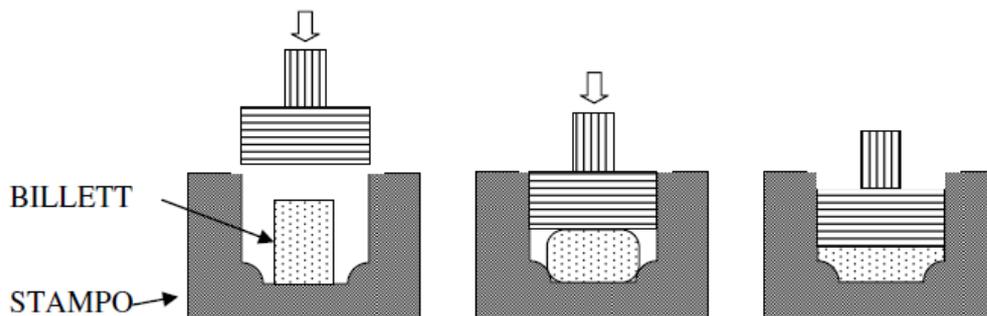


Fig. 2.4 Processo di formatura a stampo chiuso

2.3.Tecnologia di estrusione

2.3.1.Generalità

L' estrusione è considerata una lavorazione primaria e massiva, ma intrinsecamente è anche una lavorazione discreta poiché può essere lavorato un solo pezzo alla volta.

L'estrusione consiste nel forzare il passaggio del materiale all'interno di una matrice, tramite la spinta fornita da un pistone, permettendo così il passaggio dalla sezione circolare della billetta a quella imposta dalla matrice. Si ottengono così proprietà meccaniche anisotrope con allungamento dei grani in direzione della deformazione e orientati rispetto alla sezione imposta dalla matrice, e non rispetto alla totalità della forma come avveniva nella citata forgiatura.

Il parametro utilizzato per definire la complessità del processo di estrusione è il *rapporto di estrusione R* , che viene definito come il rapporto tra l'area iniziale della billetta e l'area finale [3]. Poiché risulta valida la conservazione del volume è naturale che vi sia una variazione di lunghezza. Il massimo rapporto di estrusione applicabile dipende dal materiale, anche se in ogni caso si incrementano le pressioni necessarie per la realizzazione del processo. Un aumento del rapporto di estrusione comporta un aumento della deformazione, soprattutto a freddo, del materiale che incrudisce, plasticizzando.

L'attitudine di un materiale a subire una lavorazione di estrusione è detta estrudibilità. Tale capacità diminuisce con l'aumentare del carbonio presente e degli elementi in lega, in quanto la presenza di tali elementi innalza il limite di snervamento ma anche velocizza il fenomeno dell'incrudimento che limita la deformabilità uniforme.

Limitando la deformabilità applicabile si limita la versatilità di utilizzo del materiale.

Un fatto che risulta quindi cruciale per la buona riuscita della lavorazione è dunque il flusso di materiale e di riflesso anche l'attrito presente tra la billetta e il contenitore, in quanto il flusso risulta omogeneo nel solo caso di assenza di attrito. Nel reale invece abbiamo zone in cui il materiale non viene spostato rimanendo indeformato.

La suddetta zona (zona morta) risulta delimitata da una superficie di taglio, che si espande all'interno della billetta tanto più forte è la pressione a cui viene sottoposto, aumentando anche il volume della zona morta.

2.3.2. Tipologie di estrusione

Le vicissitudini nell'ambito industriale hanno contribuito alla spinta nella diversificazione del processo di estrusione, portando quindi tipologie specifiche per le distinte applicazioni.

In primis, come già considerato nella forgiatura, la distinzione può avvenire con la temperatura alla quale viene realizzato il processo. Si ottengono dunque le categorie già elencate basate sulla temperatura omologa.

Un parametro caratterizzante dell'estrusione è l'interazione delle parti, che si riflette sulla differente tecnologia utilizzata per fornire la pressione necessaria alla billetta.[3]

Si ottiene:

-*estrusione diretta* dove la billetta inserita nel contenitore viene poi spinta da un pistone attraverso una matrice che ne modifica la forma. Risultano avere un'importanza particolare gli attriti che si verificano tra billetta e contenitore, ma anche l'angolo con cui si cerca di guidare il materiale verso la matrice.

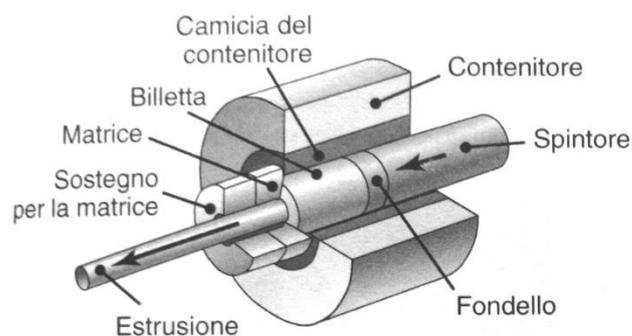


Fig. 2.5 Processo di estrusione diretta [3]

-*estrusione inversa* nella quale il punzone preme il materiale sulla camera portando il materiale a estrudere nella direzione opposta all'interno del punzone stesso. In questo modo non vi è moto relativo tra contenitore e materiale e vi è un cospicuo risparmio in termini di energia necessaria e spazio occupato dalla macchina.

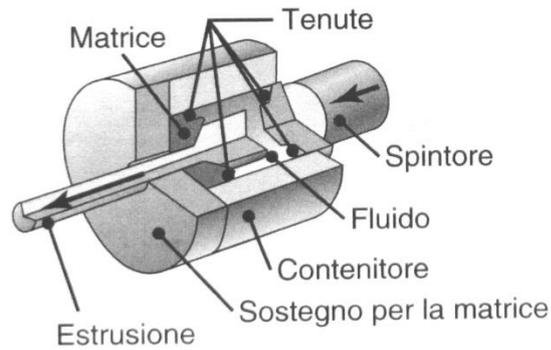


Fig. 2.6 Processo di estrusione inversa [3]

-*estrusione idrostatica* altra soluzione valida per ottenere due caratteristiche importanti; infatti con il riempimento del contenitore di fluido è possibile annullare l'attrito, ma anche uniformare la pressione agente sulla billetta grazie al cuscinetto di fluido interposto tra la stessa e il pistone premente.

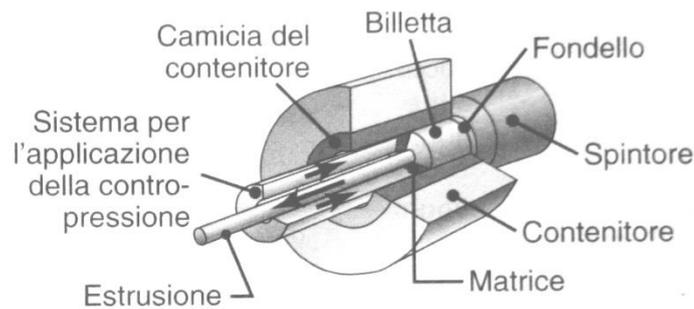


Fig. 2.7 Processo di estrusione idrostatica [3]

-*estrusione ad impatto* che risulta essere particolarmente adatta per la realizzazione di forme cave, processo nel quale un punzone ad elevata velocità impatta sul materiale facendolo estrudere dalla parte opposta, rispetto a quella di avanzamento del pistone.

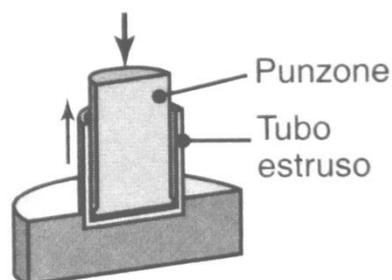


Fig. 2.8 Processo di estrusione a impatto [3]

2.4.Presse e Magli

2.4.1.Introduzione

Le lavorazioni introdotte devono essere svolte con macchinari adatti, la forgiatura generalmente può essere posta in atto sia con magli che con presse mentre l'estrusione è esclusiva applicazione delle presse.

L'intenzione di questo paragrafo non è solamente una classificazione delle tipologie esistenti, ma anche come la diversa applicazione della forza comporti una diversa risposta del materiale e quindi del prodotto finale. In conclusione si approfondirà il funzionamento delle presse coinvolte nello svolgimento della tesi.

2.4.2.Velocità di deformazione e incrudimento

Precede l'introduzione alle macchine necessarie per l'esecuzione della forgiatura e dell'estrusione, una breve presentazione per comprendere il rapporto esistente tra la velocità della lavorazione e la risposta del materiale che viene deformato.

Eseguendo una prova di trazione si ottiene una curva sforzo reale-deformazione reale che vede la deformazione elastica precedere quella plastica, divise dalla tensione di snervamento del materiale. Questo secondo campo ha una prima parte di deformazione uniforme, a cui segue quello di strizione; ma è proprio in questa prima parte che è possibile estrarre un parametro che testimonia la resistenza opposta al materiale alla deformazione plastica imposta dalla prova, viene chiamato *coefficiente di incrudimento n* . Maggiore è il valore da esso assunto maggiore è la malleabilità offerta dal materiale. Considerando però che è calcolato per velocità di deformazione costante.

Si noti, inoltre, come per mantenere costante la velocità di deformazione reale sia necessario incrementare progressivamente la velocità di processo.

Per diverse velocità di deformazione abbiamo diverse risposte da parte del materiale che per un aumento delle stesse si comporta come avverrebbe nel caso di una diminuzione di temperatura, portando una rigidità maggiore e quindi anche un coefficiente di incrudimento minore. Richiede dunque maggior energia per essere deformato..

Ne consegue che per deformare compiutamente materiali che hanno attitudine all'incrudimento, è consigliabile optare per velocità di deformazione minori in modo da rallentare i fenomeni incrudenti e avere maggiore duttilità da sfruttare.

Per recuperare in termini di duttilità e quindi abbassare il coefficiente di incrudimento è necessario far ricristallizzare il materiale aumentando la temperatura, ricostituendoli indeformati.

Si prende in considerazione i macchinari che verranno poi introdotti, il maglio che prevede, grossolanamente, la caduta per gravità di una mazza permette di avere una velocità di deformazione costante che si rispecchia in una velocità di processo che cala gradualmente.

Al contrario commentando l'applicazione della forza da parte di una pressa si osserva come la velocità di processo si mantenga costante, rispecchiandosi in un aumento graduale della velocità di deformazione

Si consiglia per materiali con più alto valore del coefficiente di incrudimento di preferire, se possibile, l'utilizzo di magli in quanto avendo velocità di deformazione costante conservano margine di duttilità che può essere sfruttato per completare il riempimento dello stampo,

2.4.3.Magli

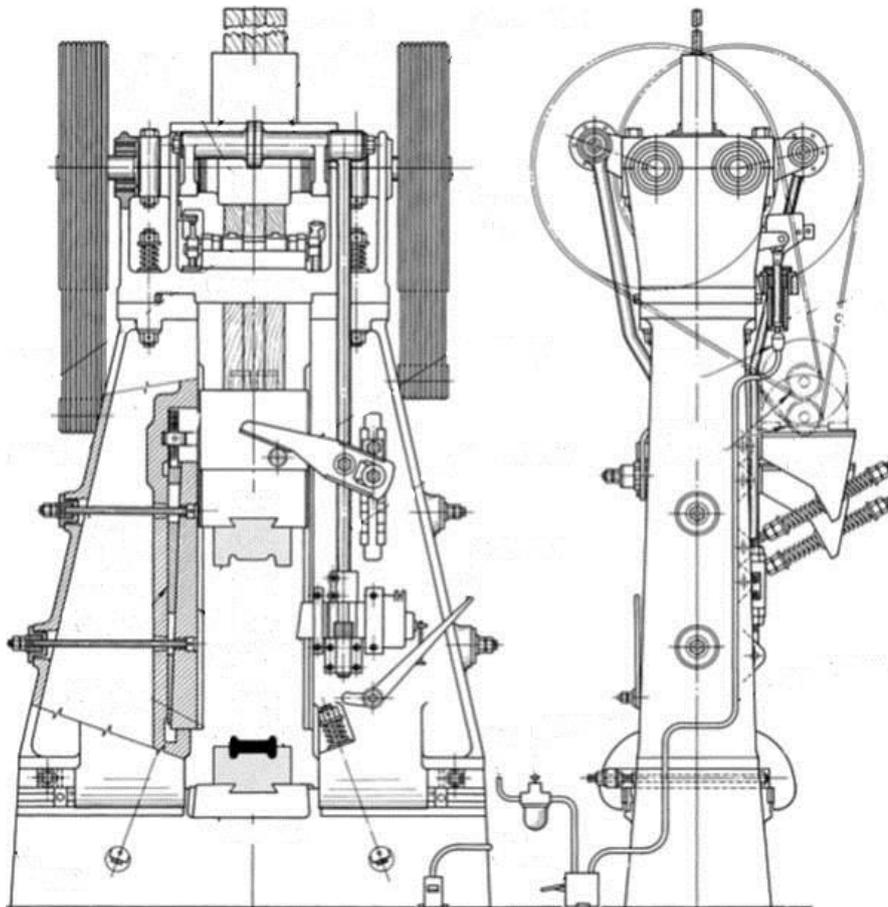


Fig. 2.9 Maglio a semplice effetto [6]

Rimanendo nella più ampia generalità i magli ricavano l'energia di deformazione, dall'energia potenziale accumulata sollevando una mazza, che può essere accelerata in diversi modi per consentire la formatura anche di geometria complesse. Da queste considerazioni si deduce che essendo stabilito il peso della mazza e altezza raggiungibile, esse siano considerate limitate in energia.

E' possibile classificare i magli per potenza quantificabile, ovvero per energia di deformazione disponibile [4].

Si distinguono versioni dei magli che si differenziano per l'energia che sono in grado di sviluppare:

-*maglio a semplice effetto* che comporta l'accumulo di energia potenziale per sollevamento di una mazza, energia che viene poi al pezzo come energia di deformazione. Prevede un semistampo fisso e la mazza tra cui viene posizionato il materiale, come riportato in Fig. 2.9 .

-*maglio a doppio effetto* che accelerano la discesa della mazza con la spinta fornita dall'aria compressa, dal vapore o dell'olio compressi. L'accelerazione comporta un incremento dell'energia della mazza e quindi maggiore energia di deformazione da scaricare sul materiale.

-*maglio a contraccolpo* la cui peculiarità è il movimento reciproco dell'incudine e della mazza, che comporta determinati vantaggi quali: il minor peso dell'incudine, l'aumento del rendimento, la riduzione sensibile delle vibrazioni trasmesse alle fondamenta che devono assorbire e disperdere parte dell'energia.

2.4.4.Presse

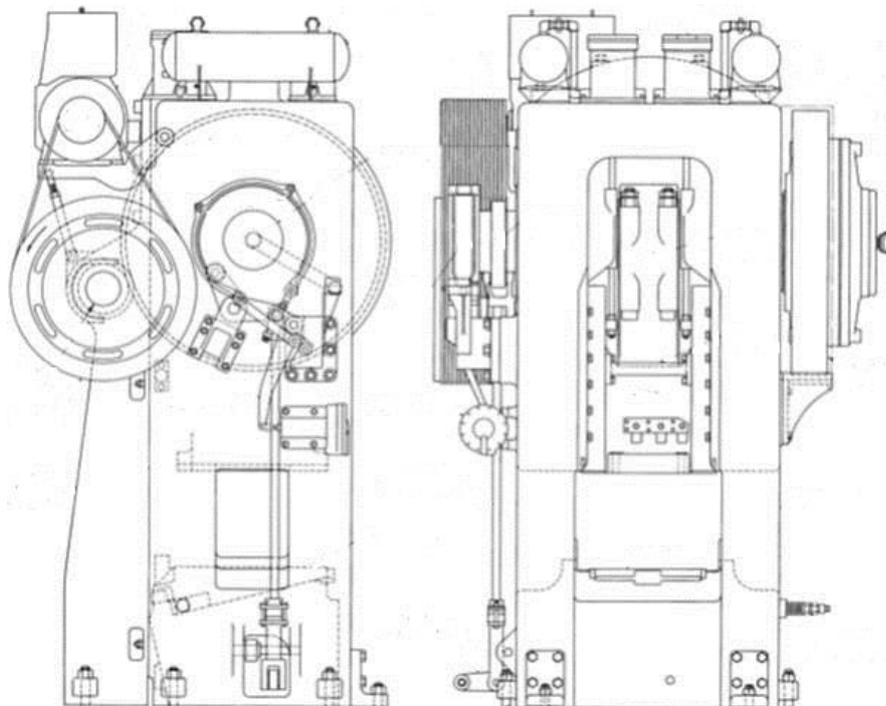


Fig. 2.10 Esempio di pressa meccanica [6]

Le presse sono il macchinario che accomuna le lavorazioni di estrusione e forgiatura e garantiscono dunque una velocità di processo costante, facoltà che può essere data tramite meccanismi che mantengano costante la propria variazione nonostante i valori di pressione in gioco. Le presse sono divise in diverse taglie ponendo come parametro la forza disponibile che sono in grado di esercitare, espressa in tonnellate.

Si classificano i macchinari anche in base al meccanismo che permette loro di generare la pressione in targa, ottenendo:

-*presse a vite* unica variante che viene riconosciuta come limitata in energia, in quanto ricavata da un volano posto in rotazione. Il meccanismo vede come componente principale la vite, che superiormente risulta solidale al volano e inferiormente alla mazza è fissa all'incastellatura della macchina con la madre vite solidale alla struttura. Il moto rotativo del volano implica la rotazione della vite che lo tramuta così in moto traslativo tale da permettere l'abbassamento e innalzamento della mazza.

-*presse idrauliche* unica versione della tecnologia che viene definita delimitata in forza. La spiegazione si ritrova nella meccanica di funzionamento che vede un serbatoio, la cui dimensione principale è l'altezza, che viene diviso in due camere dalla presenza di un pistone a cui è collegata la mazza. Riempiendo la camera superiore si ottiene la discesa della mazza, mentre pompando il fluido su quella inferiore si provoca la risalita della stessa.

-*presse meccaniche a ginocchiera* la quale come ogni pressa meccanica è definita limitata in corsa, poiché quest'ultima dipende dal meccanismo utilizzato per generare la forza. I meccanismi menzionati hanno però la peculiarità di modificare il valore della velocità della mazza a seconda del punto della corsa a cui ci si riferisce; essa risulta quindi massima a metà della corsa e quasi nulla in prossimità del punto morto inferiore, dove però fornisce la massima forza disponibile. Hanno la possibilità di sviluppare forze attorno ai 100MN, circa 1200 tonnellate.[5]

In Fig. 2.10 è riportata una rappresentazione schematica di una pressa meccanica.

2.4.5. Presse ad eccentrico

Si è scelto riservare uno spazio dedicato alle presse meccaniche ad eccentrico per approfondirne la conoscenza. Questo si è reso necessario in quanto entrambe le presse utilizzate per la produzione delle due versioni dei campioni analizzati hanno meccanismi ad eccentrico.

Le presse meccaniche ad eccentrico sono guidate da un motore elettrico e controllate principalmente da una frizione ad aria, le presse meccaniche hanno una guida dell'albero eccentrico che impartiscono una lunghezza costante al punzone per operazioni verticali della mazza. [6]

Si selezionano diversi meccanismi utilizzati per la conversione del moto rotatorio dell'eccentrico a quello traslazionale necessario per muovere la mazza:

-*pressa meccanica biella- manovella* dove la coppia necessaria per far roteare il volano è trasmessa tramite un albero eccentrico e si converte in moto utile per la mazza attraverso la biella, la manovella viene rappresentata dal raggio della ruota a cui la biella è solidale, figura 2.11. Attuando il meccanismo appena citato si hanno errori di inclinazione laterale della mazza e decentramento del carico nei carichi importanti, che possono essere limitati con l'applicazione di una seconda biella sul lato opposto.

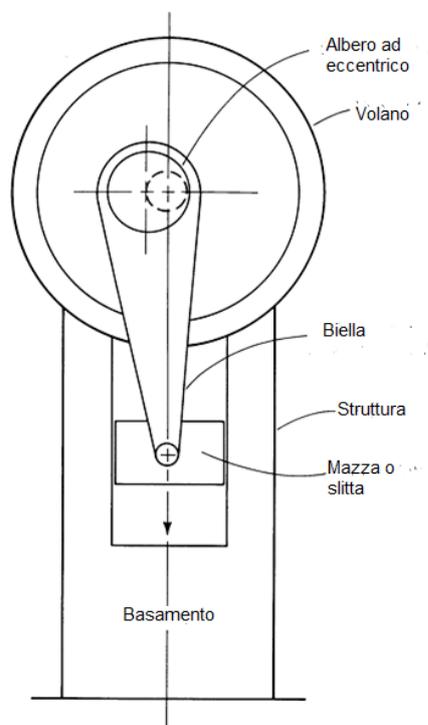


Fig. 2.11 Pressa meccanica biella-manovella [6]

-*pressa a cuneo* che ha come protagonista principale un cuneo avente un lato inclinato di 30° a cui vengono accostati la biella e l'albero ad eccentrico. Il movimento passa dall'eccentrico alla biella, che assolve ancora alla traduzione in moto traslatorio orizzontale che conficca il cuneo nella apposita sede. Ne consegue che il cuneo si muove orizzontalmente separando progressivamente la mazza dalla struttura della pressa, spingendo la prima verso il basso. Ed è proprio l'altezza a cui è posta la mazza a fare la differenza e può essere controllata da una boccia eccentrica regolata da una vite senza fine. (Fig. 2.12)

La caratteristica principale di tale pressa è che la forza di forgiatura è uniforme sopra l'intera superficie della forma, limitando l'inclinazione della mazza e lo stampaggio non centrato. Il difetto principale è il relativamente lungo tempo di contatto tra stampo e parte forgiata.

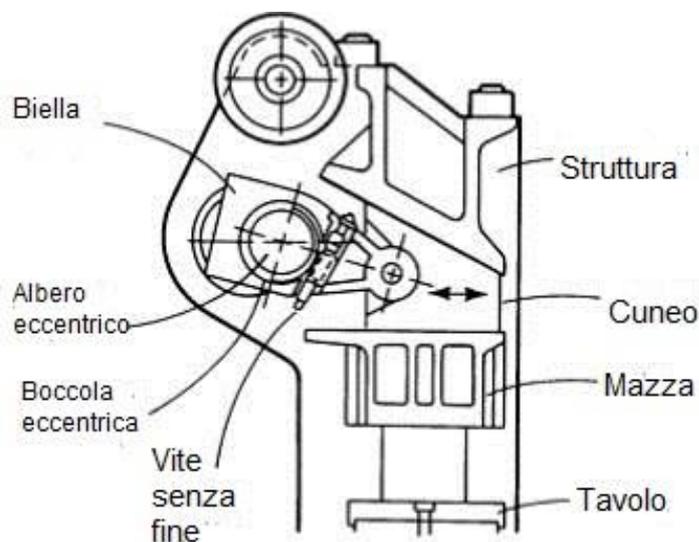


Fig.2.12 Pressa meccanica a cuneo [6]

-*presse a meccanismo scotch-yoke* meccanismo si basa su un blocco eccentrico che è integrato nella mazza, il modulo in oggetto nella rotazione eccentrica ha uno spostamento sia orizzontale che verticale. Mentre la prima corrisponde ad un periodo immobile per la mazza che si mantiene alla stessa altezza, la seconda porta al trascinarsi della mazza. La movimentazione è riassunta in Fig. 2.13 .

Ma per permettere la mobilità di tutte le parti senza compromettere la precisione della lavorazione, si deve provvedere all'irrigidimento della struttura; inoltre la pressa risulta più compatta della versione a biella e contenuta in altezza.

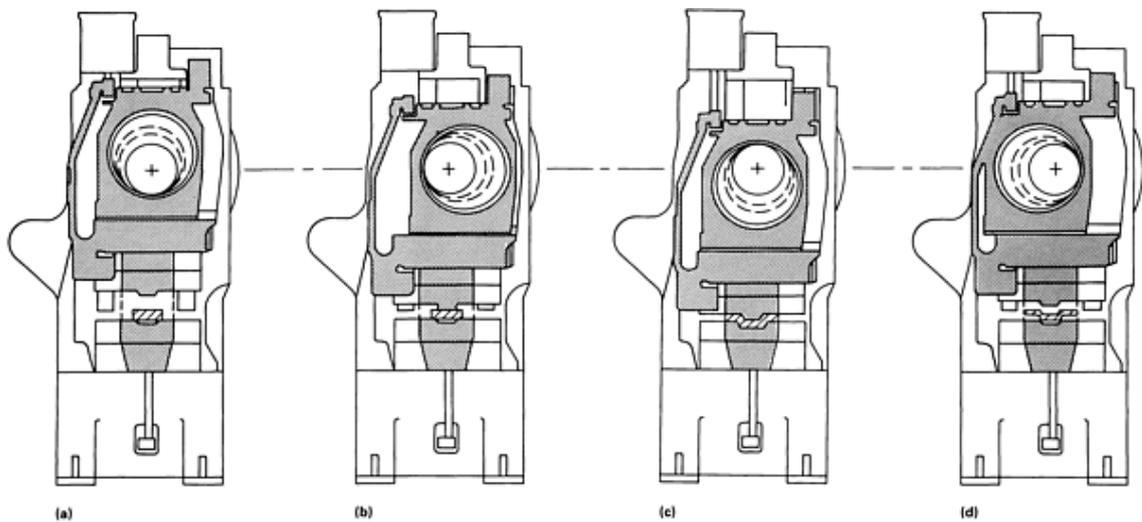


Fig.2.13 Sequenza movimento pressa meccanica scotch-yoke [6]

L'utilizzo di presse meccaniche determina dei vantaggi intrinseci nel processo se confrontate con la messa in opera dei magli, tra i quali spiccano: la possibilità di rispettare tolleranze più strette, un maggior numero di pezzi stampati per unità di tempo e matrici meno massive.

Mentre per quanto riguarda le limitazioni emergono: l'impossibilità di modificare la forza applicata, che non permette nemmeno lo svolgimento delle lavorazioni preliminari; rilevanti infine anche le considerazioni economiche, l'elevato costo delle presse rispetto ai magli, ma anche produttive in quanto le presse lavorano prevalentemente alla realizzazione diretta della forma finale.

Filiera produttiva aziendale

3.1.Introduzione

Si ritiene utile esporre la metodologia e la sequenza che tuttora viene utilizzata nell'azienda per meglio comprendere le modifiche possibili sia per un possibile miglioramento futuro un miglioramento della stessa sia come adattamento per la lavorazione di nuovi materiali (i.e. gli acciai inossidabili)..

In questo paragrafo sarà anche presentato il prodotto scelto come campione per lo stampaggio del nuovo materiale.

3.2.Approvvigionamento delle macchine

La somministrazione del materiale alle presse può essere eseguito in due modalità:

-alimentazione discreta usualmente presente nelle macchine a monostazione di stampaggio che si svolge con l'utilizzo di barre da cui poi si otterranno pastiglie che verranno poi sottoposte ad un processo di bonderizzazione, saponatura per facilitarne o stampaggio, e se richiesto dal cliente o per complessità di realizzazione si prevede una normalizzazione.

-alimentazione continua che avviene tramite rotoli di materiale che la macchina prevede a srotolare, troncare e stampare. Questa opzione prevede una bonderizzazione eseguita dalla acciaieria fornitrice.

La scelta della modalità di alimentazione ha riflessi importanti sulla qualità del prodotto finale. La scelta di una fornitura di pastiglie comporta che la loro realizzazione avvenga per troncatura o per taglio tramite sega, ma la prima crea una zona incrudita mentre la seconda è molto più lenta rispetto alla prima.

La opzione di un approvvigionamento continuo permette invece una maggiore flessibilità nel cambio di produzione, adattando la lunghezza della pastiglia troncata.

Le matasse stoccate in ambiente umido, presumibilmente per residui di bonderizzazione, hanno la tendenza a formare tracce di ruggine tra le spire della matassa stessa, fatto che andrebbe evitato poiché la ruggine è ruvida e non scorre come il materiale circostante, anzi tende ad avere un effetto abrasivo sugli stampi riducendone la vita utile.

L'utilizzo delle vergella come metodo di fornitura comporta che la superficie bonderizzata sia solo quella cilindrica iniziale, lasciandone prive e incrudite le facce di troncatura. Mancanza che si tenta di compensare con un getto di olio diretto ad ogni matrice che ha lo scopo di pulire e lubrificare ogni stampo. Così facendo, in una sequenza di più stampaggi successivi, le prime matrici sono ripulite da un eccesso di bonderizzazione mentre le altre vengono lubrificate per sopperire alla mancanza della saponatura sulle superfici create dalla stazione precedente.

Per quanto riguarda l'utilizzo di pastiglie abbiamo che l'ampia varietà di prodotti offerti vede la presenza sia di quelli che necessitano di uno stampaggio più complesso sia quelli nei quali lo stampaggio risulta meno incisivo e severo. I primi vengono normalizzati in forni alla temperatura di 800-820°C, tale da stabilizzare la temperatura a cuore a 600°C, in modo da riuscire a distendere le fibre del materiale.

Con il passaggio nel forni i pezzi si possono considerare come già puliti, in quanto l'azoto in esso circolante comporta l'eliminazione della calamina, pellicola che ricopre superficialmente l'acciaio, mentre grazie alle alte temperature abbiamo l'evaporazione e/o lo scioglimento dell'olio rimasto nelle pastiglie.

Per le pastiglie che devono poi subire una lavorazione meno severa la pulizia dagli olii e grassi di lavorazione viene eseguita tramite un apposita lavatrice.

Successivamente, ad entrambe le lavorazioni descritte, segue il processo di bonderizzazione.

3.3.Bonderizzazione

3.3.1.Introduzione

La bonderizzazione è un trattamento superficiale a cui vengono sottoposte le pastiglie di materiale, procedendo all'applicazione di uno strato di sapone che permetta una miglior scorrevolezza del materiale all'interno dello stampo, riducendo l'attrito che si verrebbe a creare limitando di fatto la riduzione di duttilità del materiale in opera e la forza utile per la formatura del pezzo. Risulta quindi un passo necessario e strategico della filiera produttiva di cui saranno messi in evidenza luci e ombre.

3.3.2.Realizzazione, qualità del risultato e regolazione del processo

Come già sottolineato la bonderizzazione è un trattamento superficiale e come tale deve avere modo di rimanere aggrappato al materiale. Perché ciò avvenga bisogna incrementare la superficie di contatto tra i due e renderla irregolare, aumentando così la rugosità superficiale del materiale ospitante; obiettivo che viene raggiunto facendo sottoporre le pastiglie ad un processo di sabbiatura con apposita sabbia. La quantità per ciclo si aggira sui 6,5 quintali per una durata di cinque minuti.

Una volta conclusa la sabbiatura i materiali entrano nel castello della macchina detta coclea nel quale saranno sottoposti al vero e proprio trattamento di bonderizzazione. La coclea ha le sembianze di un tunnel rettilineo che subisce variazioni di diametro nel suo procedere, la periferia interna vede la presenza di una griglia cilindrica alla quale è saldata una lama metallica che compone un profilo elicoidale. Il tutto viene posto in rotazione in modo tale da costringere i provini ad avanzare per attraversare tutta la macchina in tutti i suoi stadi intermedi, individuabili dalle variazioni di diametro già citate. Si analizzano successivamente le stazioni a cui sarà sottoposto il singolo semilavorato:

-lavaggio in acqua fredda compiuto tramite spruzzatura di acqua alla temperatura di 25-35°C, pescata da un'apposita vasca. Il lavaggio ha lo scopo di eliminare residui di sabbiatura e non che potrebbero inquinare la vasca successiva.

-*bagno di fosfati* che avviene in corrispondenza del primo aumento di diametro, con l'immersione delle pastiglie in un bagno acido che funge da aggrappante per il sapone che si depositerà sulla superficie del pezzo. La lunghezza della vasca, detta coppa di fosfatazione, è tale da costringere la permanenza in immersione per almeno 5 min.

Il bagno di fosfatazione è composto da 1700l acido ad una temperatura appena sopra ai 50°C.

-*secondo lavaggio con acqua* segnalato dalla diminuzione di diametro del tunnel che permette la riemersione dei pezzi e la rimozione dell'acido residuo tramite spruzzi di acqua ad una temperatura di 50°C, che sarà poi necessaria per l'esercizio del bagno di sapone.

-*bagno basico* altro passaggio non trascurabile della bonderizzazione è la neutralizzazione dell'acidità del pezzo sottoponendo ad un bagno in una sostanza basica. Il passaggio prevede una vasca da 1100l il cui liquido è ad una temperatura di 65-70°C per non raffreddare il bagno che lo succede, liquido che deve essere cambiato ogni 15 giorni lavorativi. La buona riuscita del passaggio appena esposto è determinante per la qualità del prodotto, in quanto se ciò non avvenisse il materiale arrugginirebbe in pochi minuti, rendendolo inutilizzabile in fase di stampaggio.

-*saponatura* che vede le pastiglie passare in un ultimo bagno di acqua a 78°C tale da mantenere in emulsione il sapone, stearato di zinco, che vi rimane aderente grazie all'effetto aggrappante.

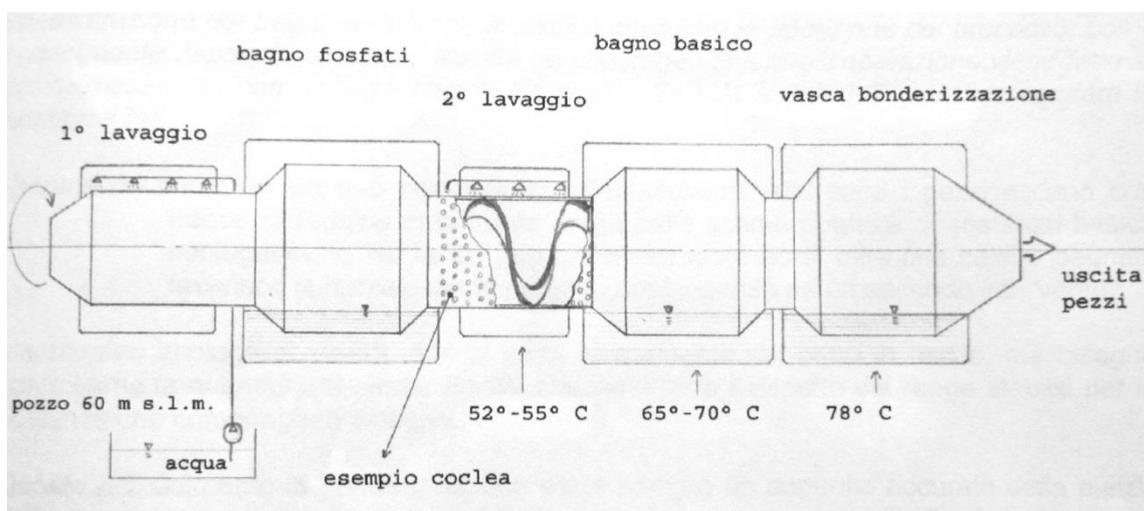


Fig. 3.1 Percorso di bonderizzazione in coclea

Il giudizio della qualità del rivestimento è effettuato visivamente e direttamente in opera dall'operatore in modo che provveda tempestivamente alla regolazione dei bagni.

Se le pastiglie uscenti dalla coclea presentano: una superficie di rivestimento abbondante che dona un colore bianco latte con una copertura che al contatto si sfalda e che vede anche la presenza di "grumi" di sapone siamo davanti ad una abbondanza di stearato di zinco nel bagno di saponatura che va dunque diluita e/o ad un bagno che è a temperatura inferiore rispetto ai 78°C previsti.

La sovrabbondanza del rivestimento porterebbe, a lungo andare, all'otturazione dei fori per lo scarico dell'olio di lubrificazione, che dunque non troverebbe sfogo nella compressione dello stampaggio trasferendo le sollecitazioni in toto sulla matrice che rischierebbe di rompersi.

L'eventualità che lo strato ricoprente sia scarso viene conosciuta al tatto, in quanto risultano ancora distinguibile la rugosità conferita dalla sabbiatura, sintomo che la bonderizzazione non è riuscita a creare uno strato sufficientemente uniforme. L'impegno di pastiglie con queste caratteristiche porta ad una notevole usura degli stampi in quanto si incrementa l'attrito che si avrebbe normalmente con la rugosità data dalla sabbiatura. La regolazione dei bagni è affidata all'occhio critico dell'operatorio che usa l'esperienza per orientarsi sulla taratura esatta; l'operatore risulta dunque cruciale per la qualità del prodotto finale.

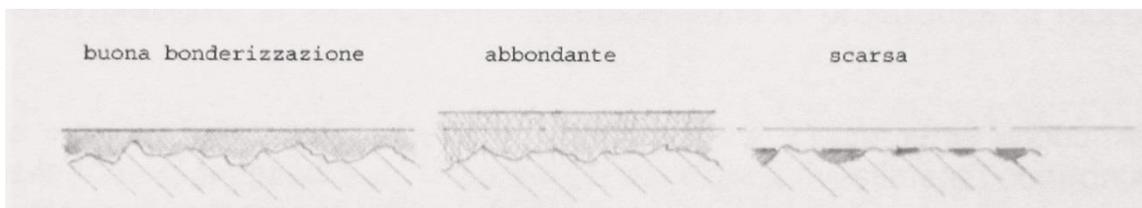


Fig.3.2 Esempi di rivestimento ottenuto

3.3.3.Processi alternativi : Polimerizzazione

All'interno dell'azienda e in collaborazione con Henkel è in via di sperimentazione un trattamento sostitutivo rispetto al processo di bonderizzazione, che crea uno strato superficiale che favorirebbe lo scorrimento del materiale ma tramite l'applicazione di un polimero. Il trattamento è chiamato polimerizzazione.

Il prodotto scelto, fornito da Henkel S.p.A., è chiamato Bonderlube FL 744, è un lubrificante non reattivo liquido su base acquosa, di colore bianco, appartenente ad una innovativa tecnologia di trattamento superficiale per la deformazione a freddo degli

acciai al carbonio, inossidabili e metalli non ferrosi. Esso è utilizzato, con un'unica applicazione, in alternativa al pacchetto lubrificante classico composto da uno strato fosfatico (i.e. fosfato di Zinco-Ferro) e sapone (i.e. stearato di Zinco e Sodio) che normalmente riveste la superficie del metallo base.

Questo prodotto viene normalmente utilizzato in impianti ad immersione sia per trattamento in batch che in impianti in linea; tecniche alternative di applicazione a spruzzo o di flow coating sono comunque possibili. [7].

Il ciclo di lavoro risulta perciò enormemente semplificato e si compone di quattro fasi:

-*sabbiatura* che può essere dunque mantenuta (come nelle tradizionali tecnologie di preparazione chimica superficiale dei metalli alla deformazione a freddo) e annessa al processo in questione

-*lavaggio per immersione in acqua demineralizzata calda* (i.e. temperatura di 60°C ca.) che prevede l'acqua ad una temperatura di 50°C per provvedere alla pulizia delle pastiglie.

-*polimerizzazione* quindi un trattamento con il Bonderlube FL744 alla temperatura di 50°C. In questa fase il polimero deve essere diluito con acqua demineralizzata in quantità variabili in funzione del tipo di manufatto e del tipo di deformazione, ad una concentrazione compresa tra il 60% e il 90%. Per evitare stratificazioni di prodotto è necessaria un'accurata movimentazione o ricircolazione del bagno all'interno della vasca mediante un agitatore meccanico, entrambi costruiti in acciaio AISI 304. Il tempo di trattamento è in funzione dell'applicazione ed è normalmente compreso tra pochi secondi (per applicazioni in linea) ed alcuni minuti (da 1 a 5 min per applicazioni in batch).

Nei vari test eseguiti in azienda sulla lega AISI-SAE 1005 e sugli acciai inossidabili utilizzati, il tempo di mantenimento delle billette utilizzate per le successive analisi è stato stimato dai 7 ai 10 min;

- *asciugatura* alla temperatura di 100°C circa (riferita alla superficie del metallo). Normalmente il tempo di asciugatura varia da pochi secondi (per applicazioni in linea) a circa 10-15 minuti (per applicazioni batch). Per gli spezzoni di materiale oggetto di successiva indagine è stato mantenuto un tempo di 15 minuti.

Per la gestione del bagno di Bonderlube FL 744 (i.e. fase di polimerizzazione) è possibile utilizzare due tecniche analitiche alternative:

- 1) Gestione per via conduttimetrica
- 2) Gestione tramite determinazione del residuo secco.

In funzione della concentrazione ottenuta si aggiunge ulteriore prodotto Bonderlube FL 744 concentrato se inferiore al valore prestabilito, mentre si aggiunge acqua demineralizzata per diminuire la concentrazione.

Per i test eseguiti è stata utilizzata una gestione per via conduttimetrica del bagno.

In questo caso per le misure viene utilizzato un conduttimetro con scala di lettura non inferiore ai 100 mS dotato di compensatore di temperatura (TC) programmabile manualmente con temperatura di riferimento di 25°C. Inoltre il conduttimetro è dotato da una cella conduttimetrica a costante 1 cm⁻¹ o 0,1 cm⁻¹, con capacità di lettura fino ad almeno 50 mS.

Per il controllo, si opera prelevando 200 ml di bagno circa e si legge la conducibilità a temperatura di riferimento 25°C o con un compensatore di temperatura, mantenendolo sotto agitazione. Il dato che se ne estrae viene poi inserito in un apposito grafico, riportato in Fig. 3.3 [7].

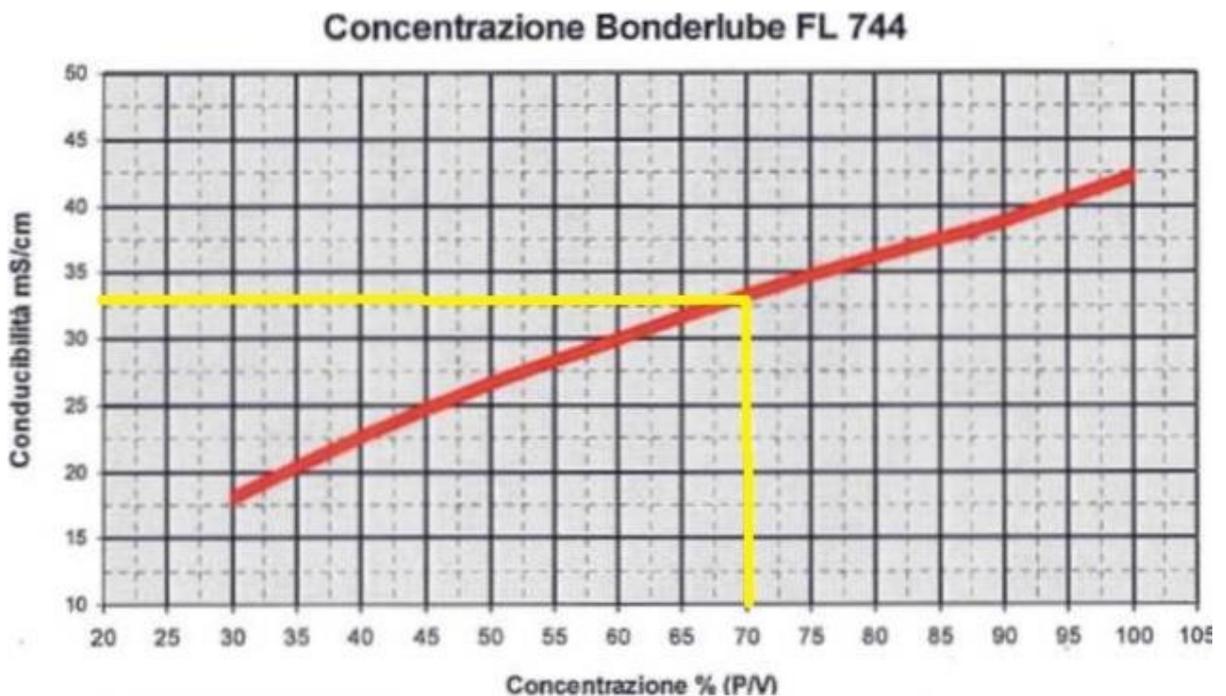


Fig. 3.3 Grafico per la verifica e il controllo del bagno polimerico.

Tra le due possibilità risulta inattuabile, in un ciclo produttivo, la gestione tramite determinazione del residuo secco, poiché i costi iniziali tra stufa ed essiccatore non sono indifferenti ma soprattutto imporrebbe una regolazione della concentrazione del bagno due ore dopo, tempo durante il quale le condizioni del bagno possono essere cambiate ancora.

Si sceglie quindi una gestione di tipo conduttimetrico, che prevede una spesa iniziale minore, ma anche una lettura semplice, veloce ma soprattutto eseguibile direttamente in opera che consente un'azione correttiva tempestiva.

Per le misure e i test fin d'ora eseguiti si è fissata una concentrazione di polimero nel bagno che è pari al 70%, dedotta dal grafico fornito in base alla misura di conducibilità di 32,9 mS misurata.

I processi di deformazione a freddo degli spezzoni trattati devono essere eseguiti in un arco di tempo non troppo ampio; in caso contrario deve essere prevista la giacenza dei pezzi trattati in un ambiente poco umido. Questo perché il rivestimento tende a reidratarsi non garantendo il massimo della prestazione in opera, e quindi per stoccaggi di lunghi periodi in ambienti umidi è consigliabile imporre un nuovo ciclo di asciugatura.

Necessario monitorare la concentrazione di polimero nel bagno in modo che si mantenga all'intorno della percentuale stabilita, in quanto proseguendo con la polimerizzazione dei pezzi la concentrazione tende ad diminuire.

La scelta di attuare il ciclo di polimerizzazione, in sostituzione al processo di bonderizzazione, prevede vantaggi consistenti in quanto vengono eliminate le vasche di acidi di fosfatazione e i fanghi che vi si depositano, nonché le rischiose operazioni di pulizia della coppa di fosfatazione. I fanghi sono di delicata rimozione, ma anche di costoso smaltimento.

Sicuramente l'azienda guadagna spazio nel layout aziendale in quanto la polimerizzazione necessiterebbe di un tunnel meno lungo avendo meno vasche, ha meno costi mantenimento e manutenzione, ma soprattutto ne guadagnerebbe la salubrità del luogo di lavoro per l'operatore che la deve gestire, nonché l'eliminazione delle operazioni di pulizia della coppa.

3.4. Prodotto scelto e matrici

3.4.1. Scelta del prodotto e presentazione della geometria

La vasta gamma di proposte di Zoppelletto S.p.A. ci ha permesso di scegliere due tipologie di prodotti le cui caratteristiche tecniche e i processi produttivi risultassero maggiormente adatti anche allo stampaggio di acciai inossidabili. Punto di partenza è stato quello di scegliere gli acciai inossidabili, che come si avrà modo approfondire poi, hanno un elevato coefficiente di incrudimento che ne riduce la duttilità sfruttabile e ne limita la deformazione possibile. Di conseguenza, dalla vasta gamma di prodotti offerti da Zoppelletto S.p.A, sono state escluse tutte le geometrie "complesse", con operazioni di estrusione inversa severa o attuate in più direzioni (i.e. raccordi). Ci si concentra quindi sulla scelta e successiva realizzazione di componenti più massivi, che presentassero deformazioni meno "severe".

Nello studio di fattibilità produttiva di componenti in acciaio inossidabile, eseguito tramite un software di simulazione di processo agli elementi finiti e svolto in collaborazione con l'azienda, sono state scelte due tipologie di tappo per il settore termoidraulico, stampati a freddo mediante presse con ciclo produttivo monostadio e multistadio rispettivamente. Nonostante ciò bisogna considerare la forma dello stesso componente come ideale; infatti essa mantiene criticità non trascurabili quali la forma esagonale della testa e la curvatura che deve subire il materiale nel formare la parte del gambo del tappo.

Il prodotto in questione permette quindi di coprire, come citato precedentemente, una casistica di stampaggio molto ampia; infatti ammettendo piccole modifiche di sezione esso viene stampato sia con una macchina monostazione che tratta pastiglie bonderizzate, sia con una macchina multistazione che stampa direttamente da vergella bonderizzata con l'utilizzo di olio lubrificante.

E' possibile notare confrontando le Fig.3.4a e 3.4b la differenza di sezione necessaria per la realizzazione del componente in un singolo ciclo di stampaggio e in più cicli di stampaggio.

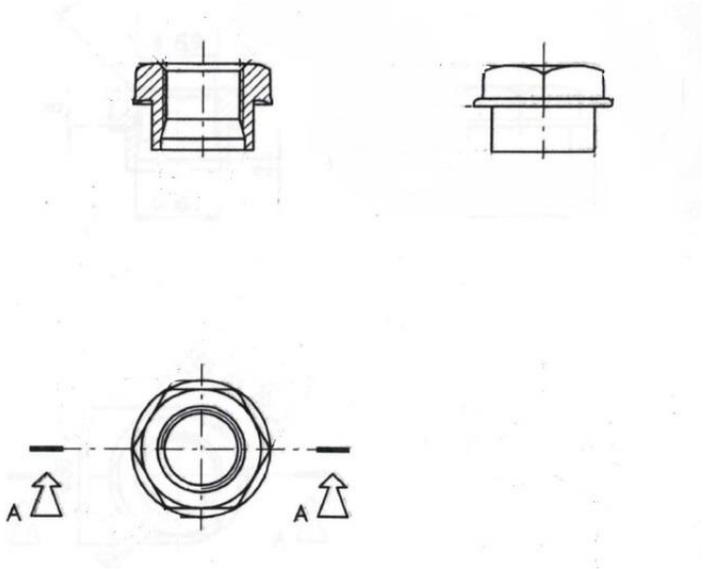


Fig. 3.4a tappo per stazione singola

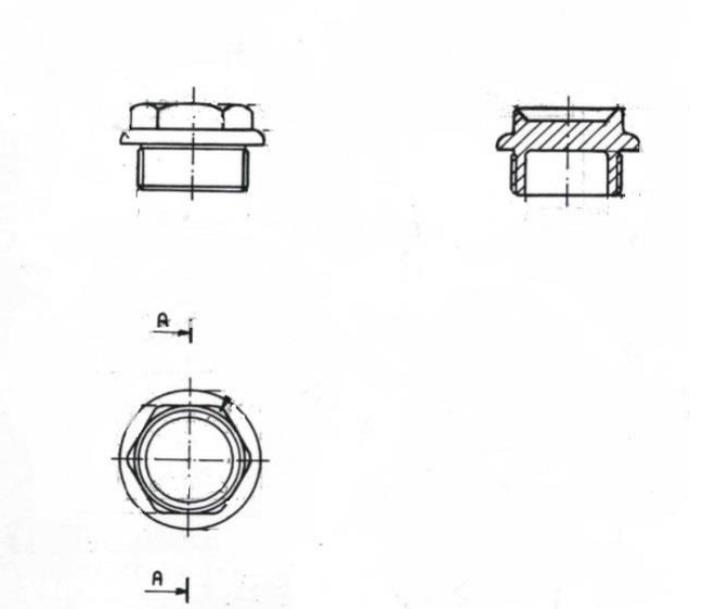


Fig. 3.4b tappo per multistazione [8]

3.4.2. Matrici

Le matrici convenzionali vengono divise in più famiglie che si distinguono per come avviene la lavorazione:

-*matrici inscatolate* durante le quali la compressione della pastiglia è data dal solo punzone in discesa accompagnando la pastiglia nella matrice che fungerà da contenitore sagomato del quale il materiale assume la forma.

-*matrici aperte* costituite da stampo e controstampo tra i quali bisogna prevedere uno sfogo di materiale, bava, che normalmente ospita il materiale in eccesso ma che nel caso dei tappi viene utilizzata per formare il collarino che divide l'esagono e il gambo tondo. Peculiarità di questo tipo di incastellatura è la presenza della bussola che si presenta come un cilindro con foro passante, in cui va inserito il punzone, tale da mantenere una corona circolare attorno allo stesso. La bussola ha il compito di assorbire le tensioni di compressione che il materiale provoca sul fondo della matrice stessa, rallentandone l'avanzamento con la deformazione della bussola stessa.

A seconda delle geometrie da realizzare si provvede all'applicazione di un rivestimento antifrizione o meno. Nel caso in cui la testa della bussola tendesse a tagliare il fondo della pastiglia è consigliabile non avere il rivestimento citato, in quanto la pastiglia sfoglierebbe inibendo il lavoro rallentante della bussola, materiale sfogliato che va dunque a impattare, senza essere frenato, sul fondo della matrice crea elevate pressioni localizzate che possono minare l'integrità della matrice.

La situazione appena esposta tende a verificarsi per bussole più sottili, per le quali si consiglia un materiale che abbia una durezza simile a quella del punzone.

La bussola può essere rivestita, fatto che accade più facilmente con bussole che vanno a creare una corona spessa in quanto aumenta la superficie di contatto tra matrice e punzone, soluzione che limita l'attrito che si manifesterebbe. Le bussole per le suddette applicazioni sono in un materiale la cui durezza sia interposta tra quella del punzone e quella della matrice, in modo che la deformazione del primo più snello, e sottoposto a carico di punta, possa avvenire deformando la bussola stessa.

Altra distinzione la meritano le matrici a seconda del lubrificante utilizzato:

-*stampaggio con olio* con il quale il progetto della matrice deve anche considerare il percorso graduale da imporre all'olio, normalmente si parte dal centro del fondo della matrice portandolo verso l'esterno, l'olio non deve rimanere imprigionato tra pezzo e

stampo per cui si devono inserire fori di scarico e/o con bava in caso di stampi aperti, figura 3.6.

-stampaggio con pastiglie bonderizzate dalle quali si può staccare la patina di sapone che necessita dunque di una pulizia, il poco grip del trattamento può essere causato da molte variabili: dal sapone residuo bruciato nell'attrito ad una pulizia non impeccabile.

Focalizziamo ora la discussione sugli stampi con la forma atta dei tappi oggetto di studio, considerate tra le matrici più fragili del parco aziendale. Infatti anche se raccordate gli spigoli della figura esagonale rappresentano comunque uno dei punti più delicati. Ad aumentare la criticità della zona in discussione è la presenza, ivi indispensabile di fori di scarico nei quali si accumula l'olio, in quanto durante la formatura è l'ultima parte che viene raggiunta dal materiale.

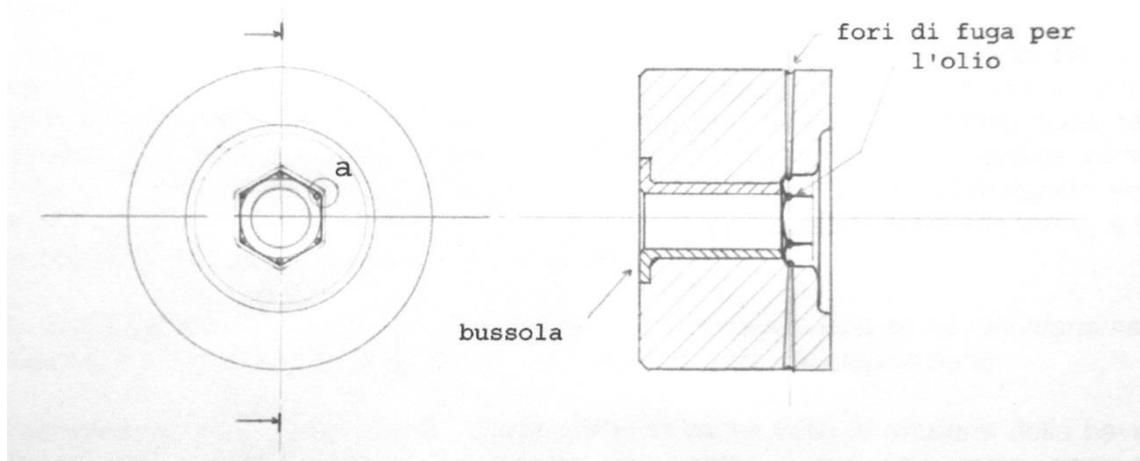


Fig. 3.5 Matrice esagonale del tappo



Fig. 3.6 Particolare del foro di scarico dell'olio nel vertice esagonale

3.4.3. Rivestimento delle matrici

Per diminuire gli attriti che si vengono inevitabilmente a creare durante l'operazione di stampaggio, possono essere alleviati con l'applicazione di un rivestimento superficiale che, aggiunto alla lavorazione di lucidatura, ha il compito di migliorare la scorrevolezza del materiale; tutto questo allo scopo di limitare l'usura dello stampo e aumentare la vita utile per la quale può essere utilizzato.

Il rivestimento è normalmente applicato sui punzoni e sulle matrici che sono soggette ad un cambio di direzione del materiale, ed è realizzato da un'azienda esterna con il metodo PVD (Physical Vapour Deposition) che prevede alla spruzzatura della polvere che costituirà il rivestimento in un ambiente di vuoto spinto.

La superficie di partenza deve essere lucidata e sgrassata per consentire alla polvere di far presa, e deve subire in fase di preparazione anche un trattamento di tempra; si osservi però che la temperatura alla quale si deposita il rivestimento deve essere inferiore alla temperatura a cui il componente è stato temprato in modo da non inficiare il trattamento.

Il rivestimento utilizzato è quello che prevede la deposizione di nitrato di titanio TiN che prevede una temperatura di rivestimento inferiore ai 500°C, ma soprattutto la creazione di uno strato spesso da 1-4µm della durezza di 2300HV_{0,05}. La copertura in TiN mantiene le caratteristiche peculiari fino a 600°C. Il trattamento permette l'ottenimento di un coefficiente di attrito su acciaio e a secco dello 0,4. Valore che apre alla possibilità di un incollaggio tra le superfici in questione, per evitare il quale si esegue la bonderizzazione sulle pastiglie o viene lubrificato con olio.

Altra possibilità perseguita dalla Zoppelleto S.p.A. è quella di prescrivere sempre una copertura delle matrici ma in Alluminio-Cromo Nitrato (AlCrN) sempre con il medesimo scopo di limitare gli effetti degradanti dell'attrito sulla matrice. Si sottolinea però che interposto tra la superficie dell'acciaio rapido e lo strato di AlCrN sia comunque presente il layer di TiN, in quanto quest'ultimo ha migliori doti di adesione sull'acciaio alto legato rispetto all'AlCrN che ha invece a sua volta buone caratteristiche sul nitrato di titanio (TiN). Il nitrato di Alluminio-Cromo ha una microdurezza che si aggira sui 3000HV_{0,05} per spessori che variano dai 0,5 ai 4 µm, una temperatura di esercizio attorno ai 1100°C ma soprattutto un coefficiente di attrito pari 0,25. Sono dunque evidenti i vantaggi emersi con l'adozione di codesto materiale di copertura, in quanto praticamente le parti a contatto possono essere considerate prive di attrito. [9]

3.4.4. Disposizione e tecnologia dello stampaggio

La tecnologia dello stampaggio prevede l'utilizzo di più componenti e il loro montaggio e funzionamento sono attentamente studiati per permettere la realizzazione del processo di forgiatura a stampo chiuso.

Per consentire lo stampaggio in senso orizzontale si ha: un punzone e un semi stampo fissi, posizionati anteriormente. Assialmente a questi vi sono un altro punzone e il secondo semi stampo che tra loro non hanno movimento relativo, ma compongono la parte mobile. Il movimento di questa parte di semi stampo è cruciale fornendo l'energia cinetica che verrà convertita in energia di deformazione.

Seguendo lo svolgersi dello stampaggio, la parte mobile entra in contatto con la pastiglia, l'avanzamento prosegue fino a che non avviene il contatto tra le matrici fenomeno che caratterizza la forgiatura a stampo chiuso. E' in questo momento che entra in azione la tecnologia che consente la forgiatura a stampo chiuso, l'azionamento di un sistema idraulico che permette un molleggiamento dello stampo anteriore, tale da ammortizzare il colpo del pistone mobile.

Tale soluzione permette il contatto delle matrici anche se in materiale duro e l'ottenimento di un prodotto senza la formazione di bava. La forgiatura a stampo chiuso viene dunque classificata come una tecnologia near-net-shape.

3.5. Presse utilizzate

3.5.1. Introduzione

Entra in gioco in questo momento la complessità della geometria dell'oggetto in quanto, grazie a questa variabile, si ha la realizzazione del prodotto in più stampate successive o in una singola. Per orientarci sul margine di duttilità fornitoci dagli acciai inossidabili scelti si è deciso di stampare due prodotti simili ma uno ottenuto con una pressa monostazione mentre l'altro con una pressa multistazione. Tale considerazione è stata scelta anche prevedendo delle successive prove a riscaldamento.

Sono presentate di seguito le due presse appena citate.

3.5.2. Pressa monostazione Erfurt

La pressa Erfurt è una pressa che prevede un solo stampaggio per l'ottenimento della forma ultimata del pezzo, compie dunque un processo che può essere annoverato in lavorazione near-net-shape. Ne deriva che per imporre una forma complessa con un solo ciclo di stampaggio il materiale debba sostenere una deformazione molto sostenuta senza che il materiale possa sfiorare nel tratto delle deformazioni non uniformi della curva di trazione; per evitare ciò normalmente sono lavorati acciai con modesto valore di incrudimento.

Lo stampaggio monostazione avviene tramite pastiglie bonderizzate per minimizzare gli attriti presenti.

Lo stampaggio avviene in orizzontale con una corsa definita di 400mm e una velocità di produzione di 40 colpi/min.

Per facilitare la deformazione del provino anche le sezioni dei prodotti sono progettate in maniera diversa, limitando l'estensione del materiale in sezione ortogonale all'asse di stampaggio e preferendo quella parallela

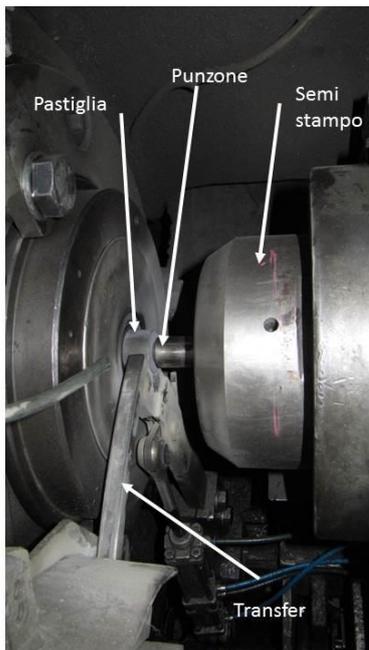


Fig. 3.7 Matrice della Erfurt



Fig. 3.8 Pressa Erfurt vista esternamente

I parametri di processo della Erfurt possono essere modificati in maniera discreta, in quanto il sistema della parte posteriore si compone in successione di: parte solidale punzone matrice e una serie di anelli che ingabbiano il punzone fino ad un piano di battuta.

Tali anelli risultano dunque rimovibili, con conseguente riduzione di distanza tra il piano ultimo e l'inizio della matrice, tale riduzione permette quindi al punzone, in fase di spinta, di avanzare di una quantità pari allo spessore di anelli rimossi ottenendo uno stampaggio più profondo del materiale. I parametri dunque attualmente utilizzati in Zoppelleto per la realizzazione del prodotto scelto sono:

Pressa	Diametro iniziale della billetta	Peso della pastiglia	Regolazioni	Velocità di processo
Erfurt	22mm	51g	29mm (spessore stampo +anelli)	40colpi/min

Fig.3.9 Tabella riassuntiva dei parametri utilizzati per lo stampaggio dei tappi in Erfurt

I medesimi parametri sopra citati sono stati poi mantenuti per l'ottenimento degli stessi prodotti in acciaio inossidabile. Alla conclusione dello stampaggio il prodotto finito risulta essere quello mostrato in figura 3.10.



Fig. 3.10 Tappo stampato in stazione singola

3.5.3.Pressa multistazione National

La necessità di una sequenza di stampaggio, in una macchina monostazione comporta un primo stampaggio di un lotto, un riattrezzaggio della macchina, e un nuovo stampaggio di tutto il lotto, considerando degli scarti per la regolazione di ogni set up di attrezzaggio bisognerà calcolare una quantità di pezzi iniziale superiore a quella richiesta. Nella maggior parte dei prodotti vengono utilizzate presse multistazione, che permettono tramite una sequenza di stampi il componimento di un ciclo di stampaggio tale da ottenere alla sua conclusione il pezzo finito, senza dover riattrezzare la macchina una volta avviata la produzione.

La regolazione degli stampi perché non interferiscano così con i successivi risulta determinante, e viene assunta indicativamente la media dei lotti fatti in passato che viene poi tarata basandosi sui primi pezzi stampati.

La pressa National ha una corsa di 400mm per una forza sviluppata di 400 tonnellate e lavora con asse orizzontale utilizzando per i prodotti considerati una velocità realizzativa di 63 colpi/minuto lavorando in parallelo su tre stazioni di stampaggio, e come sottolineato precedentemente viene alimentata con matassa da cui vengono troncate le pastiglie, metodo che implica pregi e difetti già esposti.

Lo stampaggio della National avviene in orizzontale e in parallelo su tre matrici.



Fig. 3.11. Foto Pressa National

La pressa National prevede dunque la realizzazione del tappo, oggetto delle nostre analisi, in tre passaggi partendo da un cilindretto di materiale bonderizzato:

-*primo stadio: realizzazione dell'invito* ovvero, tramite la compressione coassiale con un pistone di diametro leggermente inferiore a quello della pastiglia, si realizza un bordo rialzato di poco meno di un millimetro; bordo che conferisce alla stazione successiva una buona centratura del pezzo. Eseguita con matrici inscatolate.

-*secondo stadio: realizzazione del bicchiere* in questo caso il provino viene afferrato dal transfer e ruotato e poi viene ottenuto un nuovo bordo sulla nuova faccia con uno stampaggio molto più profondo rispetto al precedente. Eseguita con matrici inscatolate.

-*terzo stadio: realizzazione del tappo* in questa operazione di stampaggio prevede la deformazione nettamente più severa delle altre, dove viene fornita la forma del provino nella sua totalità. Questo ultimo stadio è invece ottenuto montando una matrice aperta.

-*quarto stadio: espulsione* Questa operazione è in parallelo alle altre ha come unico compito quello di espellere il provino della zona di stampaggio.

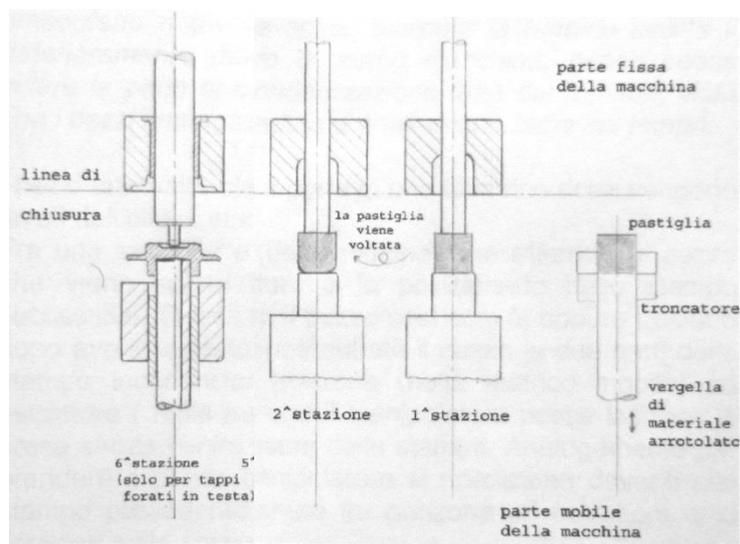


Fig. 3.12 Rappresentazione della sequenza di stampaggio nella pressa National



Fig.3.13 Attrezzatura di stampaggio della pressa National in corrispondenza con la Fig. 3.12, dove la quarta stazione di stampaggio è quella di espulsione

La modifica dei parametri operativi della pressa multistazione National sono leggermente più complessi ma forniscono maggior flessibilità alla tecnologia. In questo caso si interviene sulla regolazione della posizione reciproca tra matrici e stampi con una chiave di registrazione.

Come avveniva prima per l'Erfurt il fatto di far avanzare il punzone di spinta comporta una maggiore pressione sulla pastiglia che risulta quindi stampata con maggior severità. I parametri di processo attualmente in auge in Zoppelletto per lo stampaggio del tappo in più stadi deformativi sono riassunti in figura 3.14

Pressa	Diametro iniziale della billetta	Peso della pastiglia	Regolazioni	Velocità di processo
National	22mm	61g	29mm	63colpi/min

Fig. 3.14 Tabella riassuntiva dei parametri utilizzati per lo stampaggio dei tappi in National

Gli stessi parametri sopra elencati sono stati utilizzati per lo stesso componente ottenuto con gli acciai inossidabili considerati. Ne consegue che in uscita da ogni stadio la pastiglia a avrà geometrie diverse che sono mostrate in figura 3.15



Fig. 3.15 Sequenza di campioni stampati dei diversi stadi per la realizzazione dei tappi in National

Per provvedere allo spostamento del semilavorato da una stazione alla successiva entrano in azione i transfer, componenti che spostano il pezzo orizzontalmente con un passo costante di avanzamento. Il movimento orizzontale risultante è ottenuto da uno spostamento orizzontale consentito da una slitta parallela alla sequenza di stampi ma combinata con il movimento di un eccentrico o un pistone che permettono la presa dei manipolatori. Per ogni coppia di manipolatori può essere applicato indipendentemente un cinematismo che permetta di ruotare il pezzo di 90° rispetto alla chiusura degli stampi. Sono consentiti trasferimenti a distanza multipla del passo del transfer tramite la creazione di zone di sosta del pezzo, dove attende l'arrivo del transfer successivo.

Nell'afferrare il componente si causa la compressione di due molle che aprono un contatto elettrico, interruttore di sicurezza che evita cicli di stampaggio a vuoto, segnalandolo e/o fermando l'esecuzione del ciclo stesso, in quanto se la presa non è andata a buon fine oppure la pastiglia sia scivolata all'interno dello stampo lo stampaggio che ne succedrebbe potrebbe comportare la rottura degli stampi.

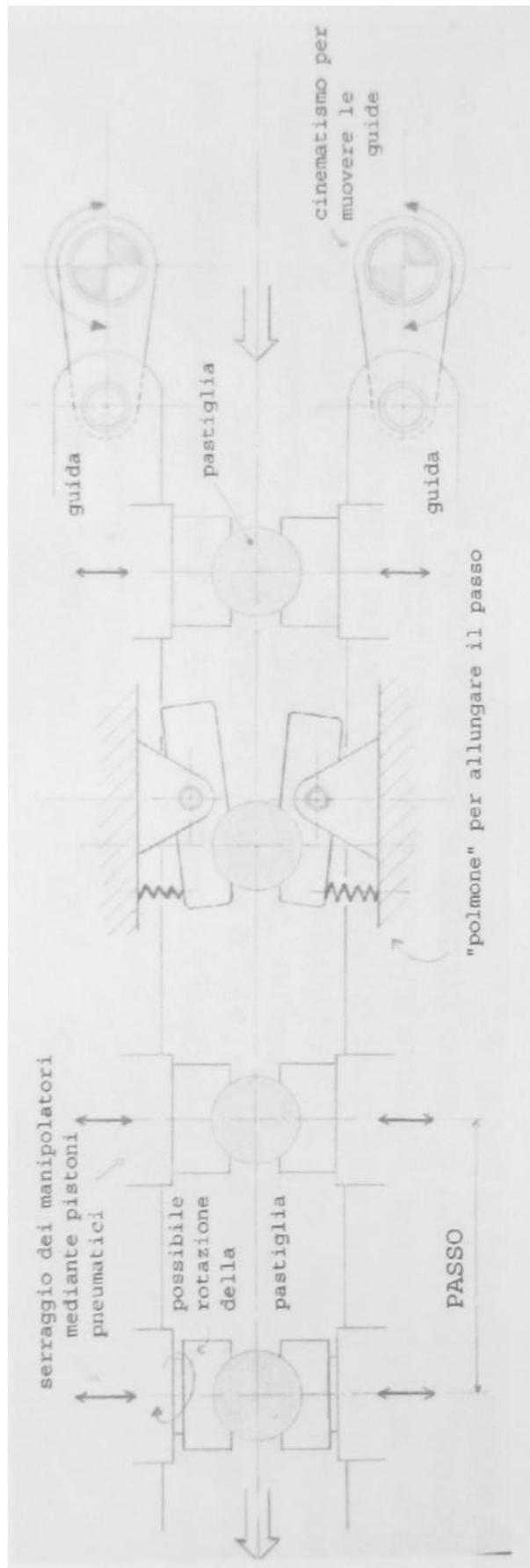


Fig 3.16 Sequenza di movimentazione tramite transfer

Una volta portato a termine lo stampaggio il tappo viene portato alle macchine utensili dove deve subire operazioni asportazione di truciolo come smussatura e maschiatura. Completate le operazioni di finitura e superati i controlli il pezzo risulta idoneo alla commercializzazione.

Acciaio inossidabile

4.1.Introduzione

Protagonisti di questo paragrafo sono gli acciai inossidabili che, come suggerisce il nome, hanno la caratteristica peculiare di non essere soggetti a determinati processi corrosivi.

Si badi però a considerare che, poiché sono possibili diverse tipologie di corrosione e attacchi degradanti, esistono diverse tipologie di acciai inossidabili per resistere ad un specifico tipo di corrosione o attacco purché siano posti in condizioni operative specifiche.

La virtù in oggetto, unite alle apprezzabili caratteristiche meccaniche, permette l'utilizzo di questo tipo di materiale in molti settori tra i quali si citano: l'automotive, l'industria chimica e quella alimentare. Possiamo ora passare ad una carrellata più tecnica sui tali materiali.

4.2.Gli acciai inossidabili

Da un punto di vista metallurgico gli acciai inossidabili sono considerati una lega a base di ferro, carbonio e cromo ma sono interessati anche dalla presenza di altri elementi quali: nichel, molibdeno, manganese, silicio e titanio. Considerando ciò che è stato appena scritto possiamo dire che il materiale è sicuramente un acciaio, in quanto lega ferro carbonio, ma la svolta delle sue caratteristiche la dà la presenza del cromo indispensabile per permettere la formazione di uno strato di ossido di cromo superficiale che non consente il proseguo di altri processi degradanti; il fenomeno appena introdotto viene chiamato passivazione. Per quantità sufficienti di cromo e supposto la presenza di un ambiente ossidante la pellicola può rimarginarsi se lacerata; risulta quindi cruciale la percentuale di cromo talmente tanto che la norma EN10088 permette la dicitura di acciaio inossidabile alle sole leghe che vedano una presenza di cromo almeno del 10,5%. [10]

Possiamo commentare il diagramma ferro-carbonio per vedere che incisività possa avere un elemento come il cromo; notiamo come fino ai 906°C i due si stabilizzano in una struttura allotropica a reticolo cubico a corpo centrato (CCC), detta ferrite α , con piccolo potere di assorbimento del carbonio per interstizione, ma elevato del cromo per sostituzione. Per temperature maggiori abbiamo una riorganizzazione in una struttura a corpo cubico a facce centrate (CFC), detta austenite, che ha elevato livello di solubilità del carbonio e meno del cromo, infine da 1392°C a 1493°C si ritorna ad una struttura CCC, chiamata ferrite δ .

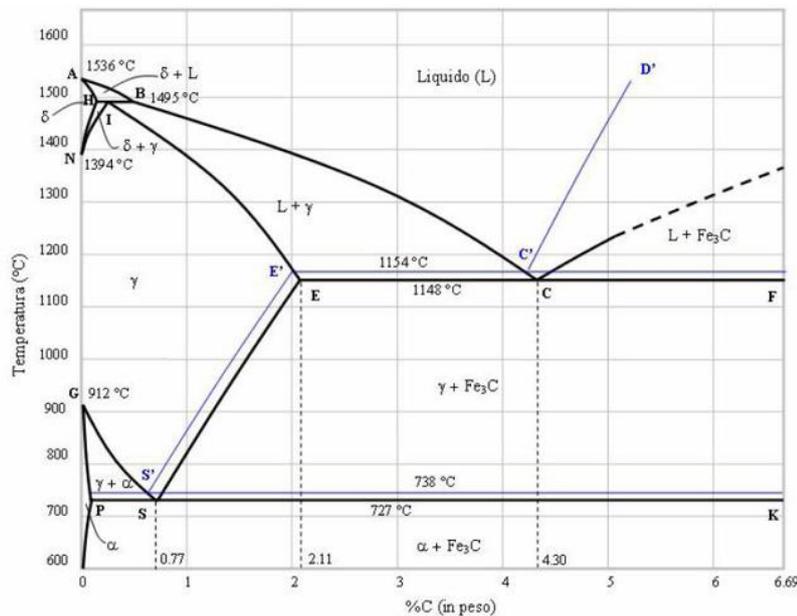


Fig. 4.1 Diagramma di stato ferro - carbonio

Abbiamo osservato come il carbonio interagisce con il ferro e le sue strutture allotropiche, possiamo ora indagare quale stabilità venga raggiunta da tra ferro e altri due elementi fondamentali per gli acciai inossidabili: il cromo e il nichel.

Nel caso della lega ferro-cromo si ottiene un diagramma di stato che predilige la formazione di ferrite α , motivo per cui il cromo è considerato elemento ferritizzante o alfaceno, mentre la struttura austenitica viene ristretta di molto ed è limitata fino a 12% di cromo. Si osserva ancora la presenza di un'altra fase, detta fase α , precipitati che contribuiscono sia alla riduzione delle caratteristiche anticorrosive sia di quelle meccaniche. Altri elementi alfaceni sono: silicio, molibdeno e titanio.

Per quanto riguarda invece l'equilibrio tra ferro e nichel è distinguibile una maggiore ampiezza delle condizioni che consentono l'ottenimento di una struttura austenitica, anche a temperatura ambiente, fatto per cui il nichel è considerato un elemento

chimico austenitizzante o gammageno; la presenza dell'austenite apre alla possibilità di effettuare trattamenti termici.

Per valori di nichel che si aggirano attorno al 40% si osserva una trasformazione magnetica.

Altri elementi gammageni sono: carbonio, azoto e manganese.

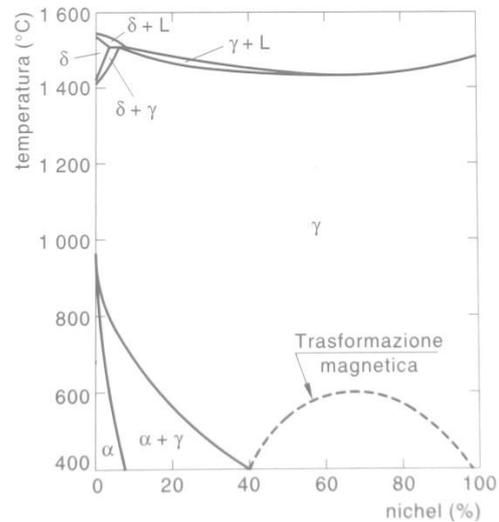
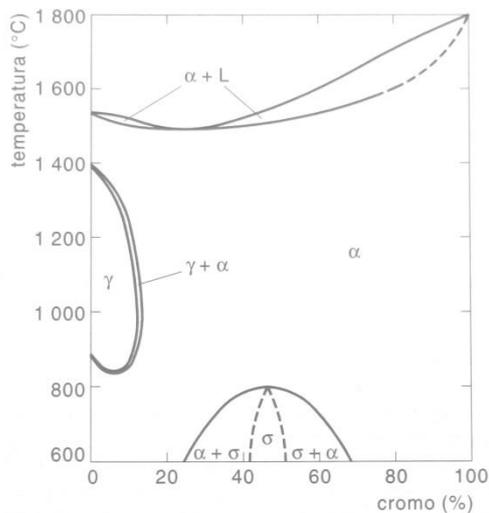


Fig. 4.2a diagramma di stato ferro-cromo Fig. 4.2b diagramma di stato ferro-nichel [10]

Per orientarsi dunque sulle caratteristiche assunte dagli acciai per le diverse percentuali di elementi in lega, introduciamo il diagramma di Shaeffler. La diversità delle proprietà è data dalla diversa percentuale di elementi alfa-genici e gamma-genici, quindi per stimarne la quantità sono stati adottati due parametri il cromo equivalente e il nichel equivalente:

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$$

$$\text{Nichel equivalente} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Come osservato la struttura cambia in modo consistente a seconda degli elementi e con essa, ovviamente, anche le proprietà offerte dal materiale, su tale base si possono distinguere le tipologie: martensitici, ferritici, austenitici e austeno-ferritici.

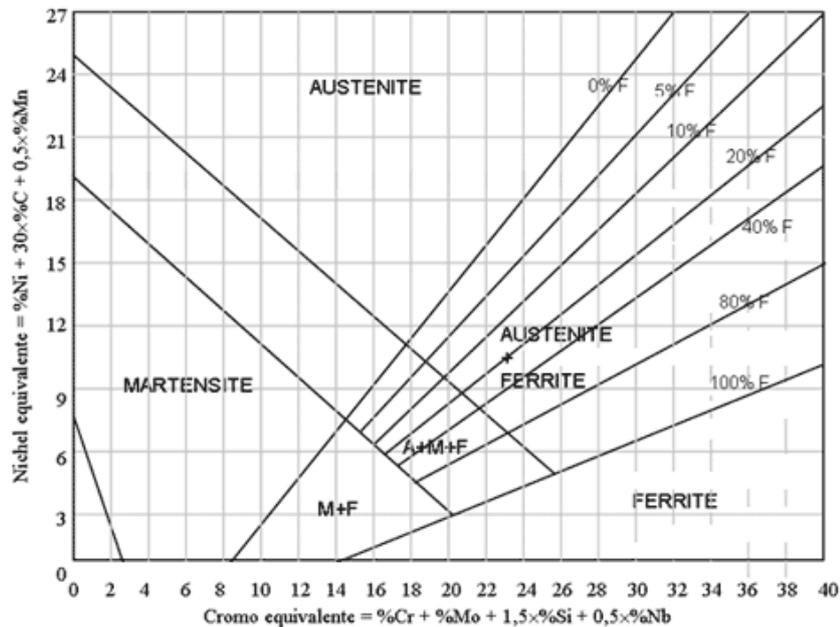


Fig. 4.3 Diagramma di Shaeffler

Segue la sfilata della tipologie di acciai inossidabili distinguibili e le caratteristiche principali [9]:

Acciaio inossidabile martensitico: sono essenzialmente acciai al cromo con nichel <2,5% e carbonio 0,8÷1,2% tale da avere strutture austenitiche o austenitiche con carburi, che tramite trattamento diventano martensitiche o martensitiche con carburi, a cui normalmente segue un trattamento di distensione. Si hanno delle leghe base, da cui derivano le altre, denominati AISI 403 e 410 con percentuali medie di carbonio, dimostrando una buona lavorabilità e formatura a freddo; permettono la realizzazioni di: forbici, coltelli e canne di fucile. A temperatura ambiente il carico di rottura si aggira sui 700MPa, durezza pari a circa 500HV e un allungamento pari al 20%, per temperature inferiori si nota un drastico calo della tenacità al di sotto dei 0°C, mentre a temperature superiori si ha il normale recupero di duttilità.

Acciaio inossidabile ferritico: vedono come elemento principale il cromo e in seconda il molibdeno, che comportano come conseguenza l'assenza delle anomalie A1 e A3 e di riflesso l'impossibilità di attuare trattamenti termici. Acciaio cardine di questa tipologia è il 430 che possiede grazie alla struttura ferritica spiccate proprietà di lavorabilità e malleabilità anche a freddo, mantenendo una buona resistenza a corrosione anche per temperature elevate. Per prove eseguite a temperatura ambiente abbiamo una resistenza a trazione sui 550MPa, durezza pari a 200HB e un allungamento del 20%. Come i martensitici i ferritici denunciano una pesante riduzione in tenacità al di sotto

dei 0°C, non risultano brillanti neanche a temperature elevate avendo valori di carichi di rottura e scorrimento viscoso piuttosto bassi.

Acciaio inossidabile austenitico: nati dal preciso bilanciamento di elementi ferritizzanti e austenitizzanti, di cui il nichel è il principe, vedono un ampio spettro di stabilità austenitica fino a temperatura ambiente, tale da eliminare ancora una volta le anomalie A1 e A3 rendendo inattuabili i trattamenti termici. Normalmente si distinguono due famiglie di austenitici: i cromo-nichel e i cromo-nichel-manganese; il primo gruppo è quello più comunemente usato, contiene quantità di carbonio inferiori al 0,03 e valori comprese tra 17 e 26% di cromo e tra 7 e 22% di nichel, quest'ultimo in percentuali maggiori limita l'incrudimento. Materiali di riferimento sono l'AISI 304 e 316, dai quali derivano una versione con carbonio in bassi valori (low carbon) per limitare il fenomeno dei precipitati.

A temperatura ambiente si ha una differenza nei diagrammi carico-allungamento a seconda se l'austenitico sia solubilizzato o ricotto, si constata che non esista una zona di snervamento certa ma ha continuità fino alla rottura. Tali curve testimoniano valori elevati di allungamento, ma allo stesso tempo di carico di rottura e snervamento, fenomeno possibile in quanto sensibili a incrudimento in deformazione. Numericamente possiamo considerare un carico di rottura pari a 700MPa, una durezza che si attesta sui 230HB e un allungamento 35-40%. Per temperature inferiori da quella ambiente mantengono le caratteristiche di tenacità, non presentano zona di transizione, e mantengono buone caratteristiche anche a temperature maggiori di quella ambiente.

Acciaio inossidabile austeno-ferritici: sono acciai caratterizzati da proprietà meccaniche di molto superiori a quelle delle altre categorie, in quanto contraddistinti dalla alta percentuale di cromo normalmente compresa tra 18 e 28%, mentre il nichel e il molibdeno sono presenti rispettivamente con percentuali dal 4 al 6% per il primo e 1,5 al 3% per il secondo.

Ma ciò che contraddistingue questo materiale è la sua struttura metallografica che vede isole di ferrite immerse in un matrice austenitica; la percentuale delle parti può essere calibrata entro certi limiti per poter definire le proprietà desiderate. Una predilezione per la struttura ferritica permette una maggiore duttilità compromettendo le caratteristiche meccaniche, mentre aumentando la austenite si penalizzano le proprietà anticorrosive.

Il fatto di essere così pesantemente legato fornisce sì caratteristiche meccaniche importanti ma determina problematiche di precipitati, soprattutto per le diffuse lavorazioni a caldo.

Gli acciai austano-ferritici, detti duplex, a temperatura ambiente presentano un carico di rottura che si aggira tra i 700 e 800MPa, una durezza di 270HB e un allungamento del 20%, mentre per quanto riguarda il comportamento a diverse temperature non si riscontrano differenze sostanziali.

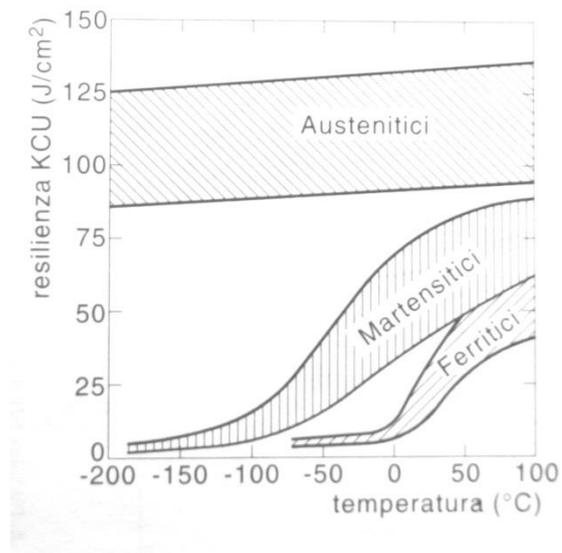


Fig. 4.4 Diagramma di resilienza a diverse temperature e confronto tra i diversi acciai inossidabili [10]

Caratterizzazione meccanica dei materiali a diverse velocità di deformazione

5.1.Introduzione

Il capitolo che si apre si snoderà tra le prove meccaniche che sono state eseguite sia sul materiale attualmente utilizzato dalla Zoppelletto S.p.A., sia per gli acciai inossidabili ritenuti adatti per assolvere a tale compito. Si ritiene più produttivo affiancare alla parte puramente teorica anche i risultati delle misure in modo da presentare delle prime conclusioni al termine del capitolo stesso. Le prove che verranno elencate ci permetteranno di capire che acciai stiamo maneggiando e le implicazioni che si hanno nell'utilizzo di uno rispetto all'altro.

5.2.Presentazione dei materiali

Doveroso prima di inoltrarci nella trattazione delle prove sostenute è una rapida presentazione dei materiali che sono stati utilizzati e che saranno soggetti sia ad una caratterizzazione meccanica che microstrutturale:

-*SAE 1005* è la designazione ISO per il materiale tutt'ora in auge all'interno della Zoppelletto S.p.A.. Il SAE 1005 ha un contenuto in carbonio dello 0,04%, ne consegue che vi è presente un'unica fase quella ferritica. Le premesse lo inquadrano come un acciaio estremamente duttile con limitato carico sopportabile.

Una seconda designazione risulta riconoscerlo con il codice C4C

-*acciai inossidabili austenitici AISI 304L & AISI 316L* tra loro molto simili e vedono la presenza di molti elementi in lega in quantità non trascurabili. Sono materiali di riferimento della categoria degli acciai austenitici, scelti in quanto tra i più performanti in termini di protezione dalla corrosione e prestazioni meccaniche, mantenute in un ampio spettro di temperature. Tali acciai sono anche tra i meno costosi e tra i più facilmente reperibili. L'azienda fornitrice è l'acciaieria Cogne che lo consegna in barre.

Le barre sono di materiale ricotto e solubilizzato che sono state laminate e pelate. Il laboratorio della Cogne fornisce un certificato che attesta la composizione chimica del materiale acquistato. Si hanno di seguito le tabelle riguardanti l'AISI 304L e il AISI 316L:

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per l'AISI 304L fornito

Marca interna: F304L1 IMCO

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.015	0.35	1.32	0.033	0.025	0.09	18.66	0.4	8.11	0.49	/	0.12

(a)

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per l'AISI 316L fornito

Marca interna: F316L IMCO

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.016	0.40	1,81	0.032	0.025	0.075	16.8	2.09	10.13	0.40	/	0.26

(b)

Fig.5.1. Tabelle riassuntive degli elementi chimici presenti rispettivamente in AISI 304L (a) e AISI 316L (b) [11]

-acciaio austeno-ferritico SAF 2205 anch'esso selezionato per la resistenza a corrosione e quella meccanica, anche superiori di quella degli austenitici. La buona riuscita del loro stampaggio a freddo aprirebbe nuovi orizzonti nel panorama tecnologico-meccanico.

Il materiale viene fornito in barre di diametro di 22mm precedentemente laminate e pelate, vengono fornite allo stato ricotto e solubilizzato. L'acciaieria fornitrice rimane la Cogne.

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per il SAF 2205

Marchatura interna: 329A 1

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.020	0.52	1,28	0.021	0.009	0.18	22.30	3.13	5.68	0.19	0.02	0.07

Fig.5.2 Tabella riassuntiva degli elementi chimici presenti nel SAF 2205 [11]

L'assunzione degli acciai appena elencati è una decisione fatta in prospettiva di una più ampia adozione degli acciai appena elencati, in quanto altri prodotti possono

comprendere fasce di mercato più ampio come quello delle basse temperature, visto il minimo cedimento di resistenza a temperature inferiori ai 0°C.

5.3.Trazione

5.3.1.Trattazione teorica della prova

La prova di trazione risulta indispensabile per comprendere le potenzialità del materiale e la sua possibilità di essere deformato, in questi termini particolare attenzione è riservata all'ottenimento del coefficiente di incrudimento calcolato per alte velocità di deformazione, su tale coefficiente si possono basare le considerazioni sulle quali eseguire cambiamenti atti a portare alla buona riuscita del processo.

Per comprendere le caratteristiche meccaniche offerte dal materiale è necessario indagare su fenomeni elasto-plastici che intervengono sollecitando a trazione un provino di materiale isotropo, continuo e omogeneo e osservare il tutto nella relazione esistente tra lo sforzo di trazione applicato σ , applicata in modo monoassiale lento e progressivo su un provino, provocando una corrispondente deformazione unitaria ϵ : la relazione appena esposta compone la curva di trazione ingegneristica (σ, ϵ) .

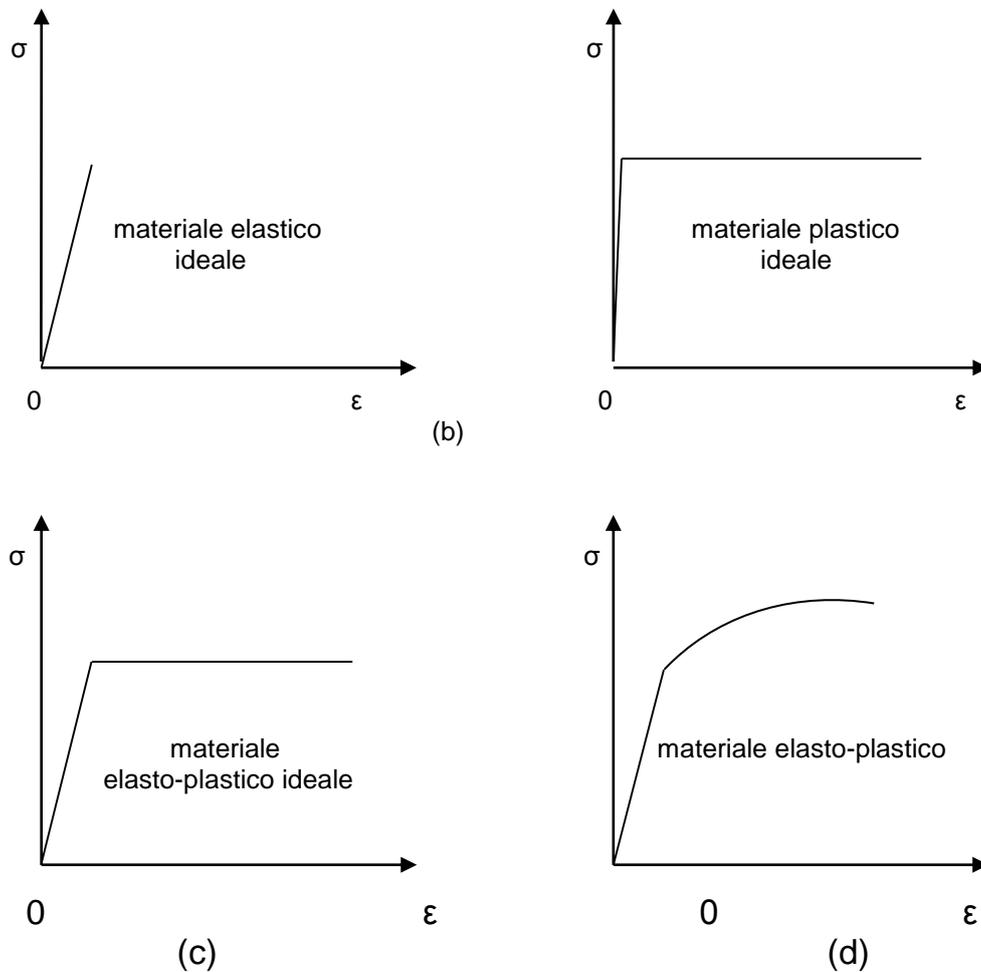


Fig. 5.3 Diagrammi (σ, ε) con deformazione: a) elastica ideale; b) plastica ideale; c) elasto-plastica ideale; d) elasto-plastica reale. [12]

Nell'ipotesi che il materiale in oggetto sia perfettamente elastico la relazione che ne deriverebbe porterebbe, nel piano σ, ε alla tracciatura di una retta uscente dall'origine degli assi e che rimane invariata nel suo procedere fino a rottura, potendo essere rappresentata completamente dalla *legge di Hooke* $\sigma = E \varepsilon$.

Mentre considerando l'esistenza di un materiale perfettamente plastico si prevede il raggiungimento di una tensione minima alla quale iniziano a muoversi le dislocazioni, detta tensione di snervamento, per poi essere rappresentata nel piano σ, ε come una parallela all'asse delle ascisse, comportamenti che viene mantenuto fino al raggiungimento della rottura.

La condizione di snervamento è possibile esprimerla matematicamente come:

$$\sigma = \sigma_s$$

Necessario osservare che il mantenimento del tratto orizzontale implica il mantenimento della tensione di snervamento, il che comporta un progressivo restringimento della sezione fino al sopraggiungere della rottura.

Perseguendo le ipotesi di materiali elasto-plastici ideali, avremmo che tenderebbero a soddisfare le caratteristiche ideali di entrambi i comportamenti, ottenendo così un primo tratto rettilineo perfettamente elastico a cui succede, dopo il superamento di un preciso sforzo di deformazione il mantenimento del suddetto sforzo costruendo un tratto orizzontale che individua la risposta perfettamente plastica.

I metalli però si discostano dalle leggi di perfetta elasticità e vengono definiti come materiali elasto-plastici reali, definendo, nella mappatura della loro risposta, un andamento che è divisibile in tre campi distinti:

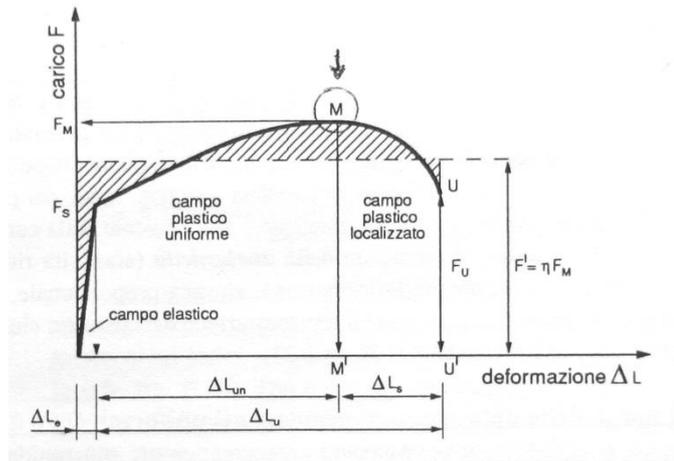


Fig. 5.4 Rappresentazione di una curva di trazione [12]

-*campo elastico* all'interno del quale le deformazioni si annullano portando a zero il carico. In un intorno dell'origine degli assi l'andamento può essere definito come perfettamente elastico ed è proprio in questi termini che trova piena validità la legge di elasticità di Hooke $\sigma = E \epsilon$. In verità ci si scosta quasi subito dalla proporzionalità ma ciò non viene considerato fintanto la misura risulta inferiore ad un valore e prefissato; il valore di F che provo uno scostamento pari a e viene definito *carico totale di scostamento dalla proporzionalità* indicato con $F_{p(0,..)}$. Il limite del carico elastico è rappresentato dal più elevato carico che non provoca deformazioni permanenti sul provino, chiamato *carico totale al limite elastico*.

Lo scostamento dalla rettilineità fin dalla battute iniziali determina il fatto che alcuni cristalli si sono deformati plasticamente, quindi la distinzione tra comportamento elastico e plastico non è più così netta in quanto il secondo si sovrappone al primo ma

in maniera talmente limitata e con effetti di deformazione non rilevabili che può essere dunque considerata come trascurabile.

-*campo delle deformazioni permanenti uniformi* appena oltre il sovra citato limite le deformazioni permanenti crescono notevolmente per effetto dell'incrudimento per i sempre più numerosi cristalli deformati plasticamente. Succede a questo un cedimento strutturale del materiale che negli acciai dolci è improvviso e si manifesta con la comparsa nel grafico di discontinuità; il carico a cui corrisponde il primo di questi cedimenti è detto *carico totale di snervamento superiore* che caratterizza il collasso strutturale. Il cedimento si stabilizza ad un valore detto *carico totale di snervamento inferiore* e dipende dalla natura del materiale e dalla velocità di deformazione

Nel caso che tale il valore dello snervamento non sia nettamente rilevabile di solito viene associato convenzionalmente il carico che determina una deformazione permanente dello 0,2% definito come *carico totale al limite della deformazione permanente allo 0,2%*. Il campo in questione si estende fino al raggiungimento del carico massimo M nel quale si ha tangente orizzontale.

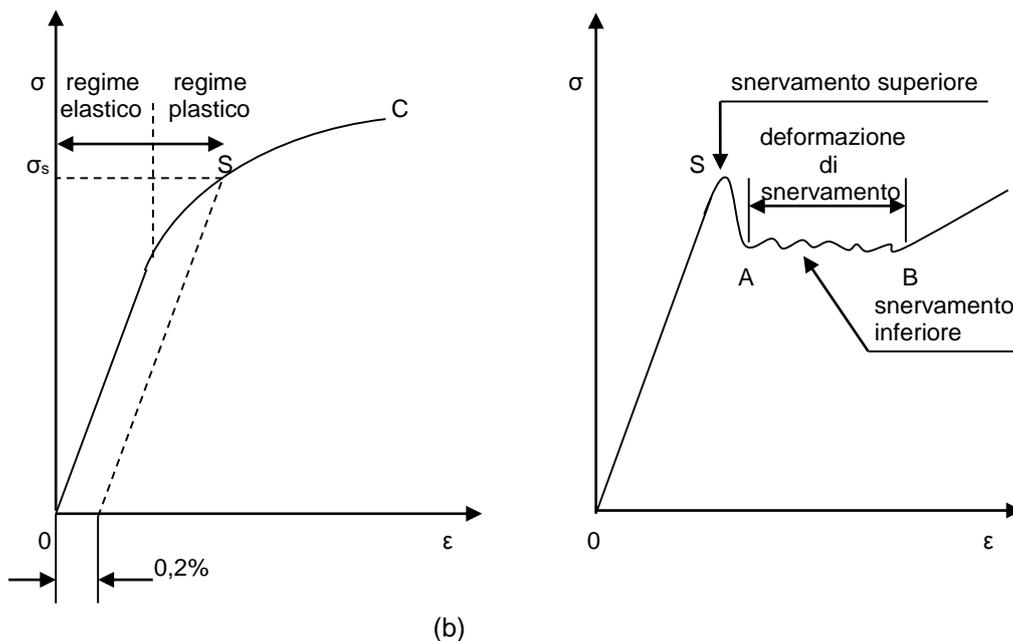


Fig. 5.5 Differenza di comportamento allo snervamento: passaggio continuo (a) e passaggio brusco (b)

Durante questo periodo la deformazione plastica si può considerare uniformemente distribuita lungo tutto il tratti utile, anche il diametro iniziale d_0 si possono considerare ristretti in modo uniforme.

E' importante osservare che per un qualunque punto successivo allo snervamento sia comunque possibile recuperare la parte elastica della deformazione imposta.

In questo tratto inizia la combinazione di due fenomeni distinti: quello di un rafforzamento del materiale, chiamato incrudimento. Tale rafforzamento è dato dalla maggiore energia richiesta dalle dislocazioni per avanzare all'interno della struttura cristallina per permettere la deformazione dello stesso. Si accosta a questo un secondo fenomeno, accennato nella spiegazione del comportamento perfettamente plastico, ovvero la progressiva riduzione di area, fenomeno che comporta l'indebolimento del materiale. Nel campo delle deformazioni plastiche uniformi prevale dunque l'effetto di rafforzamento conseguenza del progressivo incrudimento.

-campo delle deformazioni permanenti localizzate individuabile esclusivamente nei materiali tenaci, poiché i fragili sopraggiungono prima a rottura, a partire dal punto M inizia il fenomeno della strizione, nel quale la deformazione si concentra in un breve tratto della provetta. La deformazione uniforme non può continuare, in quanto la tensione passa da mono assiale a triassiale il che riduce la tendenza del materiale a deformarsi plasticamente.

Come spiegato prima abbiamo la concomitanza di due fenomeni che dettrminano risposte opposte del materiale: l'incrudimento e la riduzione di area.

E' ora facile concludere che se nel campo delle deformazioni uniformi primeggiava l'incrudimento, nel campo delle deformazioni non uniformi l'equilibrio si sia spostato a favore della riduzione di area, che si manifesta con un fenomeno chiamato strizione. Il punto M rappresenta il punto di equilibrio tra i due fenomeni. La strizione prosegue fin nel momento in cui la stessa non è più in grado di avere deformazione, giungendo all'epilogo di una rottura fragile con la costituzione di due parti separate [10]

Dalla curva appena considerata si posso estrarre diverse grandezze relative alla resistenza, quali:

-carico unitario di scostamento dalla proporzionalità $\sigma_{p(0,...)}$

-carico unitario al limite di elasticità $\sigma_{e(0,...)}$

-carico unitario di snervamento $\sigma_{p(0,2)}$ σ_s

-carico unitario di rottura o massimo σ_m

-carico unitario ultimo σ_u

Ottenute come rapporto della corrispondente forza con la sezione iniziale S_0 , ma si ricavano anche:

-*allungamento percentuale dopo rottura* ottenuto come rapporto tra allungamento e lunghezza iniziale $A_n = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100$

-*coefficiente percentuale di strizione* ottenuto come il rapporto tra la differenza di sezione e la sezione iniziale $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100$

-*modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young* considerato come il rapporto tra il carico unitario di trazione entro i limiti di proporzionalità σ e la deformazione corrispondente ϵ ; $E = \sigma / \epsilon$ interpretata anche come la tangente nell'origine della curva di trazione. Determina quindi la rigidezza la rigidezza intrinseca del materiale, più elevato il valore di E minore sarà la deformazione eseguita a parità di sollecitazione.

-*coefficiente di Poisson*: considerando la contrazione trasversale unitaria ϵ_t come differenza di diametro in rapporto con il diametro iniziale, si ha che il coefficiente di Poisson viene calcolato come : $\nu = \epsilon_t / \epsilon$.

La curva appena esposta non è rappresentativa della realtà fisica poiché essa è volutamente riportata alle dimensioni primitive del provino, in quanto le dimensioni effettive variano continuamente durante l'esecuzione della prova, poiché l'incrudimento si verifica con continuità fino a rottura la curva reale definisce lo sforzo come continuamente crescente. Lo sforzo unitario è ora individuabile rapportando istante per istante la forza applicata con la sezione del momento considerato, mentre la deformazione unitaria reale è data dall'allungamento rapportato con la lunghezza istantanea. In questo caso per carichi compresi tra quello di snervamento e quello massimo la curva può essere rappresentata in prima approssimazione con la funzione:

$$\sigma_r = K \epsilon_r^n$$

Dove K e n sono costanti proprie di ciascun materiale, con $0 < n < 1$ detto *coefficiente di incrudimento* ponendo il diagramma in doppio logaritmico si ottiene:

$$\log \sigma_r = \log K + n \log \epsilon_r$$

Rappresenta dunque, in questo nuovo grafico, la pendenza del tratto di deformazione uniforme, si ricava che il coefficiente di incrudimento eguaglia la deformazione reale uniforme che si ha immediatamente prima della fase di strizione. Pertanto n permette di valutare la deformabilità del materiale, quantificando la deformazione plastica reale uniforme che possono subire. [12]

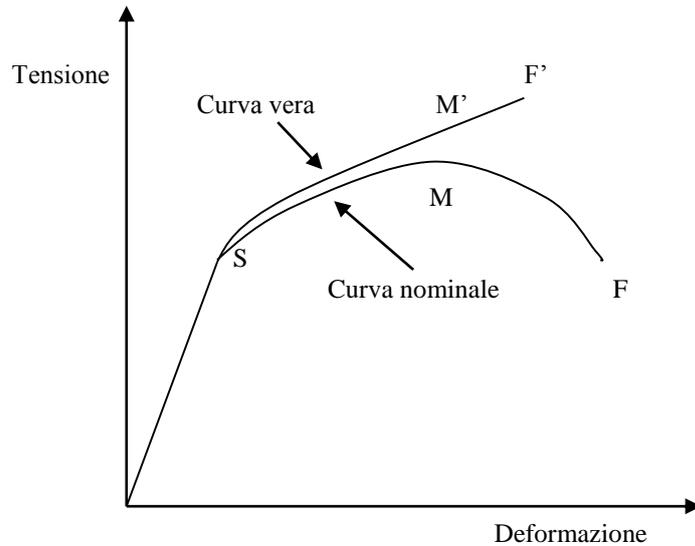


Fig. 5.6 Differenza tra la curva di trazione ingegneristica e una reale

Il coefficiente n permette di derivare la rigidità del materiale. Per valori dello stesso che si avvicinano alla elasticità, materiali che hanno poca tendenza all'incrudimento, possiamo individuare una retta $y=x$ nel piano $\log \sigma, \log \varepsilon$, ciò implica un valore di n pari all'unità; mentre un comportamento rigido definisce una retta parallela all'asse delle ascisse imponendo $n=0$. In generale, essendo a comportamento elasto-plastico gli acciai hanno un coefficiente di incrudimento che varia dallo 0,1 allo 0,55.

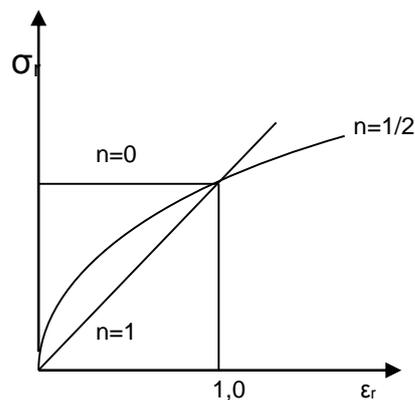


Fig.5.7 Andamenti della curva di flusso al variare di n .

L'area sottesa dalla curva in questione rappresenta dunque il lavoro per unità di volume, identificando l'energia necessaria per imporre la deformazione che il materiale subisce, viene dunque chiamata tenacità statica.

Esistono delle variabili che, a pari delle rimanenti, modificano i risultati ottenibili dalla prova di trazione e con esse anche le curve risultanti, stiamo parlando della velocità di applicazione del carico e della temperatura.

Con l'aumento della velocità di applicazione del carico abbiamo un incremento dei valori di rottura ma un comportamento che si avvicina progressivamente a quello di un materiale fragile. Il parametro più sensibile è quello del carico di snervamento che non solo aumenta ma può scomparire nel caso di materiali a basso tenore di carbonio.

Mentre per una diminuzione della temperatura abbiamo un infragilimento data da un irrigidimento della struttura, innalzando i valori del carico e riducendo gli allungamenti corrispondenti; al contrario per un aumento di temperatura si distingue un abbassamento dei carichi coinvolti e ma un incremento degli allungamenti a rottura.

5.3.2.Modalità di esecuzione della prova

La prova oggetto di tale paragrafo è stata eseguita nel laboratorio tecnologico messo a disposizione dell'istituto, utilizzando la macchina MTS 810.

Lo scopo della presente prova non è solo quello di caratterizzare le proprietà dei materiali esaminati, ma anche di considerare la reazione del materiale a velocità di deformazione importanti, anche se come vedremo le massime disponibili non sono ancora alla portata di quelle che il materiale subisce in esercizio; ma sono tuttavia utili per farci almeno un'idea di ciò che avvenga. Sono stati messi a disposizione per la prova un numero otto di provini uniformati per ciascuna delle quattro leghe coinvolte nello studio: AISI 304L, AISI 316L, SAF 2205 e SAE 1005; provini nei quali sono state tracciate le necessarie marcature di riferimento equidistanziate, differenti dal SAE 1005 agli inossidabili poiché aventi tratti utili differenti.

I provini esaminati sono stati ricavati dallo stesso lotto fornito delle acciaierie Cogne con cui sono stati realizzati i campioni che verranno poi analizzati. Il provino presenta un tratto utile, quello interessato dalla prova, racchiuso tra due teste di diametro maggiore realizzate con l'apposito intento di assicurare una buona presa agli afferraggi oleodinamici della macchina. Le teste descritte sono lisce, lo si specifica in quanto è possibile la realizzazione di teste filettate, e sono raccordate al tratto utile con un ampio raggio; accorgimento che se ignorato potrebbe portare alla rottura del provino nella zona di variazione di diametro, mentre così facendo si incanala il flusso deformativo nel tratto utile garantendo che la rottura del provino avvenga nel tratto prescelto.

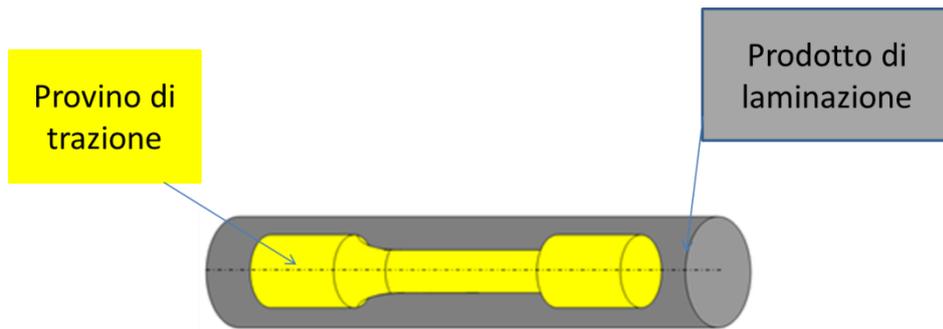


Fig. 5.8 Provino ricavato dalla barra in acciaio

Il fatto che la rottura avvenga con certezza nella dimensione stabilita, permette la standardizzazione della procedura, che compone quindi un'apposita norma internazionale. La norma in questione, la normativa ASTM E 8M – 04, detta dimensioni

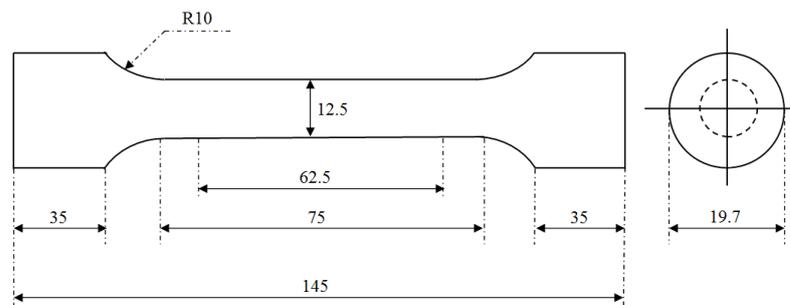


Fig. 5.9 Dimensioni unificate delle provette di trazione, secondo la normativa ASTM E 8M - 04

A disposizione per l'esperienza vi sono numero otto provini, che verranno classificati a seconda della velocità di applicazione del carico, per ciascun materiale si definiscono:

-N2 provini a 2mm/min: per i quali è stato utilizzato un set up consolidato che prevede la sequenza di due rampe distinte di velocità di deformazione; una prima parte, che si estende fino al presunto snervamento, che prevede una velocità di 2 mm/min, successivamente per accelerare l'esecuzione della prova viene aumentata la velocità a 6mm/min. Il diverso trattamento riservato alla deformazione plastica è consigliabile in quanto avrebbe tempi di conclusione importanti, tuttavia l'accelerazione non è tale da provocare una variazione dei risultati. I provini sosterranno la prova in tali condizioni verranno classificati con il nome del materiale, la lettera B (di bassa velocità) e un numero progressivo.

-N3 provini a 360mm/min per i quali è stata scelta una velocità applicazione del carico che imponga al provino una reazione intermedia tra le velocità utilizzate che permetta dunque di ricavare l'andamento della curva di trazione a velocità di applicazione del carico diverse in modo da tentare, se necessario, di stimare il comportamento anche per velocità diverse. La codificazione prevista prevede la sequenza: nome materiali, M (di velocità media) e un numero progressivo.

-N3 provini a 3600mm/min per i quali è stata prevista la massima velocità che fosse disponibile dalla macchina utilizzata, ed è da tale velocità da cui è possibile estrarre considerazioni utili per comprendere la reazione del materiale alle elevate velocità di deformazione. Come intuibile il nominativo contiene ancora: il nome del materiale, la lettera A (di alta velocità) e un numero progressivo.

Le modalità di esecuzione della prova prevedevano un controllo delle misure significative del campione tramite calibro e la loro siglatura, per poi iniziare con la sequenza delle coppie di provini da sottoporre al primo ciclo di prove.

Si è scelto di iniziare con le prove a velocità di 2mm/min, in quanto procedura consolidata e set-up della macchina tra i più utilizzati. Si permette di puntualizzare che tutte le prove si sono svolte ad una temperatura ambiente di 20°C.

Per le suddette prove è stato agganciato, tramite due apposite morsetti a molla, un estensometro che permetterà la rilevazione precisa degli allungamenti subiti dalla provetta. Il suo utilizzo è limitato solamente a questo tipo di prova in quanto una reazione scomposta del materiale, per velocità di applicazione del carico superiori, può comprometterne il buon funzionamento. La rilevazione viene conclusa con l' LVDT a bordo macchina che, vuoi per la catena di misura che lo separa dal provino e/o per il fatto che non sia a contatto fisico con lo stesso, risulta essere meno preciso dell'estensometro mantenendo comunque una buona affidabilità.

Sono state poi realizzate le prove che prevedono la massima velocità disponibile dalla macchina, per determinare la quale si è scelto di imporre una velocità di deformazione che la macchina non può raggiungere quali 10000mm/min. Il tentativo della stessa per raggiungere tale valore, ci fornirà la velocità massima attuabile dalla stessa.

Esiste però una complicanza in quanto, essendo i materiali testati molto diversi tra loro, esiste la possibilità che sia diverso il tempo per apertura della servovalvola, che si rifletterebbe con la differente variazione della portata dell'olio che porterebbe ad una variazione della forza e quindi una diversa velocità di deformazione massima. I risultati derivanti dai test su AISI 316L e un SAE1005 hanno determinato però che la massima

velocità di applicazione del carico raggiunta corrisponde identicamente a 3600mm/min, valore che verrà dunque assunto come quello di massima velocità.

Per la determinazione della velocità intermedia, è stata che ha una velocità di 360mm/min. Come le successive prove hanno poi accreditato, il materiale ha sostanziali variazioni di comportamento fino a poche centinaia di millimetri al minuto, superate le quali le variazioni si fanno sempre di minore entità nonostante velocità di deformazione importanti. Come è riscontrabile dalla comparazione dei grafici il tratto di deformazione plastica uniforme per uno stesso acciaio è praticamente sovrapponibile considerando quello ottenuto a 2mm/min e 360mm/min velocità.

5.3.3. Presentazione dei risultati

Si provvede in questo spazio alla presentazione dei risultati derivanti dalle prove di trazione precedentemente esposte.

Le prove realizzate con l'estensometro, quelle a 2mm/min velocità, sono state trattate adeguatamente per ottenere la curva sforzo-deformazione dettagliata. Non solo, parte dei dati dello sforzo reale e della deformazione reale sono stati poi posti in base logaritmica, in modo da poter essere approssimati da una retta; sugli stessi dati è stato poi eseguito il metodo dei minimi quadrati per ottenere il numero di dati coinvolti che fornisce il minor errore possibile della pendenza, parametro che come già citato rappresenta l'indice di incrudimento n del materiale.

Lo stesso metodo dei minimi quadrati è anche utilizzato per ridurre l'errore che si ha nel calcolo della pendenza che approssima il tratto elastico, permettendo dunque un valore più accreditato del modulo di elasticità longitudinale E o modulo di Young.

Da questi dati è possibile anche estrarre il valore dell'allungamento che il provino ha subito durante tutta la prova, permettendoci di ricavare facilmente il dato percentuale, Z . Le prove a 360mm/min e a 3600mm/min sono trattate al medesimo modo.

Uno dei risultati di maggiore interesse che verranno poi forniti è l'allungamento che il provino subisce fino al sopraggiungere della rottura. Per i provini a bassa velocità la rilevazione della stessa è molto pratica in quanto rilevabile dalla lettura dei campionamenti dell'estensometro, mentre per quanto riguarda i rimanenti provini, privi dello strumento di precisione, risulta poco accurata l'assunzione della misura dell'LVDT inserito a bordo macchina. Si presenza quindi la procedura per il calcolo dell'allungamento prevista dalla UNI EN 10002 92 che comprende diverse metodologie per differenti posizioni alle quali può avvenire la rottura del provino. I casi sotto esposti hanno specifiche procedure di calcolo per la quantificazione dell'allungamento.

-rottura entro il terzo medio considerando il tratto utile della provetta diviso in tre parti uguali, la rottura avviene nella parte centrale, situazione nella quale è possibile applicare la relazione classica dell'allungamento.

-rottura fuori dal terzo medio situazione nella quale l'applicazione della relazione classica definirebbe un allungamento sottostimato. Si distinguono in questa eventualità due casi:

1° caso se la rottura è avvenuta fuori dal terzo medio e vicina ad una traccia, in modo che la stessa sia assunta come punto di rottura abbiamo la possibilità di sostituire la provetta reale con una ideale in cui la rottura è avvenuta all'interno del terzo medio; provetta ideale a cui si risale misurando:

$A_r B_r$ tratto simmetrico alla sezione di rottura comprendente tutto il tratto utile dello spezzone più piccolo, tratto che nella provetta ideale rappresenta la lunghezza del tratto centrale $A_i B_i$.

$B_r C_r$ misurato dalla tacca estrema della prima misura fino alla all'ultima tacca che ha subito allungamento, componendo le parti laterali del provino ideale, il calcolo dell'allungamento si modifica come segue:

$$L_u = A_r B_r + B_r C_r + B_r C_r \quad \text{ne consegue} \quad A = \frac{(A_r B_r + B_r C_r + B_r C_r) - L_0}{L_0} 100$$

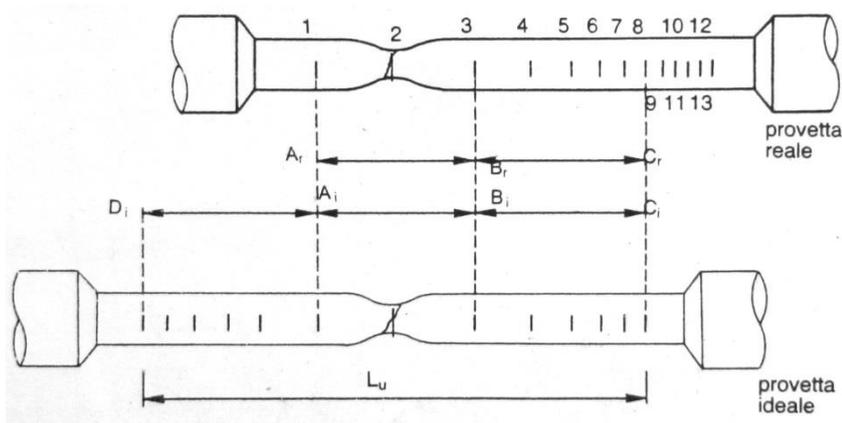


Fig. 5.10a provetta reale e ideale in caso di rottura fuori dal terzo medio in corrispondenza di una traccia

2° caso rottura avvenuta fuori dal terzo medio e nel mezzo tra due tracce nelle quali è stato diviso il provino. E' possibile dunque sostituire la provetta reale con una ideale nella quale la rottura è avvenuta all'interno del terzo medio, creata misurando determinati tratti di quella reale, otteniamo:

$A_r B_r$ tratto simmetrico alla sezione di rottura e comprendente tutto lo spezzone più piccolo della provetta, misura centrale $A_i B_i$ della provetta ideale.
 $B_r C_r$ dall'estremo della misura precedente all'ultima tacca deformata
 $B_r D_r$ dall'estremo dalla misura precedente alla prima tacca non deformata
 Si ottiene dunque:

$$L_u = A_r B_r + B_r C_r + B_r D_r \quad \text{ne consegue} \quad A = \frac{(A_r B_r + B_r C_r + B_r D_r) - L_0}{L_0} 100$$

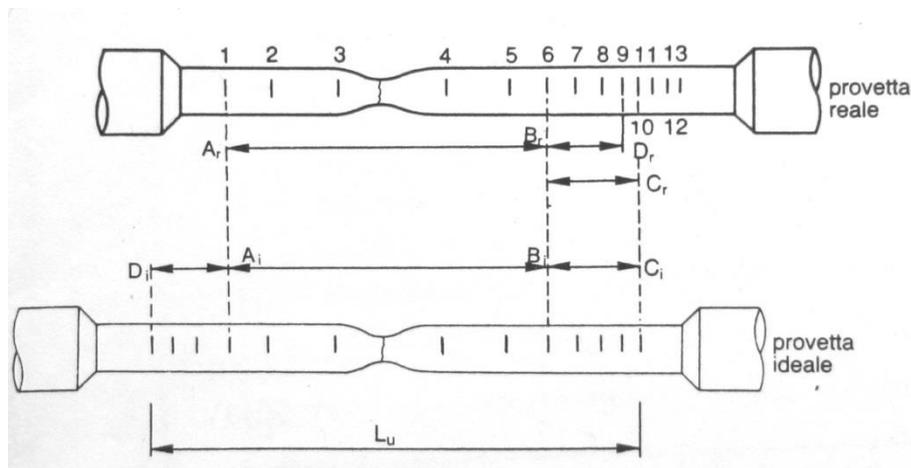


Fig. 5.10b provetta reale e ideale in caso di rottura fuori dal terzo medio nel mezzo di due tracce

I risultati che verranno poi snocciolati permettono, per ciascun provino, il rinvenimento dei valori di:

-carico massimo o di rottura $[N/mm^2]$ ovvero il punto che rappresenta l'apice della curva sforzo-deformazione ingegneristici carico massimo sopportabile dalla provetta prima di iniziare a strizionare.

-carico di snervamento $[N/mm^2]$ carico che convenzionalmente viene attribuito come confine tra il campo elastico e quello plastico. Le prove come detto hanno interessato acciai inossidabili e una tipologia di acciaio a bassissimo contenuto di carbonio, premessa utilizzare per dire che ci si è confrontati con entrambe le tipologie di snervamento. Per quanto riguarda gli acciai inossidabili, acciai alto legati, non è

distinguibile un preciso punto che funge da snervamento per cui si è dovuto ricorrere al valore corrispondente ad una deformazione permanente dello 0,2%.

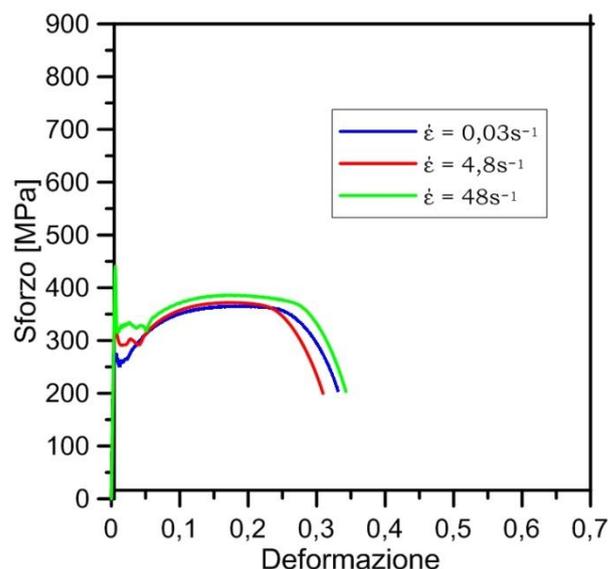
Mentre, per quanto tratta l'acciaio a basso contenuto di carbonio lo snervamento si manifesta come un'instabilità, ecco dunque che come valore dello snervamento si è scelto il carico di snervamento inferiore.

-*indice di incrudimento* indice che quantifica la deformabilità del materiale in deformazione permanente che il materiale può subire. Parametro che risulterà sicuramente minore negli inossidabili in quanto la massiccia presenza di elementi in lega funge da ostacolo al movimento delle dislocazioni che consentono la deformazione.

-*allungamento* percentuale di aumento della lunghezza durante la prova, parametro che permette di confrontare anche le diverse tenacità statiche dei materiali.

Si presentano in un grafico unico le prove di trazione eseguite su ciascun materiale, inserendone una per ogni velocità di deformazione imposta, in modo da poter comodamente confrontare le differenze di andamento riscontrabili

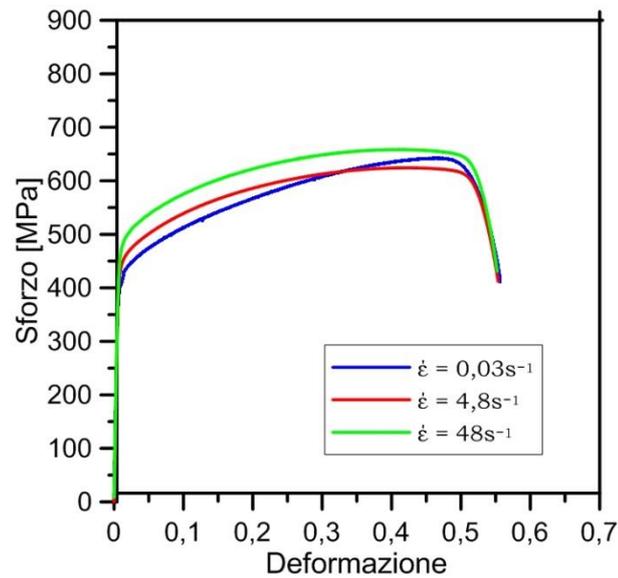
Prove eseguite con il SAE 1005



Ci si accorge immediatamente come il materiale tende ad avere in maniera proporzionale, un innalzamento dei valori significativi del carico. In questo contesto si osserva come il carico di snervamento superiore sia significativamente influenzato

dalla velocità di deformazione. L'allungamento della prova effettuata a $4,8s^{-1}$ può essere stato influenzato da una leggera disomogeneità del materiale .

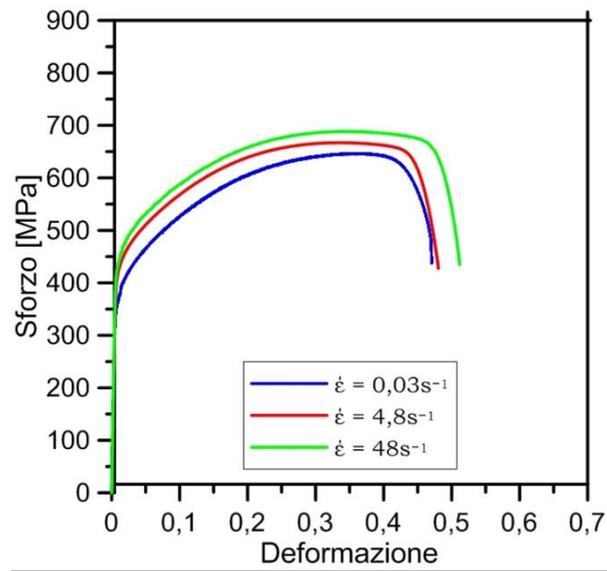
Prove eseguite con l'AISI 304L



L'andamento definito dall'AISI 304L definisce un aumento progressivo dei carichi significativi, tranne l'eccezionalità del carico di rottura per la prova a $0,03s^{-1}$.

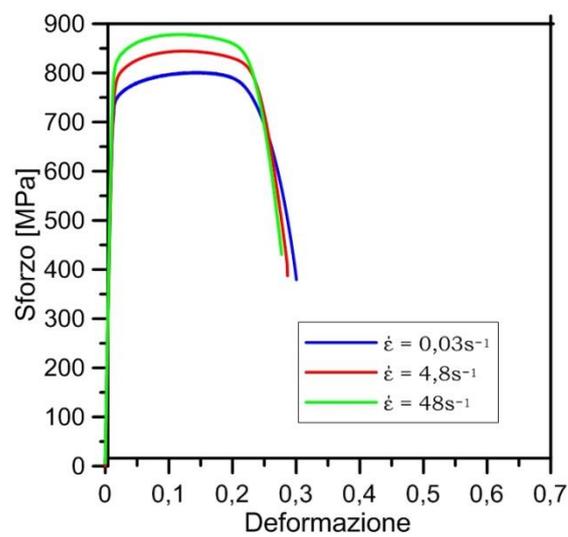
Importante sottolineare che, definendo lo stesso allungamento percentuale, l'AISI 304L migliora la tenacità sopportabile con l'aumento della velocità di applicazione del carico.

Prove eseguite con l'AISI 316L



Il comportamento dell'AISI 316L a prove di trazione effettuate a velocità diverse risulta essere molto regolare, infatti si constata anche in questo caso che il materiale sottoposto a velocità di deformazione crescenti definisce un aumento della energia necessaria per condurlo a rottura.

Prove eseguite con il SAF 2205



Le prove realizzate con il materiale bifasico definiscono, come negli altri casi, un aumento progressivo dei carichi significati; anche in questo caso gli allungamenti percentuali raggiunti sono inferiori con l'incremento della velocità di deformazione

imposta. Si nota infine come la differenza, in MPa, tra il carico di snervamento e quello di rottura si riduca con incremento della velocità.

Si presentano i risultati estrapolati dalle curve dalle prove a diversa velocità, le variabili considerate sono le stesse elencate alla fine del paragrafo precedente.

Si porge però solo un estratto della tabella completa, quello riguardante il solo SAF 2205, mentre per le rimanenti leghe è necessario rivolgersi all'appendice A in fondo al testo.

Per ogni parametro registrato saranno dichiarate media e deviazione standard dello stesso, per ogni velocità di prova

Legha	Campione	YN [Mpa]	UTS [Mpa]	n [α]	A_t [%]
SAF 2205	B1	761.51	801.5	0.1265	26.2
	B2	759.96	800.2	0.1251	26.4
	Media	760,735	800,850	0,126	26,300
	Dev standard	1,096	0,919	0,001	0,141
	M1	793.34	844.57	0.1021	28.5
	M2	791.65	838.52	0.1005	26.3
	M3	775.07	847.87	0.1063	30.6
	Media	786,687	843,653	0,103	28,467
	Dev standard	10,096	4,742	0,003	2,150
	A1	829.89	878.31	0.0962	27
	A2	832.13	880.47	0.0949	27.3
	A3	828.12	847.87	0.097	30
	Media	830,047	868,883	0,096	28,100
	Dev standard	1,641	14,885	0,001	1,349

Fig. 5.11 Estratto della Tabella riassuntiva dei valori ottenuti dalle prove di trazione alle diverse velocità

In conclusione si classificano le superfici di frattura ottenute dalle provette di trazione sopraesposte, basandosi sulla classificazione UNISIDER 4 che prevede:

Frattura A B e C che si differenziano in “a coppa” o “a coppa cono” peculiare degli acciai semiduri bonificati, che presentano un ampio tratto plastico e un elevata tenacità, risultando isotropi e omogenei.

Frattura D detta “legnosa” caratteristica di quelli materiali che hanno un elevato valore di inclusioni non metalliche.

La frattura a E, “a fischiello” o “a becco di flauto” individuabile negli acciai dolci e semiduri, non spiccatamente isotropi e con una grana cristallina grossolana.

La frattura G è presente nei materiali duri e poco isotropi.



Frattura a coppa



Frattura a semicoppa



Frattura a raggiera



Frattura piatta



Frattura a punta



Frattura di provetta fortemente snervata (caratteristica degli acciai austenici)



Frattura a fischiello



Frattura legnosa



Frattura piatta per innesco

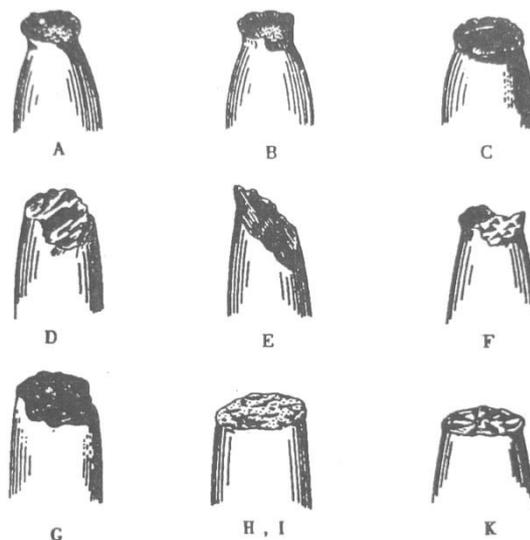


Fig. 5.12 Immagini standard della superfici di frattura riconosciute dalla UNISIDER4 (a), rappresentazione dei modelli di superfici di rottura riconosciuti (b) [12]

Con riferimento alla classificazione di qui sopra verrà ora compilata una tabella riassuntiva che ha il compito di descrivere la frattura avvenuta tramite i modelli di qui sopra, descrivendolo anche come compresenza di più modelli:

TABELLA RIASSUNTIVA DELLE SUPERFICI DI FRATTURA DESCRITTE TRAMITE MODELLI							
SAE 1005		AISI 304L		AISI 316L		SAF 2205	
Sigla	Modello	Sigla	Modello	Sigla	Modello	Sigla	Modello
1B	A - B	1B	D - F	1B	F - B	1B	B
2B	A	2B	E - F	2B	F	2B	B
1M	A - B	1M	B - D	1M	F	1M	B
2M	A	2M	B - D	2M	F - E	2M	B
3M	A	3M	F - D	3M	F	3M	B
1A	A - B	1A	D	1A	F - E	1A	B
2A	A - B	2A	B - D	2A	F	2A	B
3A	A - B	3A	B - D	3A	B	3A	B

Fig. 5.13 Tabella riassuntiva di descrizione delle superfici di frattura

5.3.4. Analisi dei risultati

Si osserva come per tutti i materiali analizzati la tendenza è quella di aumentare il carico di snervamento e di rottura con l'aumento della velocità, con una variabilità anche importante.

Il coefficiente di incrudimento tende invece ad abbassarsi per un aumento della velocità di applicazione del carico, descrivendo progressivamente una tendenza a un comportamento rigido, perfettamente plastico. Ogni materiale però denuncia una sensibilità diversa del coefficiente di incrudimento alla velocità di deformazione; per il SAE 1005 e l'AISI 304L la variabilità risulta contenuta, mentre la variabilità risulta maggiore nell'analisi l'AISI 316L e nel SAF 2205.

La sensibilità del coefficiente di incrudimento alla velocità diminuisce tanto più quanto la variazione di velocità avviene per valori elevati, quindi ipotizzando che la velocità di deformazione nel processo di nostro interesse sia 10000mm/min il valore di tale coefficiente sarà solo leggermente inferiore a quello ottenuto a 3600mm/min.

Infine l'allungamento percentuale delle provette ha un calo importante per quanto riguarda le prove eseguite a 2mm/min e a 360mm/min, mentre tra quest'ultima e la successiva velocità non si riscontrano differenze sostanziali negli allungamenti.

Dall'analisi della tabella riguardanti le superfici di frattura si osserva come per il SAE 1005 sia affettivamente associata i modelli A e B, che sono peculiari in un materiale che ha un esteso tratto plastico e quindi elevata tenacità. La superficie risulta coerente con le proprietà del materiale.

Mentre per gli acciai inossidabili austenitici si hanno modelli di superficie di frattura che esprimono una frana grossolana, ma nel contempo una buona tenacità che comporta un tratto di deformazioni plastiche importante. Tendenzialmente l'AISI 304L ha una superficie di frattura che richiama quella riscontrabile nei materiali che hanno la presenza inclusioni non metalliche.

Il bifasi invece a prescindere dalla velocità di deformazione assume sempre una superficie di frattura identificabile nel modello B detta "a coppa" o "a coppa cono" identificativa di un materiale tenace.

5.4.T-shape compression test

La prova che andremmo ora a presentare deriva dalla letteratura tecnica ma non trova nessun riscontro a livello di normativa, ma si propone come via preferenziale per il rinvenimento dei valori numerici degli attriti che si manifestano in condizioni le cui caratteristiche rispecchiano il processo dello stampaggio a freddo. Ciò permetterà di comprendere quale sia la quota di influenza che l'attrito nel processo, ma anche di ottenere valori numerici che possano poi essere utilizzati per procedure di simulazione all'interno dell'azienda stessa.

5.4.1. Attrito

Premessa necessaria per seguire lo snodarsi dei concetti coinvolti nell'esecuzione della prova risulta essere un paragrafo per introdurre il concetto di attrito secondo la tribologia, ovvero la scienza tecnologica che studia l'interazione tra superfici.

L'attrito è la resistenza al moto relativo di due corpi che strisciano reciprocamente, sotto l'azione di un carico normale; la cui esecuzione richiedono energia parte della quale viene poi smaltita con la generazione di calore.

Dalla sola definizione si deduce che il fenomeno dell'attrito abbia tanta importanza quanta diffusione in tutte le lavorazioni che prevedano una deformazione di materiale.

La resistenza al moto reciproco delle superfici di due corpi è causata anche dalle reciproche asperità, seguendo questa traccia è possibile giungere al modello assunto Coulomb per definire il fenomeno. Il modello prevede che il moto relativo sia imposto da una forza tangenziale F , mentre il contatto tra le superfici è garantito da una forza normale N . Viene definito *coefficiente di attrito* μ il rapporto tra le due forze citate, se invece si considera l'area di contatto esso può essere visto come rapporto tra la resistenza al taglio τ e la tensione normale σ :

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau}{\sigma}$$

Ne consegue che il coefficiente di attrito può essere ridotto o ricucendo la resistenza opposta al taglio, opzione che viene percorsa con l'applicazione di sostanze lubrificanti; oppure con l'aumento della durezza delle superfici a contatto.

Il modello di Coulomb vige per entro determinati valori della forza N ; infatti maggiore è tale forza più la superficie di contatto si avvicina all'area nominale che rappresenta la massima possibile.

In questo percorso vi è una proporzionalità nel rapporto tra le forze per carichi normali bassi, mentre aumentandone il valore si ha una stabilizzazione del valore della forza tangenziale che raggiunge dunque un valore limite.

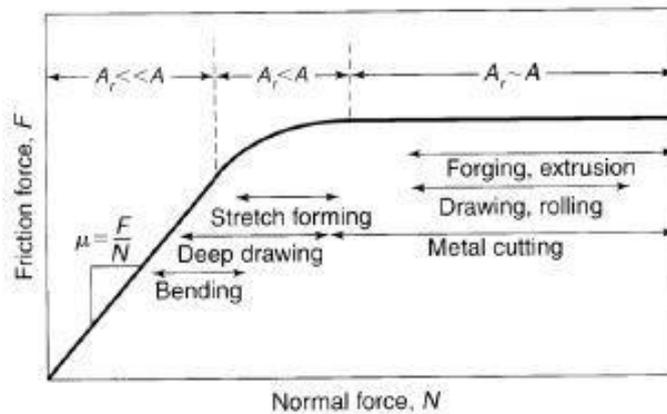


Fig. 5.14 Diagramma andamento del coefficiente di attrito per un aumento della forza di formatura N [13]

La teoria risulta dunque poco appropriata in tutte le situazioni in cui i carichi normali sono tali da fornire un valore del coefficiente inutilizzabile, tale circostanza porta esclusione di tale modello per le lavorazioni massive.

Si ha l'esigenza di integrare un nuovo modello che superi le limitazioni possedute da quello di Coulomb, si arriva dunque alla definizione di *fattore di attrito* m , ottenuto come rapporto la resistenza di taglio all'interfaccia τ_i e la minore resistenza allo snervamento tra i due materiali in gioco, k :

$$m = \frac{\tau_i}{k}$$

Fattore di attrito che assume valore nullo quando non vi è attrito e valore unitario in corrispondenza di valori di adesione delle superfici, vengono dunque superate le limitazioni descritte precedentemente in quanto m è completamente indipendente dalla forza normale N . [13]

5.4.2. Trattazione teorica della prova

La T-shape compression ha una procedura molto semplice che prevede l'utilizzo di un punzone e di un stampo in cui è presente un'incisione a V; l'incisione in cui dovrà essere posizionato il provino cilindrico che subirà poi una compressione data dal pistone in discesa. La deformazione che viene imposta con tale movimento porta alla realizzazione di due deformazioni in successione: la prima in ordine temporale è l'estrusione che si verifica nello stampo a V a cui succede un flusso laterale di materiale che subisce dunque una compressione semplice tra le due superfici piane punzone e matrice.

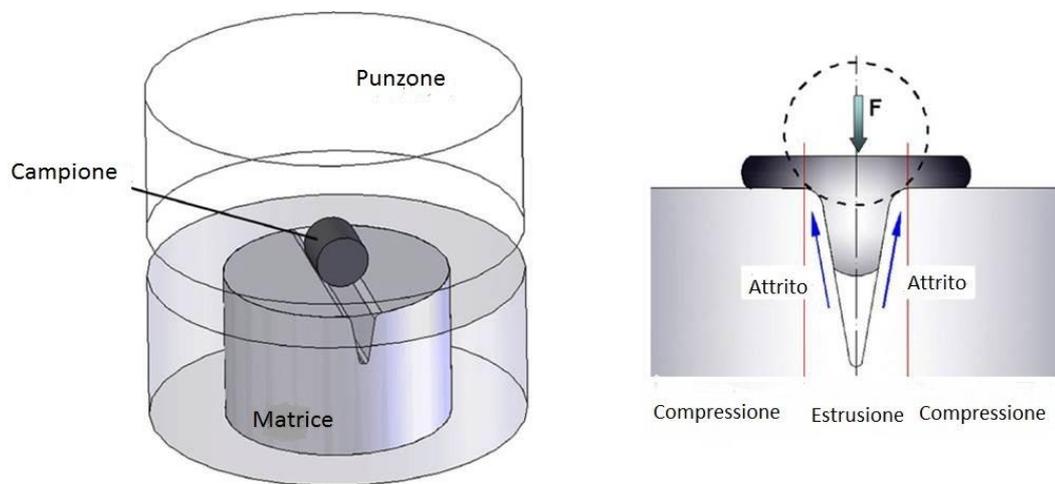


Fig. 5.15 Simulazione del set-up della prova (a) e deformazioni caratteristiche della provetta (b) [14]

Ovviamente per un cambiamento della forza opposta dall'attrito si ha una variazione dell'altezza della parte estrusa in quanto, è l'attrito rinvenuto dal flusso di materiale non è il medesimo; ne consegue che maggiore è l'altezza della parte estrusa minore sarà l'entità dell'attrito presente. Il valore da esso assunto si riflette anche sulla forza di formatura necessaria per far raggiungere al pistone una determinata corsa, indirettamente questo determina un parametro per capire l'efficacia del lubrificante utilizzato, considerazioni che però verranno approfondite successivamente.

Vengono presentati dei punti che permettono di definire i punti di forza che vanno a vantaggio dell'utilizzo della prova in questione rispetto alla compressione semplice, nel caso scopo sia quello di applicazioni per forgiatura a freddo:

Carico e forma utilizzate sono sensibili alle condizioni di attrito presente

Facilità di esecuzione del test anche con lubrificante, riempiendo la cavità

Severe deformazioni, sia in compressione che in estrusione. Il fatto che i provini siano cilindrici permette una percentuale di superficie generata del 50% valori non raggiungibili con una prova di compressione classica

Possono essere testati provini con diversi diametri, previo cambiamento dello stampo, in quanto costi e tempi realizzazione dello stesso risultano più contenuti se confrontati con altri tipi di test, come quello di estrusione inversa o a doppia coppa estrusa.

La mappatura della variazione del carico rispetto all'avanzamento del punzone rapportato al diametro del provino, permette l'ottenimento di una curva monotona crescente, partente dall'origine degli assi e che vede una variazione di concavità nel suo procedere. Ed è proprio nel punto appena citato, che rimane il medesimo anche per valori diversi di attrito, con il quale si identificano due situazioni diverse della storia deformativa del provino.[14]

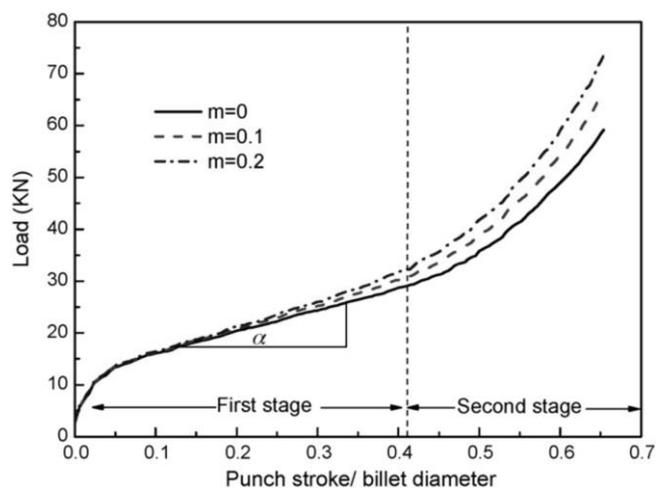


Fig. 5.16 Curve caratteristiche della prova di T-shape compression a diversi valori di attrito [14]

L'intera deformazione del provino della T-shape compression comprende più stadi: il primo che vede la deformazione per estrusione all'interno dell'incisione con ridotte superfici di contatto, situazione che viene rappresentata dalla curva partendo dall'origine degli assi fino al punto di flesso definendo un andamento circa lineare, per

valori da 0,15 a 0,43 , con l'avanzamento del punzone rapportato al diametro della billetta. Mentre la successiva parte definisce un aumento della regione di contatto tra superficie e provino che si manifesta applicativamente come una compressione semplice, definendo la seconda parte della curva analizzanda.

Normalmente la prova si arresta a 0,65 volte il diametro iniziale del provino che corrisponde alla deformazione massima con una pressione massima che passa da 3 a 1900MPa, con una superficie risultante aumentata del 50%.

Dalla figura riportata risulta chiara una sensibilità del comportamento al fattore di attrito m , portando per una diminuzione dello stesso ad un aumento dell'avanzamento eseguito dal pistone con l'applicazione di carichi di minore entità. Il progressivo distanziamento delle curve per un aumento del fattore di attrito è dato dell'altrettanto progressivo aumento della superficie di contatto tra le parti.

Per una variazione del fattore di attrito abbiamo, nel primo stadio deformativo, un aumento della pendenza del tratto rettilineo, definendo in tal modo le condizioni di attrito presenti nel processo $k = \tan \alpha$

Si riscontra poi una sensibilità del comportamento del materiale al variare delle condizioni geometriche dell'intaglio, in particolare per quanto riguarda il raggio di fondo gola e l'angolo dell'incisione. Ma per avere la portata dell'influenza che tali variabili hanno sul comportamento del materiale si definisce un coefficiente di sensibilità, λ :

$$\lambda_m = \frac{k_m - k_{m=0}}{k_{m=0}}$$

Dove k_m è la pendenza della curva di carico, mentre $k_{m=0}$ fa riferimento alla pendenza della curva in assenza di attrito e a parità di altri parametri.

-effetto del raggio di fondo gola si distingue palesemente che per una riduzione del raggio di fondo gola si ottiene un aumento dell'altezza della parte estrusa e un netto calo del carico necessario per ottenerla. Ne deriva che la variazione denunciata dalla sensibilità sia comunque linearmente crescente all'aumentare del fattore di attrito, non solo ma la sensibilità ha variazioni maggiori tra gli estremi proprio per raggi di fondo gola piccoli.

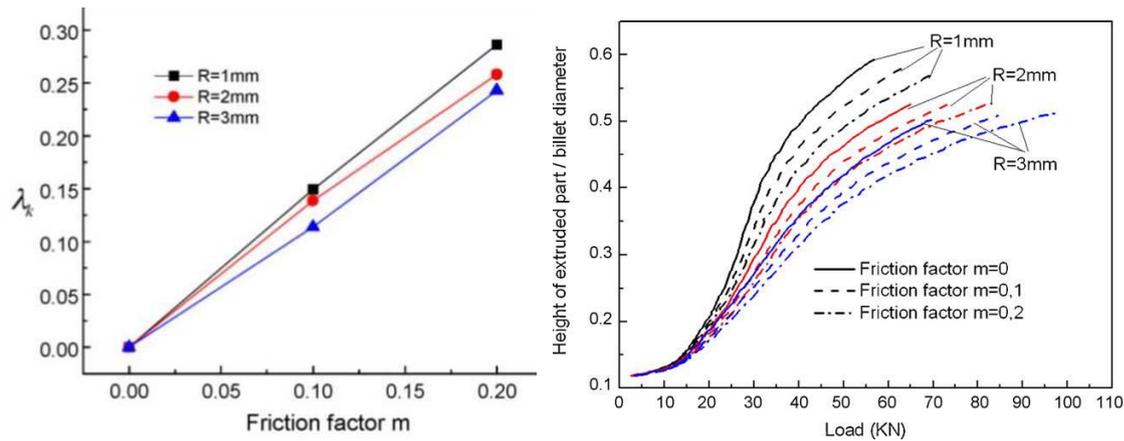


Fig. 5.17 Andamento de fattore di sensibilità rispetto al fattore di attrito m , per diversi raggi di fondo gola (a), curve caratteristiche della prova per diversi raggio di fondo gola e differenti fattori si attrito (b) [14]

-effetto dell'angolo di fondo gola monitorando l'altezza della parte estrusa e il carico necessario per ottenerla, in funzione dei diversi angoli di fondo gola dalle quali si può concludere che per un minor angolo di fondo gola si ha maggior altezza della parte estrusa e minor carico necessario per provocarla. Ma come accade per il raggio di fondo gola, la variazione è si lineare con l'aumentare del fattore di attrito ma spazia per valori maggiori proprio per angoli di fondo gola più piccoli.

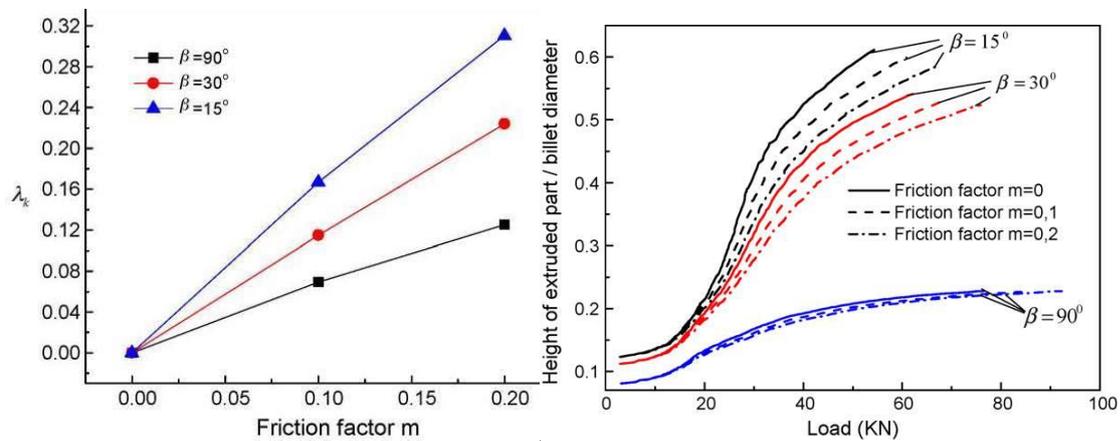


Fig. 5.18 Andamento de fattore di sensibilità rispetto al fattore di attrito m , per diversi angoli di fondo gola (a), curve caratteristiche della prova per diversi angoli di fondo gola e differenti fattori si attrito (b) [14]

5.4.3.Modalità di esecuzione della prova

L'esigenza dell'esecuzione di tali prove è dettata dalla necessità di possedere dei valori affidabili nei coefficienti e fattori di attrito che si manifestano durante lo stampaggio, in particolare per quelli che si verificano per severi stampaggi del materiale in cui è obbligato ad assumere una forma precisa. I dati ottenibili non sono solo utili per avere un'idea di ciò che accade, ma anche per avere valori più consoni da inserire eventualmente in qualche strumento di simulazione a disposizione della Zoppelletto S.p.A. Si anticipa dunque che le prove sono state realizzate sia con diverso valore di discesa sia, sia con diversi carichi, sia con la presenza di olio lubrificante e a secco, in modo da essere più aderenti alle condizioni di lavorazione: senza olio per la Erfurt e con olio per la National.

Prevista per l'esecuzione della detta prova sempre la MTS 810 in dotazione al laboratorio tecnologico.

Per avere dati più realistici i test sono stati realizzati su matrici che sono state rivestite con le stesse polveri applicate sugli stampi utilizzati in ditta, le misure riportate fanno riferimento alle prove eseguite sulla matrice rivestita in nitruro di titanio TiN.

L'incisione è stata realizzata con le direttive consigliate dal relativo articolo, che prevede una profondità di cava di 10mm, un raggio di fondo gola 1mm e un angolo di fondo gola pari a 20° . Per cercare di mantenere al meglio la centratura della forza di si è provveduto a inserire la matrice in un stampo provvisto, nella parte inferiore di un incavo nel quale viene a combaciare il punzone inferiore. Il citato punzone inferiore, come quello superiore, sono stati realizzati in Zoppelletto e sono stati forniti di estremità adatte per il sistema di afferraggio in dotazione alla MTS 810.

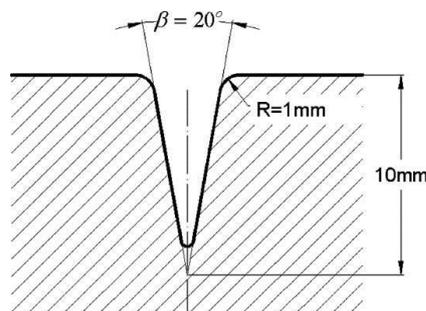


Fig. 5.19 Specifiche dell'intaglio di prova prescritto [14]

I provini realizzati in tutti e quattro i materiali considerati, di sezione circolare con diametro di 7mm e una lunghezza del provino di 7mm. Le dimensioni appena descritte sono state adottate anche per permettere un confronto con i dati denunciati nell'articolo stesso.



Fig. 5.20 Composizione del set-up di prove utilizzato: punzoni adattati e matrice rivestita in TiN

Le condizioni di prova sono definite sempre dall'articolo stesso, che prevede una velocità di applicazione del carico di 6mm/min per una corsa massima di 4,5mm, valore che corrisponde al 0,65 del diametro iniziale del provino per il quale è dichiarata la massima deformazione. L'abbondanza di provini ci ha permesso anche di eseguire dei test preliminari tali da comprendere limiti e collaudare la procedura della prova.

Si sono effettuati due cicli di misure una a secco a una seconda con l'applicazione dell'olio lubrificante utilizzato in Zoppelleto. Per ognuno dei quattro materiali in esame sono state realizzate quattro distinte condizioni sia di prova:

-N3 provini senza vincoli né di abbassamento né di carico utilizzate, come avvenuto per la trazione, per settare correttamente la macchina e verificare che le curve fossero coerenti. Nel nostro caso risultavano addirittura sovrapponibili ecco perché successivamente si avrà un solo provino per tipologia.

-N1 provini a corsa limitata a 4,5mm si rispetta quindi le prescrizioni dell'articolo determinando una discesa massima ma permette alla macchina di aumentare il carico indefinitamente pur di completare la corsa.

-N1 provini a corsa limitata a 4,5mm e forza limitata a 60kN in questo caso si pone una limitazione non nella corsa di discesa ma anche dalla massima forza imponibile. La corsa imposta deve essere dunque completata raggiungendo a mantenendo un carico massimo di 60kN.

-N1 provini a corsa limitata a 4,5mm e forza limitata a 40kN ancora una volta la prova ha specifiche da rispettare in corsa da raggiungere e in forza massima per essere raggiunta.

5.4.4. Presentazione dei risultati.

I provini dopo essere stati sottoposti alla suddetta prova si presentano come quelli in figura 5.19a-b, dalle quali già visivamente si distingue una differenza di comportamento valutabile dalla parte estrusa:



(a)



(b)

Fig.5.21. Immagine comparata dei provini in esame: prove a secco (a) e prove con olio lubrificante (b)

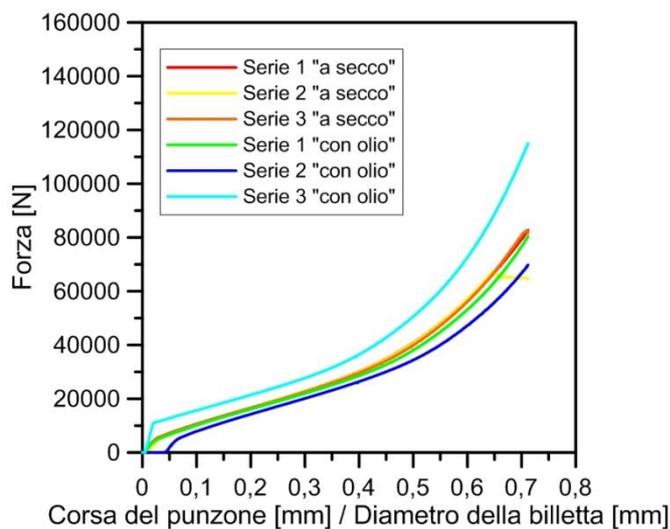
Di seguito si presenta la tabella delle misure A e B rilevate per i provini esame:

	A SECCO		A OLIO	
	A [mm]	B [mm]	A [mm]	B [mm]
SAE 1005	3,94	1,6	4,5	1,3
AISI 304L	3,4	2,1	3,24	2,6
AISI 316L	3,48	2,2	3,5	2
SAF 2205	3,24	2,1	3,2	2,26

Fig.5.22. Tabella riassuntiva delle misure rilevate dai provini

Dalla sola visione dei grafici di prova, realizzati ponendo in ascissa la corsa del pistone rapportata con il diametro iniziale del provino e in ordinata la forza esercitata dal pistone. In ogni grafico sono racchiuse sia le prove eseguite a secco sia con olio lubrificante esclusivamente alle prove senza limitazione ne di carico ma quella di corsa. Per distinguere le curve realizzate a secco e con il lubrificante si è scelto di utilizzare colori caldi per le prime quali: giallo, rosso e arancione; mentre si scelgono colori freddi per le prove ad olio: azzurro, blu e verde

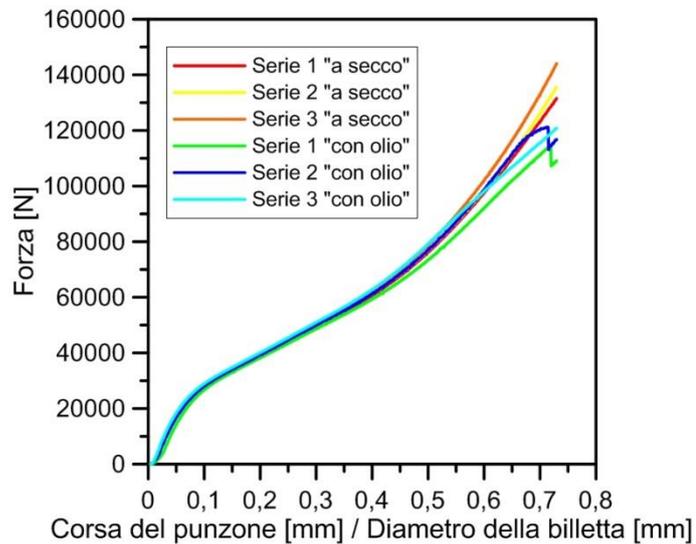
Prove eseguite con il SAE 1005



Dall'osservazione immediata del grafico si nota che gli andamenti "a secco" siano sovrapponibili, infatti non sono distinguibili. Due misure realizzate con l'olio raggiungono gli stessi allungamenti relativi con una minore forza, segno che l'olio favorisce effettivamente lo scorrimento del materiale. L'apporto derivante dall'olio

lubrificante risulta però incostante in quanto spazia dall'essere conveniente per l'utilizzo, a essere indifferente fino a definire una misura sconveniente.

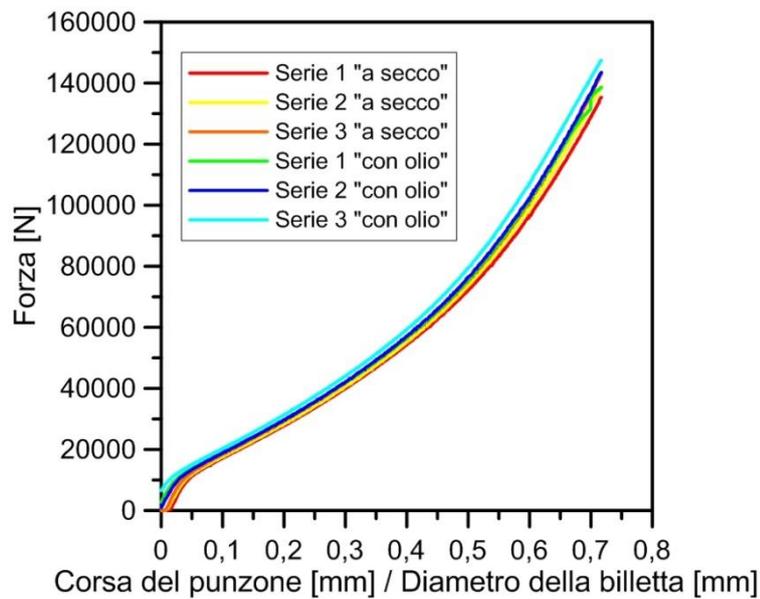
Prove eseguite con l'AISI 304L



Dal grafico in oggetto è possibile dedurre come l'olio lubrificante sia sostanzialmente ininfluenza per quanto riguarda la deformazione per estrusione, mentre la presenza della lubrificazione si distingue in fase di deformazione dovuta a compressione, risultando conveniente.

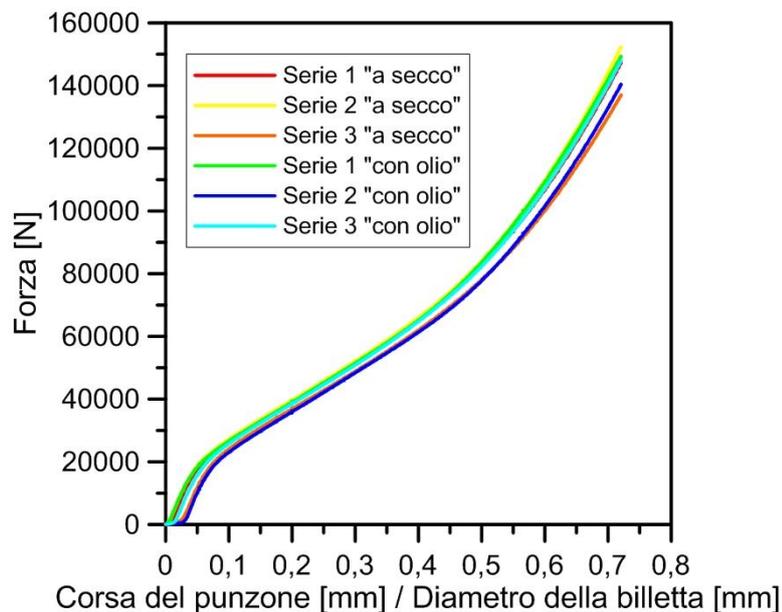
Dalle misure in nostro possesso è possibile notare con l'olio sia più costante nel suo comportamento.

Prove eseguite con l' AISI 316L



Considerando i grafici riportati si riscontra l'improbabile tendenza delle prove senza olio di richiedere più forza, e distinzione risulta più marcata per il campo delle deformazioni di compressione. Anche se in ogni caso non vi sono differenze sostanziali nella prova.

Prove eseguite con il SAF 2205



In questo caso, si distinguono due comportamenti piuttosto netti che si distinguono per una leggera differenza di forza imposta. I grafici appena individuati non trova in alcun caso miglioramenti con l'utilizzo di lubrificante.

Inoltre è il primo materiale che all'inizio dell'analisi descrive un allungamento primordiale del materiale, senza chiedere sostanzialmente forza.

5.4.5. Analisi dei risultati

Si osserva che l'utilizzo dell'olio lubrificante sia progressivamente ininfluenza con l'aumentare della durezza del materiale che si va ad esaminare.

L'olio non partecipa attivamente durante la fase di deformazione per estrusione, ma partecipa a quella di compressione. La causa di questo comportamento è la geometria dell'intaglio che favorisce, sottopressione, l'efflusso dell'olio verso l'esterno lasciando sguarnita l'interfaccia.

Dai grafici in analisi sono fonte di curiosità, e meriterebbero studi più approfonditi, sia il comportamenti relativi ai flessi delle funzioni, per i quali si ipotizza che la curvatura del flesso possa essere influenzata dalla durezza del materiale; sia il ritardo iniziale descritto dal materiale bifasico e le sue due nette funzioni descritte.

5.5. MTS 810

Uno spazio riservato lo si può ricavare per la descrizione della macchina di trazione utilizzare per tutte le prove eseguite sui materiali.

L'MTS 810 è una macchina di trazione idraulica e prevede un ampio spettro di assetti realizzabili, sia per elevati o meno valori di forza, sia che i test siano statici o dinamici. La configurazione della macchina è diversificata a seconda dei materiali che dovranno essere esaminati, è dunque possibile intervenire sulla capacità di forza sviluppata, portata della servovalvola, capacità della pompa, software e altri accessori.

Ma soprattutto la macchina è consente l'esecuzione di un ampio spettro di materiali che parte dalle plastiche e attraversando elastomeri, alluminio, compositi, acciaio arriva alle super leghe. I provini possono avere diverse taglie, in questo caso sono utilizzabili quelli fino alla large; eseguendo prove di tutti i tipi: dalle statiche come compressione, trazione e flessione a quelle dinamiche come i test a fatica per basso e alto numero di cicli. Presente anche in diverse taglie di forza nominale: 5kN, 25kN, 100kN, 250kN, 500kN per adattarsi meglio alla tipologia di materiali da esaminare.

La macchina in dotazione al laboratorio tecnologico dell'istituto è un MTS 810 di 250kN di classe di precisione 0,1 che realizza l'aumento della distanza tra le teste con un abbassamento, tramite impianto idraulico, della testa inferiore. La macchina vede a bordo la presenza di un sensore LVDP avente una corsa massima di $\pm 75\text{mm}$ in

quanto lo stesso lavora sia in trazione che in compressione e risulta meno adatto alle misurazione dei tratti elastici in quanto non ha sufficiente sensibilità per allungamenti così ridotti in valore assoluto; risulta però affidabile nel campo plastico dove gli allungamenti sono considerevoli.



Fig. 5.23 MTS 810 in dotazione al laboratorio tecnologico [15]

L'estensometro, protagonista delle prove a bassa velocità, è sempre fornito dall'MTS e corrisponde al modello 634.12F-24 avente un corsa massima di $5000\mu\epsilon$, una base di misura di 25mm per una corsa massima di 12,5mm. Strumento comodo nell'utilizzo in quanto il suo posizionamento avveniva con due morsetti a molla, tali da garantire la prese continua dello strumento a provino. [15]

Procedura sperimentale

6.1.Introduzione

Nel capitolo che segue si apre la spiegazione di tutto ciò che è stato fatto per compiere l'analisi microstrutturale dei campioni di tappi stampati a freddo la cui geometria è già stata presentata nel paragrafo 4.4.1. Nelle pagine che seguono sarà indicato tutto il percorso eseguito per la caratterizzazione della microstruttura presente sia per quanto riguarda la morfologia sia per quanto riguarda le caratteristiche fisiche di durezza, allo scopo di comprendere quali siano le zone e i modi che ci possano consentire un intervento per il mantenimento delle specifiche e della qualità del prodotto.

6.2.Analisi metallografica

6.2.1.Preparazione metallografica

Un'analisi metallografica eseguita correttamente ha il compito di stabilire le cause che hanno portato alla creazione di difetti nel campione sia in superficie che in profondità, nasce per questo motivo una procedura consolidata su ciò che il campione vede subire per permettere un'osservazione corretta sulla quale poi si andrà a fondare la determinazione delle cause. La procedura appena citata denota alcuni passi: sezionatura del provino, inglobatura, pulitura, attacco chimico e osservazione a microscopio.

La prima parte della sequenza verrà presentata nelle righe successive mentre per la rimanente si riservano dei paragrafi. I campioni oggetto di osservazione sono stati elencati nella selezione "risultati" ma in questo stadio si possono dividere in due famiglie: i non deformati, derivanti da spezzoni di barre di acciaio utilizzati per comprendere quali fossero i parametri base e i deformati a freddo sotto forma di tappi forniti direttamente dalla Zoppelleto.

Il modus operandi prevedere:

-*sezionamento* il provino veniva sezionato in mezzaria in modo da permettere l'osservazione dello stesso.

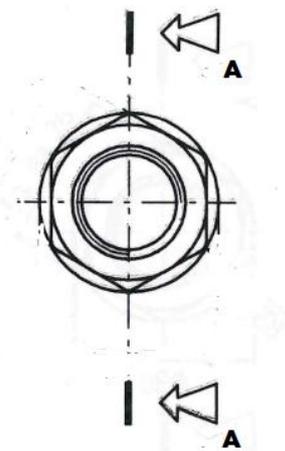


Fig. 6.1 Rappresentazione del piano di taglio

-*inglobatura* per avere una miglior presa in fase di spianatura e permette di avere una superficie piana di appoggio, si provvede a formare un campione cilindrico di altezza sufficiente da contenere il campione che deve esporre la sua faccia sezionata. Il volume di cui si necessita per passare dal semitappo al volume cilindrico si ottiene con la fusione e successiva solidificazione di un apposita resina. Ottenendo in fine un cilindretti di color nero su una cui faccia viene il campione sezionato.

-*levigatura* procedura che prevede l'utilizzo di carte abrasiva di grana progressivamente più fine (180-360-1200-2400)

-*lucidatura* su panni con sospensione diamantata sempre più fine (6-3 μ m solo i duplex hanno richiesto l'utilizzo della pasta da 1 μ m)

Gli attacchi chimici sono diversi non solo per i materiali ma variano anche per ciò che è oggetto dell'osservazione.

L'attacco chimico permette l'osservazione della microstruttura dei materiali in quanto se applicato sulla superficie provoca una reazione di ossido-riduzione corrodendo specifici costituenti. La diversa velocità di progressione della corrosione sulle diverse fasi porta ad una differenza di livello superficiale che si tramuta, in osservazione dal

microscopio, in una differenza cromatica delle fasi stesse. Si presentano i vari attacchi chimici utilizzati:

-attacco elettrolitico utilizzato per gli acciai inossidabili austenitici AISI 316L e AISI 304L permette di corrodere in maniera diversificata le zone in cui vi è una irregolarità reticolari. Nel nostro caso i provini venivano immersi in 50mL di acido nitrico e 50mL di acqua distillata a cui veniva applicata una differenza di potenziale il cui valore dipende dalla massa del campione e dalla sua composizione; come riferimento il provino non doveva superare un amperaggio di 0,15mA, che nel caso in questione corrispondeva a 1,4V.

Il tempo di mantenimento era variabile, anche in funzione del degradamento dell'attacco, generalmente però è possibile assumere 60s di mantenimento.

La progressione dell'attacco è apprezzabile dalla creazione di uno strato color giallo vivo sulla superficie del campione.

Con questo tipo di attacco è possibile attaccare i bordi grano in modo che sia visibile la struttura del materiale, per mantenimenti maggiori e sufficienti ingrandimenti è possibile individuare nei singoli grani i twin, ovvero piani preferenziali in cui avviene lo scorrimento e la deformazione del grano stesso.

Infine l'attacco elettrolitico è stato utilizzato anche in veste di macroattacco in quanto per mantenimenti superiori o per maggiori differenze di potenziale spiccavano le linee di flusso che identificavano il movimento del materiale in deformazione.

-attacco Beraha utilizzato per il SAF 2205, permette l'attacco selezionato della ferrite mentre l'austenite non vi partecipa. Applicativamente la soluzione è composta da: 20mL di acido cloridrico, 80mL di acqua distillata e 1g di solfato di potassio. L'applicazione dell'attacco avviene ancora per immersione e l'entità dello stesso viene considerata osservando l'imbrunimento della superficie. Come si osserverà l'attacco tende, anche per pochi secondi di mantenimento, a non essere uniforme, l'attacco della ferrite le fa assumere un colore azzurro o un colore marrone e con difficoltà si riesce ad estenderne l'efficacia fino a bordo del campione.

-attacco nital 4 utilizzato per il SAE 1005 (o C4C) la cui struttura ferritica viene messa in evidenza con la corrosione dei bordi grano, mentre all'interno dei singoli grani si mantiene un colore bianco. L'attacco si compone di 4 parti di acido nitrico sui 100 totali, diluito dunque in alcool denaturalizzato; percentuale che già risultava al quanto aggressiva imponendo tempi di mantenimento minore. Il contatto della soluzione con il campione avviene versandone una generica quantità sulla superficie interessata,

permettendo l'interruzione tempestiva dell'attacco una volta raggiunto lo stadio desiderato. La progressione dell'attacco si manifesta con la lente opacizzazione della superficie.

-*macroattacco* utilizzato per il SAE 1005 (o C4C) questo macroattacco mette in evidenza le linee di flusso del materiale, in modo da comprendere come sia avvenuto lo spostamento del materiale, individuabili anche a occhio nudo come una serie di bande in chiaro scuro. L'attacco è un attacco caldo in quanto l'intera soluzione deve essere riscaldata.

L'attacco si compone di 50mL di acqua distillata e di 50mL di acido cloridrico che per essere attivato ha bisogno di essere portato ad una temperatura di 80°C che viene raggiunta tramite una piastra riscaldata elettricamente. Il tempo di immersione del provino è stato di 5min.

I pezzi attaccati sono poi stati esaminati al microscopio ottico mentre quelli soggetti a macroattacchi sono stati osservati con un microscopio ottico metallografico ma, tramite l'elaborazione dell'immagine, si è riusciti a ricavare una panoramica intera di tutta la sezione del campione.

6.2.2. Caratterizzazione microstrutturale al microscopio ottico (OM)

Segue l'esecuzione dell'attacco l'osservazione del campione tramite il microscopio ottico LEICA LAS DM2500 M in possesso del laboratorio di analisi microstrutturale dell'istituto.



Fig. 6.2 LEICA LAS DM2500 M presente in laboratorio di analisi micrografiche dell'istituto

Generalmente il microscopio ottico permette di avere un'immagine metallografica per riflessione della luce sulla superficie del provino. La luce parte da una sorgente luminosa e attraversato un condensatore, impatta su una lamina di cristallo a facce piane e parallele inclinate di 45° rispetto l'asse dell'obiettivo. La lamina riveste una parte fondamentale in quanto riflette la luce partente dalla sorgente ma non interferisce in nessun modo con l'immagine riflesse dalla superficie del campione. Anche l'obiettivo gioca un ruolo decisivo in quanto anch'esso viene attraversato due volte dal flusso luminoso, e trova posto nella struttura tra la lamina riflettente e il campione. La prima volta che viene attraversato è interpretato come lente terminale del condensatore, nel secondo quando il flusso lo percorre in senso inverso, permette di ingrandire l'immagine che poi supera in trasparenza la lamina e si focalizza nell'oculare nel quale subisce un ulteriore ingrandimento. [16]

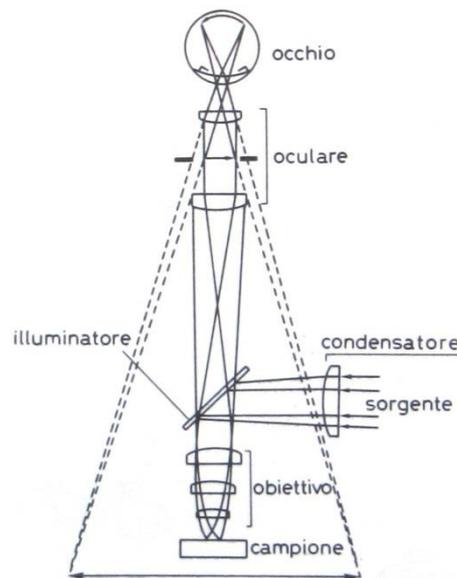


Fig.6.3 Rappresentazione del funzionamento di un microscopio ottico metallografico

[16]

Il LEICA LAS DM2500 M in dotazione del laboratorio è provvisto anche di un supporto software che permette, tramite la differenza cromatica realizzata dall'attacco di eseguire due funzionalità tra le più utili, che come si avrà modo approfondire restituiscono informazioni simili ma per strutture completamente diverse.

La prima è conosciuta come *grain expert* che permette l'identificazione di ogni singolo grano completamente compreso nell'inquadratura della telecamera; mentre il secondo sfrutta la differenza cromatica per la distinzione delle diverse fasi, tarandolo adeguatamente è possibile avere un dato affidabile sulla presenza in percentuale di una determinata fase su quella specifica inquadratura.

La percentuale di ferrite è l'unico parametro che differenzia i report stilati dalle due funzioni, mentre i parametri comuni scelti sono stati:

- area;
- larghezza;
- lunghezza;
- perimetro;
- orientamento;
- rotondità;
- diametro equivalente
- rapporto d'aspetto

Di tali parametri ne sono poi stati scelti tre in quanto portatori delle informazioni di maggior utilità per la conduzione delle indagini:

-rapporto d'aspetto è un indice ottenuto come rapporto tra la lunghezza e la larghezza del singolo grano o fase compresa totalmente nel campo dell'obiettivo:

$$\text{Rapporto d'aspetto} = \text{lunghezza} / \text{larghezza}$$

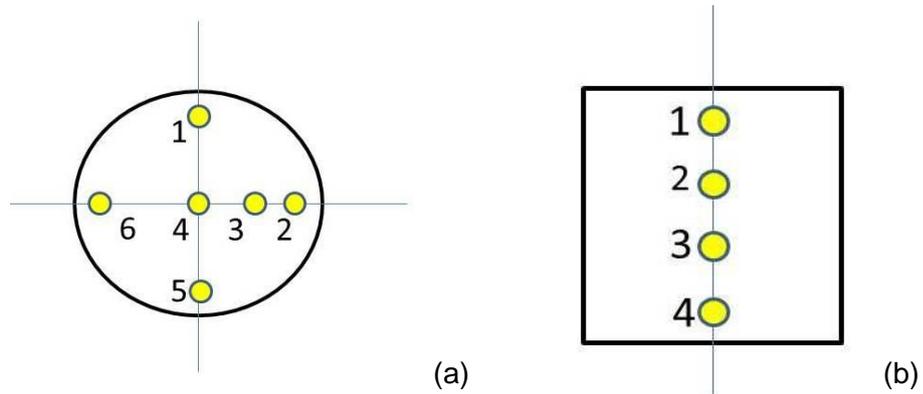
Ne consegue che verrà quantificato l'allungamento subito dalla particella, nominativo generale assunto dal software in quanto ignora il fatto che sia un grano, una fase, ecc. In questo determinato caso l'allungamento del grano è sintomo di una deformazione subita e rappresentati di come sia scorso il materiale. Quindi maggiore nei singoli punti sarà il valore del rapporto d'aspetto maggiore è la deformazione a cui è stato sottoposto.

Nello specifico della nostra analisi risulta evidente che le informazioni ricavabili dal rapporto d'aspetto e dalla rotondità sono le medesime, in quanto la rotondità definirebbe di quanto la particelle si discosti dalla circolarità. Lo scopo della rotondità sarebbe di dichiarare quanto frastagliata sia la superficie della particella, ma nel caso di deformazioni importanti il suo andamento calca in modo impressionante quello del rapporto d'aspetto.

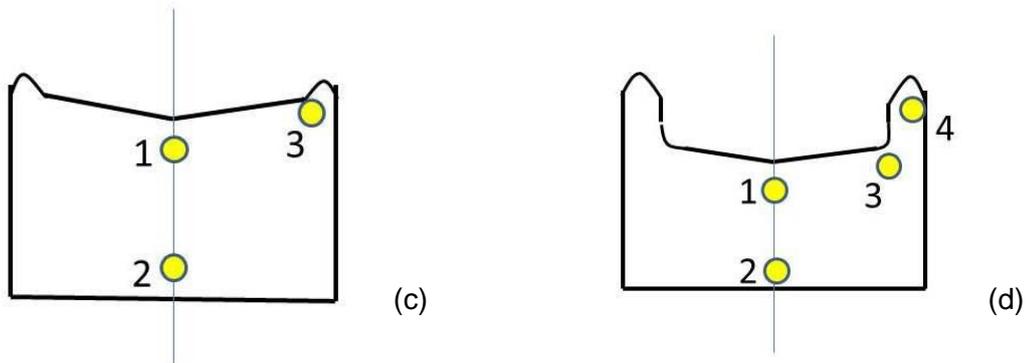
-diametro equivalente che rappresenta il valore del diametro della massima circonferenza inscrivibile all'interno della singola particella, nel report che verrà fornire sarà presente la media aritmetica di tale valori.

Le misure sovra citate sono state effettuate per un diverso schema di punti a seconda del provino esaminato:

- Numero 6 punti per i provini di materiale non deformato in sezione trasversale
- Numero 4 punti per i provini di materiale non deformato in sezione longitudinale



- Numero 3 punti per i provini che saranno chiamati “primo stadio”
- Numero 4 punti per i provini che saranno chiamati “secondo stadio”



-Numero 21 punti quantità cospicua di punti che però assicurano una copertura minuziosa delle sezioni del provino, e come il materiale si è mosso nella sua realizzazione.

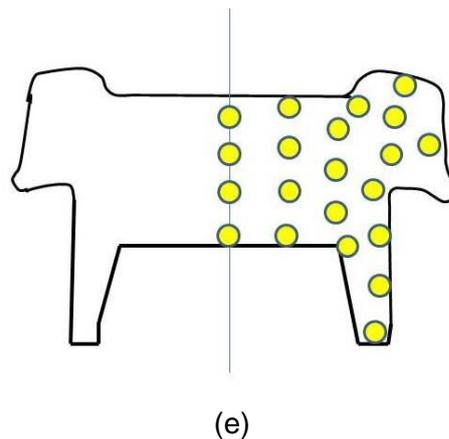


Fig.6.3 Rappresentazione dei punti analizzati per le diverse sezioni

Per ogni singolo punto sono state poi realizzate più micrografie con lo scopo di poterle comparare poi tra loro, utilizzando molto spesso ingrandimenti diversi adattati al

materiale in osservazione, mentre l'uso dell'applicazione è ristretto alla immagine con l'ingrandimento adatto.

6.3. Microdurezze e durezze

Un completamento della caratterizzazione microstrutturale può essere ottenuto associando ai dati ottenuti mediante l'utilizzo del microscopio ottico quelli derivanti dalle durezze e microdurezze.

6.3.1. Durezze Vickers

Nella sua generalità la prova consente di premere con una determinata forza un penetratore contro la superficie piana del campione. Il penetratore in questione è di diamante a forma piramidale a base quadrata possidente di un angolo al vertice di 136°; una volta rimosso il detto penetratore esso lascia sulla superficie un'impronta romboidale o quadrata a seconda della omogeneità del materiale.

Si calcola poi la media aritmetica delle diagonali dell'impronta, che forma la variabile d , per poi procedere al calcolo della durezza che sarà quindi misurata in quelli che saranno chiamati punti Vickers, otteniamo:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

Dove d è la variabile appena descritta, mentre F è la forza applicata.

Si provvede alla prescrizione di distanze minime da mantenere: 2,5 volte la media dei diametri tra un qualsiasi centro di impronta e il bordo; e una distanza di 3 volte la media dei diametri per tra il centro di due impronte distinte. [17]

Le durezze Vickers sono state eseguite con il durometro in dotazione del laboratorio di analisi microstrutturale. Sono state eseguite le prove di durezza in quanto il materiale deformandosi incrudisce aumentando la sua durezza. Ne deriva che nei punti con maggiore incrudimento è possibile riscontrare una durezza maggiore, mappandoli definiscono i piani in cui il materiale è scorso sopra altro materiale. La differenza di velocità tra le diverse parti del materiale comporta uno strato che ha moto relativo sull'altro creando una fascia di materiale incrudito. Le misure sono state eseguite con un carico 100kg e un mantenimento di 15 secondi. Il dato da ricavare è la media aritmetica della lunghezza delle diagonali dell'impronta, la loro rilevazione viene effettuata con un comodo gioco di immagini che come il microscopio ottico sfrutta la

riflessione della superficie del materiale per ingrandire l'impronta che viene poi proiettata su uno schermo di plastica trasparente su cui viene proiettata l'immagine ingrandita sulla quale si può misurare la diagonale, una volta ottenuta le media si anno apposite tabelle di conversione. I punti su cui sono state eseguite sono i medesimi che sono stati precedentemente enunciati per le diverse tipologie di provino.

6.3.2. Microdurezze Vicker

Le microdurezze sono state eseguite con il microdurometro Leitz sempre in dotazione al laboratorio di analisi microstrutturali dell'istituto, che tramite un azionamento a pistoncino e il comando di una centralina permetteva la caduta della punta e della massa a cui essa sottostava, consentendo dunque l'esecuzione della prova Vickers in maniera puntuale. Ed è stata proprio la scelta della massa una delle scelte delicate in quanto una massa troppo piccola restituiva dati poco affidabili e con un altissima variabilità, mentre una massa troppo onerosa avrebbe fornito un'informazione ridondante con quella trasmessa dall'esecuzione della durezza.

La massa scelta alla fine è stata per tutti i campioni analizzati di 200g e un mantenimento della stessa di 15s.



Fig. 6.4 Microdurometro Vicker Leitz in dotazione al laboratorio di analisi micrografica

Le microdurezze non sono state realizzate sui campioni in SAF 2205 in quanto con l'utilizzo di qualsiasi massa si ottenevano valori dubbi o con variabilità inaccettabili, senza considerare che risulta molto problematico definire se associare la durezza ad una deformazione subita o alla presenza della fase più dura, appena sotto l'isola di fase più duttile. Questa considerazione porta anche alla instabilità della validità della misura in quanto in determinate occasioni l'impronta risultava più profonda su un lato a

causa della differenza di durezza. Anche i tentativi di stabilire la durezza della singola fase sui non deformati per confrontarla con i deformati non ha portato a risultati significativi.

Per quanto riguarda l'esecuzione delle microdurezze si sono limitati ad una definizione puntuale di ogni singolo punto per tutti i campioni tranne per quelli che assumono la vera e propria sezione di tappo per cui sono stati previsti dei profili di microdurezza che comprendano la maggioranza dei 25 punti stabiliti:

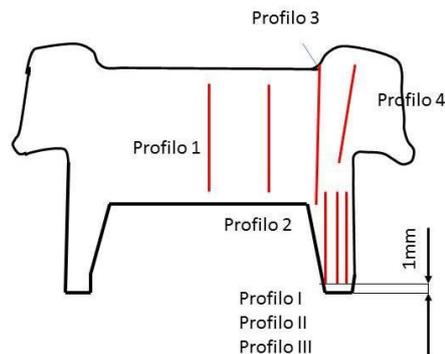


Fig.6.6.Immagine rappresentante i profili di durezza eseguiti

-*profilo 1* verticale comprendente i punti dall'1 al 4 e percorso dall'alto verso il basso
Per un totale di 9 punti intermedi rilevati di cui uno ogni altro veniva assunto come valore del punto di mappatura.

-*profilo 2* verticale comprendente i punti dall'5 al 8 e percorso dall'alto verso il basso
Per un totale di 9 punti intermedi rilevati di cui uno ogni altro veniva assunto come valore del punto di mappatura.

-*profilo 3* verticale comprendente i punti dall'9 al 13 e percorso dall'alto verso il basso
Per un totale di 11 punti intermedi rilevati di cui uno ogni altro veniva assunto come valore del punto di mappatura.

-*profilo 4* verticale comprendente i punti dall'14 al 17 e percorso dall'alto verso il basso
Per un totale di 9 punti intermedi rilevati di cui uno ogni altro veniva assunto come valore del punto di mappatura.

Come si dedurrà in seguito, si nota una fascia di materiale incrudito in corrispondenza dell'inizio della gambo del tappo per studiare la quale sono stati introdotti i percorsi partenti da un piano orizzontale comune, il piano è stato fissato ad un millimetro di

distanza dal punto più basso del gambo costituiti identicamente di sette punti, otteniamo così:

-*profilo I* verticale comprendente i punti percorso dal basso verso l'alto e ad una distanza di 0,5mm dal lato destro della gamba destra.

-*profilo II* verticale comprendente i punti percorso dal basso verso l'alto e ad una distanza di 1mm dal lato destro della gamba destra.

-*profilo III (quando possibile)* verticale comprendente i punti percorso dal basso verso l'alto e ad una distanza di 2mm (quando possibile) dal lato destro della gamba destra.

Per ogni singolo punto intermedio di ciascun percorso sono stati raccomandate misure fino all'ottenimento di tre misure simili per un massimo di cinque per punto. Tale scelta è stata presa per avere un numero sufficiente di misure per poterne ricavare una deviazione standard accettabile.

Presentazione dei risultati

7.1.Introduzione

Si apre dunque il capitolo dedicato alla presentazione dei risultati numerici dei campi descritti pocanzi, valori sui quali fonderanno le considerazioni e le conclusioni che andranno poi a chiudere lo scritto. I provini sono realizzati in tutte e quattro le leghe sopracitate ma solo divisibili in tre principali famiglie quali: non deformati, tappi multistadio e tappi monostadio. I venti campioni risultanti sono identificati da una specifica codifica che permette di renderli univoci.

Maggior peso hanno inevitabilmente i risultati che riguardano i tappi creati dal singolo passaggio in pressa Erfurt e quelli risultanti dalla terza stazione della pressa National, in quanto saranno inevitabilmente diversi e portatori di un differente tipo di informazione.

Non solo, ma anche all'interno della stessa classificazione ci si aspetta cospicue distanze tra i valori caratterizzanti i campioni SAE 1005 rispetto agli inossidabili, ma anche i distinti materiali di acciaio al cromo.

Si anticipa che quasi la totalità delle misure esposte è provvista di deviazione standard, in quanto sono state fornite dall'analisi al calcolatore o sono state eseguite più misure; qualora tale possibilità fosse venuta meno non si ha la presenza della deviazione standard.

Gli errori sulle misure di carattere microstrutturale sono contenute come media e deviazione standard della singola variabile, nel report del software LAS. Tali errori sono da riferirsi relativi alla singola micrografia acquisita.

Per quanto riguarda l'errore trasmesso nelle informazioni di durezza e microdurezza è quantificabile come circa 3HV.

7.2.Campioni non deformati

Risulta importante le condizioni del materiale di partenza tale da permettere poi una quantificazione della deformazione subita dal materiale. In questi termini è stato affrontato lo studio dei materiali non deformati, i cui campioni sono stati prelevati dalle stesse barre trafilate con cui poi si approvvigionano le presse stesse.

Per quanto riguarda le leghe le barre trafilate sono fornite dall'acciaieria Cogne e di diametro 22mm. Per il SAE 1005 campione oggetto della caratterizzazione microstrutturale è stato scelto tra più colate, in quanto la composizione chimica vedeva una stabilità maggiore degli elementi presenti, la suddetta colata viene codificata come 45872.

Colata 45872	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Media	Bal.	0.051	0.0657	0.295	0.0076	0.0071	0.105	0.0199	0.132	0.0220	0.174
Dev.	-	0.000	0.0005	0.002	0.0000	0.0000	0.000	0.0002	0.000	0.0012	0.001
Std.											
Valori secondo specifica	Bal.	0.020 - 0.060	0.100 max	0.250 - 0.400	0.0200 max	0.0250 max	0.1 max			0.0200 - 0.0600	0.1 max
Colata 45872	Co	Nb	Ti	N	W	Pb	Sn	As	Ca	Sb	Bi
Media	0.0091	0.0030	0.0204	0.0084	0.0117	<0.0025	0.0105	0.0004	0.0078	0.0058	<0.005
Dev.	0.0001	0.0008	0.0002	0.0000	0.0004	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0003	0.000
Std.											

Fig. 7.1a. Composizione della colata scelta del SAE 1005

Mentre per le rimanenti leghe di acciaio inossidabile si riportano le composizioni chimiche fornite dall'acciaieria Cogne che dichiara rispettivamente:

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per l'AISI 304L fornito allo stato ricotto

Marca interna: F304L1 IMCO

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.015	0.35	1.32	0.033	0.025	0.09	18.66	0.4	8.11	0.49	/	0.12

Fig.7.1b Composizione dell'acciaio AISI 304L fornito

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per l'AISI 316L fornito allo stato ricotto e solubilizzato
Marca interna: F316L IMCO

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.016	0.40	1,81	0.032	0.025	0.075	16.8	2.09	10.13	0.40	/	0.26

Fig.7.1c Composizione dell'acciaio AISI 316L fornito

Tabella riassuntiva degli elementi chimici per il SAF 2205
Marchatura interna: 329A 1

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0.020	0.52	1,28	0.021	0.009	0.18	22.30	3.13	5.68	0.19	0.02	0.07

Fig.7.1d Composizione dell'acciaio SAF 2205 fornito

A seconda del piano scelto per sezionare il provino si distinguono due tipologie di campioni: i non deformati in sezione trasversale e i non deformati in sezione longitudinale.

La codifica dei campioni prevede: il nome del materiale, ND acronimo di "non deformato" e l'abbreviativo della sezione considerata, ovviamente "long" per longitudinale e "trasv" per trasversale.

Quest'ultimi però non hanno fornito dati di importanza rilevante per cui si è scelto di riservare a loro l'appendice B, in coda allo scritto.

Ci si concentra sui provini ottenuti per prendendo la sezione longitudinale del provino, considerato non deformato, proveniente da una barra trafilata.

La sezione in questione risulta importante in quanto è la stessa con la quale si andranno poi ad analizzare i campioni.

Si identificano dei punti nei quali si svolgerà l'indagine al microscopio ottico e rilevata la durezza, mentre per le microdurezze saranno selezionati dei punti dei profili di microdurezza a rappresentare quelli di indagine. I punti stabili sono 4 e sono posizionati come in figura:

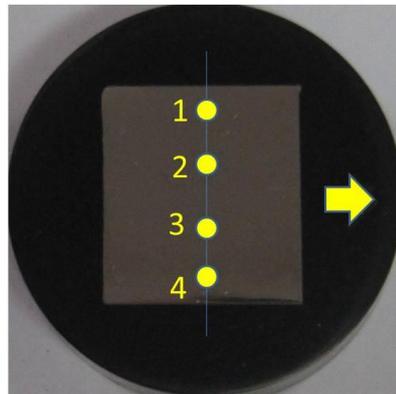
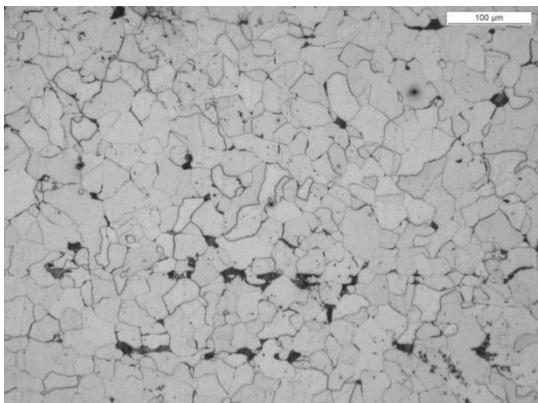


Fig. 7.1 Rappresentazione dei punti di indagine per le sezioni longitudinali; la freccia indica la direzione di trafilatura permettendo di orientazione corretta del campione

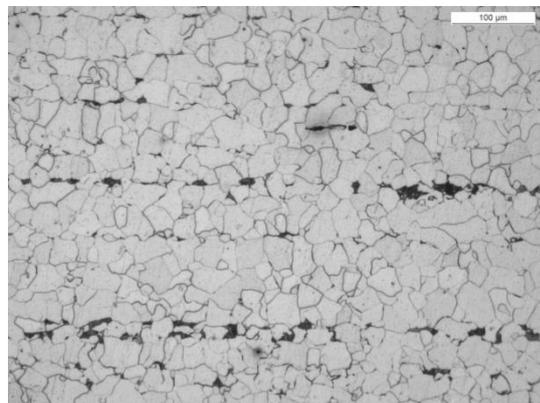
Campione “SAE 1005 ND long”

Il campione SAE 1005 (o C4C), colata 45872, in sezione longitudinale è stato sottoposto ai trattamenti superficiali abrasivi per poi subire l'attacco con la soluzione Nital 4%, che corrodendo selettivamente i bordi grano ha permesso la distinzione degli stessi. Si hanno nei punti che attraversano trasversalmente il provino le micrografie:

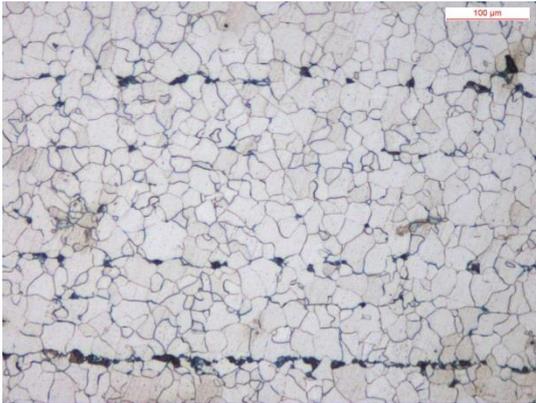
Punto 1 100x



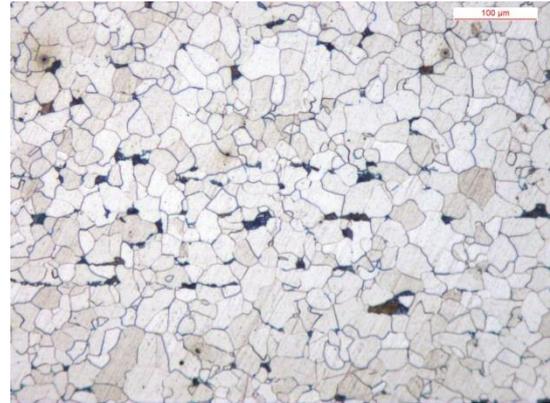
Punto 2 100x



Punto 3 100x



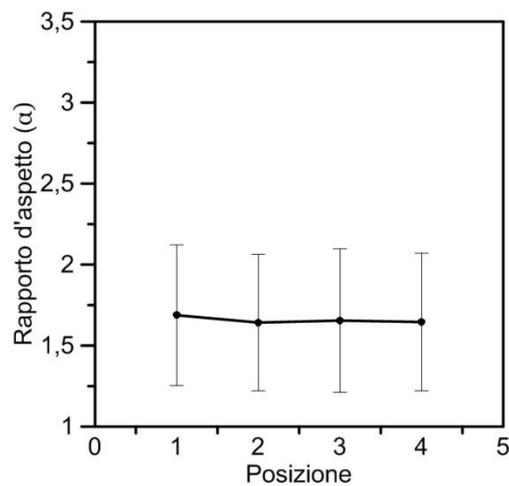
Punto 4 100x



Dai punti esposti, si sono poi estratti i valori delle variabili che caratterizzano i grani quali: diametro equivalente e rapporto d'aspetto. La compilazione della tabella riassuntiva prevede come detto la presenza di durezze e microdurezze, al suo completamento essa compare come:

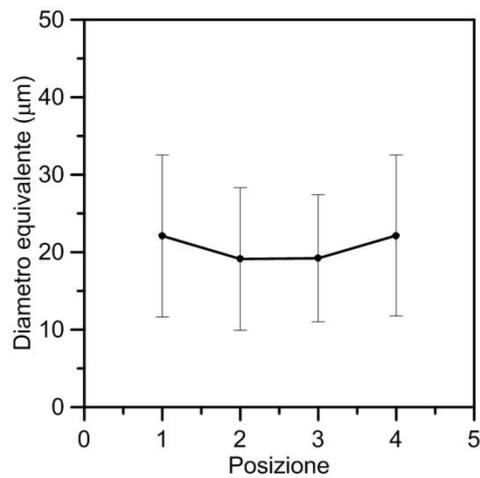
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezza		Durezza
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,688	0,434	22,102	10,451	208,6667	9,291573	119
2	1,642	0,422	19,128	9,192	127	6	106
3	1,654	0,443	19,215	8,197	128,6667	2,081666	103
4	1,646	0,425	22,157	10,376	151,3333	5,131601	116

-rapporto d'aspetto



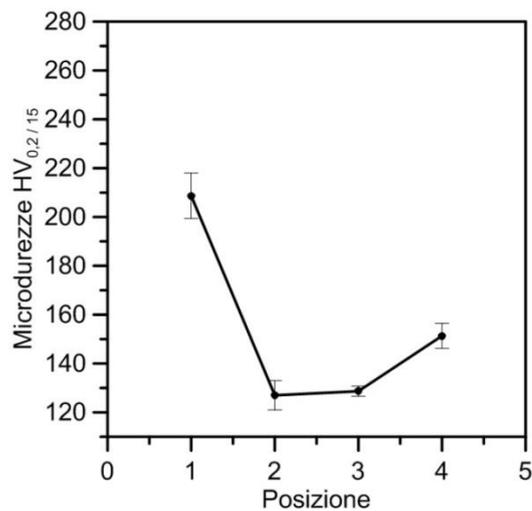
Il rapporto d'aspetto rimane pressoché costante per tutta la durata delle analisi, segno che la microstruttura del materiale non porta alcun segno della deformazione subita in trafilatura.

-diametro equivalente



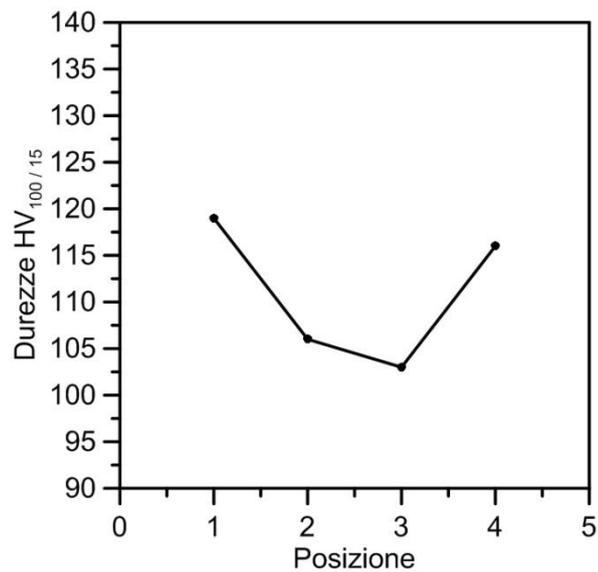
La variabile in oggetto risulta invece avere maggior sensibilità alla deformazione del materiale poiché assume comportamento speculare tra le due metà del percorso, mantenendosi per valori maggiori sui bordi.

-microdurezza



Anche le microdurezze definiscono uno stato maggiormente incrudito ai bordi, lo si deduce dal fatto che essa assume valori maggiori. Ancora una volta la microdurezza propone come valore sensibile per l'analizzare su quali punti è avvenuta maggior deformazione.

-durezza

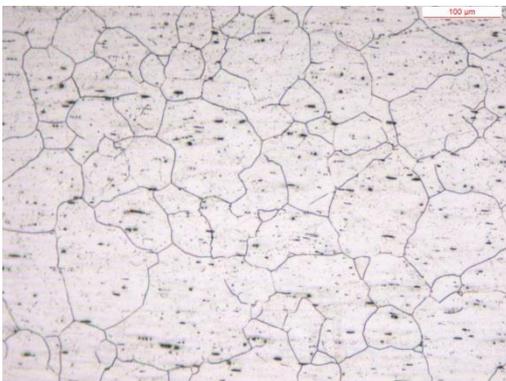


Anche l'andamento della durezza riflette le conclusioni ottenute dal profilo di microdurezza, determinando un leggero aumento del valore in corrispondenza dei bordi. Come è accaduto per gli altri campioni si scrivono: il valore medio di durezza, 111 HV_{100/15} e una deviazione standard di 7,7 HV_{100/15}.

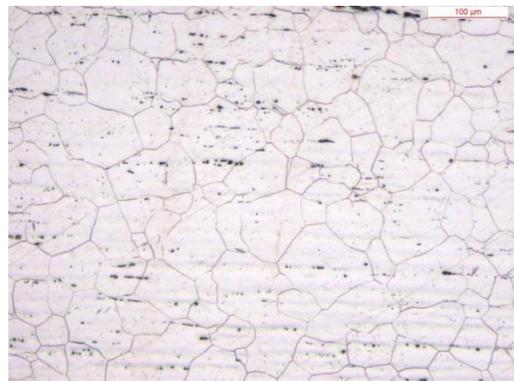
Campione "AISI 304L ND long"

Il provino viene sottoposto alla procedura di inglobatura, levigatura tramite carte abrasive e poi lucidato a specchio in modo da permettere un attacco elettrolitico efficace. Come spiegato in precedenza l'attacco elettrolitico corrode i bordi grano mettendoli in risalto. Le micrografie che seguono sono state raccolte nei punti sopra individuati e tramite osservazione al microscopio ottico la superficie compare come:

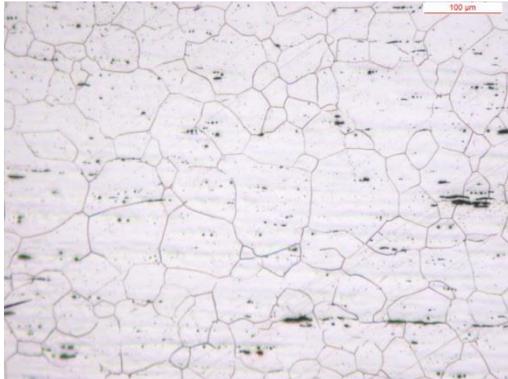
Punto 1 100x



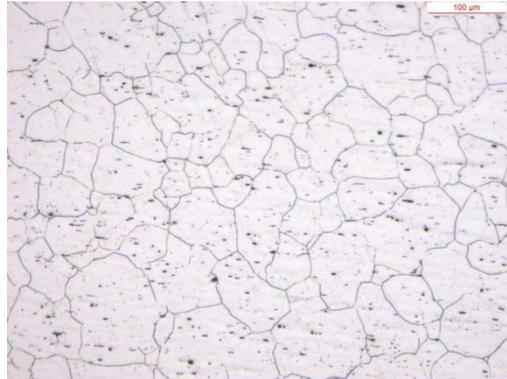
Punto 2 100x



Punto 3 100x



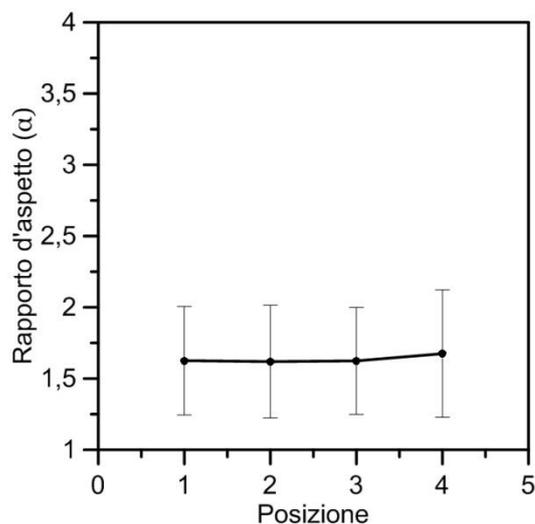
Punto 4 100x



L'analisi condotte poi sulle immagini appena esposte, unite ai valori derivanti dalle durezze a 100kg eseguite sugli stessi punti e a quelle scelte da un percorso di microdurezza si compila la sottostante tabella.

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente (μm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,626	0,380	40,866	14,415	276,5	4,950	255,0
2	1,619	0,396	42,047	18,057	227,5	6,364	233,3
3	1,624	0,375	42,826	18,370	228,0	0,000	245,0
4	1,675	0,447	41,246	17,916	285,7	13,796	269,5

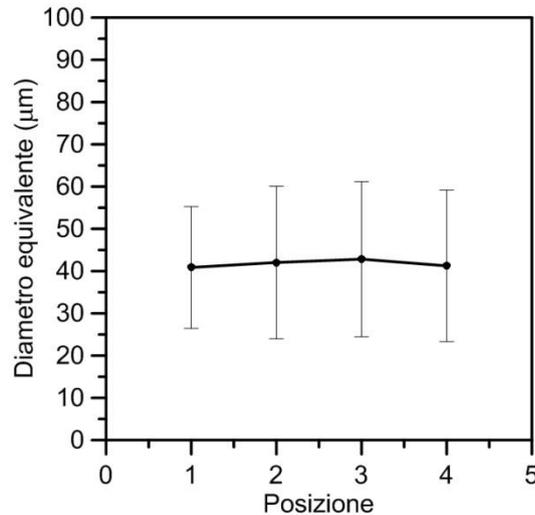
-rapporto d'aspetto



Il rapporto d'aspetto del 304L non subisce pressoché variazioni, nemmeno in prossimità del bordo, ma si mantiene su valori di poco superiori a 1,6. Tale valore può

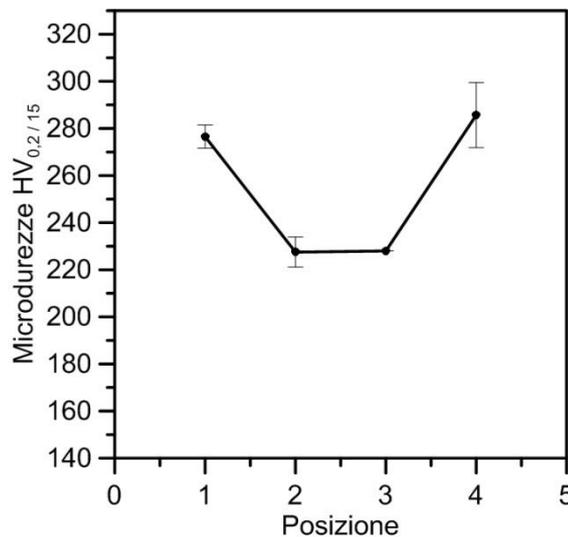
essere dunque assunto come indicativo della non deformazione del materiale in esame.

-diametro equivalente



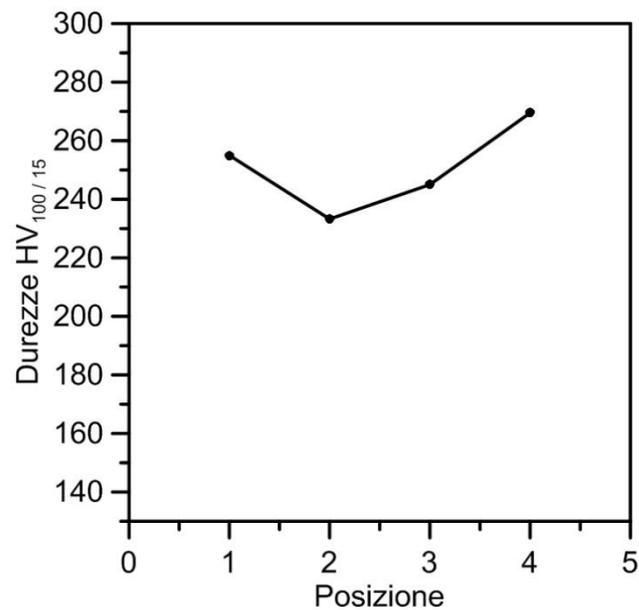
La tendenza del diametro equivalente prevede una tendenza, leggera, ad aumentare in corrispondenza dei punti centrali, giustificabile dal fatto che nei bordi la variabile possa essere influenzata dal trattamento di trafilatura subito.

-microdurezza



Le microdurezze che come già detto sono state eseguite con un carico di 200g, e sono scelte tra le misure ottenute da un percorso che passa da superficie trafilata all'altra. La variabile denota una spiccata sensibilità alle deformazioni, e corrispettivi incrudimenti, subiti in trafilatura.

-durezza



Seppur in maniera, leggermente diversa, anche le prove di durezza definiscono un aumento del loro valore in corrispondenza dei bordi con un divario massimo tra le misure di 40 punti Vickers. Sicuramente più indicativo è avere un unico valore di riferimento per la durezza, ne consegue che la media aritmetica delle misure è di 250,7 HV_{100/15} e una deviazione standard di 15,37 HV_{100/15}.

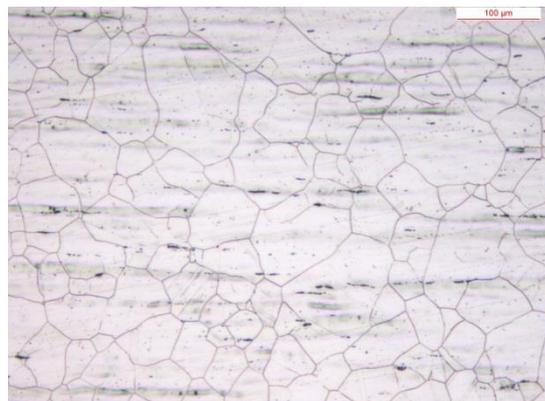
Campione “AISI 316L ND long”

Segue il secondo acciaio inossidabile austenitico il 316L, campione longitudinale che dopo aver subito una preparazione metallografica subisce un attacco elettrolitico. La corrosione selettiva mette quindi in risalto i grani presenti nei punti di analisi, come dimostrato dalla immagini che seguono, raccolte a 100x:

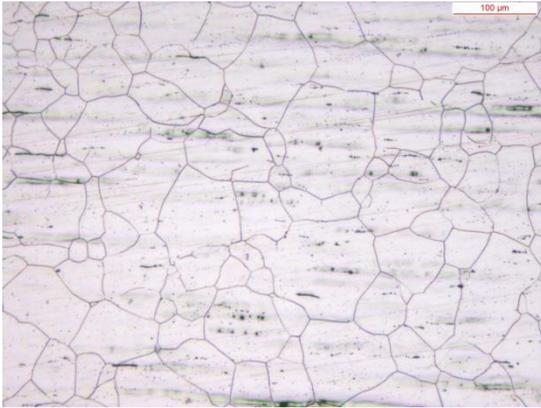
Punto 1 100x



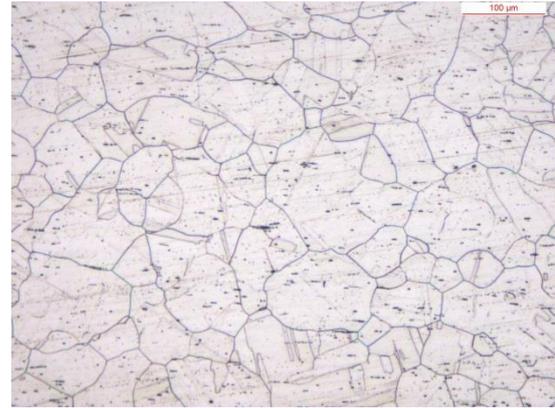
Punto 2 100x



Punto 3 100x



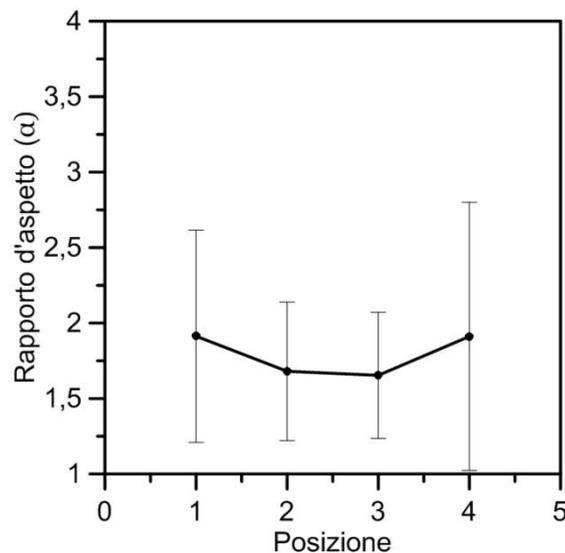
Punto 4 100x



Unendo i valori del diametro equivalente e del rapporto d'aspetto dati dal report di analisi forniti dall'applicazione LAS, quelli ottenuti dalle durezze si medesimi punti e quelli scelti dal percorso di durezza localizzata, la tabella riassuntiva compare come:

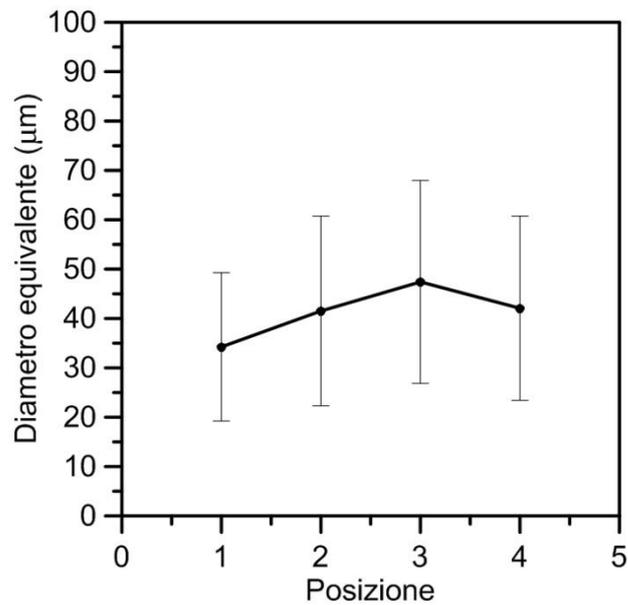
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente (μm)		Microdurezze $\text{HV}_{0,2/15}$		Durezza $\text{HV}_{100/15}$
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,913	0,703	34,253	15,000	279,5	9,192	240
2	1,680	0,459	41,524	19,206	206,5	3,536	193
3	1,654	0,418	47,415	20,549	202,0	0,000	162
4	1,912	0,889	42,075	18,676	260,5	6,364	262

-rapporto d'aspetto



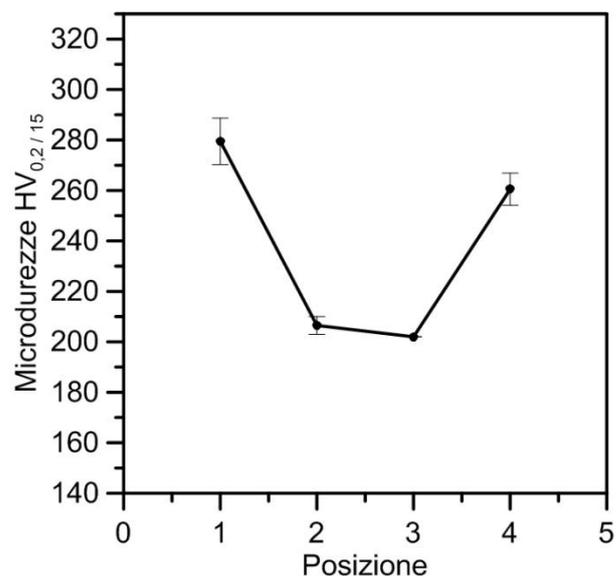
Rispetto ai valori assunti dal 304L, il rapporto d'aspetto del 316L risulta più sensibile alla deformazione subita per trafilatura, sensibilità che si manifesta anche in maniera piuttosto accurata poiché raggiunge valori assoluti molto simili per punti omologhi.

-diametro equivalente



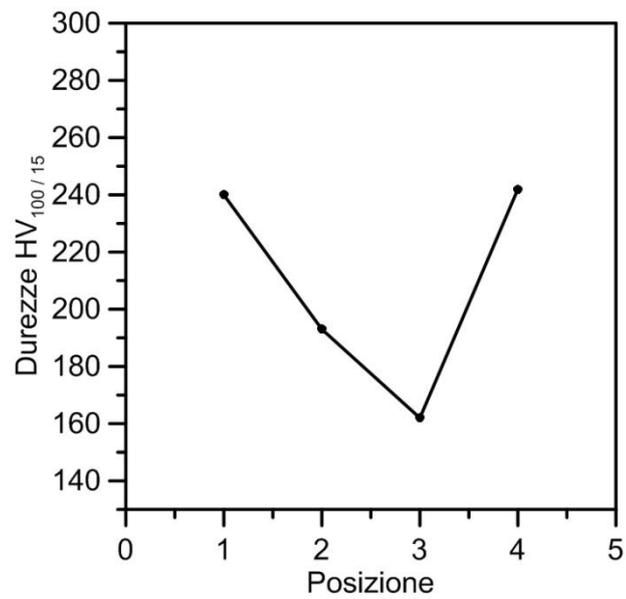
L'andamento del diametro equivalente risulta essere meno speculare, rispetto al campione precedente ma identifica ancora a cuore una zona con diametro maggiore che testimoniano la minor deformità del materiale in esame.

-microdurezza



Le microdurezze selezionate da quelle eseguite per la tracciatura di un profilo, che passa da una superficie trafilata all'altra; definiscono ancora durezze maggiori per i punti sui bordi. Questa constatazione ci permette di affermare che le microdurezze possano proporsi come variabile affidabile nella distinzione delle zone incrudite.

-durezza



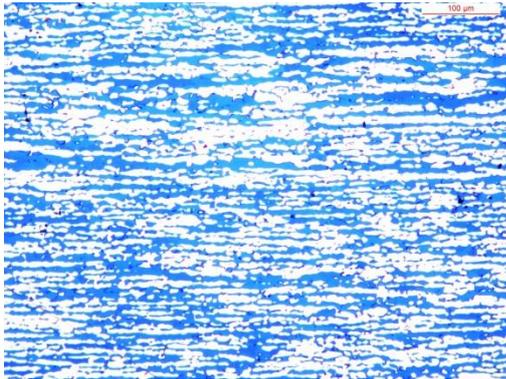
Le valutazioni che possono essere espresse con l'analisi del grafico sono le medesime già stilate per le durezza localizzate confermando nella macro dimensione quello già constatato in precedenza. In questo caso però è consigliabile avere un unico valore di riferimento per identificare lo stato del materiale prima dello stampaggio, il valore medio dello stesso risulta pari a 209 HV_{100/15} e una deviazione standard di 38,8 HV₁₀₀

/15.

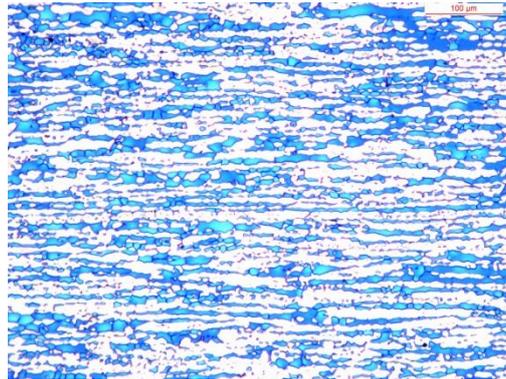
Campione “SAF 2205 ND long”

Una volta preparato all'analisi metallografica il provino presenta una superficie a specchio, ottenuta riducendo progressivamente il diametro medio del materiale abrasivo. Il successivo attacco con la soluzione Beraha, corrodendo la ferrite, permette la distinzione delle due fasi, le immagini ottenute dei punti di interesse sono state raccolte a 100x in modo da apprezzare la struttura del materiale:

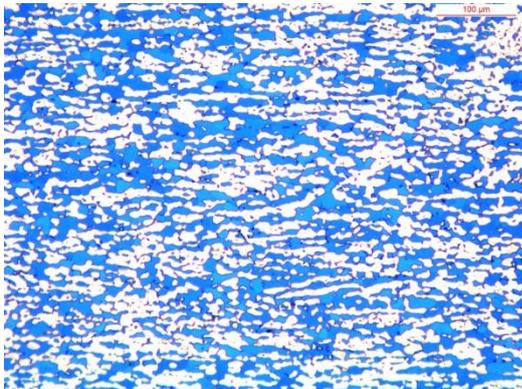
Punto 1 100x



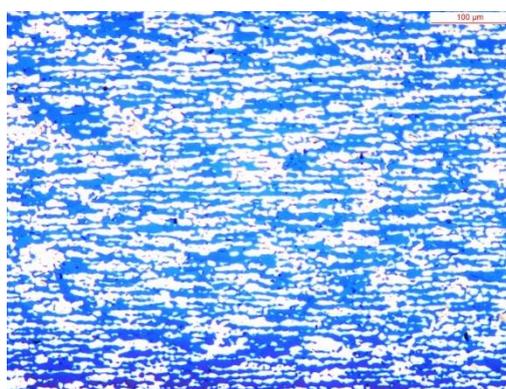
Punto 2 100x



Punto 3 100x



Punto 4 100x



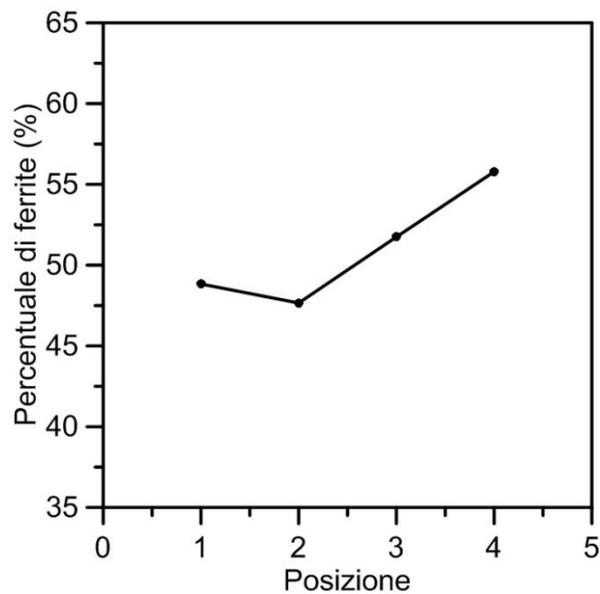
Da queste immagini vengono calcolati i valori del diametro equivalente e del rapporto d'aspetto. Le variabili caratterizzanti sono poi completate della durezza nei medesimi punti e dalle microdurezze scelte tra quelle del profilo trasversale.

Si preannuncia che nonostante siano presentate in tabella si è preferito omettere la deviazione standard nei grafici riguardanti diametro equivalente e rapporto d'aspetto in quanto un adattamento della scala delle ordinate per una corretta lettura della stessa avrebbe compromesso quella dell'andamento della variabile

Facendo confluire in una sola tabella i valori dei parametri caratterizzanti si ottiene quanto segue:

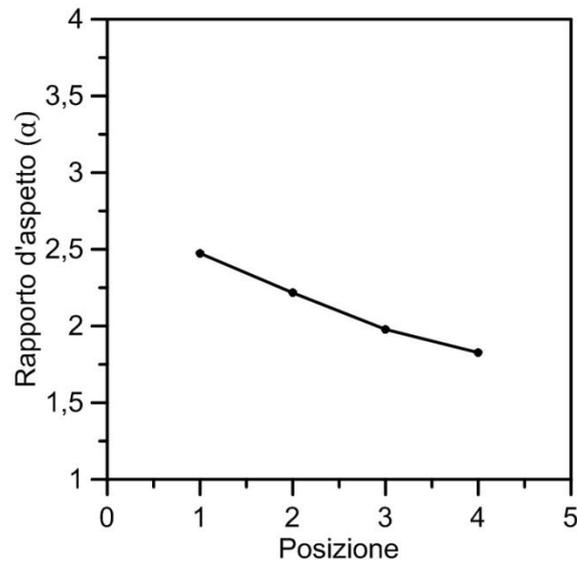
Posizione	Percentuale di ferrite(%)	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze		Durezza
	Valore	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	48,834	2,474	1,817	8,823	27,122	305,5	4,950	298
2	47,657	2,217	1,338	8,403	22,675	275,5	0,707	283
3	51,750	1,978	0,929	8,770	27,297	250	1,414	276
4	55,785	1,827	1,273	8,284	36,523	298,3	26,274	302

-percentuale di ferrite



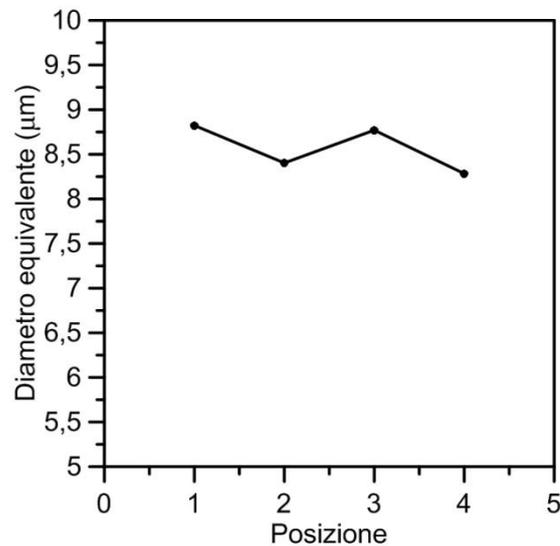
La percentuale di ferrite non risulta descrivere in questa determinata occasione, particolari tendenze in funzione dello stato deformativo. Si può considerare, per lo stato attuale dell'analisi che essa sia poco sensibile allo stato di deformazione della struttura; o almeno non sono stati raggiunti livelli di deformazione tali da avere un'influenza specifica sulla variabile in analisi.

-rapporto d'aspetto



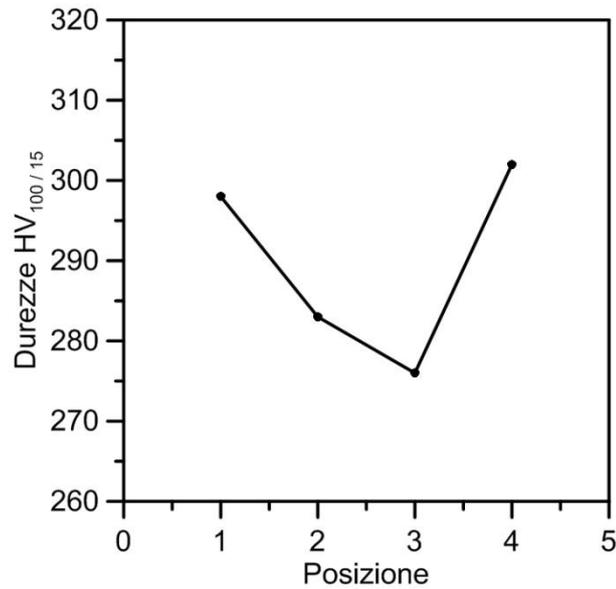
Il grafico ottenuto dalla mappatura dei valori del rapporto d'aspetto non rispecchia quelli inventati per gli omologhi punti negli altri acciai inossidabili, anche i valori considerati hanno variabilità molto ridotta.

-diametro equivalente



Si denota un comportamento costante della variabile in tutte le posizioni di interesse, indistintamente se a bordo o a cuore, la elevata variabilità contribuisce sicuramente ad appianare le eventuali differenze.

-durezza



La tendenza tracciata dai valori di durezza denota a conferma che la deformazione della lavorazione ha lasciato traccia nello stato del materiale. Risulta quindi molto più utile avere un singolo valore della durezza, per avere il quale si esegue la media dei punti che vale 290 HV_{100/15} a cui corrisponde una deviazione standard di 12,28 HV_{100/15}.

7.3.Campioni realizzati con più stazioni di stampaggio

I tappi multistadio sono i tappi generati da una sequenza di più stampate in modo da permettere uno stampaggio preciso. I tappi di cui si parla in questo paragrafo sono quelli realizzati utilizzando la pressa National, già introdotta in precedenza.

Si ricorda inoltre che i parametri di esecuzione della lavorazione non possono essere modificati e che dunque anche i campioni sono stati ottenuti per una velocità di processo di 63 colpi al minuto.

Tutti i provini sono univocamente rappresentati da un nominativo composto da: nome del materiale, numero dello stadio e l'abbreviativo NAT in riferimento alla National, appunto. Per ognuno dei dodici campioni analizzati saranno presentati i risultati delle variabili selezionate dal file di analisi del microscopio ottico, ma anche le durezze e le microdurezze eseguite.

7.3.1. Risultati dei campioni che hanno subito le prime due stazioni di stampaggio

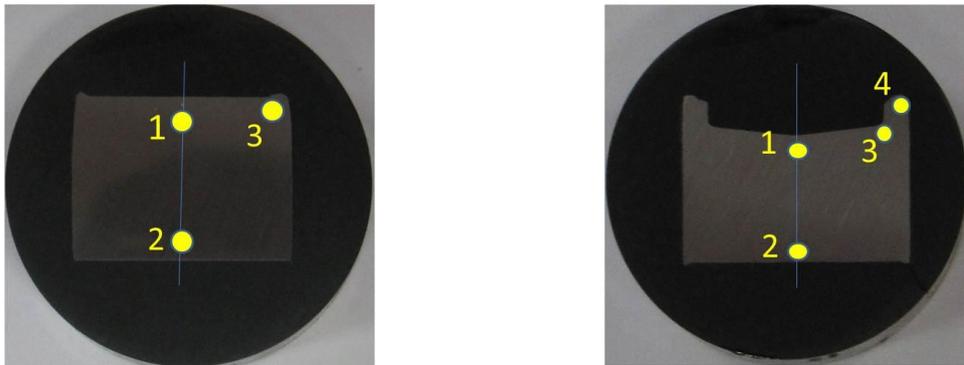
Si raggruppano in una singola parte i valori associati ai campioni risultanti dalla attuazione del primo e del secondo stadio:

-*primo stadio* si provvede alla realizzazione di un bordo, con la compressione tramite un punzone di diametro minore rispetto al provino. La generazione del bordo permette una miglior centratura del provino nella successiva matrice. Visto la esigua deformazione subita dal provino, si è optato per la selezione di soli tre di indagine.

-*secondo stadio* la cui procedura è simile alla precedente, ovvero un punzone dal diametro inferiore a quello del provino lo deforma creando un bordo circolare.

In questo caso però la deformazione risulta della antecedente, in quanto la profondità raggiunta è di molto superiore. La pastiglia una volta superato tale stadio deformativo si identifica come bicchiere.

Per compiere completamente la copertura del provino sono stati utilizzati quattro punti, come in figura:



(b)

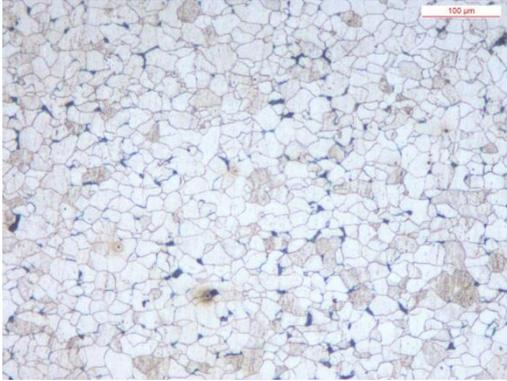
Fig. 7.2. Rappresentazione dei punti sottoposti ad analisi per i campioni che hanno subito un solo stadio di stampaggio (a) e quelli che hanno subito il secondo stadio di stampaggio (b)

Si avvisa, inoltre che il grafici relativi all'andamento delle variabile del semi lavorato a primo e secondo stadio sono presenti nell'appendice C in fondo al testo.

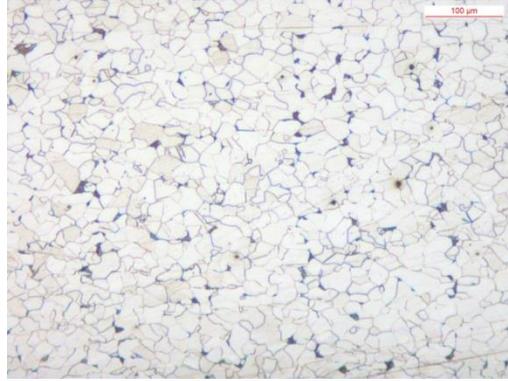
Campione “SAE 1005 1ST Nat”

Considerando i tre punti di analisi sono state ottenute le immagini che seguono:

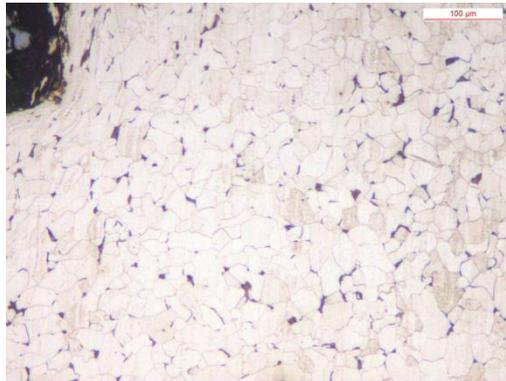
Punto 1 100x



Punto 2 100x



Punto 3 100x



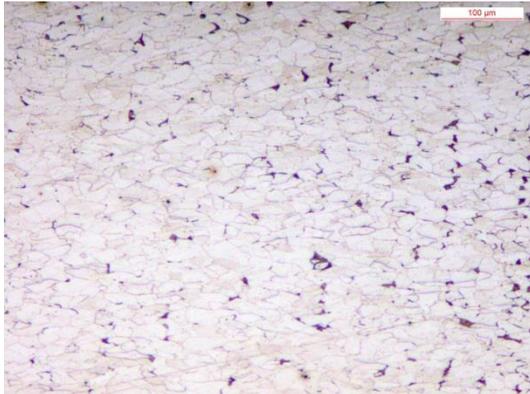
La propria tabella di dati riassuntivi compare come:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,626	0,346	17,731	6,354	174,6667	3,21455	129,3333
2	1,717	0,427	15,754	6,072	182	7,211103	131,3333
3	1,714	0,451	21,745	8,924	191		130

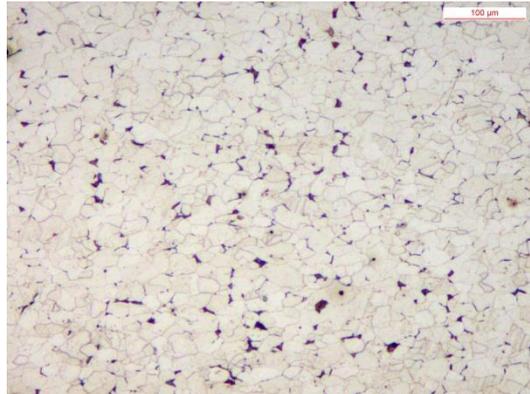
Campione “SAE 1005 2ST Nat”

Ponendo come punti di osservazione i medesimi considerati per le altre tipologie di provini stampati per i medesimi stadi; è possibile, tramite un attacco, elettrolitico ottenere le immagini della microstruttura ivi presente. Le micrografie che seguono sono riportate a 100x:

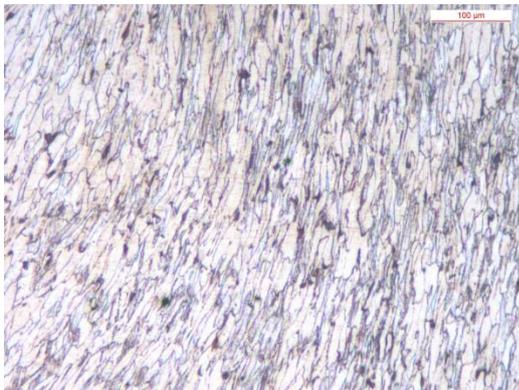
Punto 1 100x



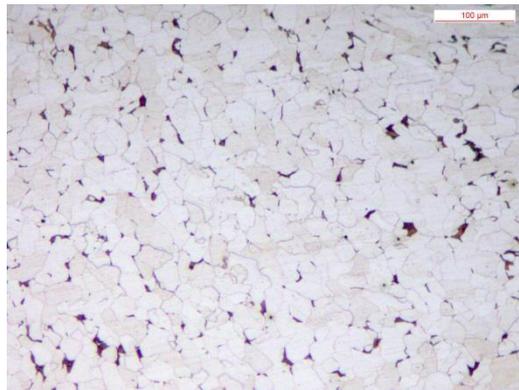
Punto 2 100x



Punto 3 100x



Punto 4 100x



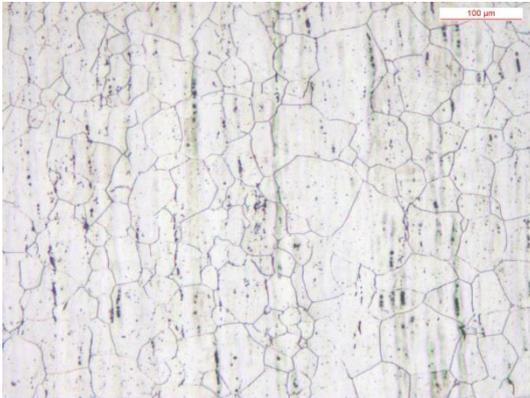
Dai valori da esso estraibili dalle immagini sovraesposte, sono ottenibili i valori del rapporto d'aspetto e del diametro equivalente. Vanno ad ultimare la tabella riassuntiva i valori della macrodurezza e della microdurezza nei punti di analisi:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,089	0,575	20,434	7,482	203	4,358899	168,6667
2	1,693	0,404	19,868	8,176	193,6667	7,234178	157,6667
3	3,078	1,187	18,657	6,622	215	2,645751	175
4	1,688	0,396	22,798	9,209	174,3333	1,527525	140

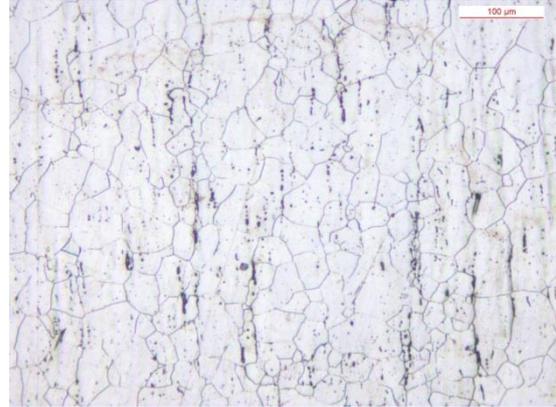
Campione “AISI 304L 1ST Nat”

Dall’analisi dei punti appena indicati, previo attacco elettrolitico, si è potuto realizzare sugli stessi punti le immagini che seguono:

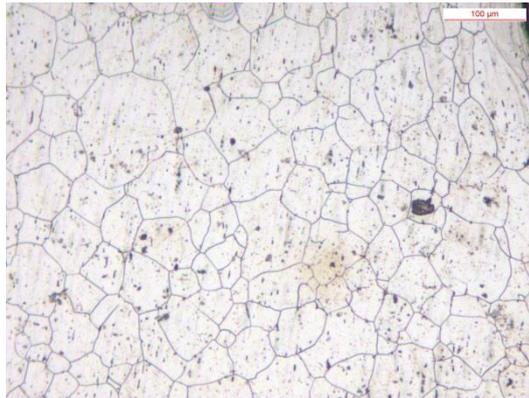
Punto 1 100x



Punto 2 100x



Punto 3 100x



La consolidata procedura prevede la presenza di una tabella riassuntiva presentante i valori di: diametro equivalente, rapporto d’aspetto, microdurezze e durezza.

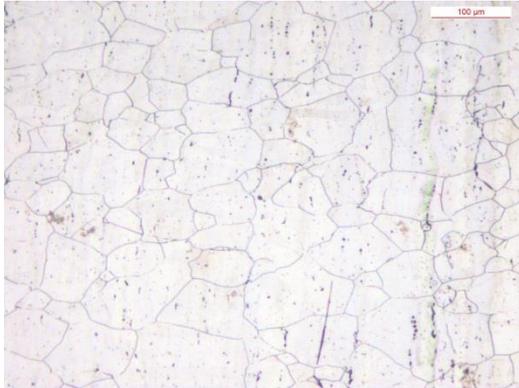
Una volta compilata la tabella appare in questo modo:

Posizione	Rapporto d’aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,608	0,481	37,998	17,198	300,500	18,174	209
2	1,619	0,390	33,377	14,191	286,333	4,933	215,3333
3	1,580	0,384	43,990	18,308	315,500	11,475	290

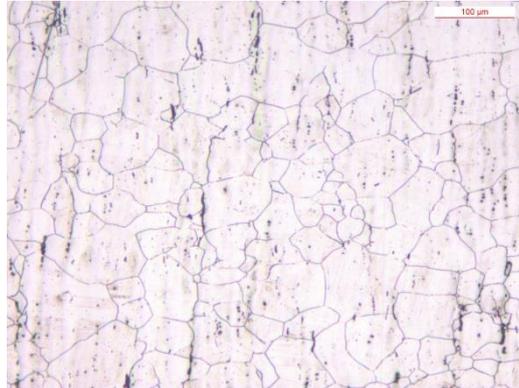
Campione “AISI 304L 2ST Nat”

Per comprendere lo stato microstrutturale del materiale nei punti di interesse, sono state realizzate delle micrografie nei punti di interesse, tali sono riportate di seguito:

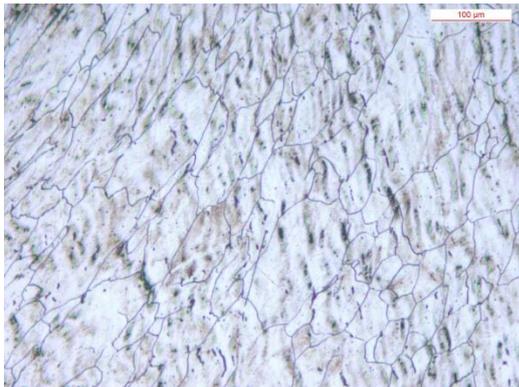
Punto 1 100x



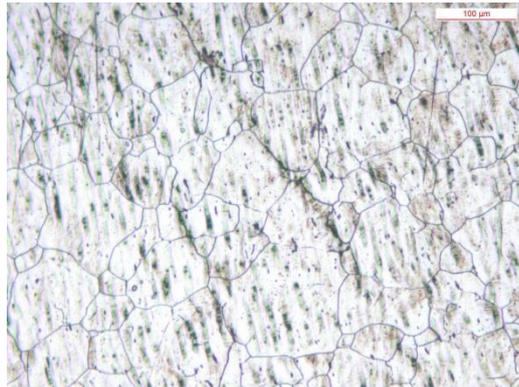
Punto 2 100x



Punto 3 100x



Punto 4 100x



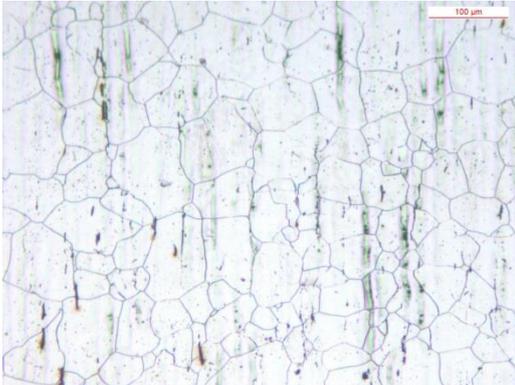
La tabella riassuntiva dei risultati ottenuti recita nel seguente modo i valori del diametro equivalente, rapporto d'aspetto, durezza e microdurezza:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,736	0,405	45,383	21,767	356,8	24,24252	294,6667
2	1,666	0,410	39,492	19,355	364,8	28,49035	280,6667
3	2,683	1,121	42,186	19,782	376,5	14,27118	330
4	1,727	0,557	47,165	22,000	304,8	14,07835	305

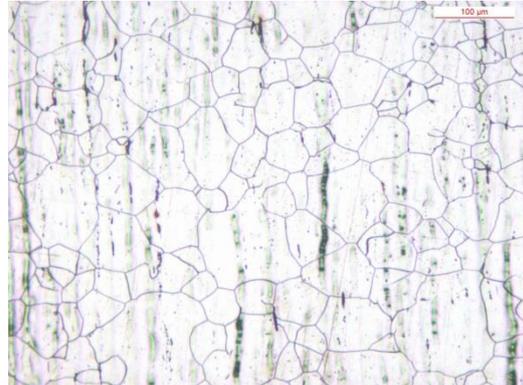
Campione “AISI 316L 1ST Nat”

La raccolta delle immagini rappresentanti la struttura nei punti considerati ha portato all’ottenimento delle successive micrografie a100x:

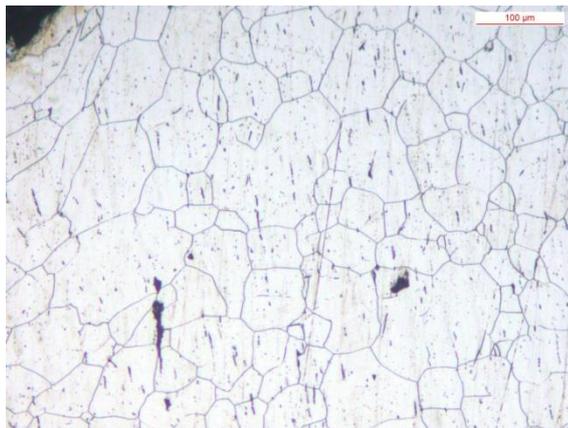
Punto 1 100x



Punto 2 100x



Punto 3 100x



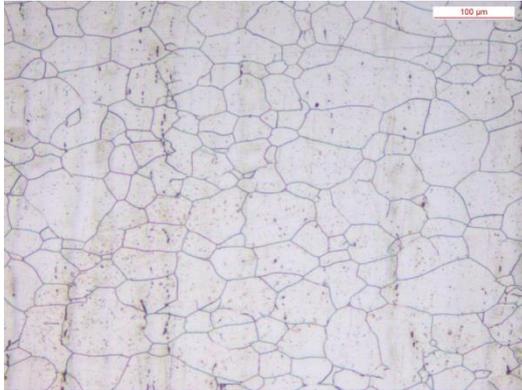
La tabella riassuntiva dei valori caratterizzanti è riportata di seguito:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,649	0,418	38,113	17,133	272,2	35,6609	204,3333
2	1,594	0,340	40,701	18,353	298	5	201,6667
3	1,775	0,748	44,745	18,015	336	3,605551	263

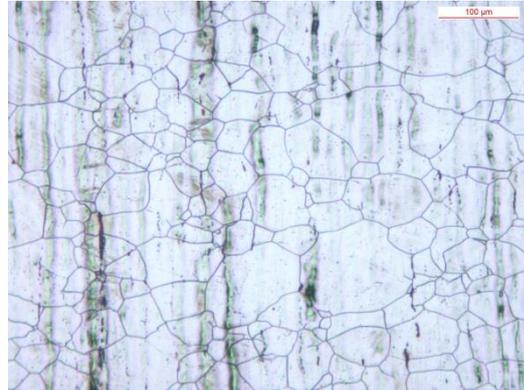
Campione “AISI 316L 2ST Nat”

E' giunto il turno di mostrare lo stato micrografico che il campione di 316L assume dopo il secondo stadio di stampaggio con la pressa National, segue:

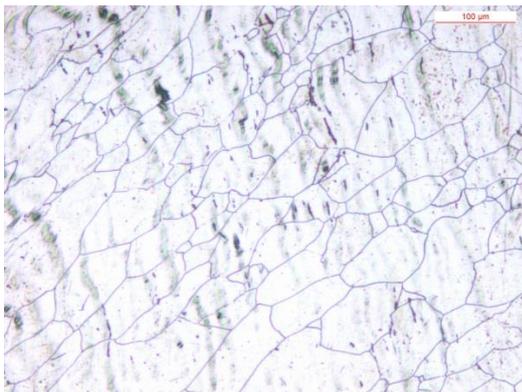
Punto 1 100x



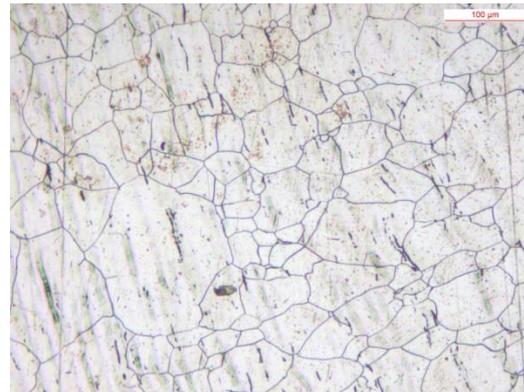
Punto 2 100x



Punto 3 100x



Punto 4 100x



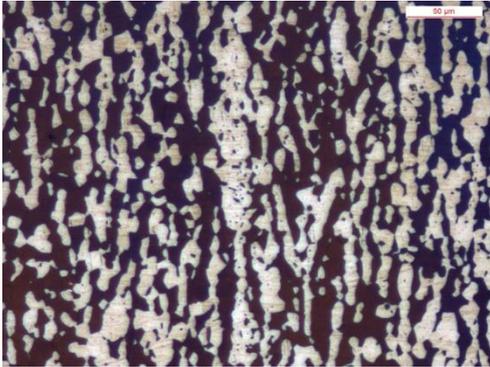
La tabella riassuntiva dei risultati dei valori caratterizzanti lo stato del materiale appare come:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	1,844	0,556	36,633	17,816	369,8	17,39828	280,6667
2	1,724	0,404	36,665	16,459	340,25	6,946222	266
3	1,704	0,492	39,547	16,916	360,25	12,84199	298
4	1,785	0,481	41,725	19,419	351,75	9,322911	276

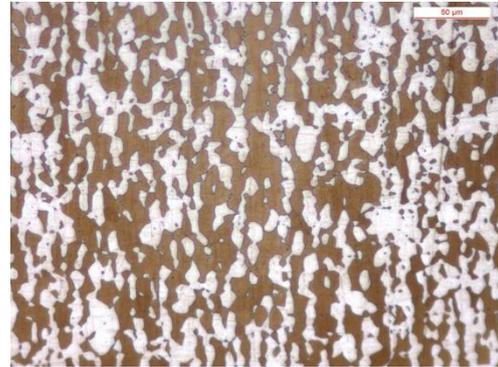
Campione “SAF 2205 1ST Nat”

Il campione di duplex che è stato stampato con il primo stadio deformativo ha nei punti determinati la microstruttura identificata per un ingrandimento di 200x:

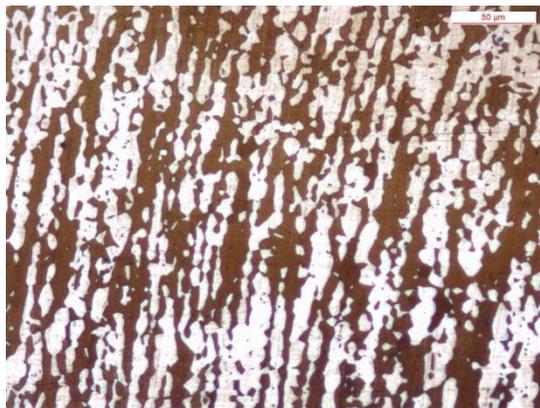
Punto 1 200x



Punto 2 200x



Punto 3 200x

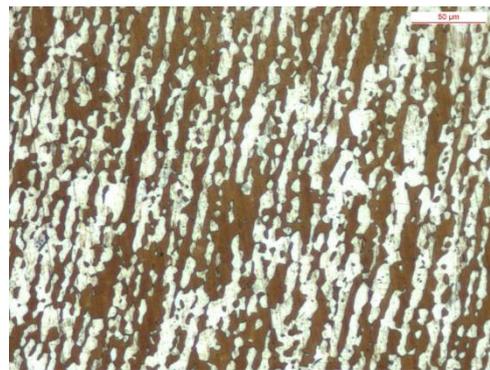
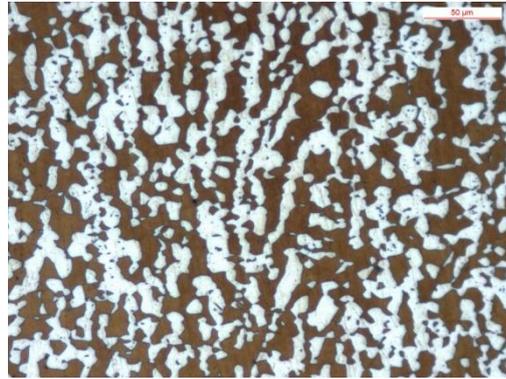
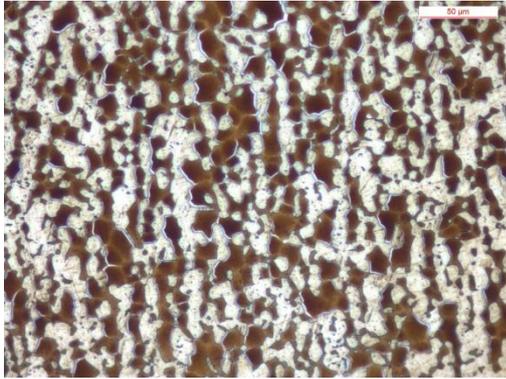


La tabella riassuntiva riguardante il campione in esame viene così compilata:

Posizione	Percentuale di ferrite(%)		Diametro equivalente(µm)		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	45,614	-	0,477	2,001	288
2	48,054	-	3,702	11,378	283,3333
3	45,619	-	0,740	3,646	330

Campione “SAF 2205 2ST Nat”

Il secondo stadio deformativo se realizzato con l'inossidabile bifasico assume nei valori considerati uno stato microstrutturale che può essere racchiuso nelle successive micrografie:



La tabella che raccoglie i valori caratterizzanti del provino sono raccolte nella tabella che segue:

Posizione	Percentuale di ferrite(%)		Diametro equivalente(μm)		Durezza $\text{HV}_{100/15}$
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Media
1	41,688	-	0,876	3,183	341
2	51,722	-	1,259	5,818	314,75
3	45,230	-	1,158	4,499	348
4	48,902	-	0,973	4,987	330

7.3.2. Risultati dei campioni che hanno subito tre stazioni stampaggio

E' stato deciso di dare rilevanza ai risultati ottenuti dal terzo stadio, in quanto, assieme a quelli dei tappi stampati in una singola stazione, rappresentano il nocciolo del capitolo. I dati risultanti da queste due prove forniranno base di studio e di confronto nel successivo capitolo.

Nella terza stazione di stampaggio della pressa National il bicchiere viene deformato in modo che si pervenga all'ottenimento del tappo vero e proprio. L'inevitabile mobilitazione del materiale dovrà essere interpretata tramite il valore assunto dalle variabili stabilite in precedenza.

Durante la rilevazione micrografica ha suscitato interesse la presenza di una fascia di materiale incrudito posizionata all'imbocco del gambo. La rilevazione è avvenuta durante l'analisi degli acciai inossidabili austenitici ma vista la criticità della zona in esame si è deciso di espandere lo studio anche ai rimanenti campioni. Per studiarla compiutamente sono stati dunque considerati dei profili di microdurezza che permettano di seguire l'evolversi dell'incrudimento locale del materiale, man mano che ci sposta dal lato destro del gambo.



Fig.7.3 Identificazione della fascia di materiale incrudito all'imbocco del gambo.

Campione “SAE 1005 3ST Nat”

Il materiale attualmente utilizzato per creare i prodotti aziendali è stato soggetto ad un attacco chimico con il Nital 4% che dunque compare come:

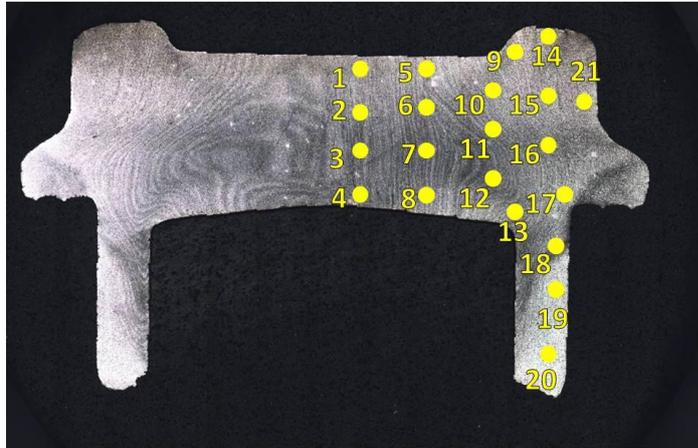
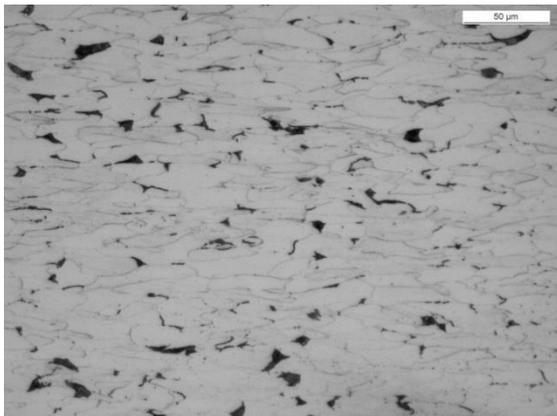


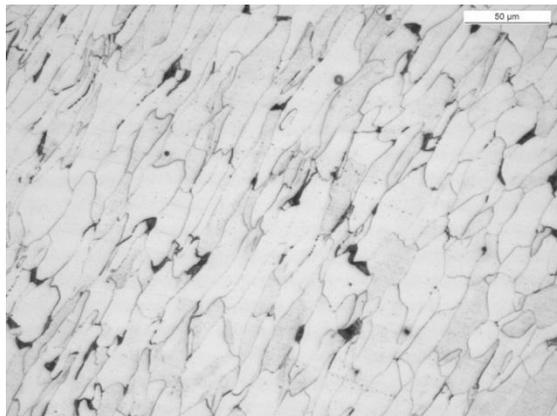
Fig.7.4 Immagine del campione “SAE 1005 3ST Nat” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

Vengono estratte alcune micrografie considerate di interesse per ingrandimenti di 200x:

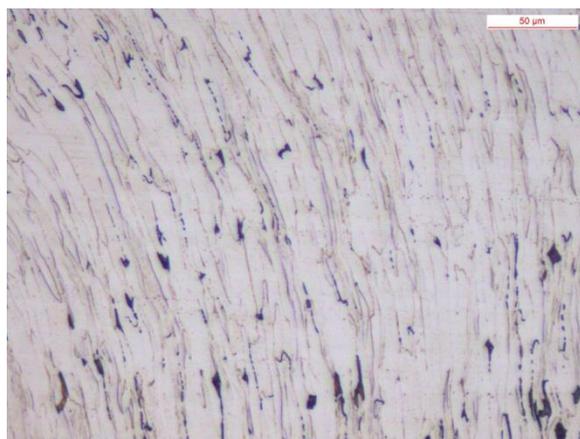
Punto 3 200x



Punto 9 200x



Punto 13 200x



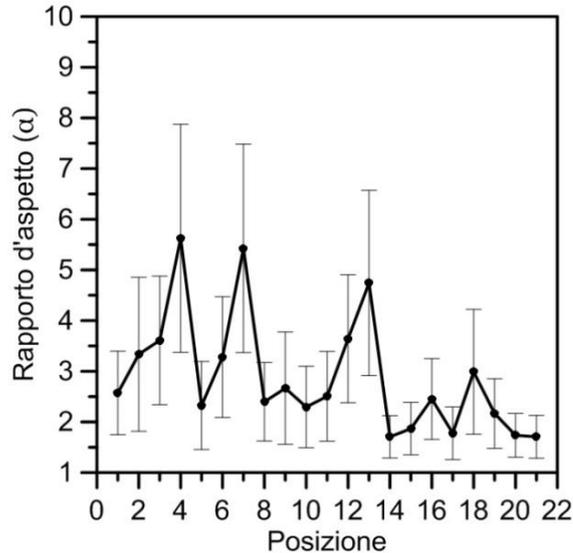
Le rimanenti micrografie di ogni punto sono presenti nell'appendice D in fondo allo scritto.

Proseguendo con la procedura ormai consolidata, si procede alla compilazione delle quattro colonne delle variabili caratterizzanti del campione: rapporto d'aspetto, diametro equivalente, microdurezze e durezze.

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,572	0,823	16,164	5,693	201	4,582576	193
2	3,337	1,520	15,462	5,498	219,6667	4,725816	207
3	3,609	1,268	16,207	6,058	217,3333	0,57735	197
4	5,623	2,251	14,670	5,076	222,6667	4,932883	193
5	2,326	0,868	17,000	6,497	196,3333	3,05505	197
6	3,282	1,191	17,190	5,728	215,6667	10,06645	197
7	5,426	2,058	15,266	5,999	225,3333	4,725816	219
8	2,398	0,774	14,582	5,635	217,6667	2,309401	199
9	2,667	1,109	16,816	7,580	228,5	4,434712	193
10	2,296	0,804	16,840	6,957	196,3333	3,05505	197
11	2,507	0,885	15,409	6,742	218,3333	3,785939	203
12	3,643	1,263	18,303	5,637	222,6667	3,21455	203
13	4,742	1,828	17,994	6,377	236	8,888194	183
14	1,707	0,418	18,637	8,282	202	6,244998	195
15	1,870	0,517	20,681	8,729	183,3333	2,886751	181
16	2,455	0,798	17,879	6,989	191	10,81665	170
17	1,778	0,521	15,787	6,852	207,3333	1,527525	199
18	2,990	1,233	19,204	7,279	196,3333	3,511885	193
19	2,168	0,686	19,265	7,936	208,3333	12,50333	185
20	1,737	0,432	21,134	11,091	209,6667	6,658328	168
21	1,708	0,423	19,727	9,058			164

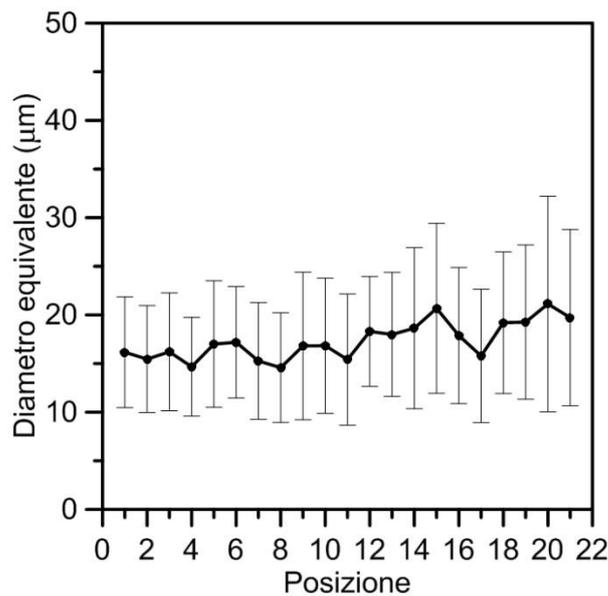
Si ricorda che le micrografie risultano mancanti del valore nel punto 21 in quanto lo stesso non rientra nei profili di durezza localizzata previsti, si analizzano Ora gli andamenti definiti per ogni variabile caratterizzante:

-rapporto d'aspetto



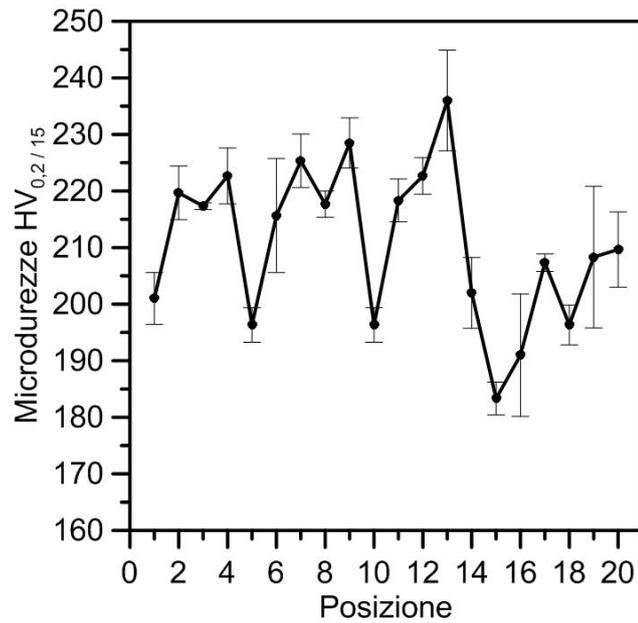
L'andamento del rapporto d'aspetto risulta al quanto regolare definendo importanti variazioni solamente nei punti in cui il materiale della zona è stato utilizzato come interfaccia di scorrimento. Il picco nel cambio di direzione denota un incrudimento del materiale, che per raggi di curva superiori però non appare; ennesima conferma delle doti di deformazione plastica del materiale.

-diametro equivalente



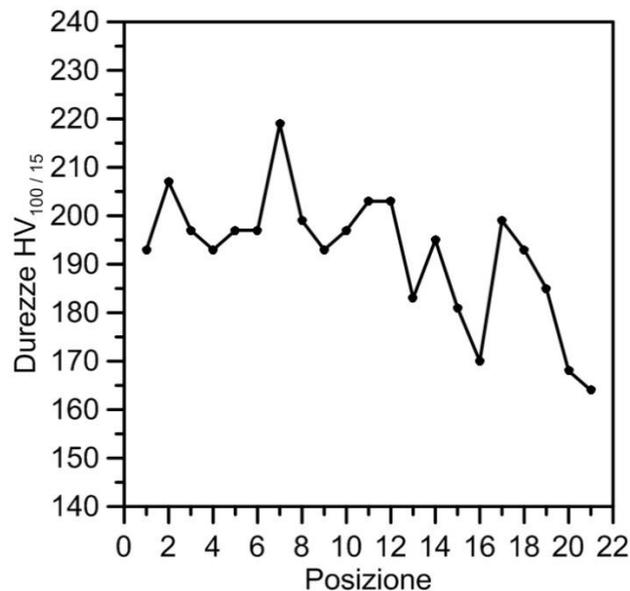
La variabile in questione, denota una sostanza dei valori assunti mantenuta per tutta l'indagine della sezione. Tale mantenimento sui stessi valori determina una deformazione localizzata limitata e di riflesso un incrudimento praticamente nullo del materiale.

-microdurezza



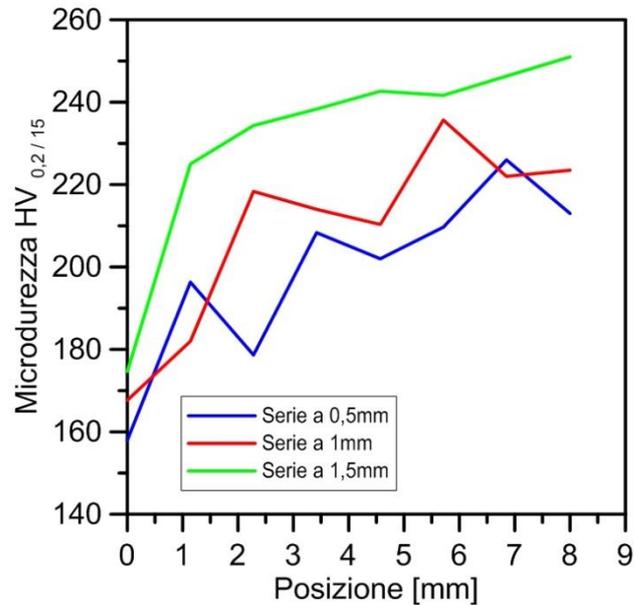
La microdurezza determina una certa regolarità a seconda dei profili verticali considerati, con una durezza crescente al diminuire del raggio di curvatura che il materiale deve subire. Tali variazioni però si mantengono in maggioranza su valori simili, senza denunciare variazioni di rilievo.

-durezza



Maggiormente marcato risulta la tendenza decadente dei valori assunti dalla durezza nei punti di interesse della sezione, mantenendosi comunque sempre su valori mediamente più bassi rispetto a quelli determinati dalle misure di durezza puntuale.

-analisi del gambo



La comparazione proposta si basa sui profili I, II e III precedentemente descritti, eseguendo le misure alla stessa distanza da un piano fissato ma ad una distanza progressivamente maggiore dal lato destro del gambo stesso: 0,5mm , 1mm, 2mm.

Si noti come, nonostante i tre profili abbiano valori iniziali molto simili, descrivono poi andamenti molto diversi in quanto il passaggio a valori maggiori di durezza avviene tanto più bruscamente quanto ci si distanzia dal bordo destro. Tale comportamento, in questo caso determina anche valori medi di durezza progressivamente maggiori, segno che l'incrudimento del materiale sfuma gradualmente allontanandosi dalla curva identificata con il punto 13.

Campione “AISI 304L 3ST Nat”

Sotto ponendo il tappo a realizzato in National a cui ciclo di lavorazione preparatorio, esso subisce effettivamente un'azione corrosiva selettiva da parte utilizzando un attacco elettrolitico. Il provino appare dunque come in fig.7.5, della quale si approfitta per segnalare i punti in cui è stata condotta l'analisi:

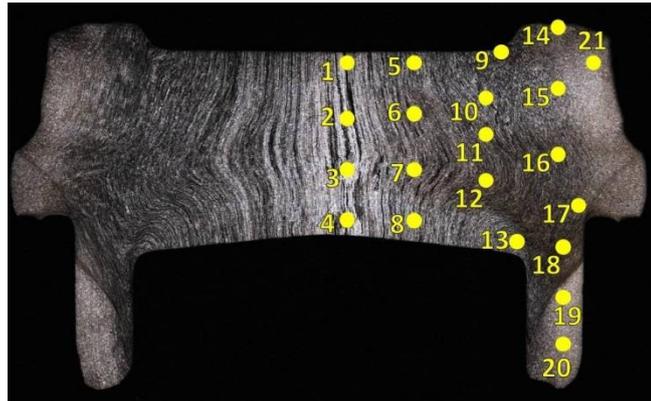
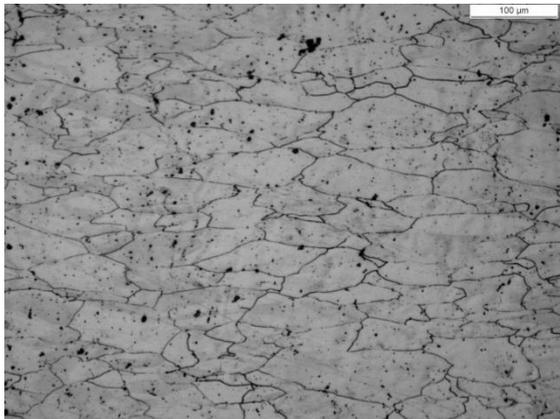


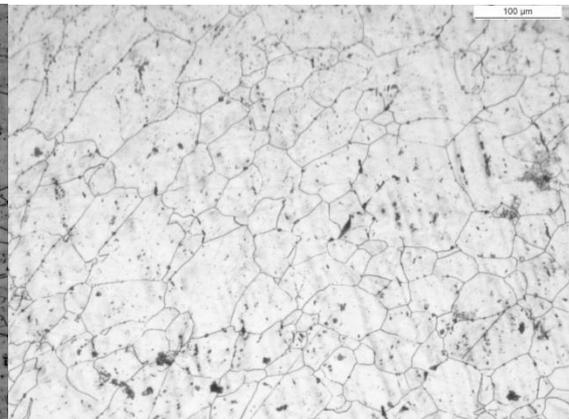
Fig.7.5. Immagine del campione “AISI 304L 3ST Nat” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

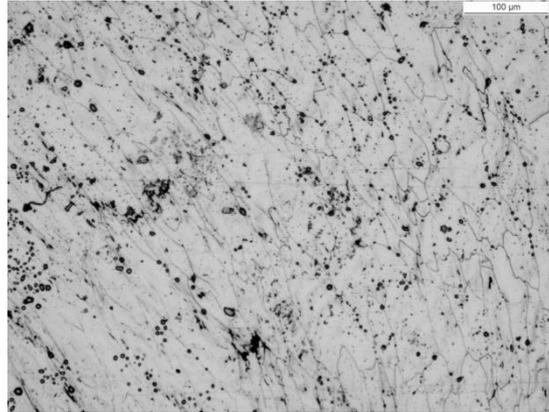
Si presentano ora le immagini raccolte con il software del microscopio elettronico LAS relative all'adattamento della microstruttura presente. Le misure sono state eseguite dopo aver eseguito un attacco elettrolitico tale da corrodere i bordi grano, facendo dunque risaltare il grano. Durante le analisi alcuni punti hanno riscosso un interesse maggiore in quanto più sollecitati o caratteristici di una specifica zona, inoltre si avvisa che per una miglior interpretazione si è optato per inserire micrografie a 100x, di seguito:

Punto 3 100x



Punto 9 100x



Punto 13 100x

La totalità delle micrografie posso essere consultate rivolgendosi all'appendice E Succede a questo una tabella riassuntiva nella quale confluiscono entrambe le tipologie di variabili caratterizzanti il materiale. Vi appartengono infatti i dati restituiti dal report dell'applicazione del LAS sulle variabili di Rapporto d'aspetto e diametro equivalente; ma anche i dati relativi dalle prove di durezza Vickers e durezza Vickers locale.

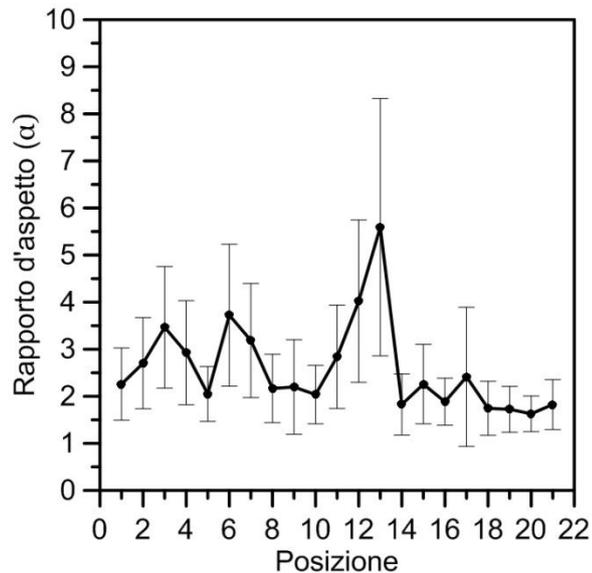
Una volta compilata la tabella riassuntiva, essa compare come:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,261	0,766	32,924	18,308	309,400	27,907	339
2	2,704	0,966	37,632	20,161	345,800	22,654	358
3	3,466	1,291	40,049	20,509	357,600	22,865	348
4	2,926	1,107	38,253	19,762	347,800	45,030	358
5	2,050	0,581	35,982	19,890	337,000	13,140	368
6	3,723	1,509	35,003	19,192	327,667	1,528	368
7	3,186	1,212	32,074	15,363	385,250	16,978	378
8	2,168	0,727	34,064	17,952	376,200	21,856	358
9	2,198	1,005	35,466	17,630	372,500	29,194	378
10	2,038	0,620	37,917	18,065	338,125	49,235	348
11	2,840	1,097	30,839	15,355	361,167	36,886	368
12	4,021	1,722	30,612	15,409	390,500	22,563	378
13	5,593	2,733	32,454	14,415	396,800	14,789	406
14	1,828	0,650	44,722	22,814	320,400	23,137	378
15	2,257	0,842	40,611	19,321	363,200	9,418	378
16	1,884	0,500	35,431	14,401	368,500	27,559	378
17	2,415	1,477	39,901	17,408	395,000	18,235	384
18	1,745	0,573	42,891	22,991	363,500	20,240	384
19	1,724	0,488	41,178	19,113	333,000	22,917	334
20	1,629	0,379	51,514	23,108	366,600	13,667	339
21	1,826	0,530	44,021	18,538			353

Si specifica come le microdurezze nelle rotte dei profili non sia compreso il punto 21, questa osservazione spiega la mancanza della corrispettiva misura.

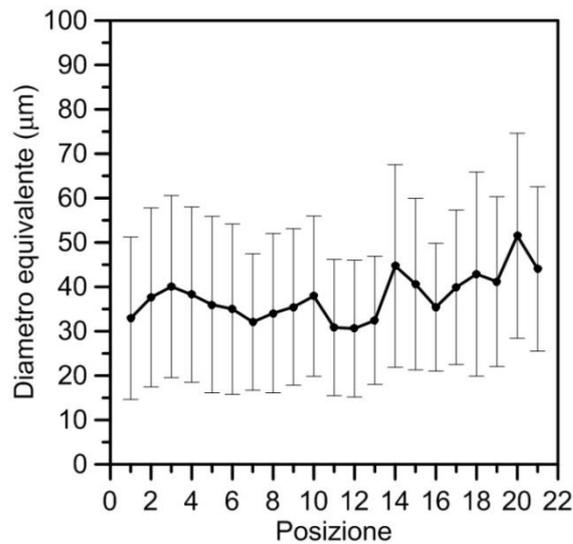
I punti il cui nominativo vede la presenza della lettera "A" sono stati introdotti a lavori in corso per comprendere fenomeni deformativi locali; si spiega così anche il fatto che questi non siano compresi tra i valori di posizione dei grafici che verranno poi presentati:

-Rapporto d'aspetto



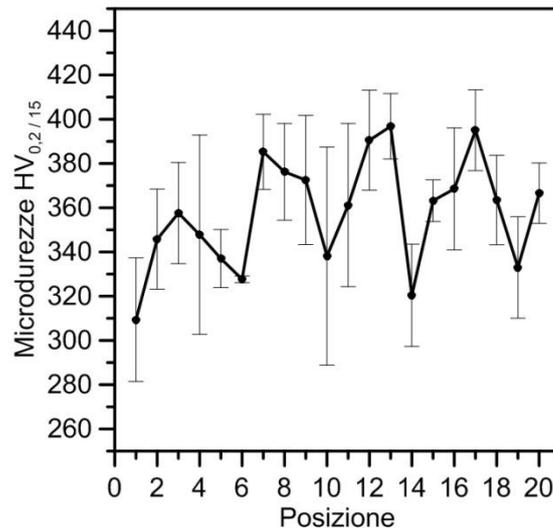
Si noti come, per le prime due serie di punti che percorrono in senso verticale la parte centrale del provino è possibile distinguere una conformazione del grano. Risulta invece, meno deformato del previsto il punto 9 segno che l'AISI 304L, almeno in questo caso, non si è incrudito come ci si aspettava. Fenomeno dell'incrudimento che diventa invece protagonista a causa della deformazione che il materiale subisce nelle posizioni 13 e 17, dove soprattutto nella seconda circoscrivere l'area di deformazione. Per quanto riguarda le rilevazioni lungo la parte il gambo destro della sezione è utile osservare che si mantiene costante, rimanendo sui valori assunti da materiale indeformato.

-diametro equivalente



Partendo dalle canoniche prime otto posizioni di analisi del provino non si distinguono significativi squilibri, assumendo dunque valori molto vicini tra loro. Considerando poi la progressione che succede il numero 14, caratterizzato da un elevato valore di diametro equivalente, si individua una graduale tendenza ad un aumento del diametro; osservazione che dimostra una minore deformazione subita in questa parte della sezione.

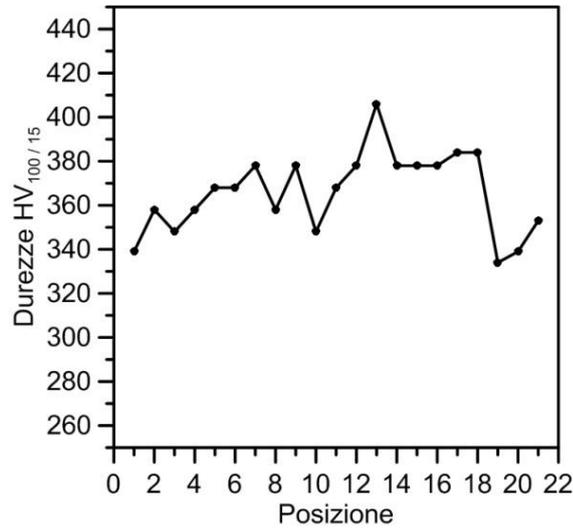
-microdurezza



Si identificano degli andamenti regolari nei primi due percorsi verticali in cui è stato diviso il provino. Dopo di che nel percorso che si estende tra le due curve abbiamo calo della microdurezza e un successivo recupero della stessa con il progressivo avvicinamento alla posizione della curva identificata con il numero 13.

Durezza che poi raggiunge valori medi maggiori nella parte successiva, per decadere ai valori iniziali per le posizioni disseminate sulla parte destra del gambo

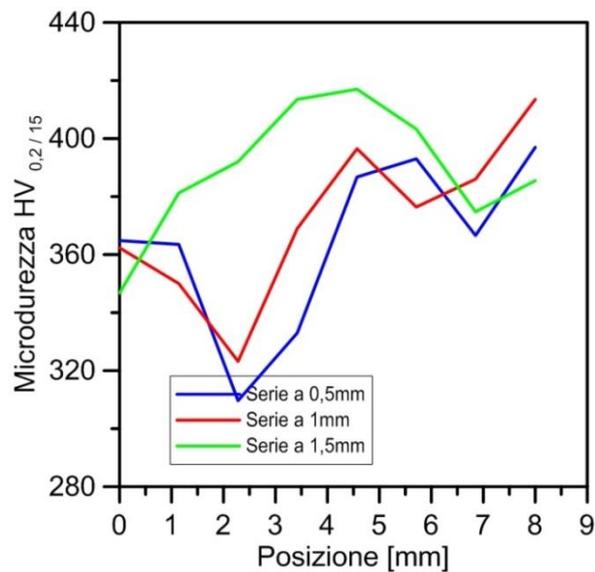
-durezza



La durezza evidenzia una tendenza all'aumento per tutti i percorsi che individuano la parte centrale della sezione. Aumento che viene interrotto nel centro della sezione di interesse e poi tornare a cresce stabilizzandosi, per tutta la parte centrale, su valori mediamente maggiori.

La misura cala in valore medio assoluto, nei punti che percorrono il gambo destro.

-analisi del gambo



I profili di microdurezza raccomandati sono pensati per descrivere come varia l'incrudimento del materiale all'imbocatura del gambo. Si osserva preliminarmente che i tre profili assumono inizialmente simili, sintomo che a 1mm dal punto più basso (posizione a cui è stato fissato il piano di riferimento) il materiale mantiene in certo livello di incrudimento. Monitorando dunque per posizioni omologhe la durezza si dimostra come a 0,5mm e a 1mm dal bordo destro il materiale raggiunge valori minimi di durezza per poi raggiungere valori molto simili in un secondo momento, anche ciò avviene in posizioni diverse identificando una progressiva discesa della fascia incrudita.

Il profilo a 2mm dal bordo destro assume in anticipo a valori di picco della altre serie. Il picco del profilo a 2mm si ha per valori maggiori degli altri e anche per punti precedenti, segno che non solo la fascia incrudita si abbassa percorrendo lo spessore del gambo, ma anche che progressivamente si allarga interessando altro materiale.

Campione “AISI 316L 3ST Nat”

Segue il tappo realizzato in AISI 316L a più stazioni di stampaggio, che subisce come il suo predecessore, una pulizia della superficie di interesse fino a renderla riflettente; condizioni nelle quali è protagonista di una corrosione selettiva da parte di un attacco elettrolitico

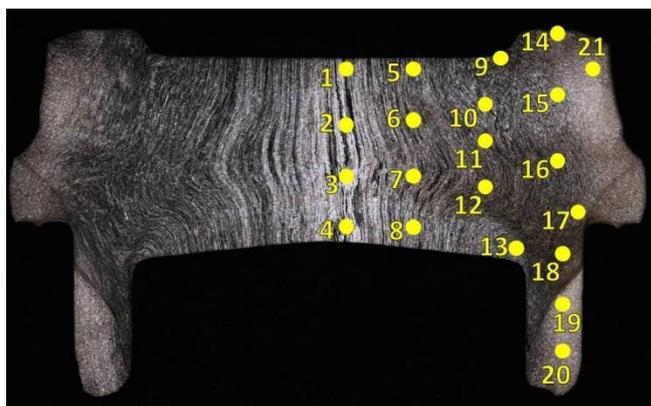
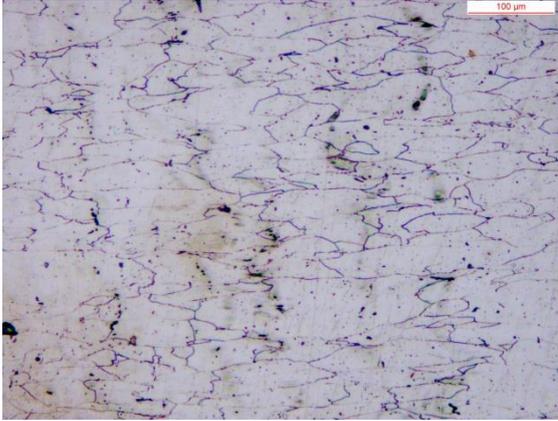


Fig. 7.6 Immagine del campione “AISI 316L 3ST Nat” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

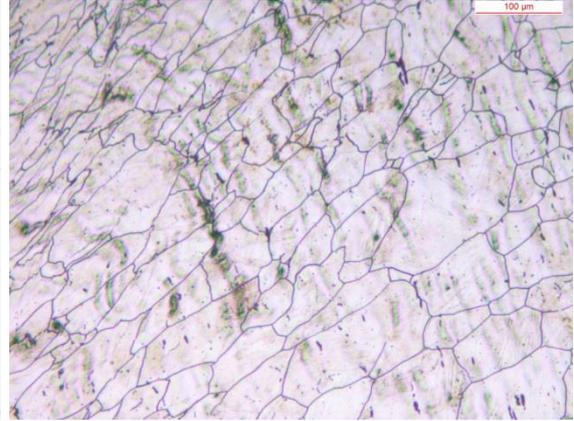
Il campione viene sottoposto ad attacco chimico con un attacco elettrolitico, come fu in precedenza per l'AISI 304, è possibile selezionare le immagini delle posizioni di interesse sulle quali è possibile avviare l'analisi del software LAS.

Seguono micrografie delle posizioni di interesse e che coprono un ampio campo deformazioni assorbite. Le immagini delle microstrutture sono state realizzate a due ingrandimenti di 100x permette l'analisi della struttura metallica.

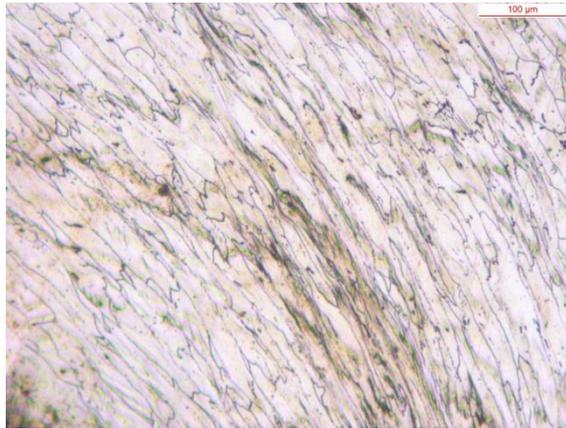
Punto 3 100x



Punto 9 100x



Punto 13 100x



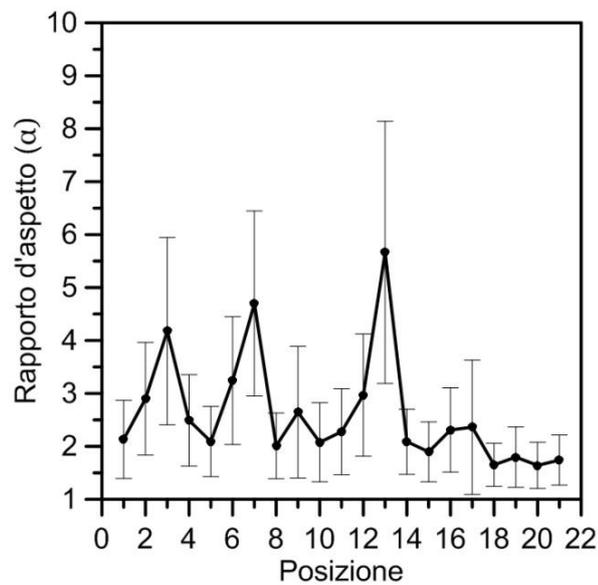
Per le immagini di ogni punto in esame fare riferimento alla appendice F.

I valori delle variabili già citate, caratterizzanti il campione, vengono raccolte in una tabella riassuntiva. L'analisi al microscopio ottico fornisce i report contenenti i valori di variabili quali rapporto d'aspetto e diametro equivalente. Si aggiungono a completamento, le durezze e le microdurezze scelte a rappresentazione delle varie posizioni. La tabella compare come:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro circolare e equivalente		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezze HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,134	0,738	35,597	20,732	331,125	25,89229	344
2	2,900	1,064	33,315	20,008	382,6667	4,041452	310
3	4,177	1,769	35,840	20,481	367,4	14,01071	358
4	2,492	0,863	37,016	17,521	361	34,39477	373
5	2,091	0,664	35,660	17,641	368,75	26,58544	330
6	3,242	1,206	36,578	18,062	385	15,52417	378
7	4,699	1,749	34,209	17,479	366,3333	21,16286	373
8	2,011	0,620	34,087	17,117	356,1429	23,58975	334
9	2,645	1,244	39,965	22,162	398,8333	24,63669	297
10	2,077	0,747	36,925	18,870	365,2	31,99583	330
11	2,278	0,812	36,729	19,446	363	24,94566	344
12	2,970	1,155	31,730	16,180	352,75	19,2765	373
13	5,666	2,475	27,946	14,138	360,75	16,19413	378
14	2,090	0,616	40,064	17,284	337,5	27,04934	373
15	1,897	0,567	39,478	17,852	339,125	18,78782	330
16	2,311	0,797	33,625	17,910	376,3333	3,511885	363
17	2,363	1,270	36,855	19,933	361,8571	18,27957	348
18	1,652	0,407	42,702	17,829	333,2857	19,11992	344
19	1,798	0,571	38,170	18,876	324,8333	17,93786	297
20	1,642	0,437	39,731	18,304	368,75	10,14479	317
21	1,742	0,472	45,886	20,225			330

Si osserva che le misure di microdurezza sono orfane della ventunesima posizione poiché non è compreso nei profili di durezza puntuale. Per quanto riguarda i punti succeduti della lettera A, sono quelli introdotti in un secondo momento per migliorare l'informazione in determinate zone del provino. Le posizioni appena descritte non sono rientranti nei grafici che succederanno:

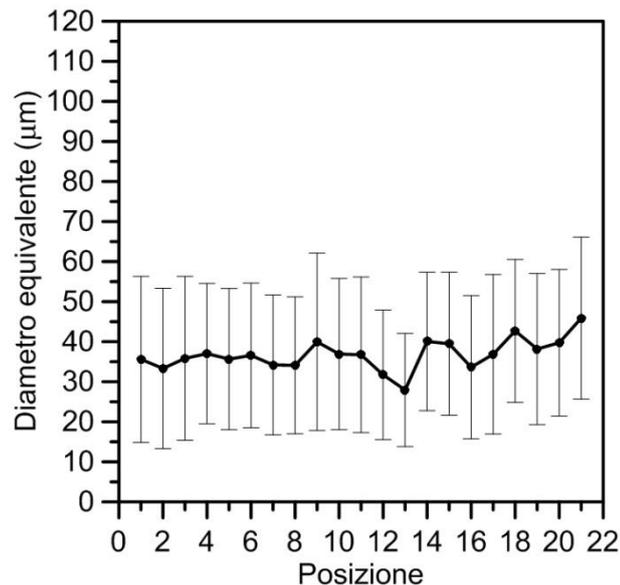
-rapporto d'aspetto



Si distingue, per la variabile in analisi, una buona regolarità di risposta per quanto riguarda la parte centrale della sezione. Nella rimanente parte di grafico si distinguono solamente i valori delle curve nei quali il rapporto d'aspetto assume valori tanto maggiori quanto minore è il raggio della curvatura imposta.

Si individua infine, nel gambo, una progressione che porta ad un calo della misura, che si avvicina a valori riscontrabili ad un non deformato

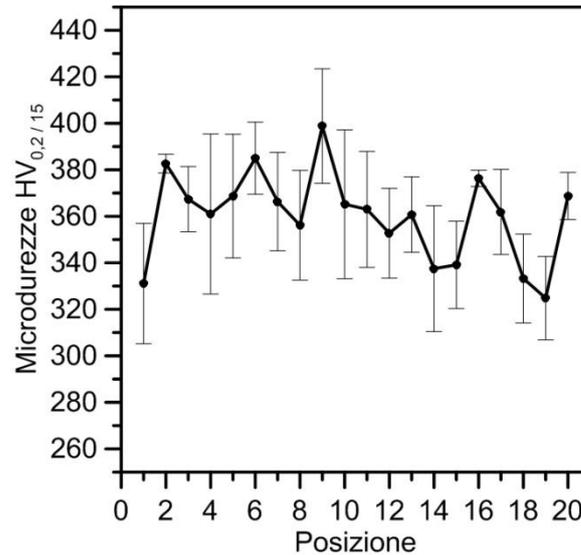
-diametro equivalente



I primi nove valori nella lista si aggirano sugli stessi valori, scemando poi dal punto 10 al punto 13. La diminuzione del diametro è segno di maggiore durezza e quindi di un livello di incrudimento maggiore che distingue il materiale progressivamente fino al

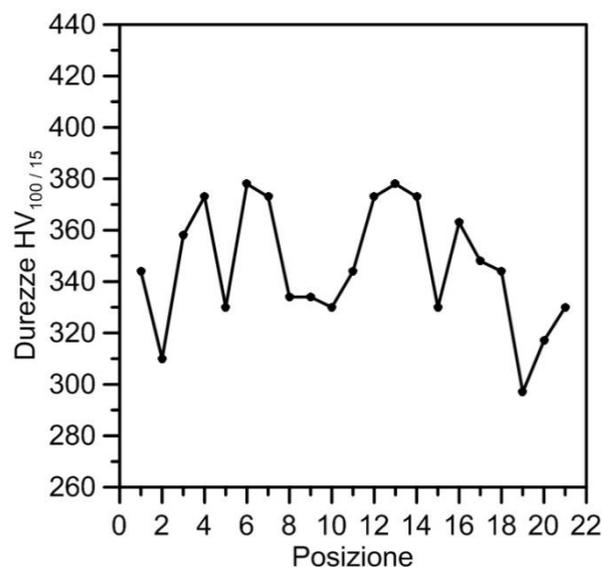
punto 13. L'andamento tracciato del diametro equivalente aumenta dopo l'ultimo punto esaminato mantenendosi sostanzialmente costante per tutta la rimanente analisi

-microdurezza



Anche la microdurezza definisce un andamento al quanto regolare per quanto riguarda i due profili centrali della sezione, distinguendosi si nelle curva ma andando poi tendenzialmente scemando verso valori minori della variabile anche se in maniera non costante.

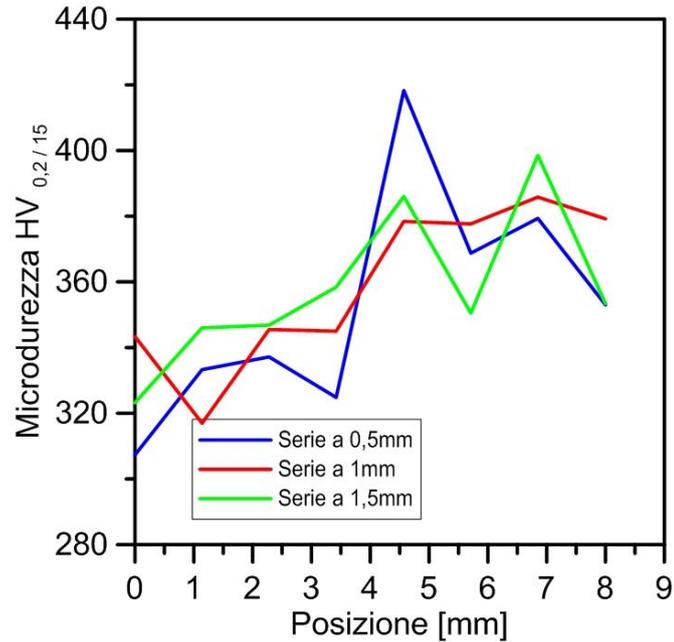
-durezza



Anche la durezza determina una certa regolarità nella parte centrale, ma vistosamente anomalo risulta essere il punto 9 nel quale crolla. L'andamento successivo rispecchia quello rinvenuto in altri campioni, con effetti dell'incrudimento della curva 17 che

ripercuotono sulla posizione 18, per assumere valori da materiale privo di deformazione lungo i gambo.

-analisi del gambo



Il confronto tra più serie di misurazioni permette ancora di determinare che la fascia si allarga attraversando lo spessore del gambo come dimostra il progressivo anticipo delle curve ad aumentare il valore e mantenendo valori medi progressivamente maggiori. Si badi però ad osservare che a dispetto degli altri campioni esiste una terza correlazione che permette di concludere che minore è lo spessore della fascia, e quindi il materiale interessato, maggiore sarà il livello di incrudimento a cui sarà soggetto.

Campione “SAF 2205 3ST Nat”

Il provino sottoposto a levigatura prima e a lucidatura poi, è sottoposto ad un attacco con il Beraha e la sezione compare come quella in figura 7.7 utilizzata per segnalare i punti di interesse:

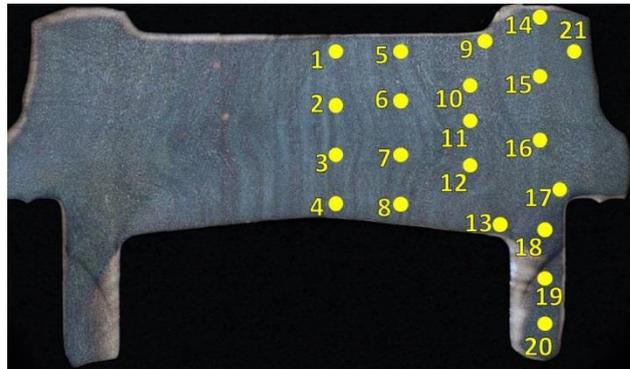
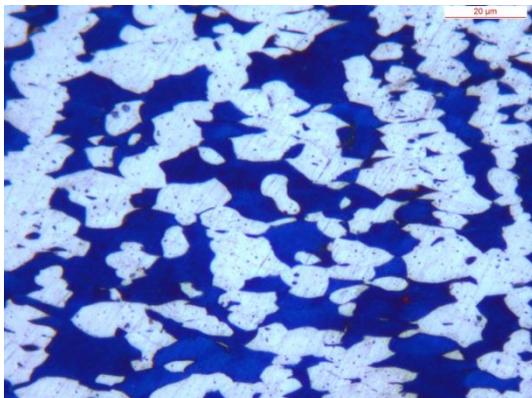


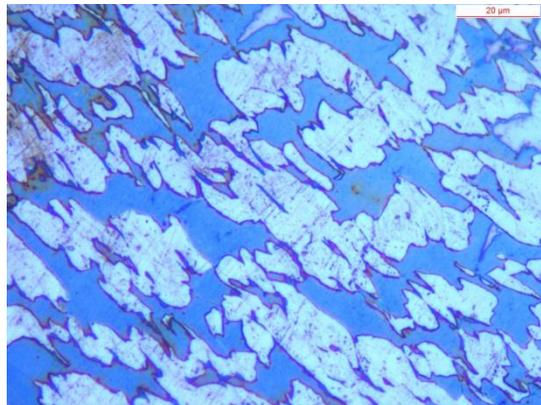
Fig.7.7.Immagine del campione “SAF 2205 3ST Nat” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

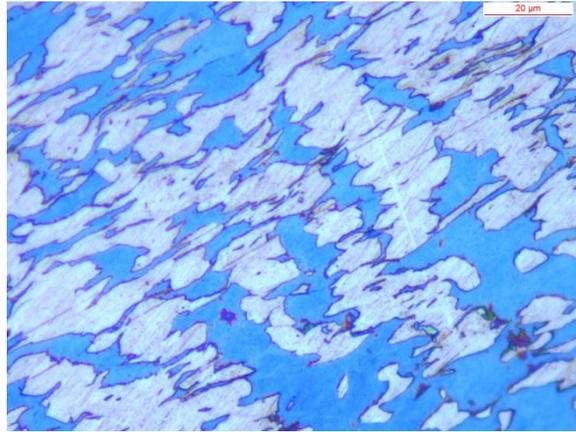
Sono state selezionate poi le micrografie, realizzate con il microscopio ottico LAS, per punti strategici del provino che subiscono deformazioni di diverse entità. Le immagini della microstruttura sono state eseguite a due ingrandimenti diversi: 200x per vedere nel suo complesso la zona e a 500x per quantificare adeguatamente le due fasi. Ed è proprio per la delicatezza richiesta a questi ingrandimenti che il provino subisce anche una lucidatura con la pasta diamantata da 1 μ m:

Punto 3 500x



Punto 9 500x



Punto13 500x

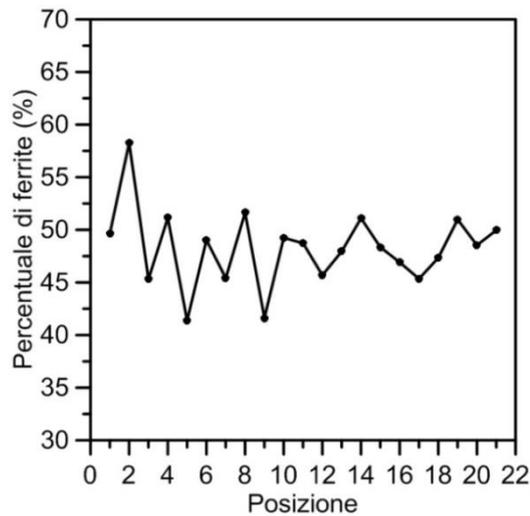
L'intera raccolta delle micrografie rinvenute per ciascun punto sono rinvenibili in appendice G.

Si raccolgono i valori delle variabili microstrutturali quali diametro equivalente e rapporto d'aspetto, che si associano a quelle meccaniche: durezze. Per quanto riguarda le microdurezze, non sono considerate nei campioni in austeno-ferrito in quanto inaffidabili e instabili. La tabella dei valori caratterizzanti viene compilata così:

Posizione	Percentuale di ferrite		Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	49,648	-	2,768	6,419	1,836	8,879	373
2	58,263	-	2,433	3,229	1,600	10,404	385
3	45,303	-	2,146	1,359	0,891	4,024	384
4	51,151	-	1,983	4,032	0,734	3,398	401
5	41,380	-	2,633	1,511	1,605	5,353	368
6	49,032	-	2,680	1,422	1,471	6,262	376
7	45,407	-	3,272	2,276	1,119	4,983	395
8	51,634	-	1,873	4,048	0,721	3,406	389
9	41,616	-	2,751	5,040	0,928	3,720	358
10	49,243	-	2,110	0,974	1,515	5,766	368
11	48,731	-	2,666	2,115	1,404	5,313	383
12	45,688	-	2,385	5,239	1,019	4,202	389
13	47,948	-	3,422	7,235	1,751	5,666	407
14	51,102	-	2,587	5,534	1,150	4,695	368
15	48,354	-	2,922	6,118	1,068	4,898	348
16	46,918	-	2,433	5,281	1,221	4,237	389
17	45,353	-	2,877	2,147	0,915	3,137	378
18	47,336	-	4,250	8,570	2,320	6,564	353
19	50,987	-	3,205	7,334	1,247	6,074	348
20	48,539	-	2,415	4,650	1,029	3,557	313
21	49,963	-	2,392	3,184	0,882	3,374	308

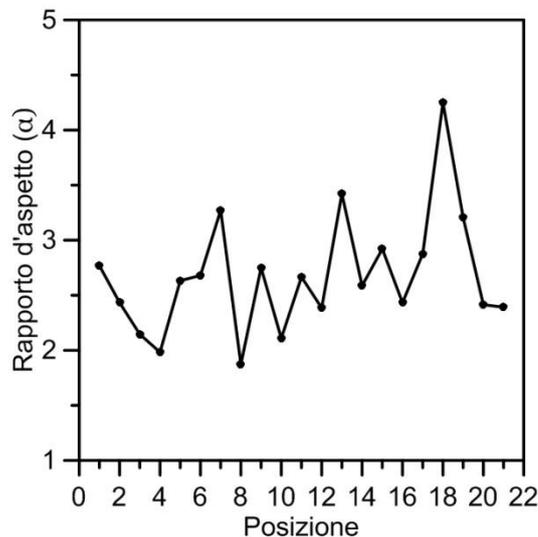
Entra in gioco una nuova variabile caratterizzante, la percentuale di ferrite; presente in esclusiva nei provini duplex in quanto sono gli unici composti da due differenti fasi. Nei grafici che seguiranno si avranno 21 punti.

-percentuale di ferrite



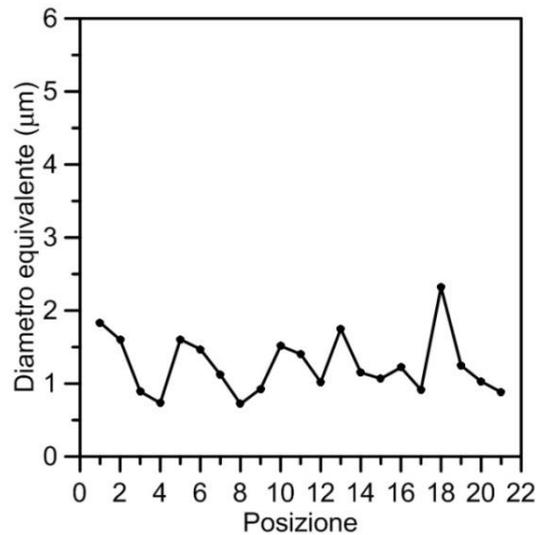
La percentuale di ferrite in tutte zone sottoposte ad indagine si mantiene per valori già rinvenuti nel campione non deformato. La variabile non sembra essere particolarmente influenzata dalle deformazioni locali, non ha variazioni di rilievo in nessuno dei punti più sollecitati e si stabilizza nel proseguo delle misure.

-rapporto d'aspetto



Il rapporto d'aspetto per la maggior parte dei punti osservati si stabilizza su valori che caratterizzano il non deformato. Uniche eccezioni sono i punti attorno alla posizione 13 godono di un rapporto d'aspetto maggiore che nelle altre zone, segno che la deformazione che conferisce la curvatura interessa la deformabilità di una zona molto più ampia.

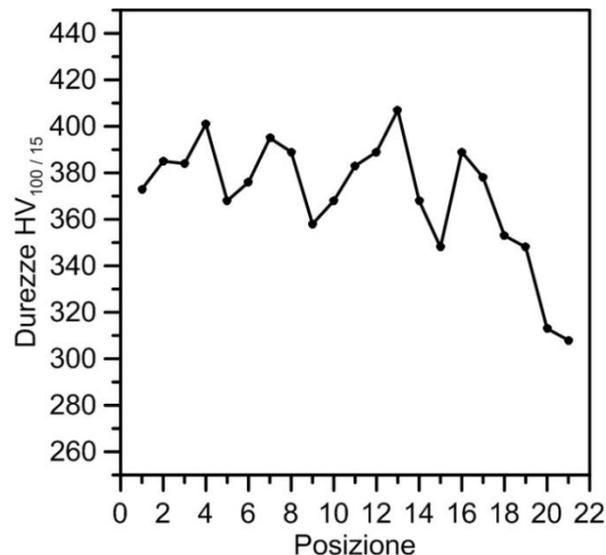
-diametro equivalente



La valutazione fatta per diametro equivalente restituisce una media dimensionale nettamente inferiore a quello descritto dall'analisi sui non deformati.

Vi è però una spiccata regolarità di variazione per quanto riguarda la parte centrale della sezione anche non vi si possono trarre conclusioni significative in quanto la variazione massima risulta essere di appena $1,7\mu\text{m}$.

-durezza



Il profilo determinato dalla variazione della durezza denota una buona specularità di andamento nella parte centrale con almeno uno dei due punti centrali leggermente maggiori. Anomalo risulta il punto 9 che non esalta il fatto che in quella posizione il materiale sia incrudito; risultano molto significative le rimanenti che esprimono attraverso con l'aumento di durezza il progressivo incrudimento all'avvicinarsi della curva 13, sia per la curva 17. Per quanto riguarda i punti siti nel gambo si registrano valori comparabili con quelli di un non deformato.

7.4.Campioni realizzati con una singola stazione di stampaggio

I tappi realizzati con una pressa monostazione Erfurt, hanno una geometria leggermente diversa di quelli formati nella National, ma come vedremo le considerazioni ricavabili hanno la stessa validità. I tappi, come nei precedenti casi, sono sia in acciaio inossidabile sia in SAE 1005 e sono valutati tramite le variabili già considerate. La pressa in considerazione è stata utilizzata, come richiesto, mantenendo inalterati i parametri macchina e dunque anche la velocità di produzione di 40 colpi al minuto e continuando a stampare pezzi bonderizzati, mantenendo gli stessi parametri di processo.

Anche questo caso lo codifica del campione risulta intuitiva essendo formata: il nome dell'acciaio seguito della dicitura monostadio.

Come descritto in precedenza si è andati ad verificare, tramite microdurezze, se esiste e che caratteristiche abbia la fascia di materiale incrudito che nei provini della pressa a più stazioni era situata all'imbocco del gambo.

Tale studio ulteriore viene condotto sui soli materiali in cui la misura della durezza puntuale acquista un senso fisico, ecco perché essa non viene fatta sul bifasico SAF 2205.

Campione “SAE 1005 Monostadio”

Come negli altri casi si considera in primo piano il materiale utilizzato attualmente in Zoppelletto per la realizzazione di tali prodotti. Il tappo affronta quindi la procedura di procedura metallografica al termine della quale deve subire una corrosione selettiva tramite l'applicazione del Nital 4% con la quale il campione compare come in figura 7.8 nella quale si rappresentano anche i punti che sono stati presi in esame:

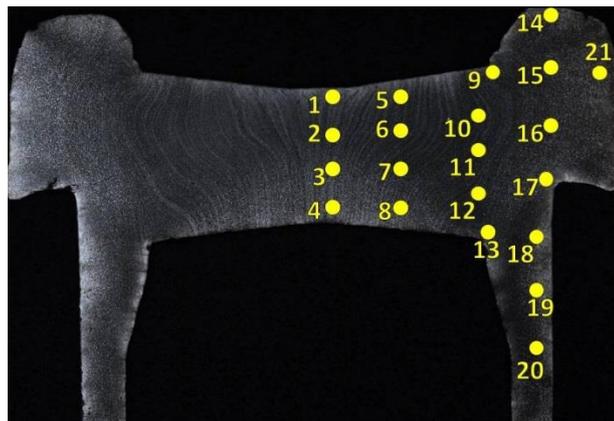


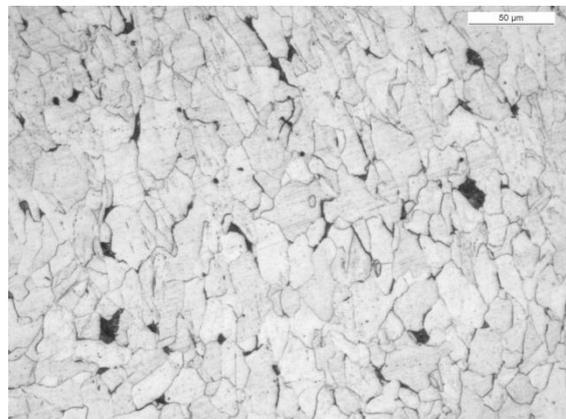
Fig. 7.8. Immagine del provino “SAE 1005 Monostadio” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

Seguono quindi una selezione delle micrografie acquisite per permettere l'osservazione della microstruttura del materiale in diversi stati di deformazione. Le immagini sono state raccolte a diversi ingrandimenti, ma qui sono riportate solo quelle a 200x. Per avere la versione integrale, agli stessi ingrandimenti, di ogni punto di interesse si prega di rivolgersi all'appendice H.

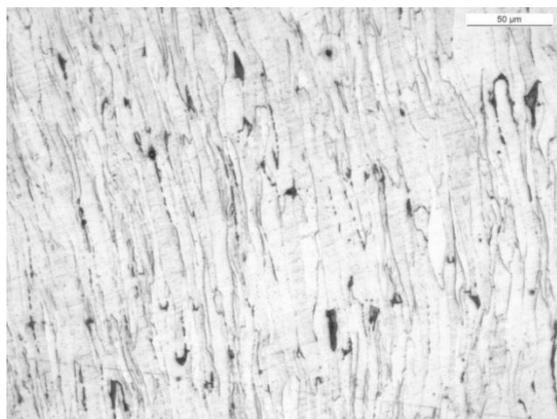
Punto 3 200x



Punto 9 200x



Punto 13 200x

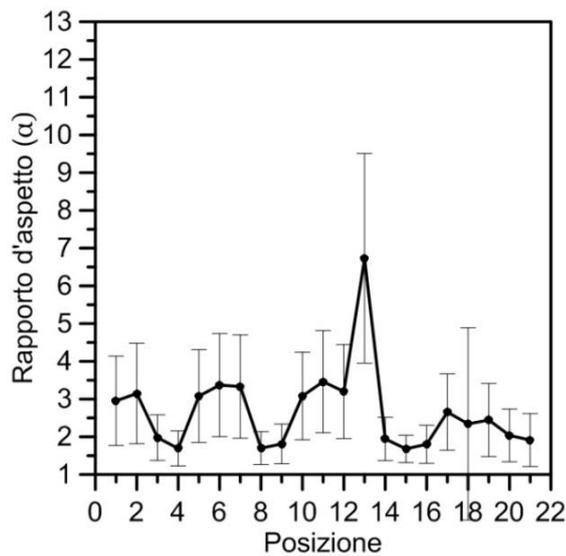


Unificando in una sola tabella: i valori calcolati assunti dalle variabili caratterizzanti restituiti dall'applicazione LAS e i risultati di macrodurezze e microdurezze è possibile ottenere la tabella che segue:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezza HV _{0,2 /15}		Durezza HV _{100 /15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,954	1,182	11,816	4,486	237,333	9,452	199
2	3,149	1,331	11,482	4,244	215,333	3,786	199
3	1,980	0,604	15,219	6,244	192,667	3,055	162
4	1,691	0,464	16,388	6,131	179,333	4,509	169
5	3,080	1,230	12,723	4,709	238	5	219
6	3,371	1,365	13,644	5,114	222,333	9,0185	219
7	3,333	1,370	13,209	4,934	226,667	3,78594	205
8	1,699	0,436	17,641	7,828	204	3,60555	168
9	1,812	0,524	15,218	5,309	214,000	4,000	193
10	3,081	1,162	15,800	6,126	212,333	2,309	181
11	3,462	1,355	14,958	5,806	217,333	10,504	197
12	3,201	1,245	15,476	6,171	207,667	4,041	187
13	6,729	2,777	15,503	6,592	239,333	5,686	215
14	1,943	0,572	19,496	7,925	202,000	6,083	190
15	1,681	0,362	17,343	7,673	190,000	13,000	158
16	1,803	0,505	17,758	7,484	195,333	8,083	154
17	2,656	1,012	18,782	7,553	182,000	4,583	148
18	2,342	2,548	19,947	10,198	213,333	4,933	140
19	2,445	0,968	22,086	9,297	220,000	9,539	188
20	2,038	0,699	21,808	8,122	207,000	1,732	174
21	1,914	0,701	23,463	10,894			162

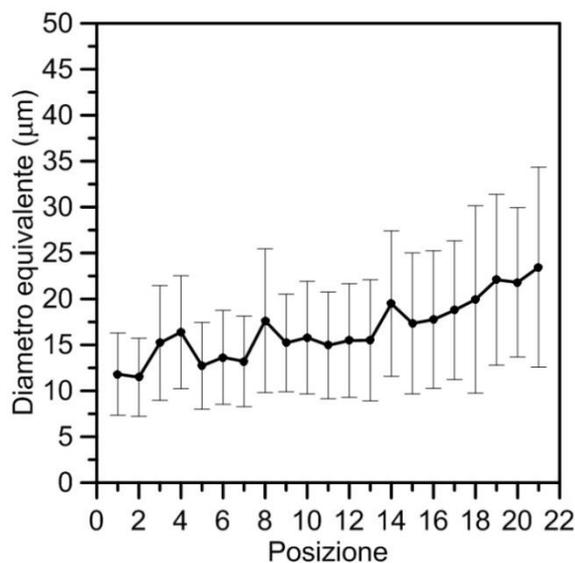
Si analizzano e commentano separatamente gli andamenti delle variabili caratterizzanti:

-rapporto d'aspetto



La variabile assume un comportamento ripetitivo nei profili centrali, denunciando nei punti inferiori valori corrispondenti a quelli del materiale non deformato. Il picco è in corrispondenza con la curva di raggio minore, preceduta da un progressivo aumento della variabile. Aumento lento che si distingue anche nelle posizioni precedenti la curva 17, mentre ciò che le succede è un altrettanto lenta discesa fino al raggiungimento dei valori da non deformato.

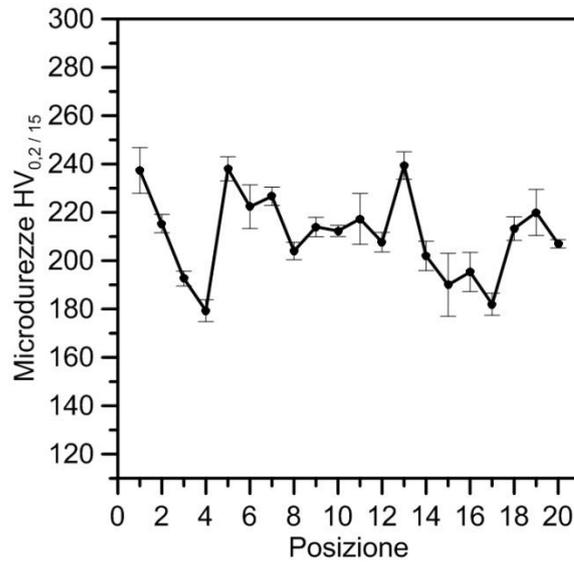
-diametro equivalente



Nonostante i valori con tendenza all'incremento, descritti dal diametro equivalente, si osserva che in ogni punto soggetto ad analisi l'entità della variabile corrisponde con uno

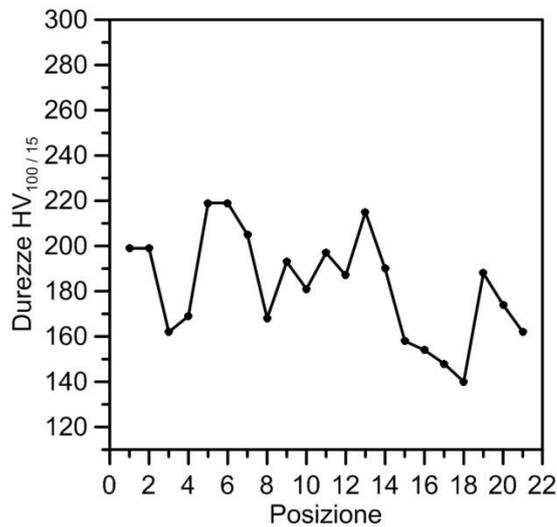
stato privo di deformazione. Tale considerazione esprime l'elevata duttilità del materiale in questione.

-microdurezza



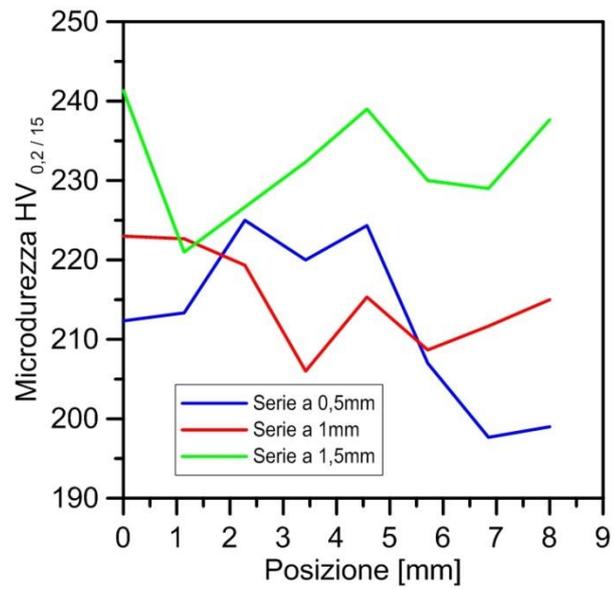
La microdurezza manifesta una progressiva riduzione nel percorso tra i due bordi, ma definendo comunque da qui in poi una certa costanza dei valori con unico valore maggiore quello riguardante il punto 13.

-durezza



Si distinguono due valori maggiori dei restanti nei due percorsi interni definendo picchi non ben distinti, per poi scendere a valori paragonabili con quelli registrati per quelli non deformati per la serie di punti che si posizionano lungo il gambo.

-analisi del gambo



In questo caso, al contrario di come avveniva nei provini realizzati a multi stazione non è riconducibile ad alcun comportamento specifico, solo la serie a distanza maggiore mantiene valori medi delle altre. Un seconda considerazione che ci permette di dubitare dell'esistenza di una fascia incrudita è il fatto che tutti i valori definiti sono raccolti in un campo di valori molto ristretto segno che non vi è un incrudimento definito.

Campione “AISI 304L Monostadio”

Il tappo realizzato con la pressa Erfurt in AISI 304L subisce tutta la procedura di taglio e pulizia che prepara la superficie per l'attacco con attacco acido elettrolitico che va ad corrodere il bordo del grano. La sezione del campione attaccata compare come quella in figura 7.9 nella quale si evidenziano i punti che verranno sottoposti ad analisi:

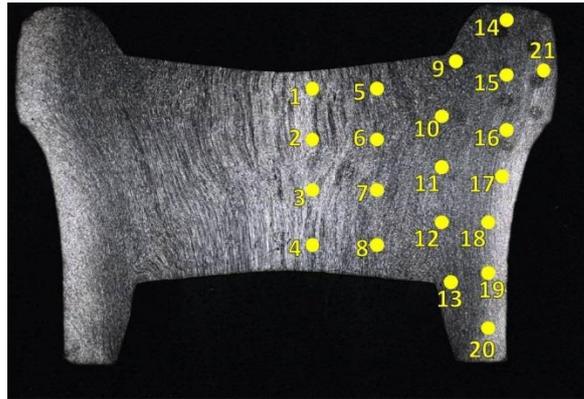


Fig.7.9. Immagine del campione “AISI 304L Monostadio” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi.

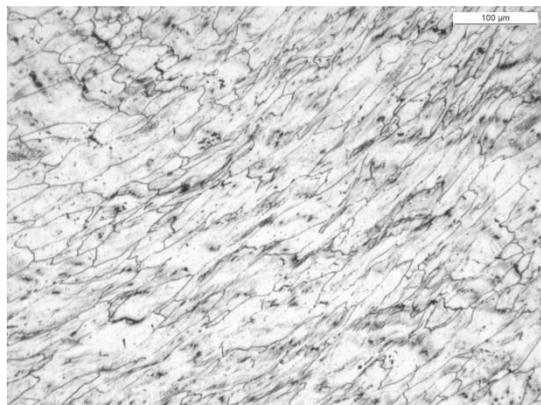
Si ha di seguito delle micrografie acquisite in parti avente diverse storia deformativa in modo da avere una panoramica sul differente comportamento del materiale:

Le immagini sono state raccolte a 50 e 100x, ma vengono presentate solo quest'ultime; la versione integrale delle immagini a 100x raccolte è posta in Appendice I.

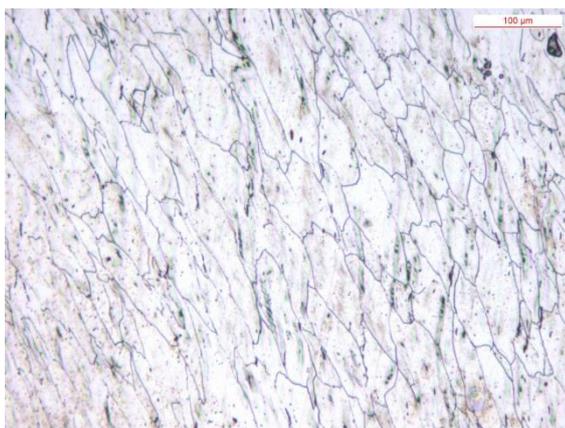
Punto 3 100x



Punto 9 100x



Punto 13 100x

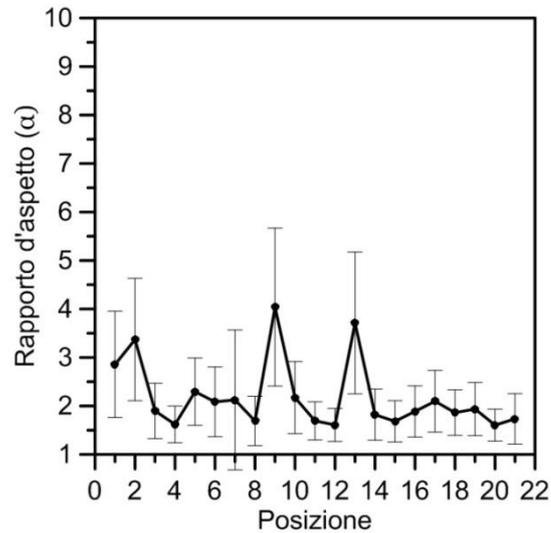


L'analisi delle immagini raccolte nell'appendice H permette la collezione dei valori assunti dalle variabili caratterizzanti, quali diametro equivalente e rapporto d'aspetto. Unendo questi ai valori delle variabili di durezza si completa la tabella riassuntiva che segue e che ha il compito di rappresentare esaustivamente la deformazione subita dal materiale per formare il campione.

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze		Durezza
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	2,857	1,097	35,891	18,090	391,75	9,742518	368
2	3,371	1,262	32,611	18,813	400,5	23,67136	358
3	1,900	0,570	34,635	17,758	364,5714	24,85194	330
4	1,620	0,379	41,612	18,688	341,5714	39,53419	229
5	2,296	0,694	30,519	15,306	374,25	14,52297	368
6	2,085	0,721	32,486	16,709	360	18,45264	368
7	2,126	1,442	35,606	16,429	376,2	17,64086	358
8	1,691	0,510	33,868	17,036	348	5,196152	257
9	4,039	1,629	26,647	13,359	403,5	18,19341	368
10	2,173	0,742	27,704	15,275	400	12,60159	368
11	1,694	0,393	31,212	15,977	385,6667	2,516611	321
12	1,610	0,340	38,661	16,946	349	22,28228	348
13	3,713	1,462	34,626	14,514	431	13,14027	368
14	1,821	0,525	37,159	16,212	282,4	13,97498	358
15	1,684	0,425	34,824	15,884	276,6667	8,144528	330
16	1,889	0,528	38,650	16,520	289	10,29563	330
17	2,098	0,638	41,183	17,836	307	8,286535	358
18	1,863	0,468	41,339	17,228	339,6	18,03607	368
19	1,938	0,549	39,519	17,332	347,4	15,05988	330
20	1,606	0,329	38,005	14,903	333	23,8642	339
21	1,735	0,521	33,731	14,019			330

Successivamente sono presentati gli andamenti di tali variabili descrittive appena valutate numericamente.

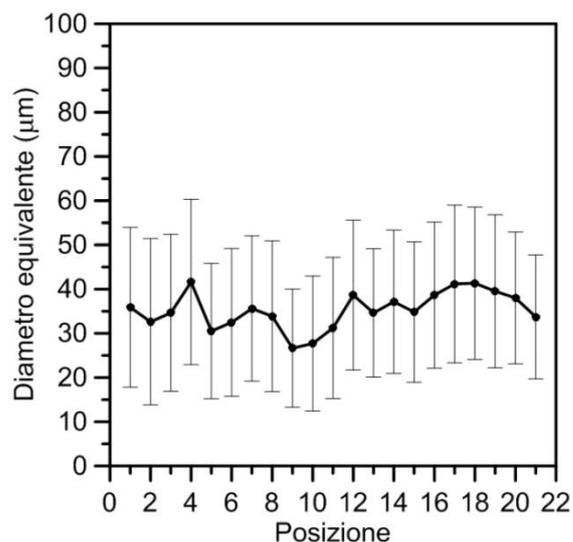
-rapporto d'aspetto



L'andamento del rapporto d'aspetto risulta mantenersi piuttosto costante, con valore medio di poco al di sopra dei valori rinvenuti per il materiale privo di deformazione.

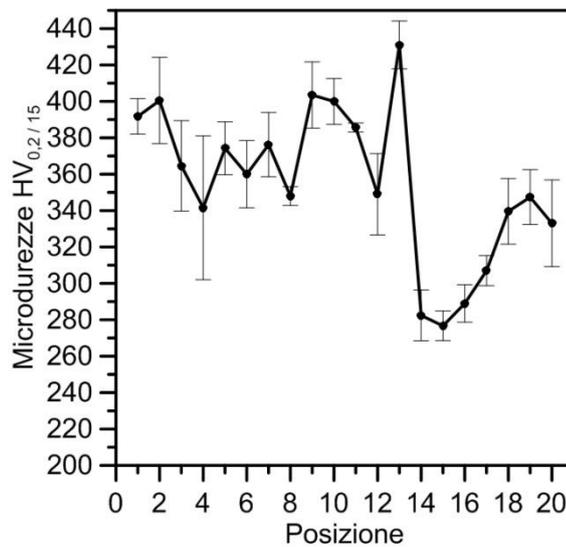
Tale costanza viene interrotta sia dal tratto iniziale che dalle due curve, imponenti un raggio di curvatura limitato, imponendo una deformazione che fa includere il materiale stesso.

-diametro equivalente



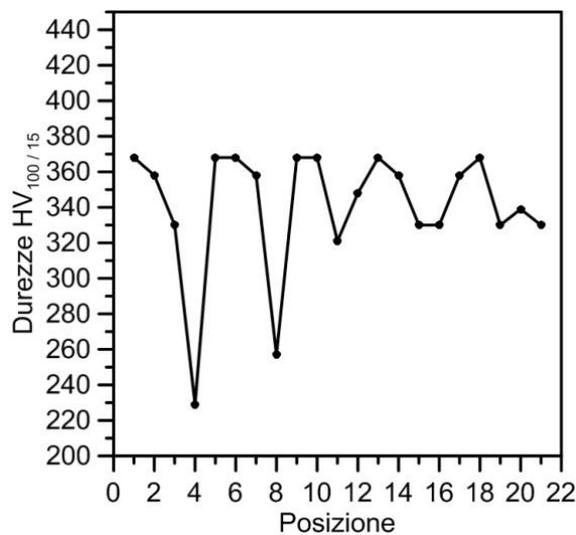
L'andamento tracciato dai valori assunti dalla variabile in esame denotano una buona regolarità nei punti centrali della sezione. Andamento interrotto dal solo punto 9, dopo il quale il valore gradualmente aumenta fino a toccare valori caratteristici del materiale non deformato.

-microdurezza



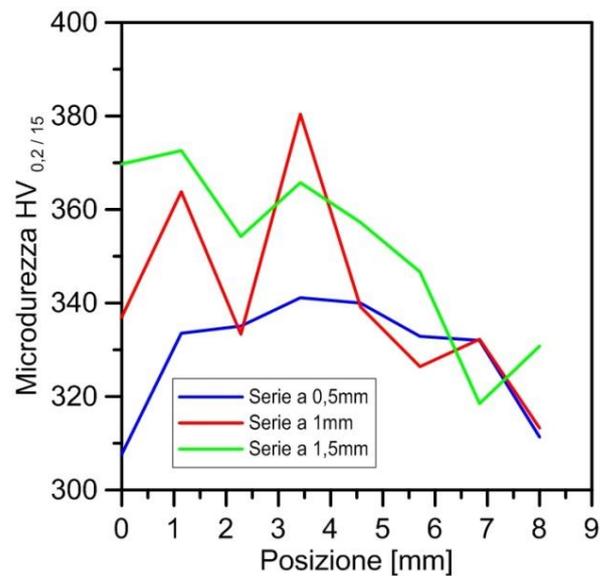
La microdurezza distingue due picchi in all'analisi della parte centrale della sezione, mentre solo in presenza delle curve si presentano picchi di una certa entità. Al cambio di zona indagata dalla tredicesima alla quattordicesima posizione si ha un crollo in quanto variano notevolmente come deformazione subita. Per i punti che interessano il gambo si ha un graduale aumento del valore di durezza.

-durezza



Netta risulta, fin da una prima occhiata, la presenza di due valori molto distanti dai loro predecessori, e corrispondono con i punti le cui posizioni vengono a contatto con il punzone fisso. Per quanto riguarda i punti successivi la variabile raggiungere valori molto simili ogni qualvolta si è in presenza di uno stato fortemente deformato.

-analisi del gambo



I valori ricavati dalle misure di durezza puntuale eseguite su determinati profili non permettono di individuare una precisa tendenza come avveniva per il provini realizzati con più stazioni di stampaggio. Le uniche osservazioni utili sono: il fatto che generalmente percorrendo lo spessore da destra a sinistra il valore medio aumenta e il fatto che considerando i primissimi valori di compresca come questa durezza pervada il lato interno del gambo per tutta la sua lunghezza.

Non solo, i valori raggiunti in questo caso sono in media maggiori di quelli registrati nella controparte multi stadio e hanno minor variabilità tra massimo e minimo.

Campione “AISI 316L Monostadio”

Come avvenuto per il tappo stampato più stadi di deformazione anche in questo caso, il tappo è stato realizzato con tutti i materiali in esame. E' giunto il turno di analizzare l'AISI 316L che come nei precedenti ha subito tutte le lavorazioni preparatorie della superficie in modo da renderla adeguata per un attacco con la soluzione elettrolitica. Il risultato ultimo è visibile in figura 7.10 nella quale sono anche individuati i punti che sono stati ritenuti di interesse:

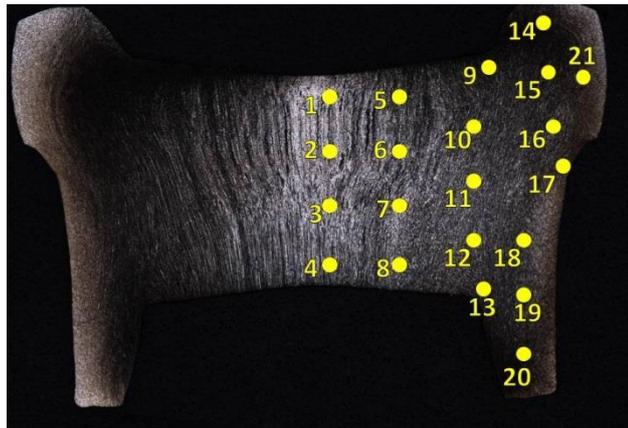
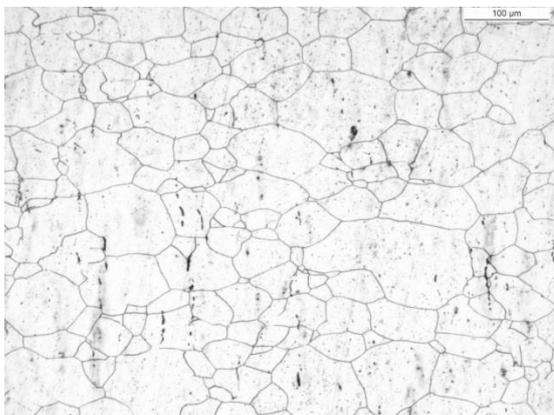


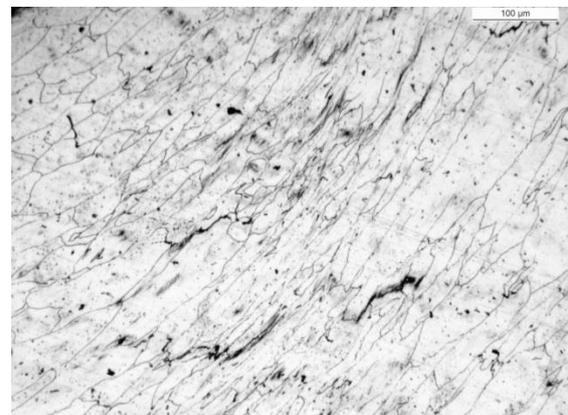
Fig.7.10 Immagine del campione “AISI 316L Monostadio” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

Si presentano dunque delle immagini micrografiche significative che riguardano la struttura e i diversi stati in cui si trova dopo aver subito deformazioni di varia entità. Sono realizzate a 50 e 100x ma di seguito e la versione integrale presente nell'appendice I sono riportate solo quelle a 100x, si ha dunque:

Punto 3 100x



Punto 9 100x



Punto 13 100x



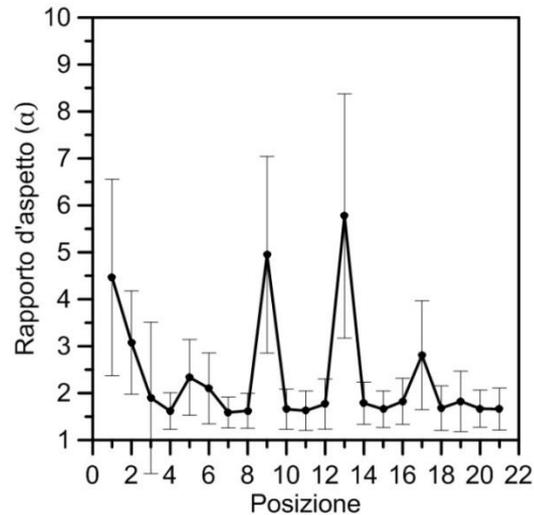
Le micrografie di tutti i punti oggetto di studio sono raccolte nell'Appendice L.

L'analisi si divide in due parti: una derivante dalla valutazione al LAS della microstruttura in cui si ha il giudizio della stessa e de suo stato tramite differenti variabili. Le variabili scelte per la descrizione appropriata della microstruttura sono diametro equivalente e rapporto d'aspetto. La seconda parte si compone delle durezze e delle durezze locali registrate nei medesimi punti. Una volta in possesso di tutte le misure è possibile completare una tabella riassuntiva che possa descrivere compiutamente il campione:

Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(µm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	4,464	2,094	33,629	17,210	367,250	7,588	339,000
2	3,077	1,100	28,791	15,343	372,000	18,448	358,000
3	1,899	1,611	39,304	18,512	331,333	6,807	297,000
4	1,620	0,389	40,422	19,283	245,000	7,810	217,000
5	2,338	0,805	30,863	16,149	366,714	13,985	339,000
6	2,103	0,755	34,158	16,773	346,500	25,122	348,000
7	1,590	0,330	34,585	15,749	328,750	6,602	313,000
8	1,625	0,371	40,978	19,305	348,429	19,130	327,000
9	4,948	2,096	34,799	17,513	390,000	24,568	339,000
10	1,659	0,429	37,512	17,419	357,750	8,732	358,000
11	1,627	0,420	35,830	16,372	329,750	8,884	305,000
12	1,768	0,535	34,052	18,362	355,750	12,659	330,000
13	5,773	2,601	36,209	17,730	399,250	31,669	358,000
14	1,786	0,449	40,429	17,333	340,000	2,000	330,000
15	1,658	0,389	41,591	20,241	317,000	6,928	313,000
16	1,826	0,491	39,694	18,515	349,000	7,071	321,000
17	2,808	1,160	46,895	19,731	396,500	16,583	321,000
18	1,682	0,475	48,938	23,006	324,600	13,813	330,000
19	1,826	0,645	49,170	23,379	334,800	10,663	321,000
20	1,671	0,397	41,028	21,585	316,500	9,110	330
21	1,660	0,448	47,771	22,284			313

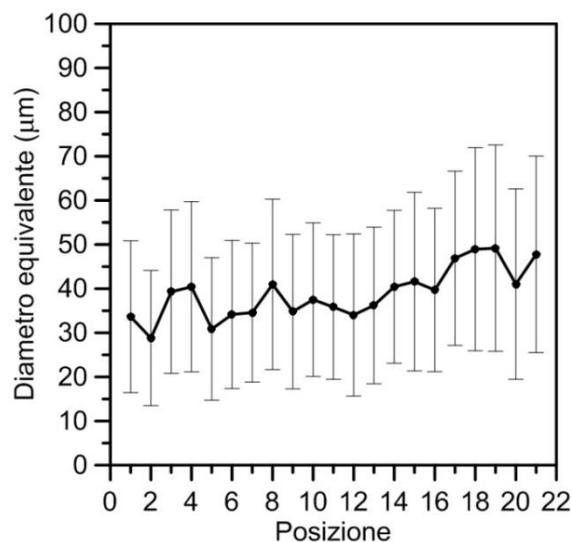
Come di consueto sfilano ora i grafici ricavati dall'andamento delle variabili sopra elencate:

-rapporto d'aspetto



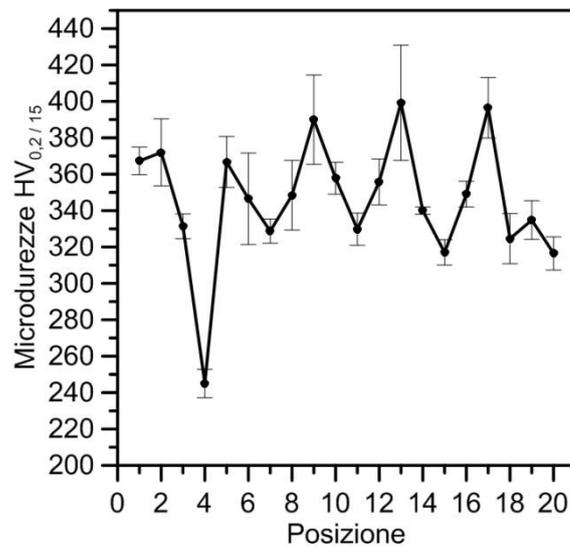
Ad eccezione del primo valore registrato si osserva una certa costanza per quanto riguarda la parte centrale della sezione. I valori effettivamente si mantengono di poco sopra quelli attribuiti al campione non deformato e vengono interrotti solo localmente da un picco che segnala la presenza di una zona che ha subito una notevole deformazione.

-diametro equivalente



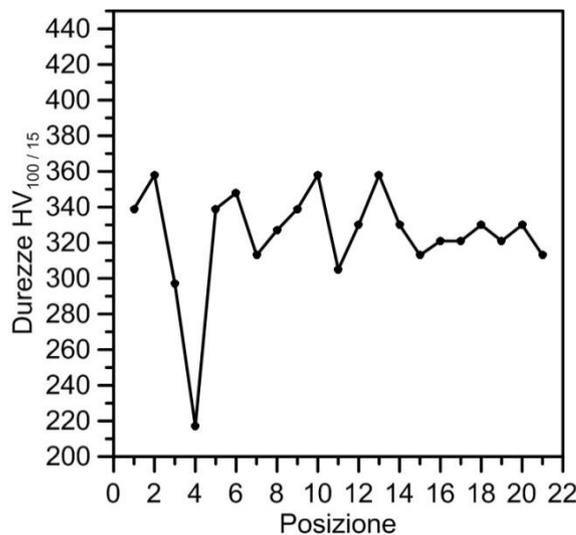
Il diametro equivalente si mantiene circa per tutta l'analisi quasi $10\mu\text{m}$ sotto il valore di diametro rinvenuto nel campione non deformato, ma che generalmente ha tendenza ad aumentare nello svolgersi dell'indagine. Non si hanno segnalazioni di zone in particolare.

-microdurezza



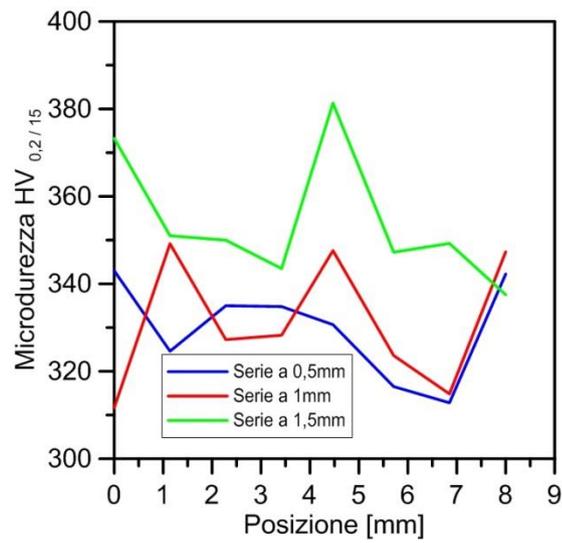
Le microdurezze denunciano valori raccolti nella parte centrale, fatta eccezione per il quarto punto nel quale vengono raggiunti valori di durezza in linea con quelle ottenute dall'analisi del campione indeformato, successivamente si ha una costanza molto precisa con il raggiungimento di valori molto simili ogni qual volta la zona di indagine è una zona che ha subito deformazione o meno.

-durezza



L'andamento definito dalle durezza rispecchia quello tracciato dalle durezza localizzate, potendo identificare ancora con valori simili le zone più deformate e con altri valori caratterizzanti le zone meno deformate. Si ha coerenza praticamente assoluta tra le durezza e microdurezza.

-analisi del gambo



Dall'analisi delle consuete tre serie di misure si evince solamente che la media della serie più interna è maggiore delle restanti. In questo caso, meno che in altri, non è distinguibile ne una relazione precisa, ne valori assoluti maggiori rispetto alla controparte stampata in più stazioni.

Campione “SAF 2205 Monostadio”

Il tappo monostazione in SAF 2205 è preparato in modo che la faccia che debba essere osservata sia lucidata a specchio; è solo in queste condizioni infatti che dopo un attacco chimico con Beraha è possibile distinguere, anche cromaticamente, la ferrite dall'austenite. Nel suo complesso il campione compare come in figura 7.11 nella quale sono stati anche individuati i punti che saranno soggetti delle analisi esposte.

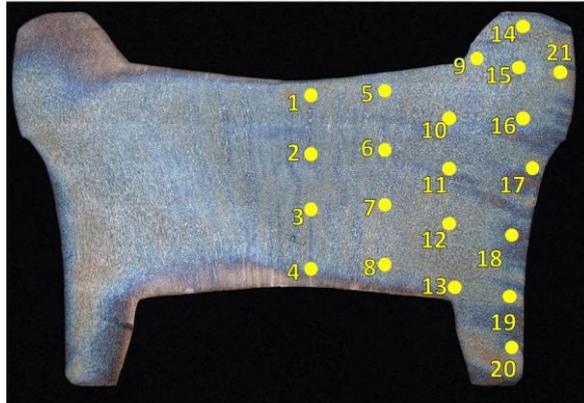
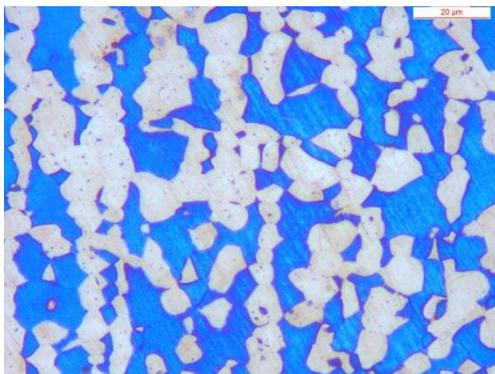


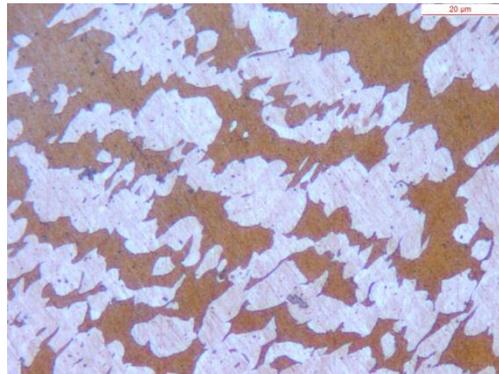
Fig. 7.11. Immagine del campione “SAF 2205 Monostadio” con identificazione dei punti sottoposti ad analisi

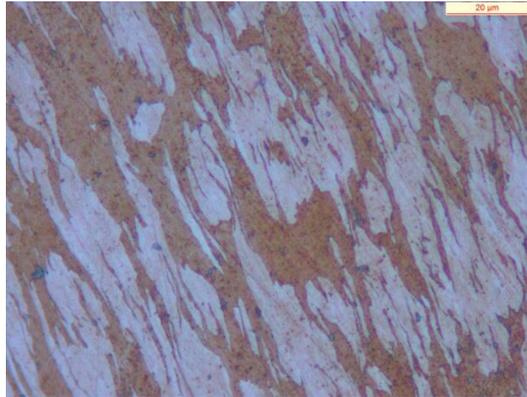
Di seguito vengono riportate le micrografie di zone che hanno subito diverse entità di deformazione, le restanti immagini dei punti appena localizzati sono raccolte nell'appendice M :

Punto 3 500x



Punto 9 500x



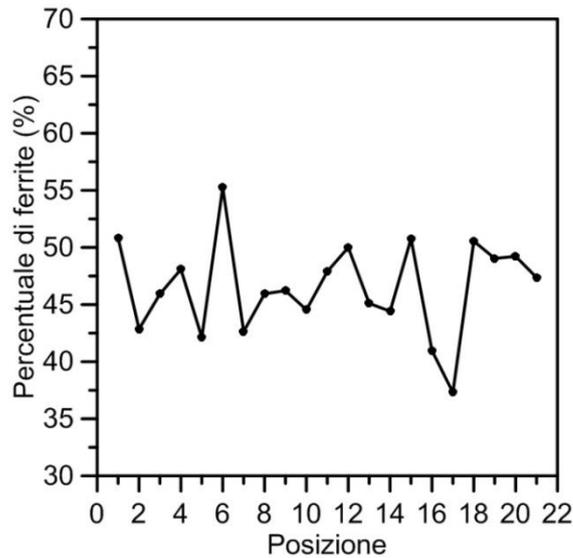
Punto 13 500x

Sotto ponendo le micrografie di ogni punto ad un'analisi all'immagine si possono selezionare esclusivamente i parametri che si reputano come sufficientemente descrittivi dello stato della microstruttura. Si opta per il rapporto d'aspetto e per il diametro equivalente che verranno poi affiancati con i valori delle misure di durezza e durezza localizzata vanno a comporre un tabella riassuntiva che permette di descrivere completamente il materiale:

Posizione	Percentuale di ferrite(%)		Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore	Dev std	Valore
1	50,823	-	2,628	5,217	0,728	4,330	358
2	42,864	-	3,525	9,170	2,142	6,913	348
3	45,929	-	3,187	10,146	3,276	7,984	313
4	48,093	-	3,035	8,518	2,194	6,831	305
5	42,122	-	2,228	1,401	1,158	4,275	368
6	55,276	-	3,335	10,190	2,005	9,300	378
7	42,633	-	2,649	7,150	1,403	5,468	368
8	45,948	-	2,282	1,602	0,933	4,110	348
9	46,224	-	2,300	1,039	0,634	2,801	378
10	44,541	-	2,926	7,862	1,742	6,066	378
11	47,901	-	2,889	8,104	2,223	6,636	348
12	50,000	-	2,020	1,075	0,462	1,983	358
13	45,103	-	2,009	1,046	0,461	1,838	378
14	44,418,	-	2,110,	0,929,	0,687,	2,713,	368
15	50,776	-	2,940	8,532	2,191	7,017	348
16	40,978	-	2,981	7,755	1,913	5,629	348
17	37,305	-	2,401	5,366	1,451	3,741	378
18	50,555	-	2,961,	3,449,	1,272	6,166	368
19	49,043	-	2,358	5,733	1,100	4,855	358
20	49,222	-	2,472	5,342	1,142	4,455	348
21	47,372	-	2,566	7,163	1,522	5,886	339

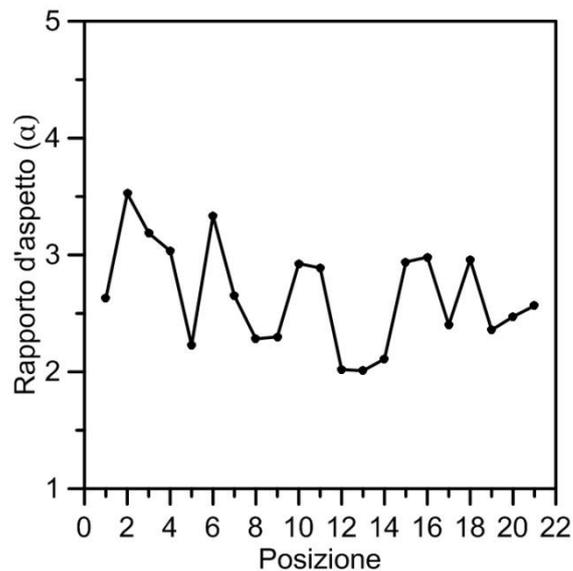
Segue l'esame dell'andamento di ciascuna variabile

-percentuale di ferrite



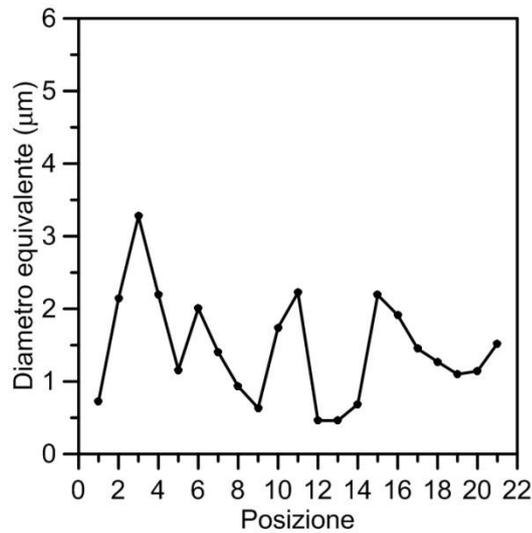
La percentuale di ferrite mantiene più o meno lo stesso valore medio, nonostante si individui una tendenza alla diminuzione alla presenza della ferrite in corrispondenza con le zone che hanno subito maggiore deformazione.

-rapporto d'aspetto



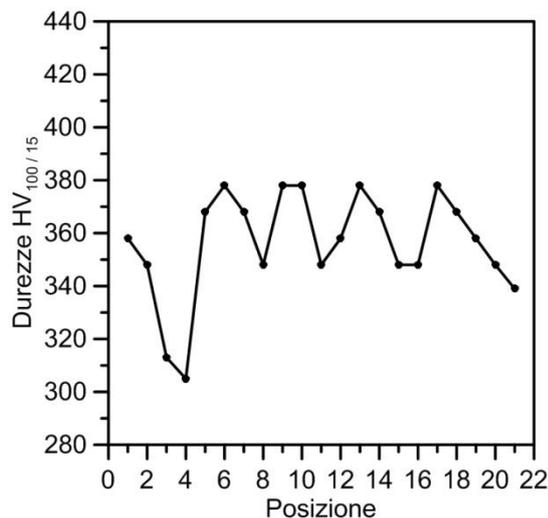
Nel rapporto d'aspetto si distingue una fascia di maggior presenza deformazione che individua una fascia che taglia trasversalmente la parte centrale della sezione. Non si distingue una tendenza definitiva, e non sottolinea nemmeno la presenza dei punti in cui il materiale è più sollecitato. Nel complesso l'andamento risulta poco significativo.

-diametro equivalente



Il diametro equivalente evidenzia la presenza delle tre curve, ma soprattutto permette, tramite i picchi di distinguere le zone in cui il materiale sia stato meno sollecitato nel suo movimento per il completo riempimento della cavità. Anche la quattordicesima posizione, normalmente isolata da processi deformativi rilievo denuncia un incrudimento dato dalle sollecitazioni scambiate con la parte posteriore del semistampo.

-durezza



Nel caso in esame la variabile ha una decadenza a valori da materiale non deformato nel quarto punto dove vi è il contatto con il punzone fisso. Successivamente è netta la presenza di ogni curva, in quanto la variabile raggiunge sempre valori molto simili. Valori simili sono raggiunti anche nelle zone tra picco e picco nelle quali il materiale risulta essere stato meno sollecitato.

Correlazione tra parametri microstrutturali e durezze

8.1.Introduzione

Come deducibile dal titolo del capitolo appena aperto esso è dedicato alla determinazione di una relazione che lega le variabili morfologiche della microstruttura a quelle di durezza in modo da permettere di valutare una certa coerenza anche con la teoria ufficiale. Siccome risulta essere più significati il confronto in particolare tra il diametro equivalente e la durezza, sarà quest'ultima protagonista anche del confronto con il rapporto d'aspetto.

Lo scopo principale è quello di valutare come si relazionano due variabili completamente diverse, quando materiali completamente diversi sono sottoposti alle stesse deformazioni. In particolare il confronto più interessante è quello tra il materiale attualmente stampato in Zoppelletto il SAE 1005 con il materiale per cui il processo di stampaggio a freddo risulterebbe più innovativo ovvero il duplex SAF 2205. Quest'ultimo ha infatti carico di rottura maggiore e velocità di incrudimento nettamente superiori rispetto al primo che rendono lo stampaggio molto più complesso, ma l'analisi delle curve correlate può rilevare particolari che fungano da base per soluzioni che permettano il completo stampaggio del tappo.

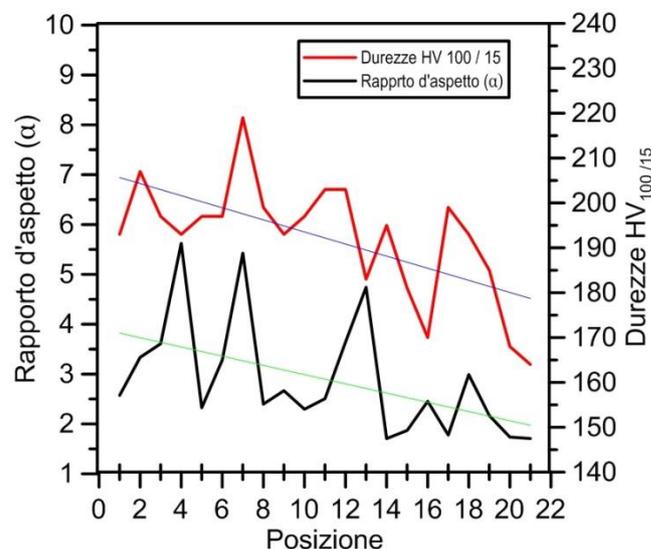
Si sceglie dunque di escludere gli acciai inossidabili austenitici, sia per avere direttamente il confronto di interesse, sia perché le proprietà risultanti da questi risultano rientrano nel campo delimitato dall'SAE 1005 e dal SAF 2205 quindi ogni risultato rinvenuto può avere maggior successo se eseguito con il materiale austenitico. Si confrontano le due variabile per le stampate che permettono l'ottenimento della forma ultimata.

8.2. Correlazioni dei tappi realizzati a più stazioni di stampaggio

Si inizia confrontando l'andamento delle variabili nei provini ottenuti attraverso un maggior numero di stadi deformativi, Il confronto avverrà sull'analisi degli andamenti delle due variabili, ognuna valutata rispetto al proprio asse delle ordinate. Come avvenuto in precedenza si rispetta la sequenza dei materiali con cui sono costituiti i campioni

Campione "SAE 1005 3ST Nat"

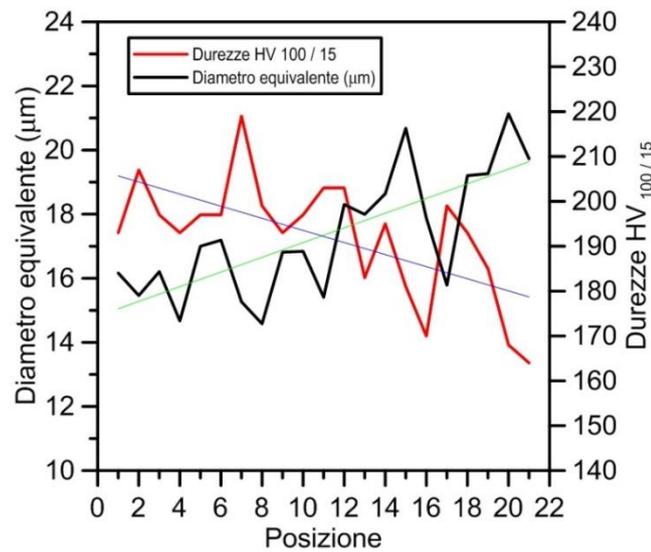
-confronto tra rapporto d'aspetto e durezza



Come è stato detto anche in altre occasioni il rapporto d'aspetto è una variabile che ci permette di valutare l'entità della deformazione subita, infatti più il valore da esso assunto si discosta dai valori dell'indeformato più il materiale ha subito deformazione. Quindi in corrispondenza di un aumento del diametro equivalente si prevede anche un aumento della durezza, sono dunque direttamente proporzionali.

Per comodità di interpretazione si è deciso di tracciare la linea di tendenza delle funzioni a tratti, che in ambo i casi sono decrescenti e con inclinazione molto simile.

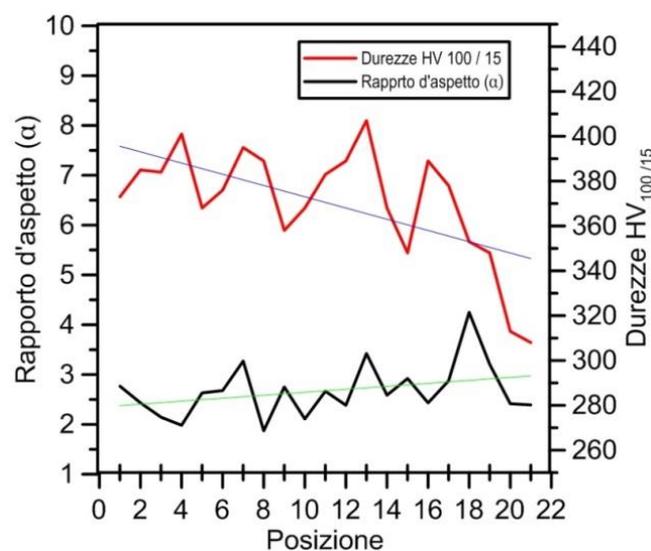
-confronto tra diametro equivalente e durezza



Il diametro equivalente trasmette anch'esso una valutazione dello stato di incrudimento del materiale, in quanto i valori maggiori sono testimonianza di una zona che è stata meno deformata rispetto alle altre. In corrispondenza di queste zone ci si aspetta dunque un livello di incrudimento minore che si trasmette con un valore minore della durezza. Ne deriva che le due variabili in oggetto siano inversamente proporzionali. Relazione che viene enfatizzata dalla tracciatura delle linee di tendenza le quali attraversano il grafico in maniera opposta.

Campione "SAF 2205 3ST Nat"

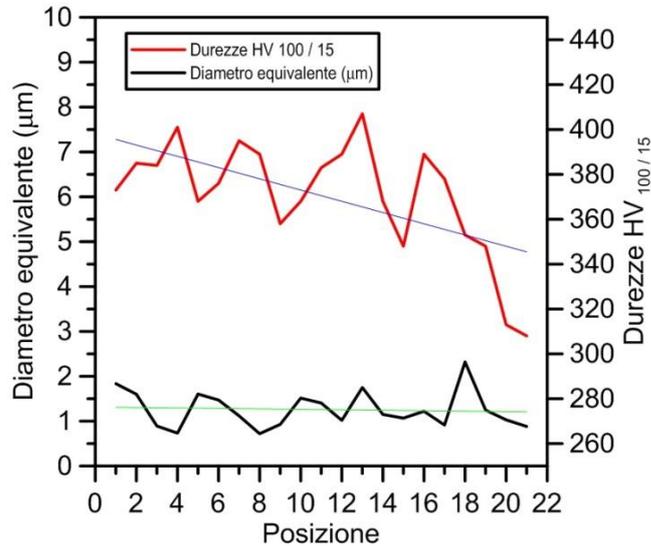
-confronto tra rapporto d'aspetto e durezza



Nel caso del bifasi si denota ancora una tendenza al calo di durezza durante la progressione delle posizioni dei punti. Complice anche la variazione in valore assoluto

tra i due materiali, il rapporto d'aspetto non risulta più relazionarsi allo stesso modo con la durezza e le linee di tendenza fanno trasparire in indifferenza del rapporto d'aspetto rispetto la durezza.

-confronto diametro equivalente e durezza



Anche in questo caso le variazioni, in valore assoluto, tra i valori del diametro equivalente del SAE 1005 e del SAF 2205 sono determinanti per perdere la correlazione esistente tra la durezza e il diametro equivalente. Ciò avviene in quanto le fasi si incrudiscono ma solo in casi critici viene meno la loro dimensione.

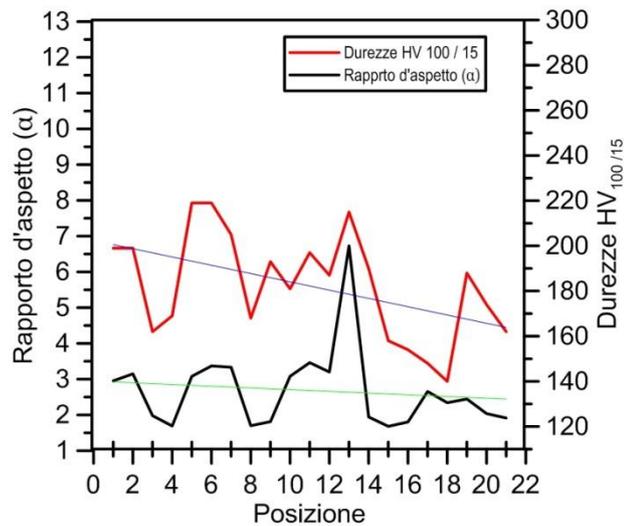
Una seconda considerazione invece si fa spazio alla luce degli andamenti sovra esposti, ovvero quella che il materiale abbia velocità di incrudimento talmente elevate da inibire uno scorrimento che ne modifichi la forma. Ciò spiegherebbe come possa variare la durezza senza che vi siano modifiche ai valori morfologici della particelle.

8.3. Correlazioni per tappi realizzati a stazione di stampaggio singola

L'analisi dei campioni stampati con un solo stadio di deformazione porta anche in questo caso alla composizione di grafici riportanti l'andamento delle due variabili come due serie distinte valutate ognuna rispetto la propria ordinata.

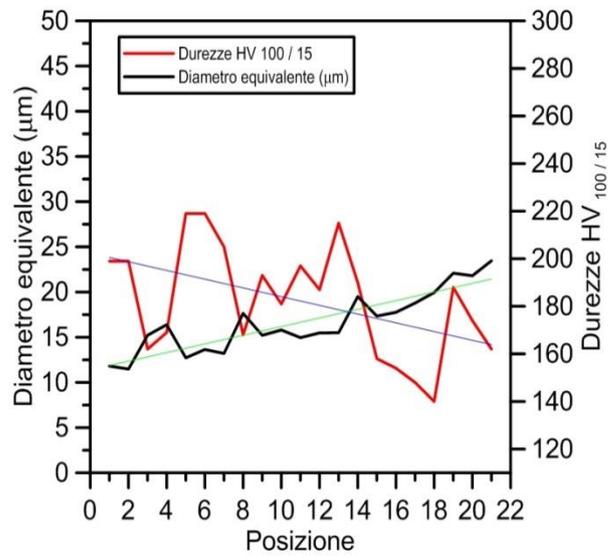
Campione "SAE 1005 Monostadio"

-confronto tra il rapporto d'aspetto e la durezza



Meno netta in questa circostanza sembra essere la relazione che intercorre tra le due variabili, anche se la tracciatura delle linee di tendenza ci permette di dedurre ancora una volta che le due mantengono tendenza decrescente durante tutta l'analisi anche se in maniera meno calcata rispetto al campione realizzato in più stadi deformativi.

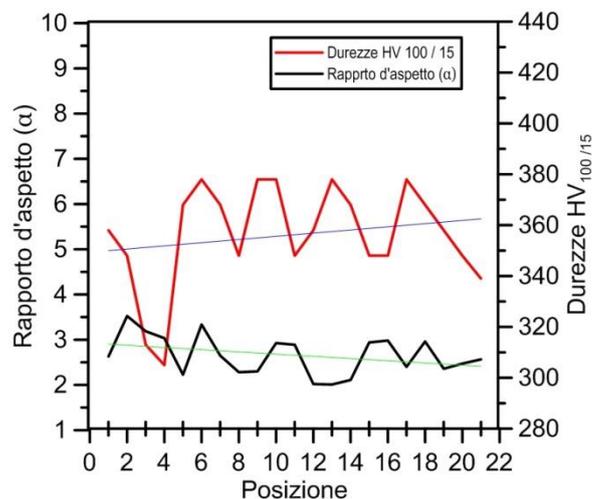
-confronto tra diametro equivalente e durezza



Risulta molto più indicativa l'analisi delle linee di tendenza in questo confronto in quanto durante l'analisi le due tendono ad incrociarsi attraversando il grafico in maniera opposta.

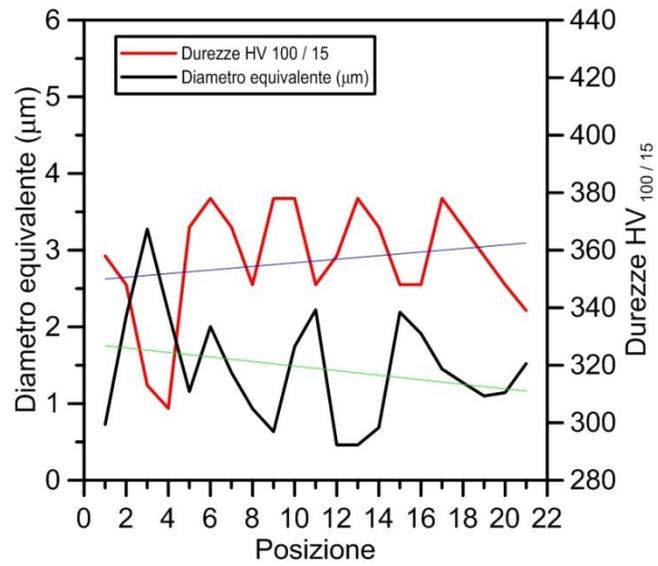
Campione "SAF 2205 Monostadio"

-confronto tra rapporto d'aspetto e durezza



In questa analisi si osserva come la durezza tenda, nel corso dell'indagine ad aumentare, mentre il rapporto d'aspetto si mantiene sempre su valori molto simili, senza assumere distinzioni significative nelle zone in cui il materiale ha subito maggior deformazione.

-confronto tra diametro equivalente e durezza



Come descritto anche nel campione stampato a più stazioni la relazione, che intercorre tra i due parametri, risulta molto più fievole ma ancora esistente. Che le variabili siano inversamente proporzionali è possibile dedurlo anche dai singoli valori considerati che compongono due andamenti praticamente speculari.

Analisi dei risultati e conclusioni

9.1.Introduzione

Il Capitolo che si apre sarà dedicato a tutte le conclusioni che si possono trarre con i dati a nostra disposizione. Per avere una maggiore comprensione delle conclusioni che si andranno ad ottenere si sceglie di suddividere il capitolo in più parti ognuna specializzata nel proprio ambito: materiali non deformati, tappi realizzati con più stazioni di stampaggio, tappi realizzati con una singola stazione di stampaggio e confronto tra questi due ultimi.

9.2.Materiali non deformati

Si aprono quindi le considerazioni derivanti sia dei risultati dalla caratterizzazione meccanica che dai dati derivanti dalla caratterizzazione microstrutturale.

Si nota da subito che i materiali sono omogenei poiché i valori assunti da tutte le variabili analizzate sono contenute in un ristretto campo di valori. Tali valori assoluti dalle variabili hanno però importanti differenze da materiale a materiale.

Il SAE 1005 si presenta come omogeneo e le variabili sono sensibili, anche se in maniera diversa, alla deformazione subita in trafilatura. Dall'analisi micrografica emerge che in media si ha un grado di non del tutto equiassico (rapporto d'aspetto vale 1,6), mantenendo valori diametro molto modesti all'incirca $20\mu\text{m}$ e una durezza allo stato base compresa tra 100 e $120\text{HV}_{100/15}$ ma che localmente, nei singoli grani più soggetti a sforzo, tocca anche i $200\text{HV}_{0,2/15}$.

Per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica del materiale, la prova di trazione a temperatura ambiente fornisce valori di carico di snervamento pari a circa 260MPa, e una rottura attorno ai 360MPa per un allungamento pari al 38%.

I dati appena elencati testimoniano un acciaio malleabile, grazie a valori di carico di snervamento molto ridotti, e in generale facilmente lavorabile grazie a valori di durezza al quanto modesti. Il SAE 1005 risulta essere duttile e lo si comprende dallo spessore

che intercorre tra il carico di snervamento e quello di rottura, sintomo di un tratto di deformazione plastica uniforme molto ampio, grazie anche ad un allungamento consistente.

Gli acciai inossidabili austenitici AISI hanno valori molto simili sia nella caratterizzazione microstruttura che meccanica, in quanto in ambo i casi il rapporto d'aspetto si mantiene mediamente su valore di 1,6 e il diametro equivalente è comunque compreso tra i 40 e i 50 μ m, si registrano durezza che in media si attestano sui 250 HV_{100/15} e che aumentano di qualche decina di punti nel caso di durezza puntuali.

Per le prove meccaniche si ha sostanzialmente lo stesso carico di rottura attorno ai 640MPa mentre il carico di snervamento viene leggermente anticipato nell'AISI 316L dove vale 415MPa a dispetto dei 445Mpa forniti dall'AISI 304L. Sempre nella stessa prova si distinguono in entrambi i casi allungamenti percentuali molto interessanti, ma che ancora una volta avvantaggiano il 304L con il suo 54% rispetto al 45% del 316L.

Sono dunque sostanzialmente simili, anche se l'AISI 304L assicura un tratto di deformazioni plastiche uniformi maggiore sia come carico applicato sia come allungamento raggiungibile.

Per ultimo si ha il SAF 2205 che prevede una microstruttura non equiassica ma già distintamente allungata, in quanto il rapporto d'aspetto è compreso tra 1,75 e 2,5 , un diametro equivalente compreso tra 8 e 9 μ m e una durezza da non deformato pari a 280÷300 HV_{100/15} .

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dalle prove di trazione a temperatura ambiente esso manifesta un carico di snervamento attorno ai 760MPa e un carico di rottura a 800MPa, il tutto per un allungamento a rottura del 26%.

Tutti i dati permettono di inquadrare il materiale come poco malleabile, grazie alla elevata durezza allo stato non deformato e alla struttura molto fine. Il duplex risulta anche poco tenace; conclusione che traspare da più risultati: alti valori di carico di snervamento, modesta differenza tra il carico di snervamento e quello di rottura e allungamenti percentuali a temperatura ambiente al quanto minori se confrontati con gli altri.

9.3.Campioni realizzati in più stazioni di stampaggio

Una prima conclusione immediatamente ottenibile semplicemente osservando i provini a disposizione, è palese che gli acciai inossidabili non soddisfino le specifiche dimensionali richieste. Tramite l'utilizzo micrografie calibrate dell'intera sezione, si può entrare in possesso di determinate quote per eseguire in confronto. Le quote sono: la dimensione del diametro del tappo e della lunghezza del lato interno del gambo.

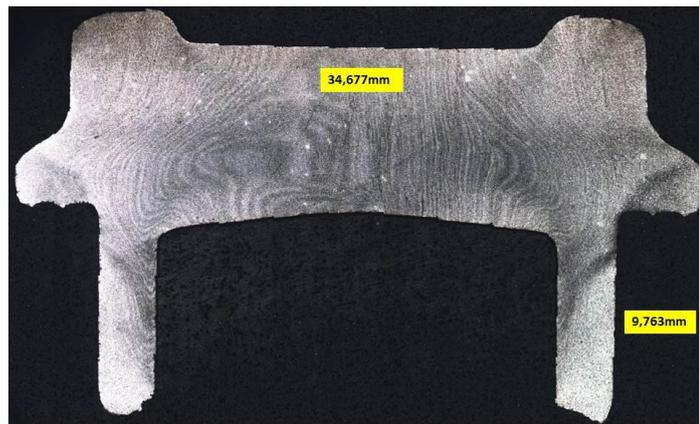


Fig.9.1.Immagine calibrata del campione "SAE 1005 3ST Nat"

Come misure da prendere a modello si utilizzano quella calcolate per il SAE 1005 con cui i tappi vengono attualmente realizzati. Il diametro registrato è di 34,7mm mentre la lunghezza del gambo, calcolata nella parte interna, è di 9,8mm. Rientrando nelle specifiche di produzione

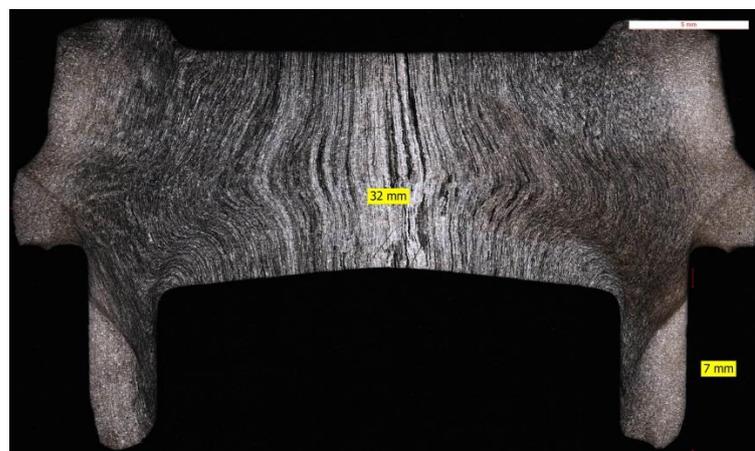


Fig.9.2.Immagine calibrata del campione "AISI 304L 3ST Nat"

Insufficiente risulta il comportamento dell'AISI 304L che non permette il corretto riempimento dello stampo, individuando insufficienze dimensionale quali: un diametro del tappo di circa 32mm e una lunghezza del gambo ridotta a 7mm.



Fig.9.5.Immagine calibrata del campione "AISI 316L Nat"

Il campione realizzato in AISI 316L dimostra un'insufficienza sulle stesse misure ma dimostrando una maggiore duttilità rispetto la sua controparte.

Anche in questo caso il diametro del campione rientra nei 32mm, mentre il gambo rimane ancora di 7mm.



Fig 9.4.Immagine calibrata del campione "SAF 2205 3ST Nat"

Il SAF 2205 ha un comportamento soddisfacente per quanto riguarda la dimensione nella zona maggiormente massiva, quella del diametro, raggiungendo i 32mm. Mentre

nel gambo, dove si ha meno materiale la lunghezza si limita a 6,3mm. Ambo le misure risultano però insufficienti per rientrare nelle specifiche richieste.

Tramite i valori assunti dalle variabili micrografiche è possibile osservare come tendenzialmente i valori corrispondenti alle posizioni interne della sezione (posizioni 2, 3, 6, 7) ve ne sia uno, per ogni percorso, che manifesta uno stato di leggero incrudimento, fatto che traspare anche in certi andamenti della durezza.

Non solo, ma mentre i punti che entrano in contatto con il punzone mobile spesso portano i segni della deformazione, quelli rivolti verso il punzone fisso hanno valori molto vicini a quelli rilevati per i campioni non deformati.

Rivolgendoci più a destra si constata come molto spesso i valori delle variabile assunti dalle posizioni accompagnino gradualmente la variazione fino al raggiungimento dei valori di deformazione presenti nelle curve occupanti l'ultima posizione dei profili.

Una volta superata la curva in corrispondenza della posizione 17, ovvero per quelle che ricoprono il gambo, è possibile affermare che il materiale frequentemente tende a raggiungere valori da non deformato.

Come è già stato fatto notare risulta la presenza di una fascia di materiale incrudito all'imbocco del gambo che è stata analizzata con determinati percorsi di microdurezza. In tutti i casi analizzati è possibile affermare che la fascia di materiale, attraversando lo spessore del gambo da destra a sinistra, si allarga abbassandosi progressivamente interessando continuamente una quantità maggiore di materiale. Non solo, ma per ogni percorso una volta entrati nella fascia incrudita si raggiungono valori di durezza paragonabili tra loro.

I valori di durezza maggiori sono stati individuati o nella parte centrale del terzo profilo, o in corrispondenza dell'attraversamento della fascia da parte della prima serie.

L'assunzione di prendere come riferimento un piano orizzontale posto ad un millimetro dal punto più basso ha consentito di osservare che nella prima parte il gambo risulta sostanzialmente indeformato per poi raggiungere valori durezza massima comparabili tra loro.

Alla luce dei dati in nostro possesso è possibile dunque affermare che il materiale della pastiglia al secondo stadio, una volta posto in compressione dal punzone smuove la parte di materiale ad esso adiacente che scorre lateralmente a formare la flangia e il gambo; isolando di fatto una parte di materiale, che rimane dunque indeformato, in corrispondenza di dei punzone fisso.

Solo in un secondo momento viene riempita la parte alta che va a formare la corona, movimento con il quale non sembra subire sostanziali deformazioni. Il versamento di

tale materiale in questa parte è da ricercarsi dalla minore resistenza opposta dalla zona della corona poiché incomincia a incrudire la fascia all'imbocco del gambo.

Generalmente è dunque riscontrabile dai dati un'oscillazione importante dei valori di durezza, considerando tutte le posizioni analizzate, segno che l'incrudimento è dato da una deformazione quanto più locale. Unica considerazione che non vede protagonista il SAE 1005.

Infine le linee di tendenza permettono di concludere che il materiale risulta tendenzialmente meno incrudito man mano che ci si sposta verso la parte esterna del campione.

Le considerazioni appena esposte possono essere considerate trasversali poiché riguardano indistintamente ogni campione a prescindere dal materiale utilizzato.

Osservando i valori dei diagrammi delle durezze e paragonandoli con i dati ottenuti dalle stesse variabili in condizioni di indeformabilità, è utile osservare come l'aumento di durezza mediamente registrato nel SAE 1005 è modesto in quanto si lascia deformare essendo un materiale duttile. L'aumento di durezza della coppia austenitica risulta importante, segno di una deformazione severa che ha portato a significativi livelli di incrudimento.

Mentre per il SAF 2205 si hanno valori di partenza già importanti dai quali non ci si scosta mediamente di molto. A differenza del SAE 1005 il SAF 2205 richiede molta più energia solo per permettere uno scorrimento interno del materiale.

9.4. Campioni realizzati con una singola stazione di stampaggio

Simili ma sostanzialmente diversi sono le conclusioni che si possono trarre dai risultati ottenuti dall'analisi dei campioni realizzati in un ciclo unico di stampaggio.

Si osserva inizialmente che anche in questo caso gli acciai inossidabili non dispongono della duttilità necessaria per il completo riempimento dello stampo, e lo si attesta con micrografie calibrate in cui vengono riportate delle quote significative per meglio comprendere quanto debba essere ancora formato. Si assumono come quote rappresentative: il diametro del tappo e la lunghezza del gambo considerando la parte interna che va dal punto 13 in poi.

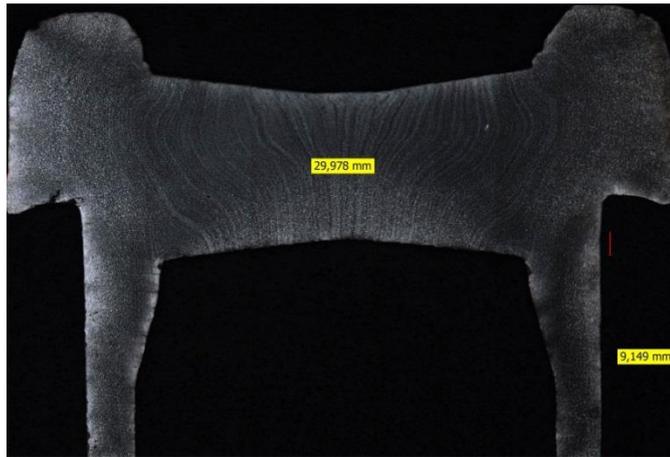


Fig.9.5.Immagine calibrata del campione “SAE 1005 Monostadio”

Si parte dunque dal campione che dobbiamo prendere a modello. Ovvero il SAE 1005 che dichiara una dimensione radiale di 29,97mm e una lunghezza del gambo di 9,15mm. La differenza dimensionale risultante dalla stessa analisi eseguita sui campioni austenitico ci fornirà un indicazione di quanto si deve migliorare l'utilizzo del materiale per arrivare agli stessi risultati.

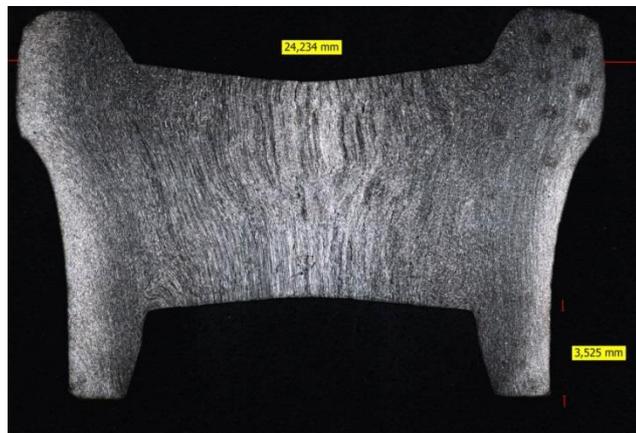


Fig.9.6.Immagine calibrata del campione “AISI 304L Monostadio”

Nonostante le buone premesse fornite dalla caratterizzazione meccanica anche l'AISI 304L dimostra importanti insufficienze dimensionali che non permettono il completo sviluppo della geometria. La dimensione radiale massima è di 24,23mm mentre la lunghezza del gambo è di appena 3,5mm, praticamente un terzo di quella richiesta.



Fig.9.7. Immagine calibrata del campione "AISI 316L Monostadio"

Supera le aspettative premesse, fatte nella parte dedicata all'analisi dei non deformati, l'AISI 316L che riduce, rispetto al 304L, lo scarto dimensionale che lo separa dai valori del modello. Il provino in esame raggiunge i 27,3mm di diametro del tappo e i 4,6mm della lunghezza del gambo.



Fig.9.8. immagine calibrata del campione "SAF 2205 Monostadio"

Buono risulta essere anche il risultato fornito dal bifasico SAF 2205 che vede una dimensione radiale massima di 26,42mm e una lunghezza del gambo di 4,1mm.

Gli acciai inossidabili hanno maggior difficoltà nella deformazione imposta per la formazione del gambo, in quanto risulta abbastanza severa e coinvolge progressivamente meno materiale. In queste condizioni si ha una buona deformazione iniziale, la quale viene limitata dall'aumentare dell'incrudimento fino a che il materiale

smette di deformarsi. In ognuno dei tre casi il risultato è insufficiente in quanto non vi è possibile eseguire l'operazione di filettatura del tappo.

Per quanto riguarda l'osservazione degli andamenti delle variabili si analizza in particolare il materiale SAE 1005, dai cui grafici si distinguono le zone deformate, ma nel complesso non si perviene a nessun andamento definito. La tendenza descritta dalle variabili informa di una diminuzione di incrudimento del grano in direzione radiale e definisce un cospicuo incremento di durezza rispetto a quella non deformata.

Considerando i campioni realizzati con gli acciai inossidabili risulta inequivocabilmente che le posizioni assunte come protagoniste della deformazione e quelle invece oziose abbiano caratteristiche estremizzate in quanto, nei grafici, vengono dunque a mancare intervalli più o meno lunghi in cui il valore delle variabili non si discosta di molto dai precedenti.

In particolare osservando attentamente i diagrammi di durezza emergono le considerazioni:

Il materiale raggiunge due valori definiti di durezza, infatti sebbene racchiusi in un campo di valori alquanto ristretto, si individuano nettamente due livelli di deformazione il cui passaggio da uno all'altro è accompagnato dai valori assunti dalle posizioni che li separano, tale considerazione viene a mancare solamente nei punti in corrispondenza del punzone fisso dove si raggiungono valori da non deformato.

Considerando le posizioni che definiscono un maggior livello di incrudimento si scopre che progredendo da questi verso l'interno il materiale raggiunge progressivamente uno stato interno uniforme di incrudimento che coinvolge tutta la parte destra dell'area analizzata e la parte a cuore della sezione del tappo. Vengono dunque esclusi i punti vicini al pistone fisso.

Nel progredire dell'analisi si ha la tendenza ad un aumento generalizzato della durezza, grazie appunto a valori presenti nella zona di materiale a contatto con il punzone fisso. Tale fatto certifica la considerazione del punto precedente in quanto si giunge sempre alla conclusione che la parte esterna del tappo sia maggiormente incrudita in confronto alla parte interna.

Sembra dunque che l'elevata velocità di deformazione che il materiale deve subire permetta il raggiungimento di valore determinato di durezza a prescindere dalla severità della deformazione imposta, in quanto il valore raggiunto risulta il medesimo a prescindere dal valore del raggio di curvatura scelto.

La limitazione dell'incrudimento raggiungibile comporta un incrudimento più uniforme del materiale nelle zone interne, se ne deduce che lo stesso non sia più localizzato nella singola posizione.

Si può dunque concludere che la deformabilità del materiale, eccetto la parte a contatto con il punzone fisso, è sfruttata al massimo.

Dalle considerazioni appena esposte si determina che il movimento del materiale sia il medesimo visto in precedenza per i tappi realizzati in più passaggi.

A ulteriore conferma dello stato di deformazione uniforme riscontrabile nella parte più interna intervengono le conclusioni dell'analisi, eseguita tramite percorsi di durezza localizzate, eseguite nel gambo. I valori di queste microdurezze hanno lo stesso comportamento di quelle registrate nel resto del provino mantenendosi su campo contenuto di valori. Anche in questo caso il percorso sito nella parte più interna ha una durezza media maggiore, mentre il percorso più esterno si mantiene su valori minori.

9.5. Confronto tra tappi realizzati in multistazione e tappi in monostazione

Si osserva come prima cosa che lo stampaggio del processo multistazione e quello della monostazione siano sostanzialmente simili in quanto i primi stadi sono di carattere preparatorio; ne deriva che le differenze che si andranno a riscontrare sono causa di altri fattori come: geometria, parametri di processo e altro ancora.

Generalmente, a prescindere dal materiale, si riconoscono dei connotati comuni che differenziano il comportamento del materiale nelle due versioni del processo.

Nei provini multistazione si ha un aumento considerevole della durezza limitatamente ai punti di deformazione raggiungendo valori diversi in funzione della deformazione subita; mentre nei provini monostadio si raggiungono, indifferentemente all'entità della deformazione, il valore massimo di incrudimento possibile.

Il processo produttivo della stazione singola garantisce sostanzialmente un miglior utilizzo della duttilità del materiale raggiungendo valori di incrudimento simili e uniformi

in tutta la sezione, eccetto quelli in posizione al punzone fisso. Mentre i tappi realizzati con la pressa National in determinati punti si manifestano ancora valori molto simili a quelli del non materiale deformato risultando soggetto ad un incrudimento non uniforme.

Tale caratteristiche si rispecchiano anche nella distribuzione dei valori di durezza stessi; in quanto nei tappi a stazione singola i valori hanno poca variabilità, mentre nei tappi realizzati a più stazioni sono soggetti ad una variabilità maggiore; nel complesso le due versioni mantengono valori medi comparabili.

La velocità di deformazione che è richiesta nella realizzazione del tappo in un solo ciclo di stampaggio implica una tendenza all'aumento dell'incrudimento in maniera radiale, all'opposto i tappi stampati in multistazione che determinano un incrudimento maggiore nella parte centrale dello stesso tendente a scendere una volta che si raggiunge la parte della corona e del gambo.

Un'ultima distinzione che merita attenzione è la presenza o meno della fascia incrudita all'imbocco del gambo che si manifesta nei campioni ottenuti per più stampaggi, situazione che dunque non si viene a creare nei tappi realizzati a stazione singola. Possibile influenza in caso può essere fornita dalla diversità di sezione, infatti i multi stazione sono più sviluppati in senso radiale, rispetto alla controparte, e ammettono quindi una sacca di materiale che può influire sul comportamento di tale zona.

Come si è notato dalle micrografie che riguardano l'intera sezione, la fascia di materiale incrudito parte proprio dalla zona appena citata.

Un secondo fattore, anche se meno influente, è il maggior spessore del gambo del monostadio rispetto a quello del multistadio.

Osservando le immagini della sezione completa si osserva come utilizzando gli stessi parametri di prova si abbia un diverso spessore della parte centrale del tappo nel passaggio tra SAE 1005 e i gli inossidabili.

Rimanendo immutata la pressione di stampaggio si nota un inspessimento della fascia che separa la curva chiamata 17 dalla 13, spessore che risulta tanto maggiore quanto maggiore è la durezza del materiale lavorato. Segno che, negli inossidabili devono essere aumentate caratteristiche che migliorino il suo comportamento quando è soggetto a estrusione ad impatto.

9.6. Conclusioni

Si prescrive dunque, in conclusione, l'utilizzo del processo a più stazioni di stampaggio in quanto i materiali incrudenti raggiungono valori dimensionali più vicini alle specifiche richieste. Questo accade in quando il materiale viene già deformato negli stadi precedenti con la creazione del bicchiere e la sollecitazione del punzone non incrudisce direttamente il materiale che dunque ha meno duttilità da sfruttare in deformazione.

Il fatto di rimanere più aderenti alle dimensioni imposte prevede minor numero di accorgimenti per sfruttare meglio la duttilità del materiale. Nessuno acciaio viene dunque escluso visto che sia gli AISI sia il SAF 2205 raggiungono valori molto simili anche nella lunghezza del gambo, dove trovano maggior difficoltà essendo una richiesta una deformazione meno massiva.

Considerando infine il progetto anche da un punto di vista economico, l'assunzione del bifasico anche per la realizzazione di altri prodotti è da ritenersi conveniente solo se risulteranno efficaci i miglioramenti per meglio sfruttare la duttilità.

Azioni migliorative

10.1.Introduzione

Si è optato per una doverosa distinzione delle azioni migliorative che si possono attuare, in quanto vi sono delle procedure efficaci a livello teorico ma non trovano sbocchi industriali. Oppure altre che violano le specifiche fornite dalla Zoppelleto.

Si precisa che le soluzioni proposte possono non solo essere implementati singolarmente ma anche in maniera combinata allo scopo di unire più azioni che agiscono simultaneamente.

10.2.Miglioramento teorico

Si presentano ipotesi di miglioramento teorico per gestire in maniera migliore la duttilità disponibile.

Il primo miglioramento risulta prettamente metallurgico e prevede un riscaldamento successivo ad ogni stadio; riscaldamento che deve essere fatto ad una temperatura tale da permettere la ricristallizzazione del materiale recuperando la duttilità originaria della grana cristallina.

Tale considerazione è sicuramente funzionante ma risulta impossibile implementare tale operazione nel ciclo di lavorazione, sia per quanto riguarda il consistente costo iniziale sia per quanto riguarda il posizionamento fisico dei forni tra uno stadio e il successivo.

Un'altra possibilità è quella di invertire la posizione reciproca del posizione fisso e del mobile, per avere differenti fenomeni deformativi, per verificare se vi è riscontrabile qualche vantaggio nella formazione della parte del gambo.

Tale soluzione è ostacolata dal costo in termini di tempo e materiali per la progettazione e realizzazione di matrice adeguate.

Ipotizzato come migliorativo è stato un aumento della profondità di stampaggio; questa viene ottenuta facendo avanzare ulteriormente il punzone mobile. Ma le prove preliminari che sono state condotte identificano la tendenza del materiale a fuori uscire dallo stampo, avendo maggior spinta radiale. Vi è dunque l'impossibilità di avere uno stampaggio a stampo chiuso.

10.3. Miglioramento del sistema produttivo e orizzonti di industrializzazione

Si fanno largo però anche proposte che potrebbero avere un inserimento nel sistema produttivo della Zoppelletto S.p.A. ma che devono essere ancora soggette a sperimentazione

Ulteriore potenziale azione migliorativa è la possibilità di stampare la lega inossidabile, scaldando le pastiglie a temperature comprese tra i 300 e i 600°C in modo da favorire i fenomeni deformativi. L'adattamento del processo passa per l'individuazione del lubrificante adatto, ma soprattutto della temperatura che garantisca in un processo produttivo che prodotto non formi precipitati infrangibili che ne compromettano la resistenza.

Una possibilità metallografica per aumentare, anche se limitatamente, la duttilità disponibile è quella di innalzare, nei materiali bifasici, la presenza della ferrite.

Tale possibilità vedrebbe però un calo della resistenza alla corrosione del materiale.

Un'ulteriore ipotesi percorribile è quella di inserire tra la seconda e la terza stazione di deformazione un'ulteriore operazione di stampaggio, che accompagni il più possibile il materiale al riempimento della cavità. Tale ipotesi deve essere valutata attentamente in quanto deve essere fornito maggior pressione al materiale poiché già nello stadio precedente ha subito una deformazione plastica permanente.

Un'ultima possibilità vede la modifica della geometria del tappo in modo da facilitare il flusso del materiale verso il gambo. Una maggiore quantità di materiale ritarderebbe l'incrudimento permettendo la formazione di un gambo di maggiore lunghezza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sito Zoppelletto spa: <http://www.zoppelletto.it/> 4 Febbraio 2014
- [2] Manas Shirgaokar, *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, Material Park, Ohio; USA, p.8
- [3] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, 2012, *Tecnologia meccanica, Milano, Italia*; Pearson Prentice Hall, p.320-321
- [4] Giusti F., Santochi M., 1992, *Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione*, CASA EDITRICE AMBROSIANA, Milano.
- [5] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, 2012, *Tecnologia meccanica, Milano, Italia*; Pearson Prentice Hall, p.300
- [6] *Forging e Forming*, ASM International, Material Park, Ohio; USA, p.25 – 37.
- [7] Documentazione tecnica fornita da *Henkel Italia*.
- [8] Documentazione tecnica Zoppelletto S.p.A.
- [9] Oerlikon balzers: <http://www.oerlikon.com/balzers/en/products-services/balinit-coatings/>, 25 Febbraio 2014
- [10] G. Di Caprio, 2001, *Gli acciai inossidabili: Capitolo 2*, Milano, Italia. Editore Ulrico Hoepli
- [11] Documentazione tecnica della Cogne acciai.
- [12] G. M. Paulocci, *Lezioni di metallurgia per laurea in ingegneria meccanica volume 3: Analisi, prove e controlli sui materiali metallici*, Edizioni libreria progetto, Padova; Italia.
- [13] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, 2012, *Tecnologia meccanica, Milano, Italia*; Pearson Prentice Hall, p.146
- [14] Q. Zhang, E. Felder, S. Bruschi, 2009, *Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test*, Trento, Italia, Journal of Materials Processing Technology
- [15] Documentazione tecnica MTS
- [16] W. Nicodemi, 1996, *introduzione agli acciai inossidabili*, Monza, Italia; Associazione italiana di metallurgia, p.19.
- [17] C. Crosera, 2005, *Tecnica professionale, Tecnologia meccanica, Milano, Italia*; Principato S.p.A.

APPENDICE A

Tabella dei risultati ottenuti caratterizzazione meccanica dei materiali a diverse velocità di deformazione

A.1.Introduzione

Si presentano, in queste pagine, la parte di tabella omessa nella parte testuale del testo.

La divisione è avvenuta sia per lega che per velocità di esecuzione della prova, e ognuna presenta la propria media e deviazione standard.

Legna	Campione	YN [Mpa]	UTS [Mpa]	n [α]	A _f [%]
SAE 1005	B1	260,4	365.74	0.1997	38
	B2	260,4	360.37	0.203	36
	Media	260.4	363,055	0,201	37
	Dev standard	0	3,797	0,002	1,414
	M1	292.17	381.44	0.267	31.5
	M2	295.97	385.91	0.2451	33.8
	M3	289.36	385.7	0.2111	32
	Media	292,5	384,35	0,241	32,433
	Dev standard	3,317	2,522	0,028	1,209
	A1	331.2	440.58	0.2171	34
	A2	355.4	462.44	0.21	34
	A3	324	443.81	0215	33.5
	Media	336,866	448,943	0,214	33,833
	Dev standard	16,449	11,799	0,003	0,288

AISI 304L 304L	B1	443.39	641.27	0.2814	53.7
	B2	443.38	641.61	0.2891	52.8
	Media	443,385	641,44	0,28525	53,25
	Dev standard	0,0070	0,240	0,005	0,636
	M1	466.72	624.55	0.2925	54.5
	M2	472.62	629.95	0.2855	53
	M3	474.10	632.98	0.2859	55
	Media	471,147	629,160	0,288	54,167
	Dev standard	3,904	4,270	0,004	1,041
	A1	438.37	641.7	0.3056	55.8
	A2	501.37	658.84	0.2818	54.5
	A3	503.71	661.51	0.2835	58
	Media	481,150	654,017	0,290	56,100
	Dev standard	37,067	10,750	0,013	1,769
AISI 316L	B1	418.38	646.61	0.3459	44.8
	B2	411.76	645	0.3329	45.5
	Media	415,070	645,805	0,339	45,150
	Dev standard	4,681	1,138	0,009	0,495
	M1	455.43	667.20	0.3008	58
	M2	446.27	665.45	0.3159	45
	M3	457.45	668.97	0.3073	48
	Media	453,050	667,207	0,308	50,333
	Dev standard	5,958	1,760	0,008	6,807
	A1	481.06	688.78	0.2925	51.5
	A2	476.35	693.06	0.3001	47.8
	A3	461.31	689.27	0.3064	49.3
	Media	472,907	690,370	0,300	49,533
	Dev standard	10,315	2,342	0,007	1,861

APPENDICE B

Indagini eseguite sui campioni non deformati in sezione trasversale

B.1.Introduzione

Sono i provini ottenuti per prendendo la sezione trasversale del provino, considerato non deformato, proveniente da una barra trafilata.

Si assumono dunque dei punti significativi nel quale rilevare i valori assunti dai parametri presentati quali: area, rotondità, orientazione, rapporto d'aspetto, diametro equivalente, durezza. I punti di indagine sono:

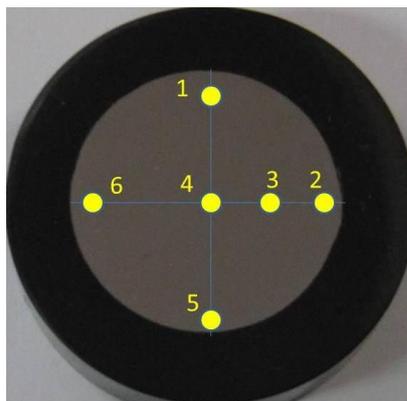


Fig. A.1 Rappresentazione dei punti di interesse sul un campione in sezione trasversale

Verranno di seguito snocciolati, campione per campione, i dati ad esso relativi:

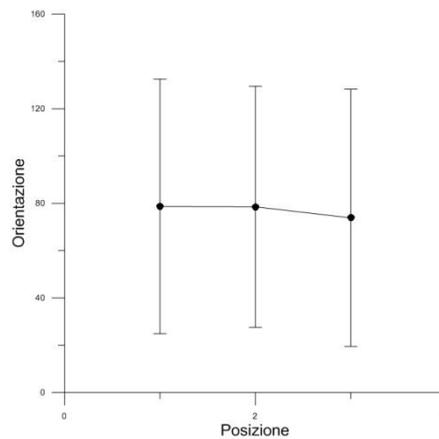
Campione “SAE 1005 ND trasv”

Mentre per quanto riguarda la lega C4C 45872 sono stati selezionati diversi punti di osservazione, restringendoli a tre che percorrono in direzione radiale il provino dal bordo al centro. Ne consegue che:

	Orientazione		Rapporto larghezza/altezza		Diam. equiv.(μm)	
	Media	Devstd	Media	Devstd	Media	Devstd
1	78,690	53,835	1,707	0,452	21,141	10,282
2	78,523	50,955	1,626	0,383	20,058	8,987
3	73,860	54,356	1,562	0,346	20,973	8,176

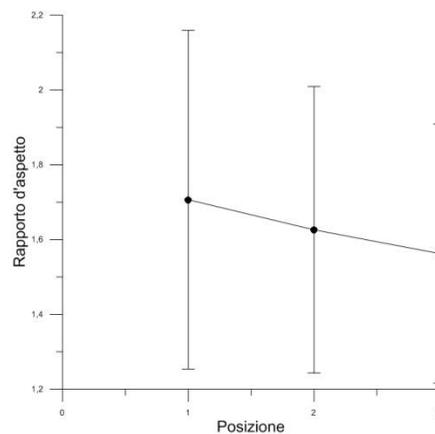
Vengono di seguito analizzate ciascuna della variabili scelta, per individuarne l'andamento lungo l'analisi

-orientazione



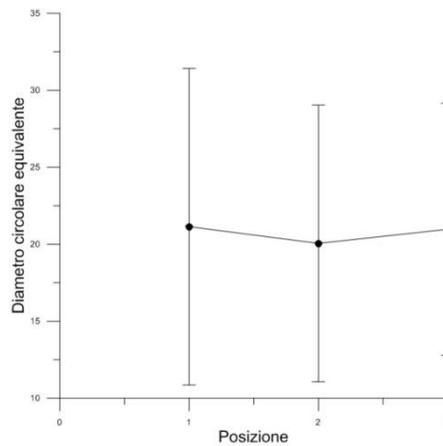
Valori di orientazione che si stabilizza anche in questo caso sugli 80°, mantenendo una costanza molto buona come variazione standard. La presenza, seppur debole, dell'incrudimento in trafilatura non porta ad alcuna modifica della variabile in analisi.

-rapporto d'aspetto



Il rapporto d'aspetto mantiene valori che si aggirano sull'1,5 dimostrando una tendenza al quanto netta di scemare avvicinandosi al cuore della barra. I valori assoluti della variabile sono in linea con quelli denunciati dai campioni analizzati in precedenza.

-diametro equivalente

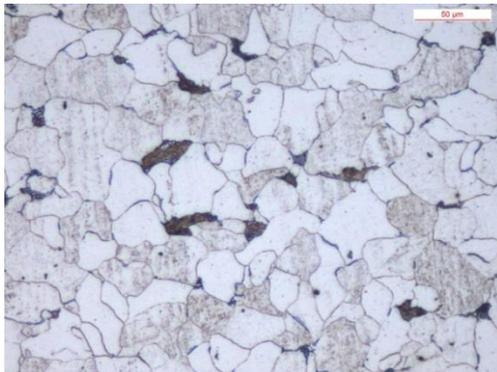


Spicca anche in questa occasione la diminuzione del diametro equivalente che attesta ora sui 20 μ m che vengono mantenuti per tutto il perdurare dell'indagine.

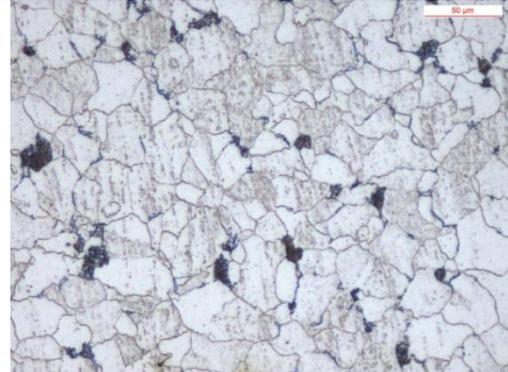
Valore nettamente inferiore a quelli denunciati dagli altri elementi aventi una struttura a grani.

Le micrografie, appunto per permettere una miglior visione del grano sono state realizzate con ingrandimenti superiori, si ha:

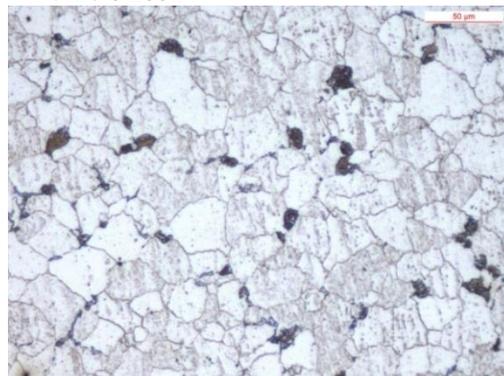
Punto 1 200x



Punto 2 200x

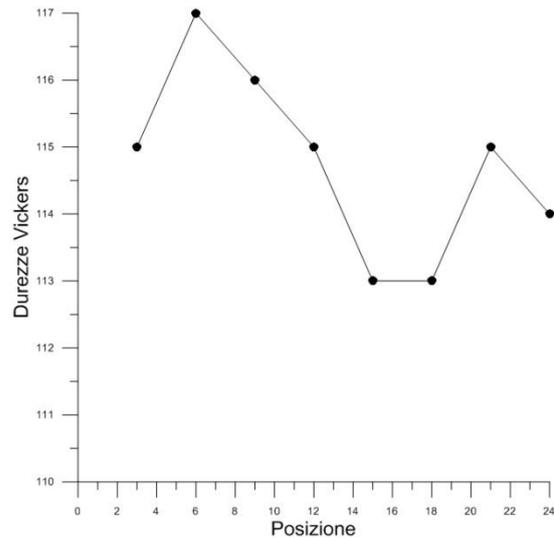


Punto 3 200x



Durezza

Distanza c	Misure
3	115
6	117
9	116
12	115
15	113
18	113
21	115
24	114

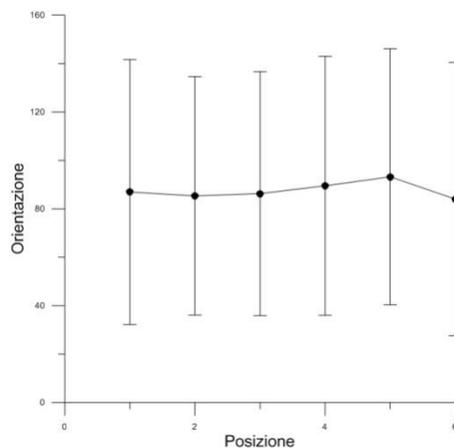


Il profilo appena tracciato trae in inganno chi lo osserva, in quanto si sarebbe portati a pensare che non vi sia alcuna correlazione certa; osservando invece i valori si nota come gli stessi siano fitti e sostanzialmente inalterati nello procedere da bordo a bordo. Tale nota porta a concludere che nonostante la lavorazione subita il materiale non sia stato in alcun modo soggetto ad incrudimento.

Campione "AISI 304L ND trasv"

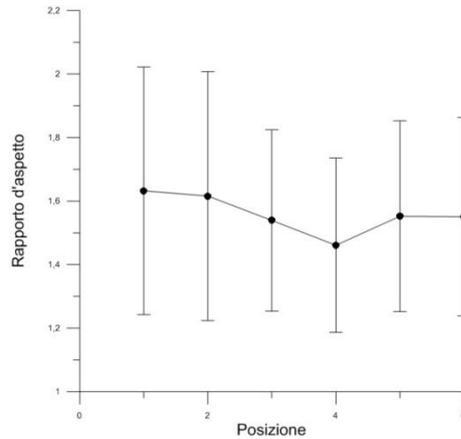
	Orientazione		Rapporto larghezza/altezza		Diam. equiv.(μm)	
	Media	Devstd	Media	Devstd	Media	Devstd
1	86,967	54,746	1,632	0,390	48,526	24,401
2	85,375	49,274	1,616	0,392	49,859	26,290
3	86,326	50,376	1,539	0,285	46,344	20,640
4	89,527	53,488	1,461	0,274	49,302	21,558
5	93,255	52,881	1,552	0,301	50,375	23,699
6	84,047	56,481	1,551	0,312	47,728	22,760

-orientazione



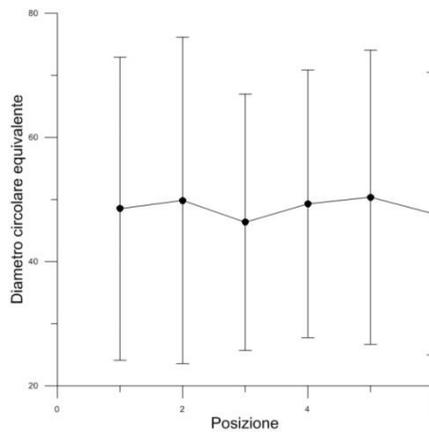
Si ha un comportamento pressoché costante con valori contenuti tra 80° e 90° che sono tipici del materiale indeformato.

-rapporto d'aspetto



Anche il rapporto d'aspetto si stabilizza su valori molto simili che identificano in ugual modo la tendenza alla circolarità descritta dunque dalla inderformità, ma anche la deviazione standard si mantiene grossomodo sui medesimi valori.

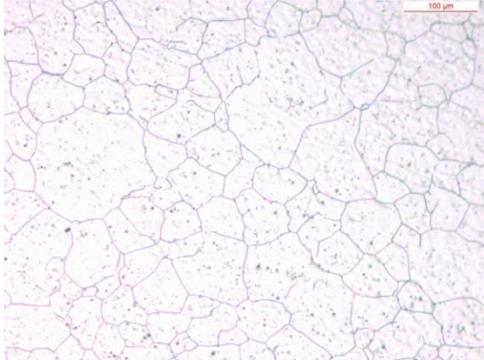
-diametro equivalente



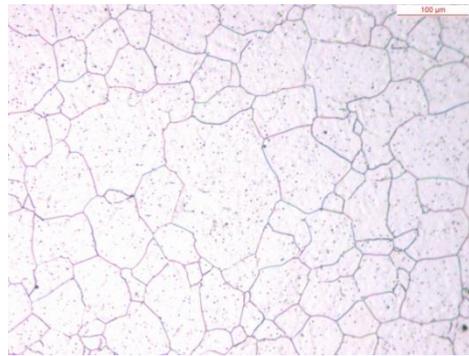
Anche in questo caso i valori si stabilizzano su uno in particolare, attorno ai 50 μ m, valore che può dunque essere assunto come rappresentativo dello stato privo di deformazione.

Le micrografie ottenute sono riportate di seguito:

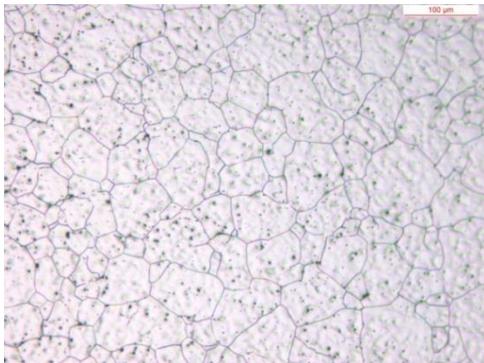
Punto 1 100x



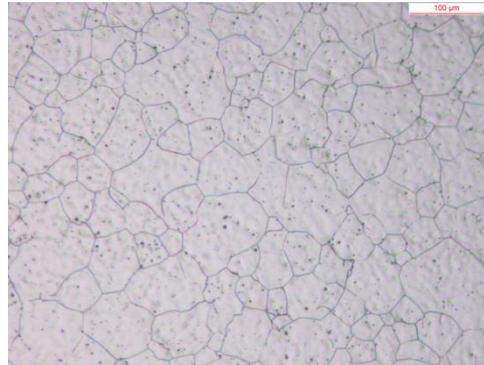
Punto 2 100x



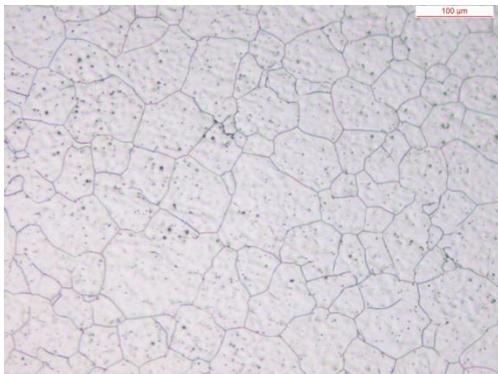
Punto 3 100x



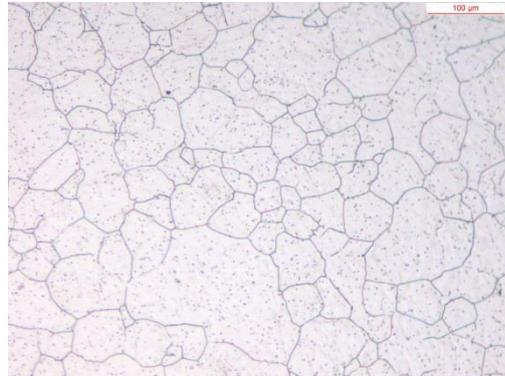
Punto 4 100x



Punto 5 100x

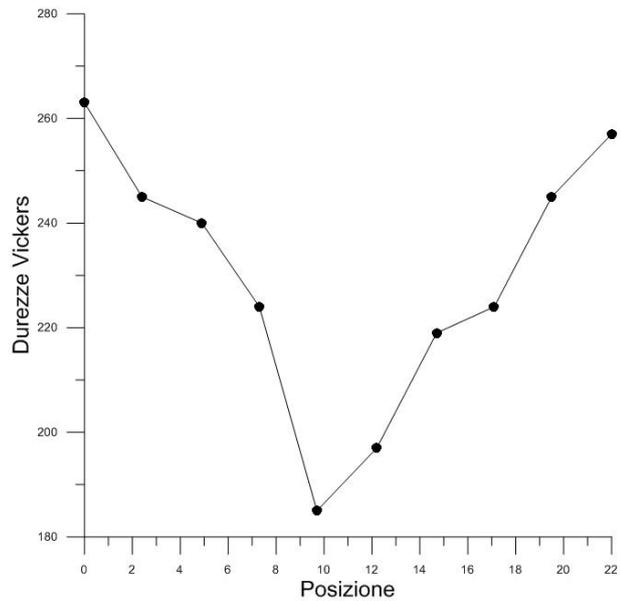


Punto 6 100x



Durezze

Distanza dal bordo	Misure
0	263
2,4	245
4,9	240
7,3	224
9,7	185
12,2	197
14,7	219
17,1	224
19,5	245
22	257

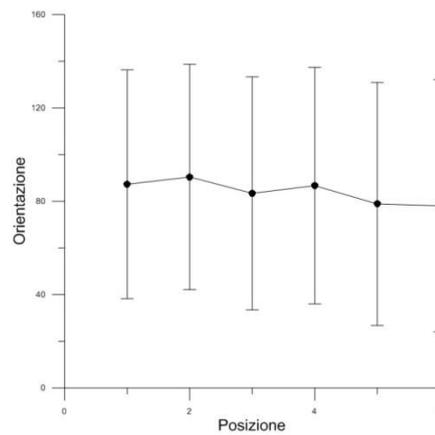


Le durezze dunque eseguite seguendo percorrendo il diametro a passi costanti, grafico denota come al centro della barra trafilata il materiale sia nettamente più tenero che nella superficie, posizione nella quale il materiale viene incrudito durante la lavorazione.

Campione "AISI316L ND trasv"

	Orientazione		Rapporto larghezza/altezza		Diam. equiv.(μm)	
	Media	Devstd	Media	Devstd	Media	Devstd
1	87,301	49,011	1,603	0,394	46,747	24,363
2	90,412	48,254	1,564	0,395	45,012	22,885
3	83,413	49,919	1,522	0,317	44,691	22,377
4	86,695	50,657	1,512	0,359	44,913	22,047
5	78,856	52,061	1,591	0,438	47,127	24,493
6	78,087	54,059	1,559	0,326	48,465	25,860

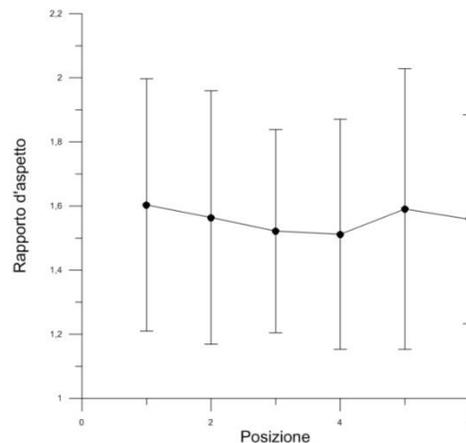
-orientazione



Per quanto riguarda la sezione trasversale del campione in 316L abbiamo che si mantiene ancora tra i 75° e 80° circa che trasmette il fatto che non abbia subito deformazione.

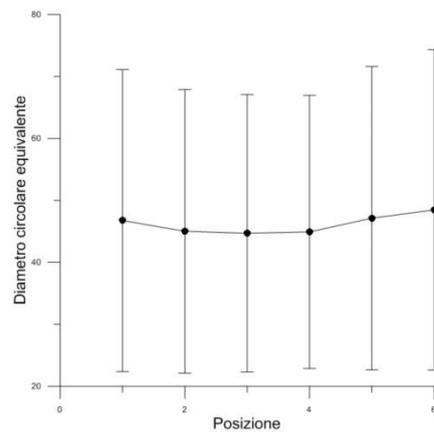
La parte superficiale della barra trafilata, deformata, non da ripercussioni a livello di orientazione del grano.

-rapporto d'aspetto



I valori assunti dalla variabile sono sostanzialmente molto simili a quelli osservati per il 304L, ma sostanzialmente, in direzione radiale si ha un lieve e poco significativa diminuzione di rapporto d'aspetto. Mantenendo valori di variazione standard molto simili.

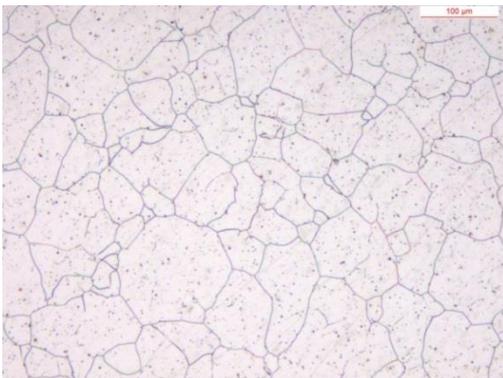
-diametro equivalente



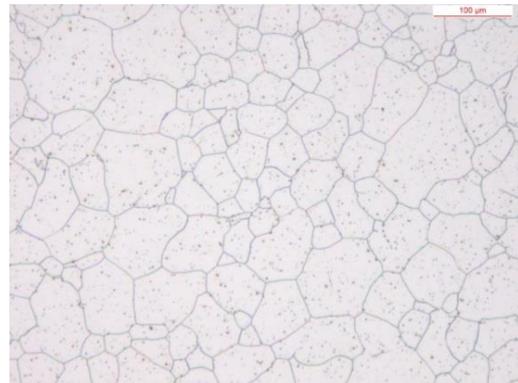
I valori medi sono leggermente inferiori di quanto riscontrato nella sua controparte in 304L, valore che si può assumere come relativo all'assenza di deformazione del materiale.

Le micrografie relative a tale campione sono riportate di seguito:

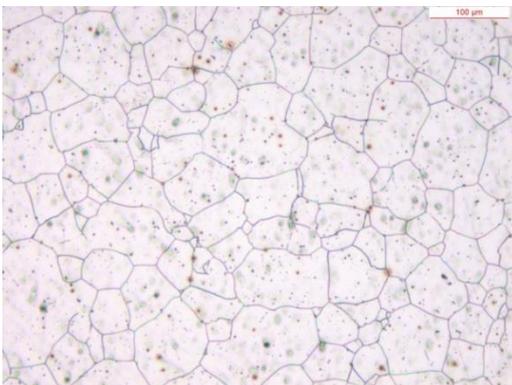
Punto 1 100x



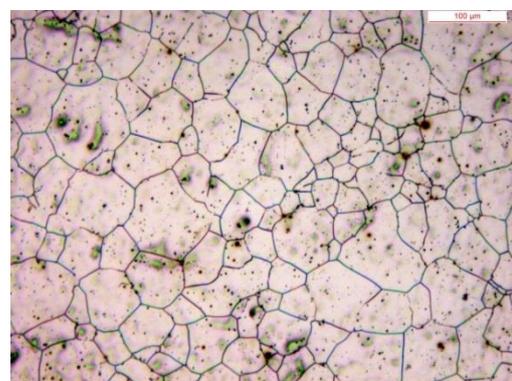
Punto 2 100x



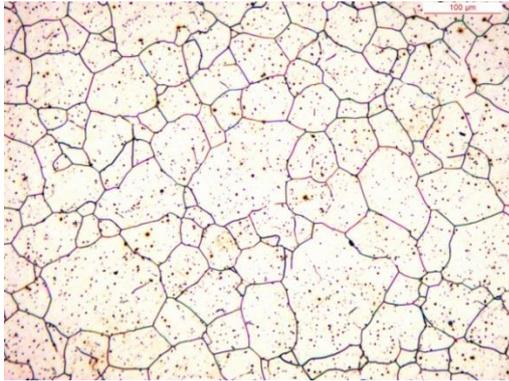
Punto 3 100x



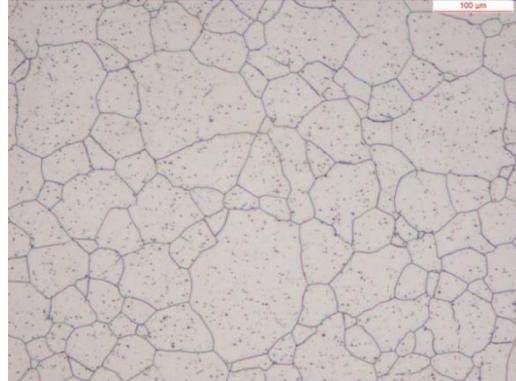
Punto 4 100x



Punto 5 100x

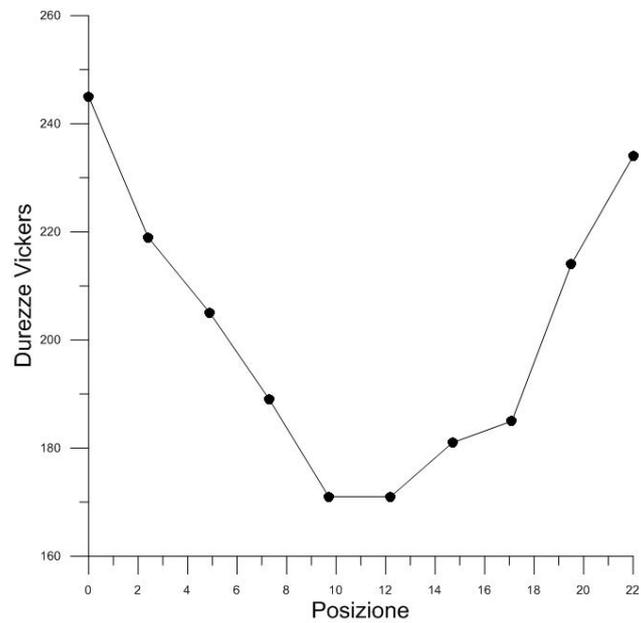


Punto 6 100x



Durezza

Distanza dal bordo	Misure
0	245
2,4	219
4,9	205
7,3	189
9,7	171
12,2	171
14,7	181
17,1	185
19,5	214
22	234

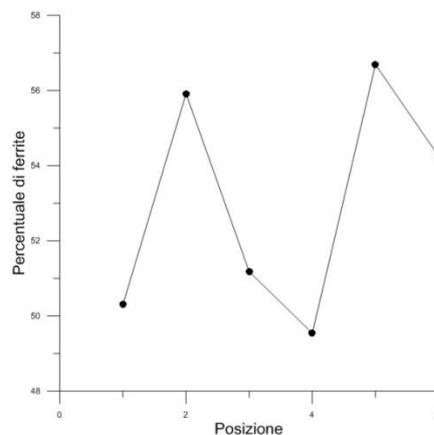


Il percorso secondo il quale sono state fatte le misure percorre il diametro della barra trafilata di 22mm. E' netta anche in questa occasione la decadenza della durezza nella parte centrale dove non ha subito deformazione di circa 70HV.

Campione "SAF 2205 ND trasv"

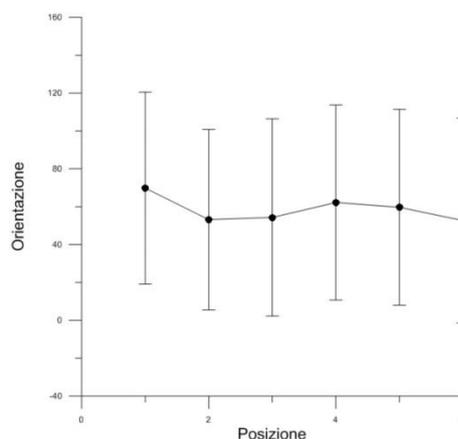
	Percentuale area(%)		Orientazione		Rapporto larghezza/altezza		Diam. equiv.(μm)	
	Media	Devstd	Media	Devstd	Media	Devstd	Media	Devstd
1	50,304	-	69,836	50,702	2,809	8,331	7,764	28,915
2	55,914	-	53,176	47,637	2,178	1,271	4,433	18,844
3	51,180	-	54,348	52,053	2,031	1,363	5,178	15,244
4	49,543	-	62,217	51,512	1,909	0,701	5,753	16,095
5	56,691	-	59,705	51,713	2,010	1,307	5,315	27,174
6	54,253	-	52,692	54,142	2,003	1,742	8,934	42,669

-percentuale di ferrite



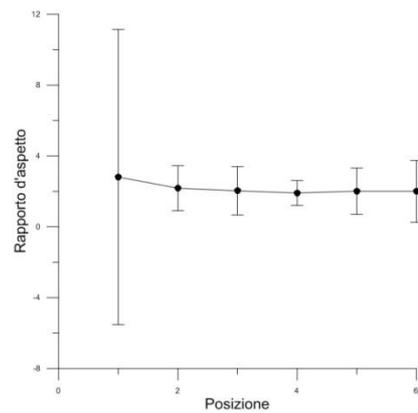
Rimanendo nella più ampia generalità, si può dedurre che per i valori rilevati sul bordo siamo maggiori di quelli ottenuti in direzione radiale. Generalmente le percentuali si aggirano attorno a 50%.

-orientazione



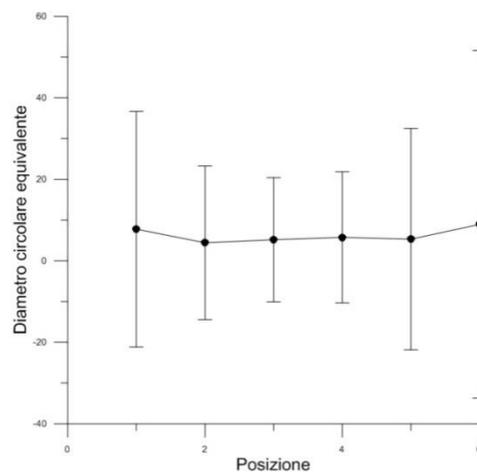
Sempre i già citati valori protagonisti di questa parte, anche se in qualche punto scemano per valori leggermente minori. Anche i valori della deviazione standard mantengono dunque valori simili

-rapporto d'aspetto



Il rapporto d'aspetto si mantiene come detto nei rispettivi valori, anche se la deviazione standard del primo valore ha connotati anomali e quindi è possibile trascurarla, potendo prendere in considerazione altri tre punti che vedono le stesse condizioni.

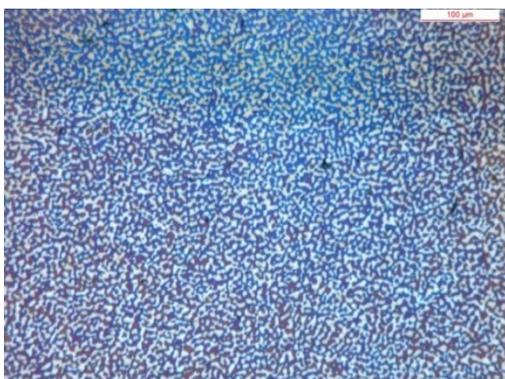
-diametro equivalente



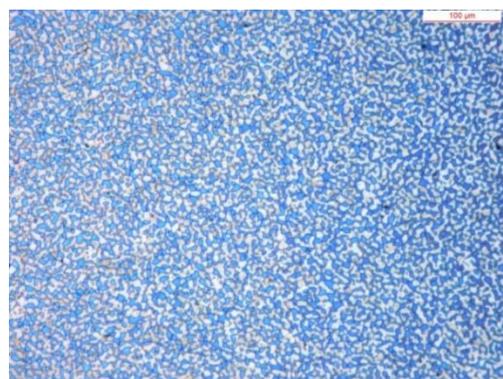
Avendo isole di ferrite di dimensioni di molto inferiori rispetto alla rimanente parte, si ottiene un valore del diametro medio molto inferiore, che si aggira sui $9\mu\text{m}$, variabile che non trova cambiamenti rilevanti nei casi di deformazione o meno.

Seguono le micrografie nei rispettivi punti già segnalati:

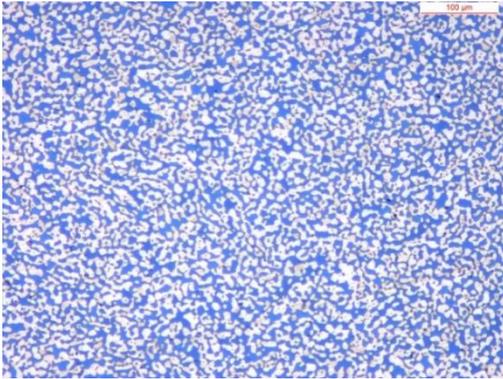
Punto 1 100x



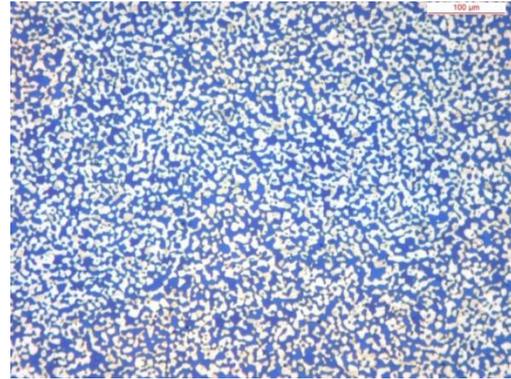
Punto 1 100x



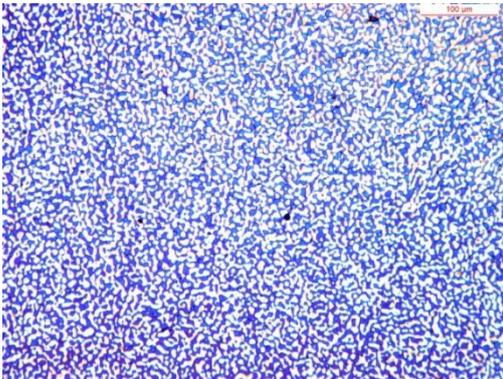
Punto 3 100x



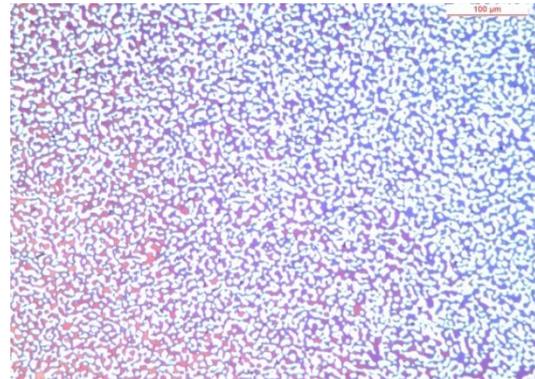
Punto 4 100x



Punto 5 100x

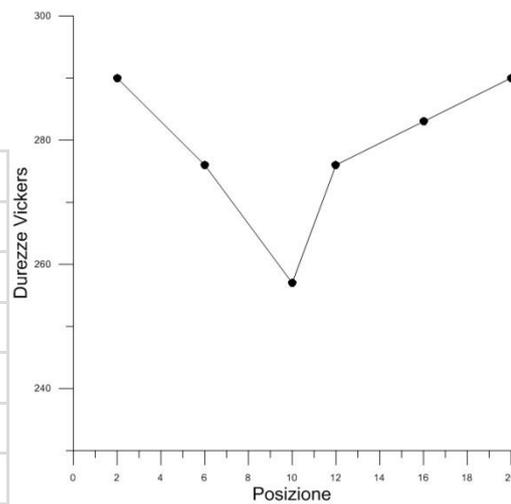


Punto 6 100x



Durezza

Distanza bordo	misure
2	290
6	276
10	257
12	276
16	283
20	290



Anche l'austenoferritico, tende ad incrudire nei punti in cui ha subito la sollecitazione, questo giustifica l'andamento delle durezze. Un andamento che risulta essere grossomodo speculare per le due semicirconferenze analizzate.

APPENDICE C

GRAFICI PRIMI E SECONDI STADI

C.1.Introduzione

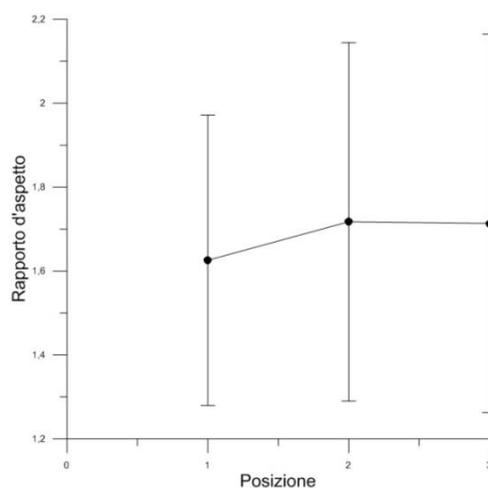
La appendice B è riservata alla successione dei grafici che rappresentano gli andamenti delle variabili di interesse: rapporto d'aspetto, diametro equivalente, durezza e microdurezze. Tali risultati non determinano infatti risultati importanti per la conduzione dell'analisi, ma sono comunque utili a comprendere le diverse velocità di incrudimento.

Campione "SAE 1005 1ST Nat"

La propria tabella di dati riassuntivi compare come:

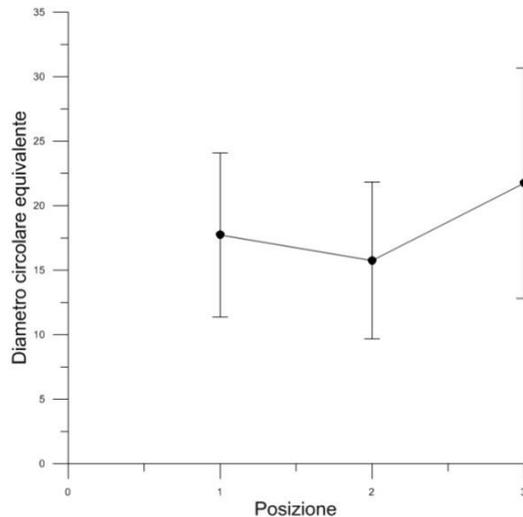
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	1,626	0,346	17,731	6,354	174,6667	3,21455	129,3333
2	1,717	0,427	15,754	6,072	182	7,211103	131,3333
3	1,714	0,451	21,745	8,924	191		130

-rapporto d'aspetto



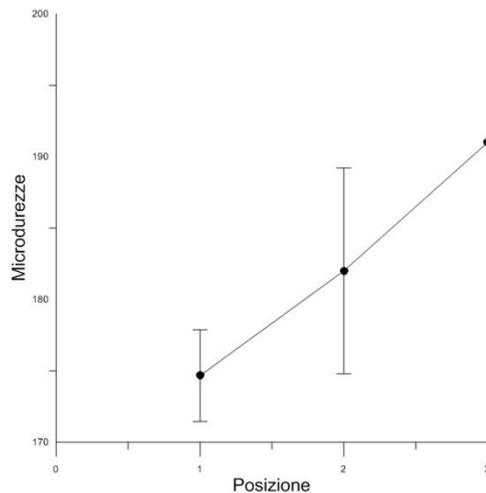
La tendenza espressa dalla variabile rapporto d'aspetto risulta essere alquanto costante per quanto riguarda tutte le misure, seguito di una influenza limitata della variabile alla deformazione.

-diametro equivalente



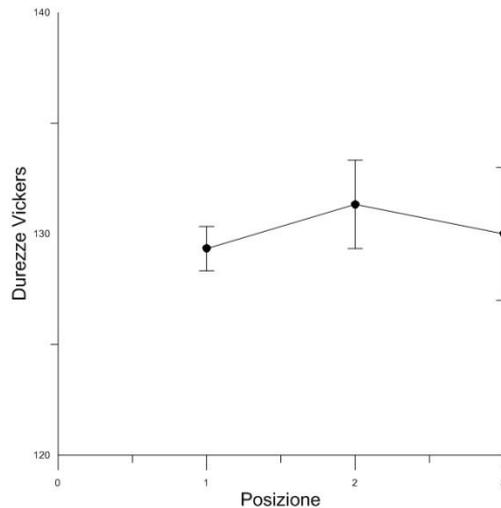
Il diametro equivalente riscontra una posizione distinta specialmente in quella in cui avviene il cambio di direzione del materiale, il terzo punto. Mentre per la prima parte non si identificano considerevoli differenze.

-microdurezza



L'andamento della durezza localizzata può essere forviante ad un primo sguardo, in verità la scala delle ascisse tende ad essere ingannevole poiché la differenza massima riscontrabile è di appena 20HV. Tale considerazione permette di dedurre solamente che non vi siano nei punti di analisi differenze apprezzabili per quanto riguarda la microdurezza.

-durezza



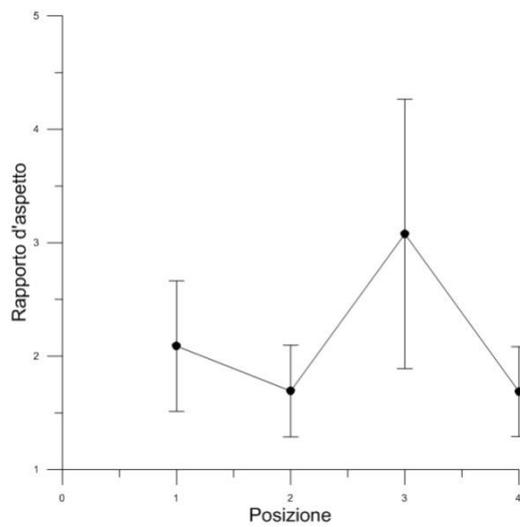
Anche in questa situazione la prima impressine deve essere poi rivalutata osservando la scala dell'asse delle ordinate e considerando che la differenza massima imputabile è di neanche 4HV. Verificato che la durezza esprima l'entità dell'incrudimento è possibile concludere che il C4C, in questo stadio realizzativo non dimostra tendenza all'incrudimento.

Campione "SAE 1005 2ST Nat"

Sono ottenibili i valori del rapporto d'aspetto e del diametro equivalente. Vanno ad ultimare la tabella riassuntiva i valori della macrodurezza e della microdurezza nei punti di analisi:

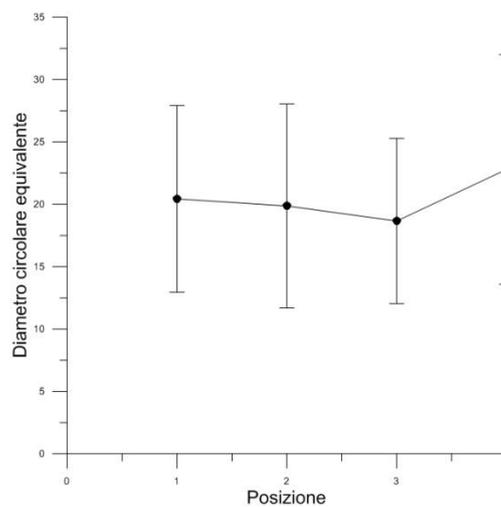
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	2,089	0,575	20,434	7,482	203	4,358899	168,6667
2	1,693	0,404	19,868	8,176	193,6667	7,234178	157,6667
3	3,078	1,187	18,657	6,622	215	2,645751	175
4	1,688	0,396	22,798	9,209	174,3333	1,527525	140

-rapporto d'aspetto



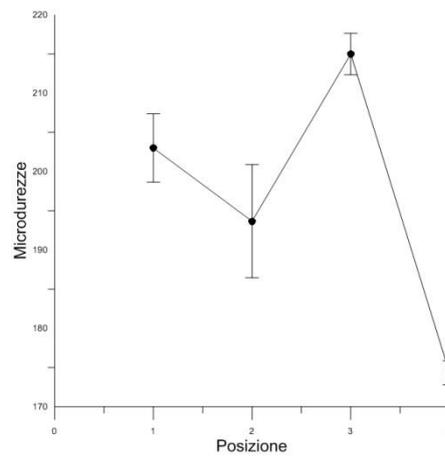
Il rapporto d'aspetto risulta essere influenzato dalla deformazione riscontrabile nel terzo punto. Punto in corrispondenza del quale si evidenzia un picco della funzione a tratti che lo descrive.

-diametro equivalente



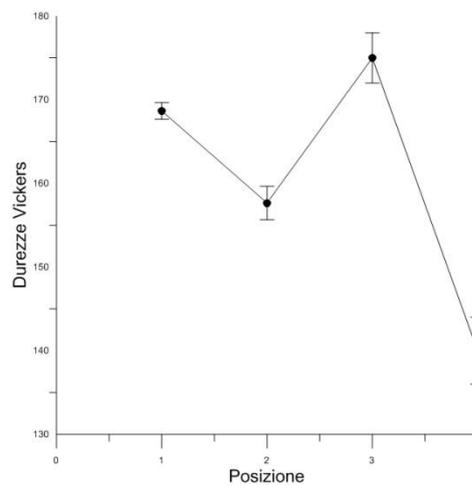
Ad una prima impressione l'andamento definito dalla variabile caratterizzante sembra non avere una correlazione coerente con la tesi fin qui supportata, ma ancora una volta si invita ad osservare la scala delle ordine dalla quale si deduce che la massima differenza è di $5\mu\text{m}$, sostanzialmente nulla.

-microdurezza



La microdurezza in questione segnala, come avvenuto negli casi, un aumento di durezza in corrispondenza della terza posizione. La differenza si basa su appena 25HV testimonia un aumento della energia di deformazione assorbita.

-durezza



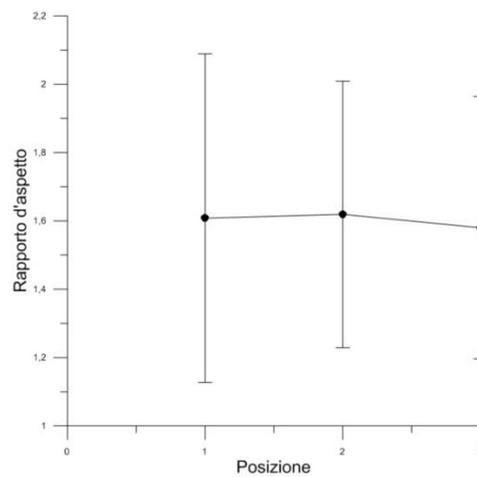
Le macrodurezze calcano in maniera fedele quanto espresso dalle durezza puntuali ne deriva che le considerazioni ultime debbano essere considerate le medesime.

Campione "AISI 304L 1St Nat"

Una volta compilata la tabella appare in questo modo:

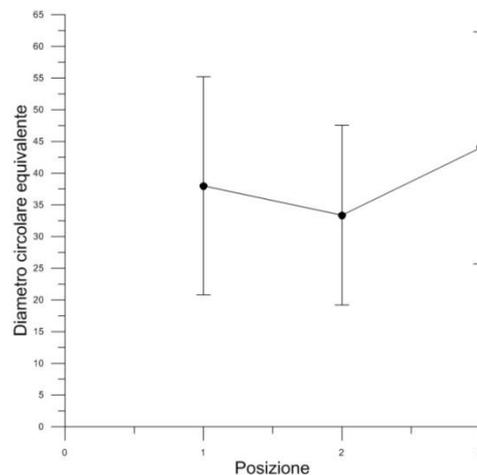
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	1,608	0,481	37,998	17,198	300,500	18,174	209
2	1,619	0,390	33,377	14,191	286,333	4,933	215,3333
3	1,580	0,384	43,990	18,308	315,500	11,475	290

-rapporto d'aspetto



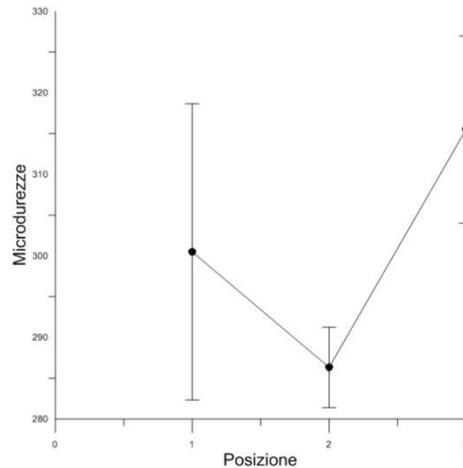
Dai valori assunti dal rapporto non è possibile distinguere alcun stato nettamente caratteristico del materiale in quella determinata zona. Lo stesso infatti mantiene una buona costanza per tutte e tre le posizioni di analisi.

-diametro equivalente



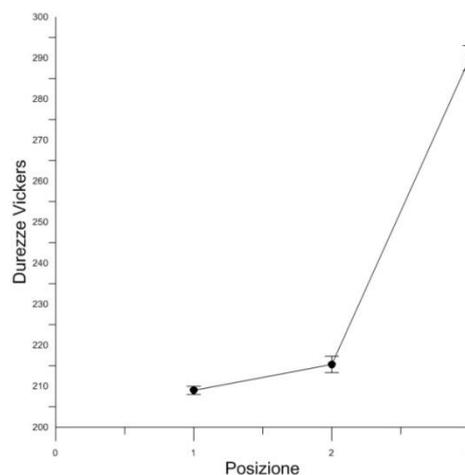
La variabile considerata risulta, ad una prima osservazione, più sensibile allo stato deformativo rispetto al rapporto d'aspetto. L'andamento evidenzia un calo del valore in corrispondenza del secondo punto, anche se non è possibile affermare formulare conclusioni certe poiché i punti si mantengono sempre su determinati valori.

-microdurezza



La possibilità che la posizione 2 possa essere rimasta non deformata ci viene sostanzialmente verificata dai assunti dalla microdurezza, variabile che crolla esattamente in corrispondenza di tale punto di analisi. Se si pensa alla microdurezza come variabile utile a indentificare le zone che si sono incrudite, allora è possibile considerare che nei punti in esame non vi è una cospicua differenza di deformazione anche la stessa risulta inevitabilmente più accamtuata in corrispondenza della curva.

-durezza

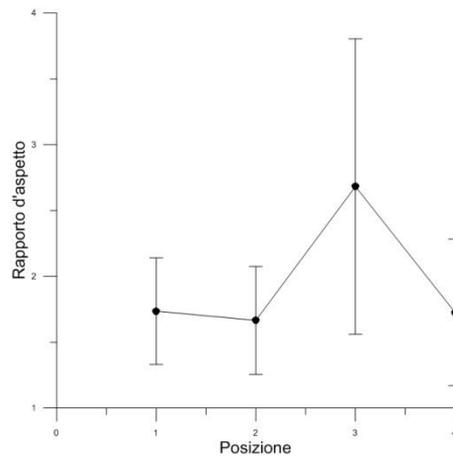


La macrodurezza Vickers determina in questo ambito, valori molto simili per i due valori che si trovano direttamente a contatto con pistoni dello stampo, che non sembrano incrudirsi se confrontati con la posizione presente nella zona creata per deformazione plastica.

Campione "AISI 304L 2ST Nat"

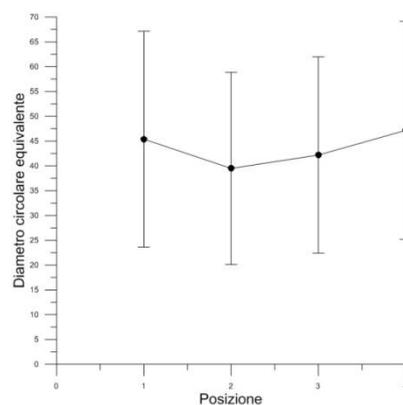
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	1,736	0,405	45,383	21,767	356,8	24,24252	294,6667
2	1,666	0,410	39,492	19,355	364,8	28,49035	280,6667
3	2,683	1,121	42,186	19,782	376,5	14,27118	330
4	1,727	0,557	47,165	22,000	304,8	14,07835	305

-rapporto d'aspetto



Sicuro valore di interesse in questo caso è quello che riguarda il valore della variabile nella posizione 3, in cui il materiale è costretto a cambiare direzione che risulta dunque essere maggiormente deformato rispetto agli altri. Le misure eseguite nelle rimanenti posizioni non hanno valori tali da poter dedurre una tendenza specifica.

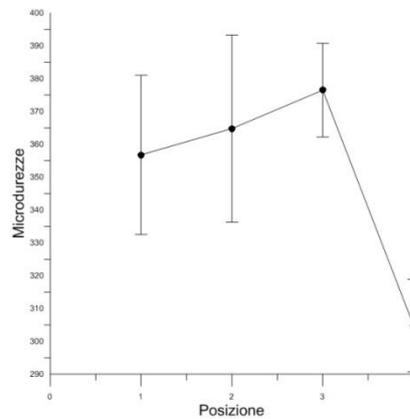
-diametro equivalente



Il valore assunto dalla variabile non è dei più rappresentativi per comprendere in modo completo gli stadi deformativi presenti. Unica posizione distinguibile è quella del punto 2 dove si ha una leggera tendenza all'incrudimento. Possiamo concludere solamente

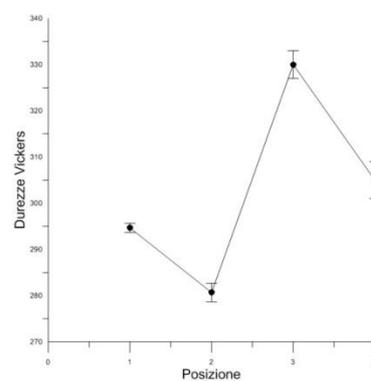
che il diametro si mantiene sostanzialmente costante a prescindere dalle posizioni di analisi.

-microdurezza



Dalla microdurezza traspare come nel punto di indagine della curva, la deformazione che subisce il materiale e l'incrudimento che ne consegue risultano nettamente maggiori che nei rimanenti punti in esame, definendo un recupero di deformabilità nell'ultimo punto selezionato.

-durezza

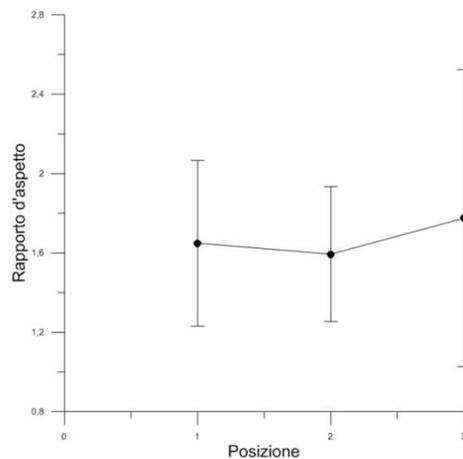


Ancora una volta la terza posizione assume valori di entità maggiore rispetto ai rimanenti punti, anche rispetto ai casi precedenti è distinguibile un più pronunciato calo in corrispondenza del secondo punto.

Campione "AISI 316L 1ST Nat"

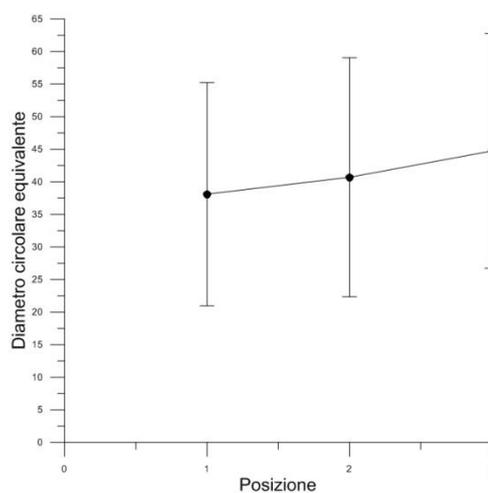
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezze HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	1,649	0,418	38,113	17,133	272,2	35,6609	204,3333
2	1,594	0,340	40,701	18,353	298	5	201,6667
3	1,775	0,748	44,745	18,015	336	3,605551	263

-rapporto d'aspetto



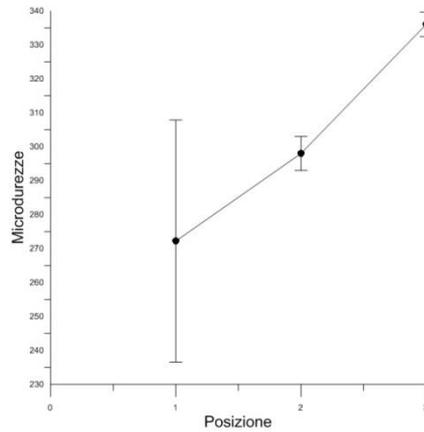
Il rapporto d'aspetto mette in evidenza la posizione terza, che identifica la curva, come la più soggetta alla deformazione, mentre per le rimananti posizioni non risulta distinguibile un andamento certo.

-diametro equivalente



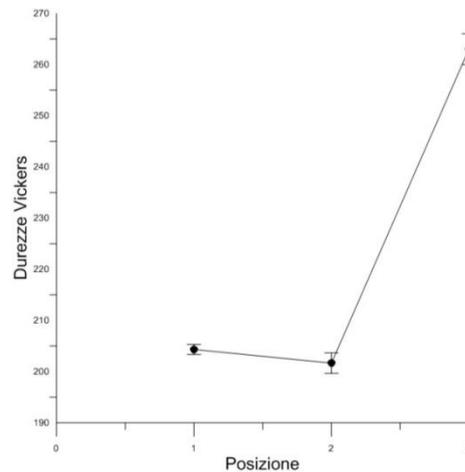
Ad una prima osservazione il grafico in esame risulta avere un andamento molto anomalo, determinando un materiale progressivamente meno deformato. Ad una attenta osservazione è possibile notare come il valori siano pressappoco raccolti in $7\mu\text{m}$.

-microdurezza



L'analisi della microdurezza porta inevitabilmente alla definizione di un maggior valore per quanto riguarda la posizione in curva, l'andamento trasmette anche in questo caso la deformazione subita dalla posizione in esame.

-durezza

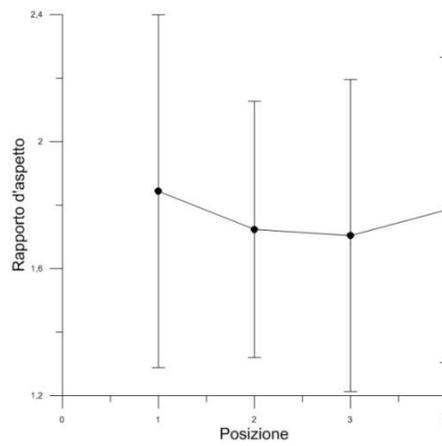


Anche per le misure di durezza il punto numero tre risulta nettamente il più duro, confermando le conclusioni già formulate sul grafico delle microdurezze.

Campione "AISI 316L 2ST Nat"

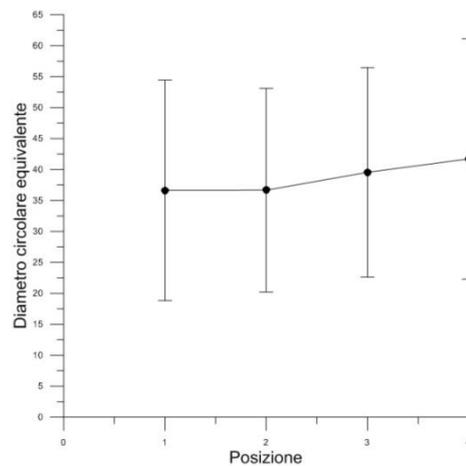
Posizione	Rapporto d'aspetto		Diametro equivalente(μm)		Microdurezza HV _{0,2/15}		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	1,844	0,556	36,633	17,816	369,8	17,39828	280,6667
2	1,724	0,404	36,665	16,459	340,25	6,946222	266
3	1,704	0,492	39,547	16,916	360,25	12,84199	298
4	1,785	0,481	41,725	19,419	351,75	9,322911	276

-rapporto d'aspetto



L'andamento descritto dal rapporto d'aspetto risulta pressoché costante attraverso i quattro punti di indagine, unico punto in cui è possibile riscontrare una anomalia è il valore della terza posizione.

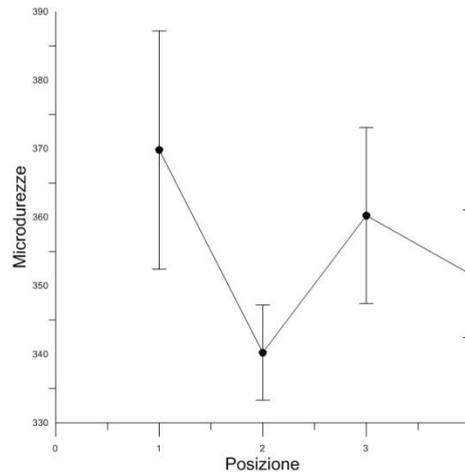
-diametro equivalente



Anche il profilo descritto dalla tendenza del diametro equivalente risulta praticamente costante nella sua evoluzione tra le varie posizioni in esame. Come prima anche il

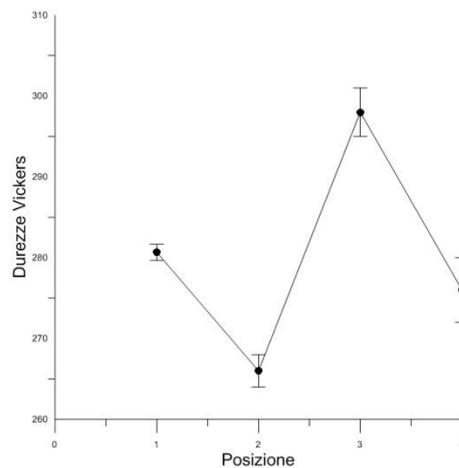
questo caso il valore assunto dal punto tre non convince pienamente, anche se è necessario precisare che i valori ha una differenza massima di soli 5 μ m.

-microdurezza



In questo caso la durezza localizzata presenta si un comportamento distintivo nel punto terzo, con aumento di tendenza. Per quanto riguarda il primo punto si ipotizza che il valore sia forviato dal fatto che le misure effettuate siano state eseguite ad una distanza esigua dal bordo superiore, quindi le misurazioni sono state realizzate su una zona ancora interessata dalla deformazione fornita dal pistone mobile.

-durezza

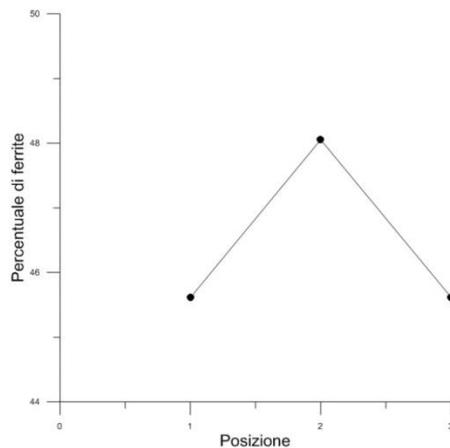


L'andamento riflette esattamente quello descritto per la controparte in 304L, descrivendo un massimo in corrispondenza del punto tre e un minimo in corrispondenza della posizione due, sita a contatto con il pistone fisso.

Campione "SAF 2205 1ST Nat"

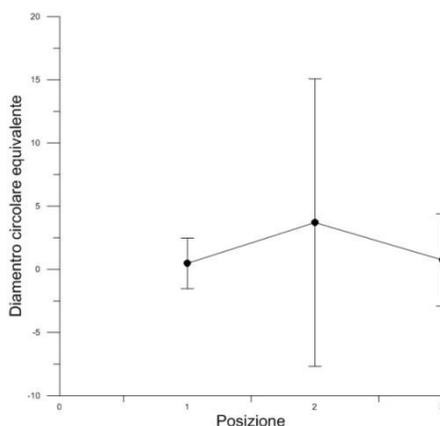
Posizione	Percentuale di ferrite(%)		Diametro equivalente(μm)		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Valore
1	45,614	-	0,477	2,001	288
2	48,054	-	3,702	11,378	283,3333
3	45,619	-	0,740	3,646	330

-percentuale di ferrite



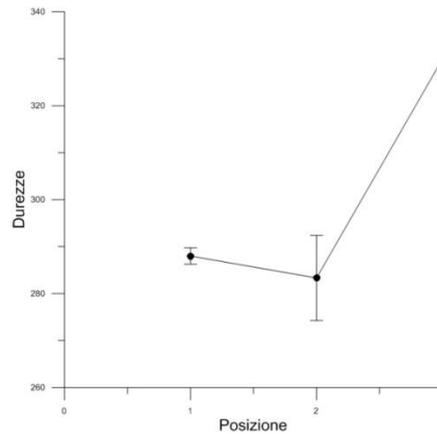
Dalla misurazione effettuata nei tre punti di interesse, è nettamente distinguibile una maggior percentuale di ferrite nella seconda zona. La posizione risulta anche la meno deformata, si ipotizza quindi una connessione tra le due parti.

-diametro equivalente



Ancora una volta il diametro equivalente individua nel punto secondo, tra quelli protagonisti della nostra analisi, uno stato nettamente meno soggetto a deformazione plastica e quindi meno incrudito.

-durezza



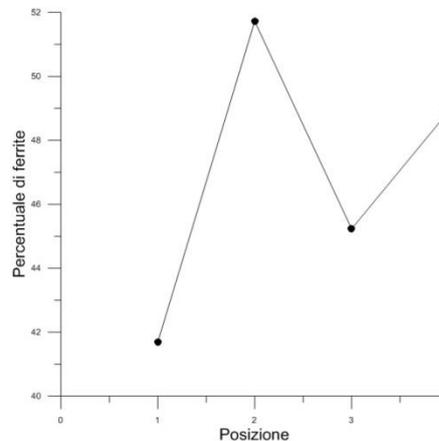
Seguendo l'andamento descritto dalle misure di durezza si evince che il punto situato nella curva, raggiunge valore di incrudimento di molto maggiori se confrontati con i rimanenti due punti.

Campione "SAF 2205 2ST Nat"

La tabella che raccoglie i valori caratterizzanti del provino sono raccolte nella tabella che segue:

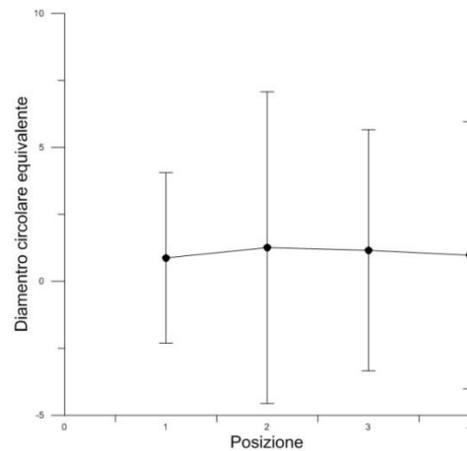
Posizione	Percentuale di ferrite(%)		Diametro equivalente(μm)		Durezza HV _{100/15}
	Valore	Devstd	Valore	Devstd	Media
1	41,688	-	0,876	3,183	341
2	51,722	-	1,259	5,818	314,75
3	45,230	-	1,158	4,499	348
4	48,902	-	0,973	4,987	330

-percentuale di ferrite



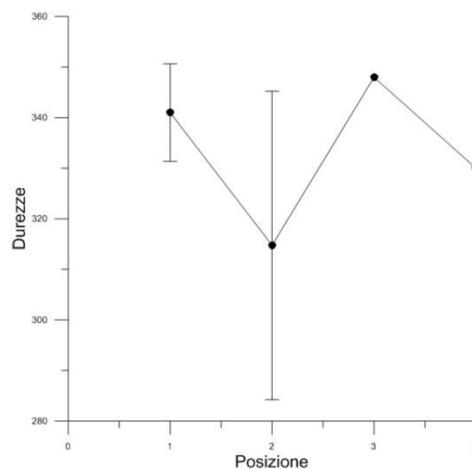
Seguendo la condotta logica proposta nella precedente occasione, ovvero che la percentuale di ferrite sia connessa allo stato deformativo, si ha una corrispondenza per il punto tre mentre il valore della prima posizione assume valori poco affidabili.

-diametro equivalente



Se per i valori raccolti per il primo stadio deformativo erano deducibili alcuni stati caratteristici in questa occasione è solamente distinguibile un maggiore, seppur leggero, aumento di deformabilità per quanto riguarda la seconda posizione. Mentre per le rimanenti parti analizzate è possibile solamente attestare che il valore medio risultante rimane il medesimo.

-durezza



Dai valori assunti, nelle varie posizioni, dalla macrodurezza Vickers si distinguono la prima posizione e la terza per una maggiore durezza. Le due zone infatti sono sicuramente quelle soggette ad una maggiore sollecitazione in quanto la prima subisce il colpo inferto dal pistone mobile mentre la seconda è protagonista del cambio della direzione del flusso di materiale.

APPENDICE D

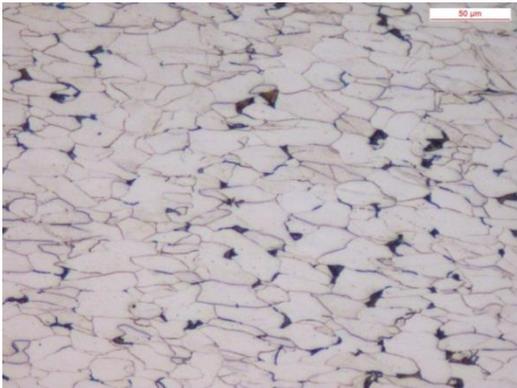
SAE 1005 3ST NAT

D.1. Micrografie

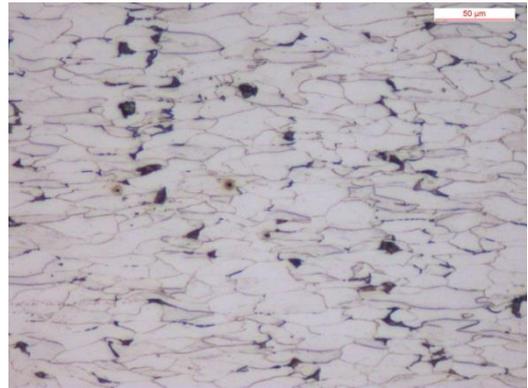
Vengono di seguito riportate le immagini micrografiche inerenti al provino in acciai ferritico C4C, l'analisi avrà luogo nelle posizioni già citate visibili in Fig.7.4.

Essendo, il grano del materiale, di dimensioni nettamente inferiori rispetto al corrispettivo presente nell'acciaio inossidabile austenitico, saranno presentate le immagini a 50x e quelle a 200x, si ha dunque in ordine numerato:

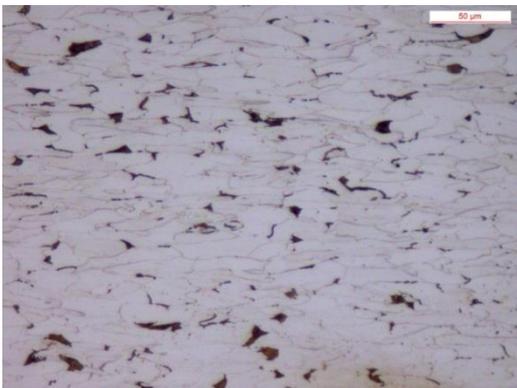
Punto 1 200x



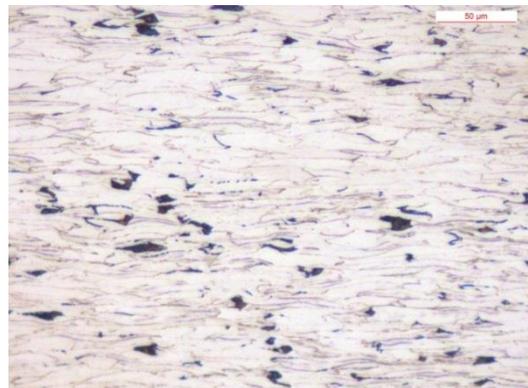
Punto 2 200x



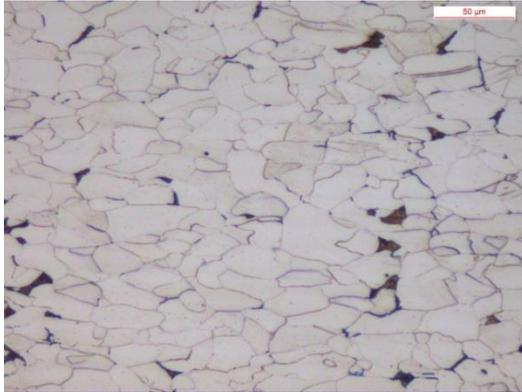
Punto 3 200x



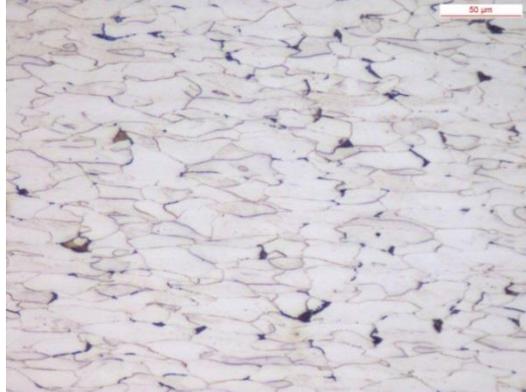
Punto 4 200x



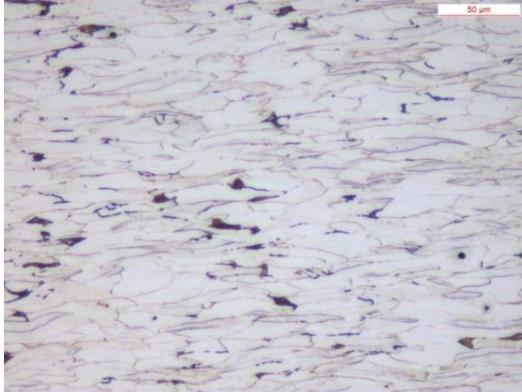
Punto 5 200x



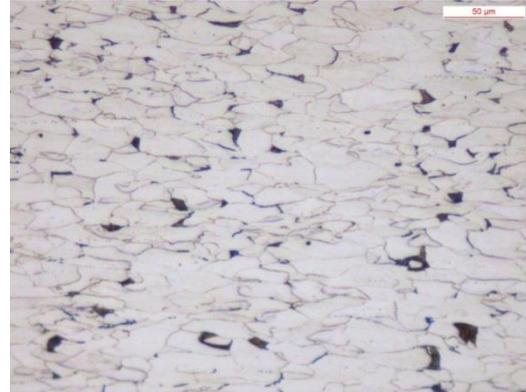
Punto 6 200x



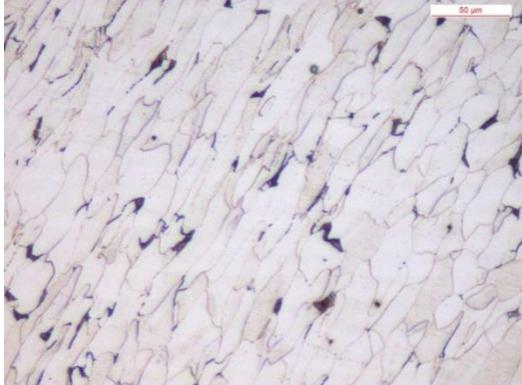
Punto 7 200x



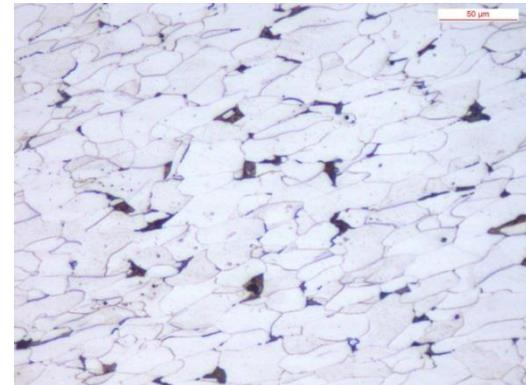
Punto 8 200x



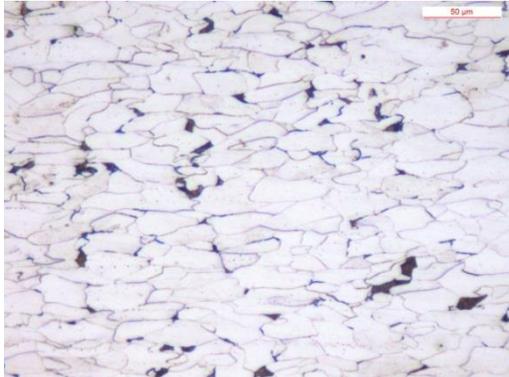
Punto 9 200x



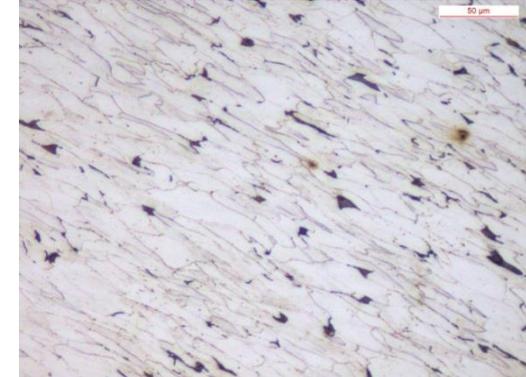
Punto 10 200x



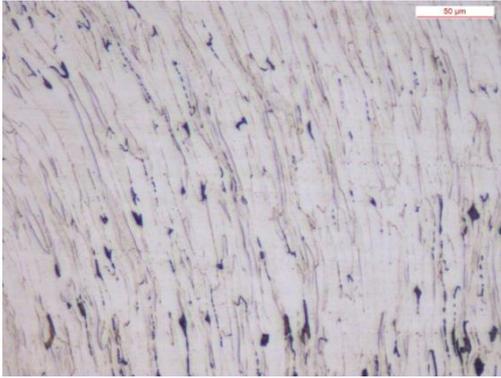
Punto 11 200x



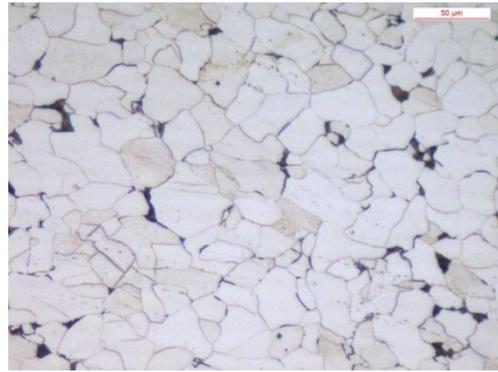
Punto 12 200x



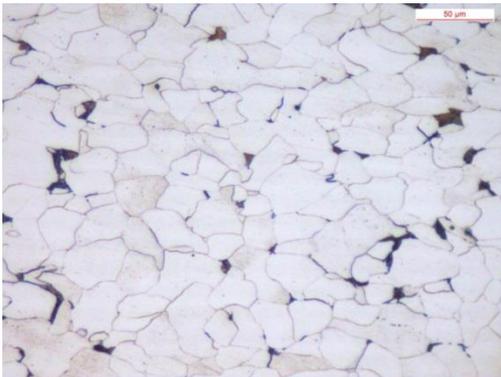
Punto 13 200x



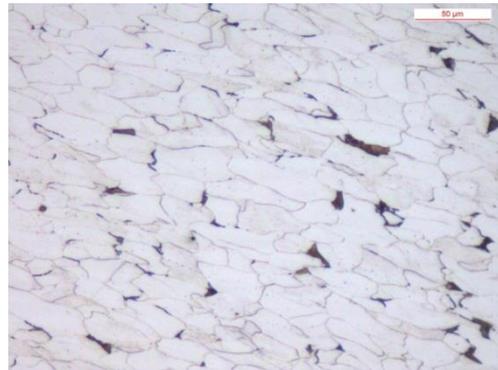
Punto 14 200x



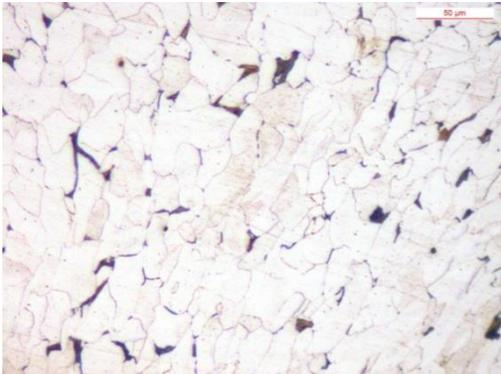
Punto 15 200x



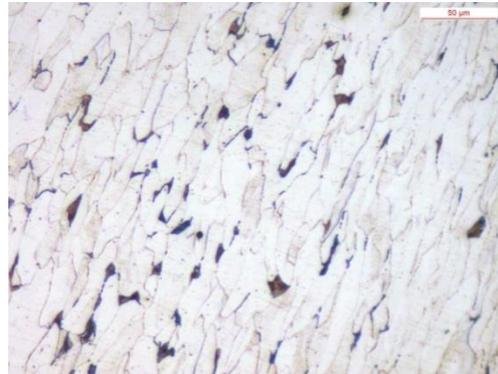
Punto 16 200x



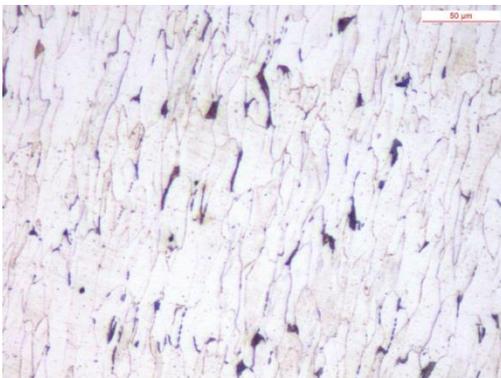
Punto 17 200x



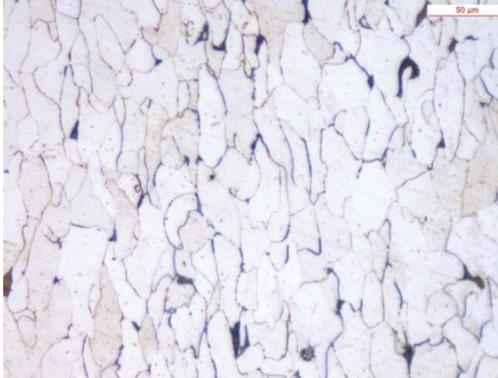
Punto 18 200x



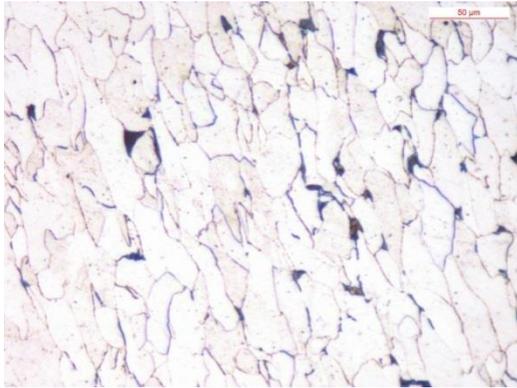
Punto 18A 200x



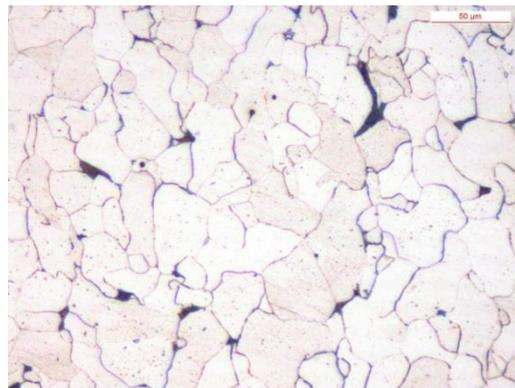
Punto 19 200x



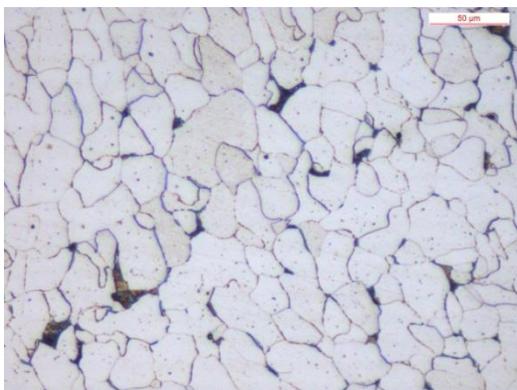
Punto 19A 200x



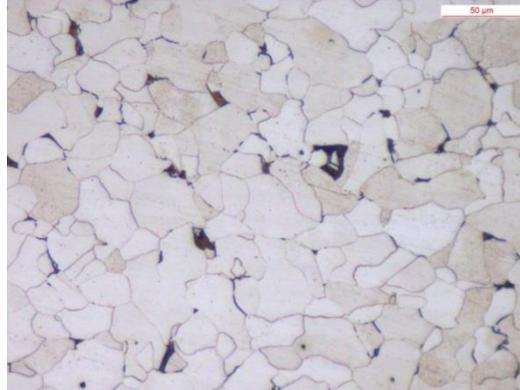
Punto 20 200x



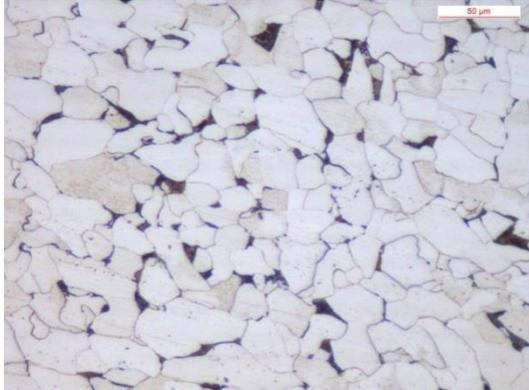
Punto 20A 200x



Punto 21 200x



Punto 21A 200x



D.2. Microdurezze

Vengono presentate la versione integrale delle misure da cui sono state prelevate le misure riportate nelle tabelle riassuntive presenti alla presentazione di ogni campione. Le misure sono state eseguite con un carico di 200g e 15 secondi di mantenimento, su profili prestabiliti che successivamente verranno chiamati con il nome meno consono di percorsi in figura 6.6.

Percorso 1 verticale dal punto 1 al punto 4

Passo 0,97

	Tutte le misure			Media	Devstd
0	203	200	192	198,3333	5,686241
0,97	205	202	196	201	4,582576
1,95	206	196	202	201,3333	5,033223
20925	225	218	216	219,6667	4,725816
3,9	214	211	215	213,3333	2,081666
4,87	218	217	217	217,3333	0,57735
5,85	213	213	215	213,6667	1,154701
6,82	226	217	225	222,6667	4,932883
7,8	250	250	238	246	6,928203

Percorso 2 verticale dal punto 5 al punto 8

Passo 1,03

	Tutte le misure			Media	Devstd
0	187	188	203	192,6667	8,962886
1,03	197	193	199	196,3333	3,05505
2,06	211	206	213	210	3,605551
3,09	205	217	225	215,6667	10,06645
4,12	222	218	227	222,3333	4,50925
5,15	220	227	229	225,3333	4,725816
6,18	215	219	219	217,6667	2,309401
7,21	215	226	228	223	7
8,2	239	238	229	235,3333	5,507571

Percorso 3 verticale dal punto 9 al punto 13

Passo 0,94

	Tutte le misure	Media	Devstd
0	204 226 230 234	223,5	13,40398
0,94	203 214 215	210,6667	6,658328
1,88	202 200 187	196,3333	8,144528
2,82	197 199 193	196,3333	3,05505
3,76	209 208 202	206,3333	3,785939
4,7	214 220 221	218,3333	3,785939
5,84	228 222 233	227,6667	5,507571
6,38	224 219 225	222,6667	3,21455
7,52	227 215 218	220	6,244998
8,46	231 228 226	228,3333	2,516611
9,4	239 243 226	236	8,888194

Percorso 4 verticale dal punto 14 al punto 17

Passo 1,175

	Tutte le misure	Media	Devstd
0	204 215 215	211,3333	6,350853
1,175	209 200 197	202	6,244998
2,35	170 173 170	171	1,732051
3,525	180 185 185	183,3333	2,886751
4,7	187 193 182	187,3333	5,507571
5,87	213 198 215	208,6667	9,291573
7,05	188 203 182	191	10,81665
8,22	184 189 181	184,6667	4,041452
9,4	207 209 206	207,3333	1,527525

supponendo la presenza di un piano ad un millimetro dal punto più basso

Percorso I

	Tutte le misure	Media	Devstd
0	153 161 160	158	4,358899
1,14	193 200 196	196,3333	3,511885
2,28	198 175 163	178,6667	17,78576
3,42	214 194 217	208,3333	12,50333
4,57	213 200 193	202	10,14889
5,71	204 208 217	209,6667	6,658328
6,85	235 221 222	226	7,81025
8	212 204 223	213	9,539392

Percorso II

	Tutte le misure	Media	Devstd
0	160 167 176	167,6667	8,020806
1,14	178 193 175	182	9,643651
2,28	218 217 220	218,3333	1,527525
3,42	211 214 217	214	3
4,57	207 210 214	210,3333	3,511885
5,71	226 246 235	235,6667	10,01665
6,85	219 220 227	222	4,358899
8	213 209 237 235	223,5	14,54877

Percorso III

	Tutte le misure	Media	Devstd
0	182 164 178	174,6667	9,451631
1,14	220 228 227	225	4,358899
2,28	237 223 243	234,3333	10,2632
3,42	233 238 244	238,3333	5,507571
4,57	244 235 249	242,6667	7,094599
5,71	239 239 247	241,6667	4,618802
6,85	237 255 247	246,3333	9,0185
8	239 252 262	251	11,53256

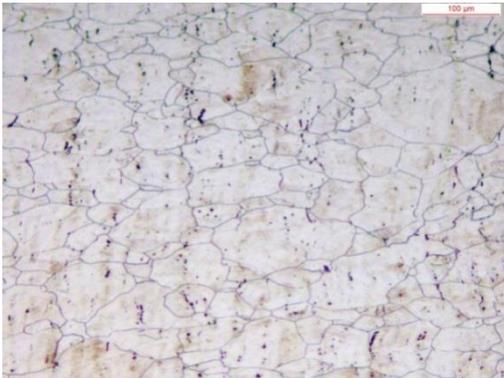
APPENDICE E

AISI 304 3ST NAT

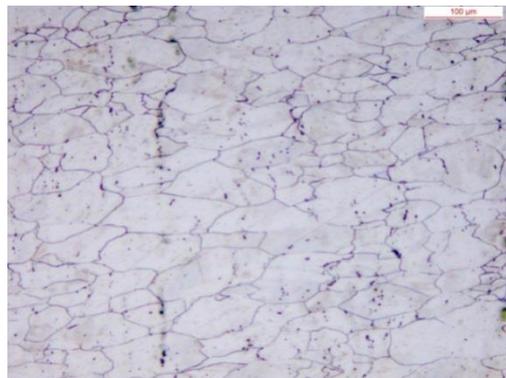
E.1. Micrografie

L'appendice in questione è dedicata alla raccolta integrale dei dati raccolti in merito al campione 304 3ST Nat, si snocciola via via le micrografie riguardanti il campione in materiale inossidabile austenitico e nel rispetto dell'ordine numero che fa capo al posizionamento apprezzabile in Fig.7.5.

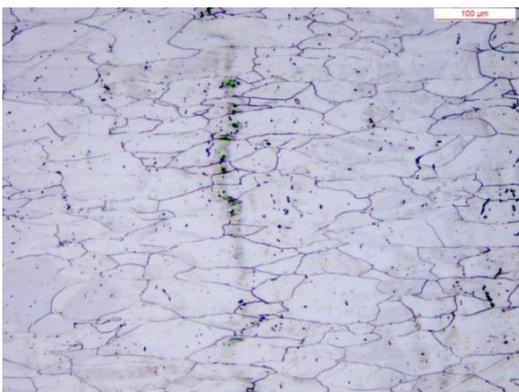
Punto 1 100x



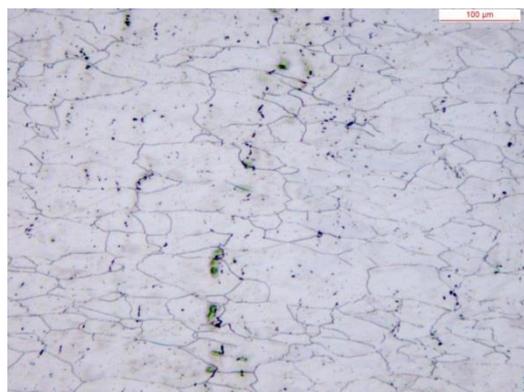
Punto 2 100x



Punto 3 100x



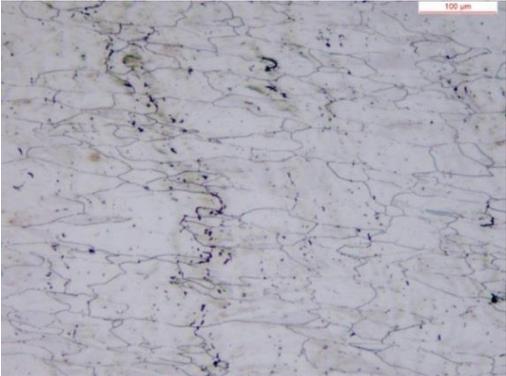
Punto 4 100x



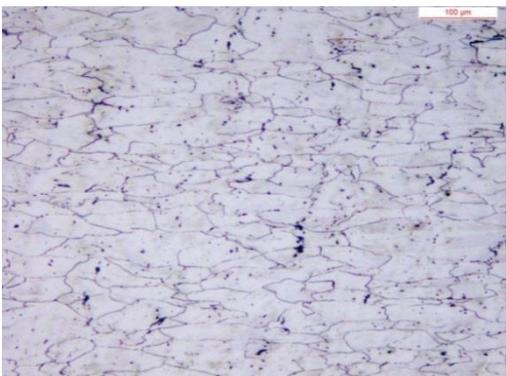
Punto 5 100x



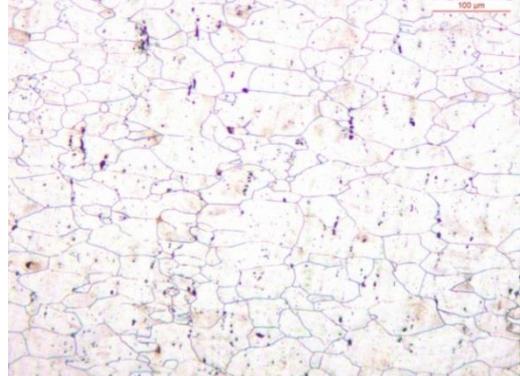
Punto 6 100x



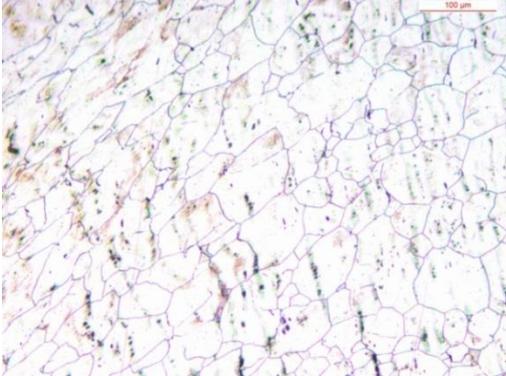
Punto 7 100x



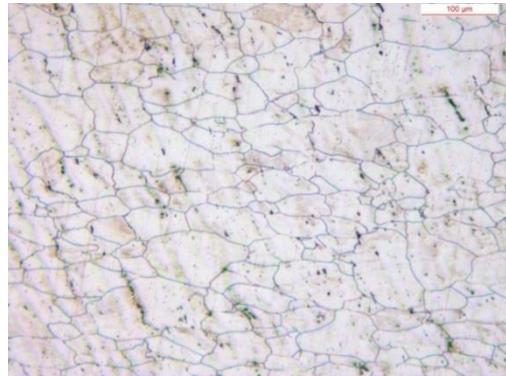
Punto 8 100x



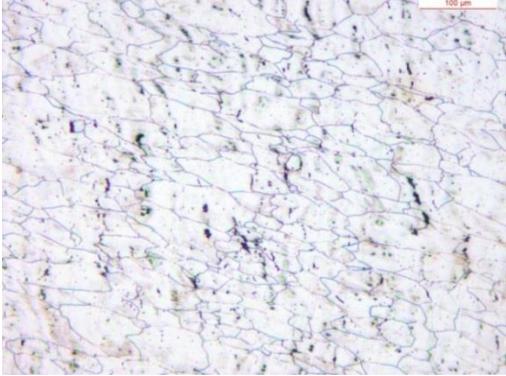
Punto 9 100x



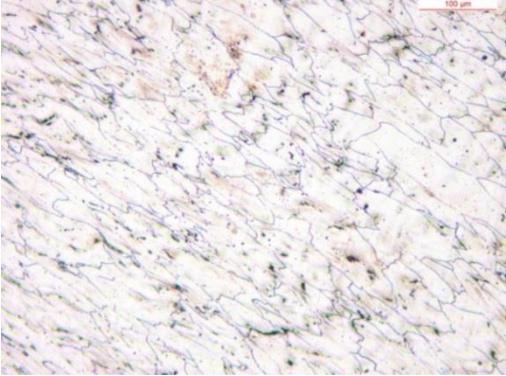
Punto 10 100x



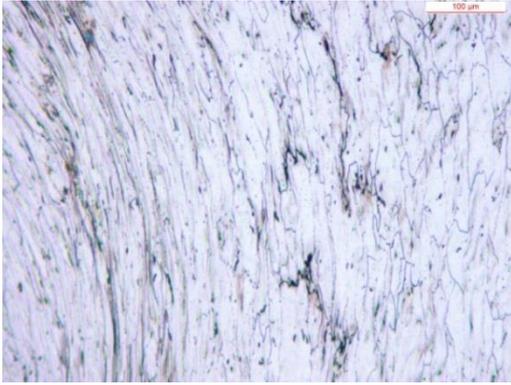
Punto 11 100x



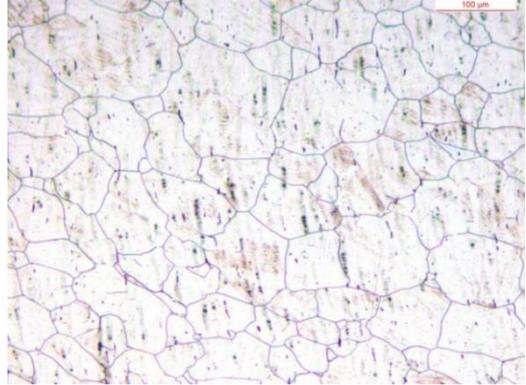
Punto 12 100x



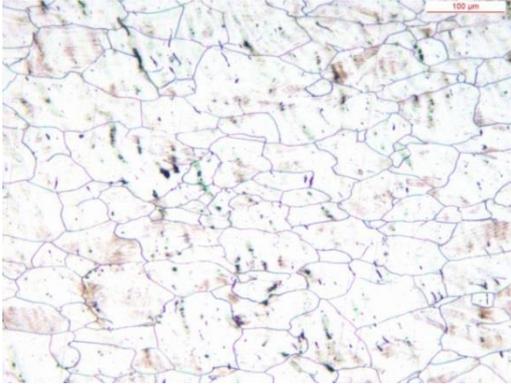
Punto 13 100x



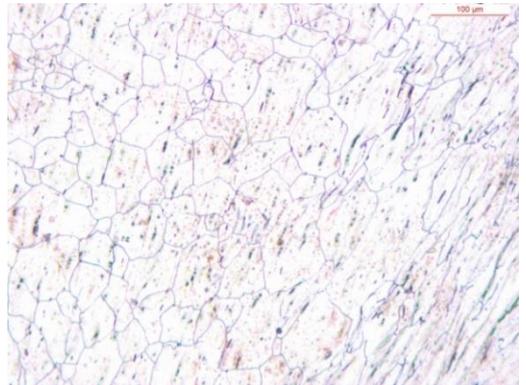
Punto 14 100x



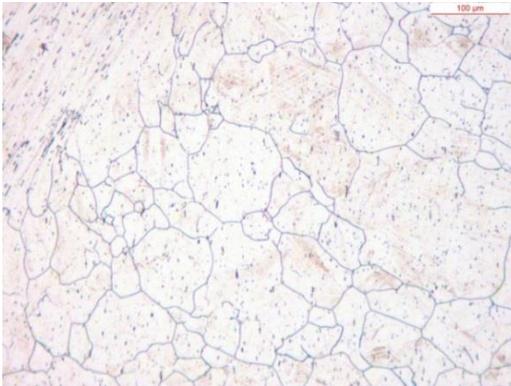
Punto 15 100x



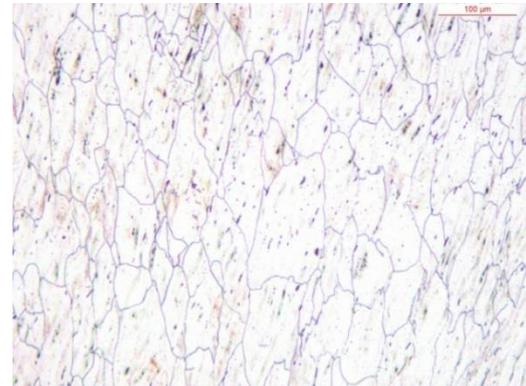
Punto 17 100x



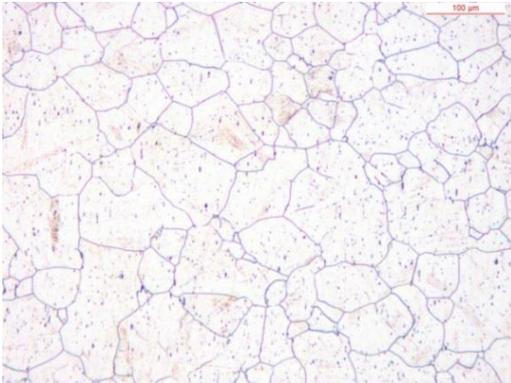
Punto 18 100x



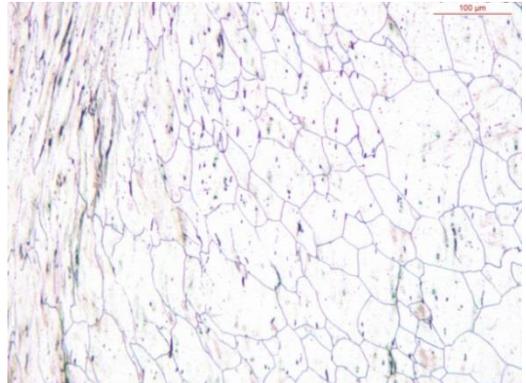
Punto 18A 100x



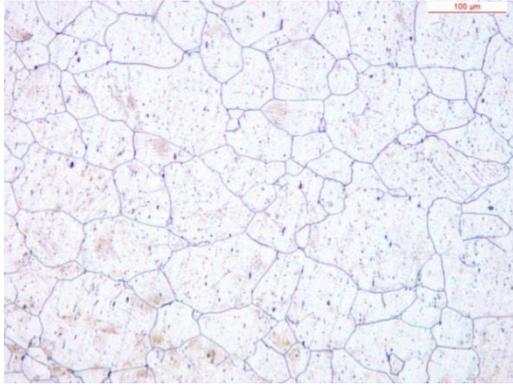
Punto 19 100x



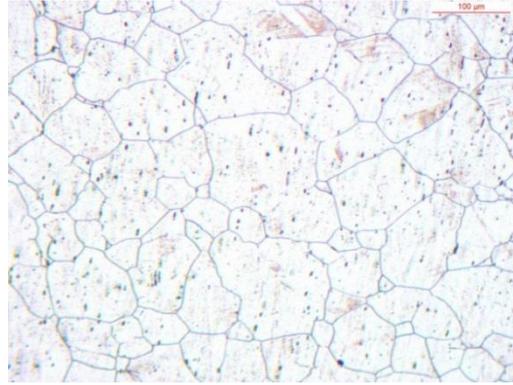
Punto 19A 100x



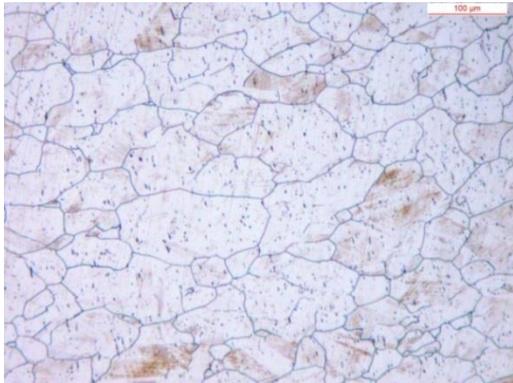
Punto 20 100x



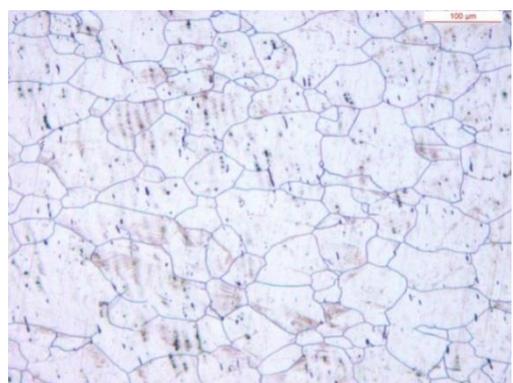
Punto 20A 100x



Punto 21 100x



Punto 21A 100x



E.2.Microdurezze

Sono riportati tutti i valori registrati ordinati per profilo, qui chiamati percorsi, correlati con valore medio e deviazione standard

Si ricorda che le misure sono state eseguite, come precedentemente affermato , con un carico di 200g mantenuto per 15s

Percorso 1

Passo 1,125 Percorso verticale dal punto 1 al punto 4

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd	
0	294	292	337	342	282		309,4	27,9	
1,125	375	351	357	325	321		345,8	22,7	
2,25	320	304	333	315			318	12	
3,375	323	324	369	338	303	300	326,17	25,3	
4,5	339	331	366	372	357	344	351,5	16,1	
5,625	327	355	390	351	365		357,6	22,9	
6,75	316	361	397	364	359		359,4	28,8	
7,875	307	360	369	400	321	382	356	356,43	32,7
9	349	400	277	346	367		347,8	45	

Percorso 2

Passo 1,06 Percorso verticale dal punto 5 al punto 8

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	342	370	363	315	317	383	348,33	28,4
1,06	335	322	354	337			337	13,1
2,125	318	304	336	338	325		324,2	13,9
3,18	329	326	328				327,67	1,53
4,25	387	410	354	361	407		383,8	25,7
5,31	376	366	355	337	363		359,4	14,6
6,37	310	377	408	352	391	338	368 363,43	33,1
7,43	409	377	385	370			385,25	17
8,5	411	354	383	408	376	341	356 375,57	27,1
9,4	364	353	390	407	367		376,2	21,9

Percorso 3

Passo 1,02 Percorso verticale dal punto 9 al punto 13

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	332	402	359	353	384	405	372,5	29,2
1,02	366	379	346	335	377	428	370 371,57	29,7
2,04	325	357	231	378	316	347	373 338,13	49,2
3,06	340	364	365	337	349	363	353	12,7
4,08	365	364	358				362,33	3,79
5,1	378	335	374	397	299	384	361,17	36,9
6,12	399	395	375	418	364	365	386	21,5
7,14	377	428	395	369	402	372	390,5	22,6
8,16	375	411	392	410	396		396,8	14,8
9,18	365	364	405	387	403	389	385,5	17,8
10	336	370	396	387	387		375,2	23,8

Percorso 4

Passo 1,225 Percorso verticale dal punto 14 al punto 17

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	320	312	358	295	317		320,4	23,1
1,225	417	434	379	438	367		407	32,3
2,45	356	377	369	358	356		363,2	9,42
3,675	349	336	370	380	364	363	360,33	15,6
4,9	329	400	389	379	342	372	368,5	27,6
6,125	352	402	414	414			395,5	29,5
7,35	374	369	383	379			376,25	6,08

8,575	405	393	385	383			391,5	9,98
9,8	393	404	375	421	382		395	18,2

Fissando un piano orizzontale a un millimetro dal punto più basso della gamba destra:

Percorso I Percorso verticale dal basso verso l'alto a 0,5mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	346	434	337	365	346	361	364,83	35,4
1,14	393	347	356	358			363,5	20,2
2,28	338	321	306	283	304	306	309,67	18,4
3,42	306	316	341	325	339	371	333	22,9
4,57	390	388	372	397			386,75	10,6
5,71	375	415	376	393	406		393	17,8
6,85	355	386	358	376	358		366,6	13,7
8	352	411	381	425	377	436	397	32,2

Percorso II Percorso verticale dal basso verso l'alto a 1mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	383	327	366	353	385	360	362,33	21,4
1,14	322	359	364	355			350	19
2,28	312	312	328	344	320		323,2	13,4
3,42	320	383	365	388	356	402	369	29,1
4,57	384	426	368	428	379	394	396,5	25,1
5,71	380	411	330	380	381		376,4	29,1
6,85	386	383	389				386	3
8	427	414	406	407			413,5	9,68

Percorso III Percorso verticale dal basso verso l'alto a 2mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd
0	359	278	369	353	375		346,8	39,4
1,14	376	408	369	372			381,25	18,1
2,28	397	366	394	411			392	18,9
3,42	419	418	400	417			413,5	9,04
4,57	435	439	392	402			417	23,5
5,71	424	398	407	384			403,25	16,8
6,85	349	386	387	377			374,75	17,7
8	398	400	334	415	370	396	385,5	29,1

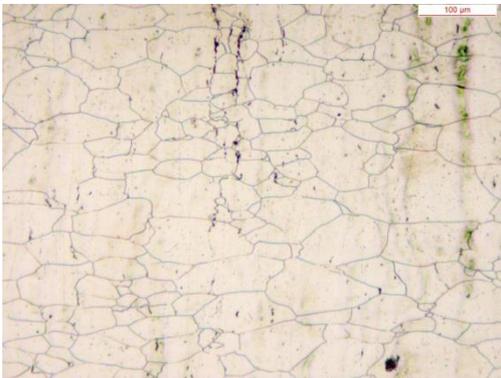
APPENDICE F

AISI 316L 3ST NAT

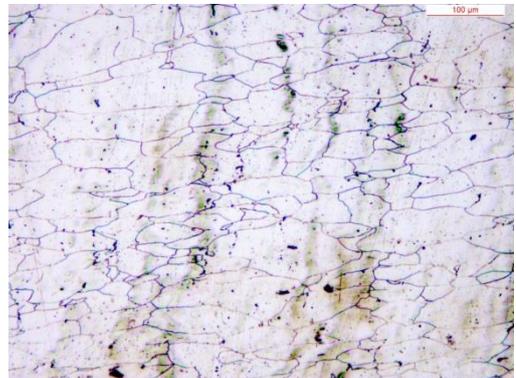
F.1.Micrografie

L'appendice in questione è dedicata alla raccolta integrale dei dati raccolti in merito al campione AISI 316L 3ST Nat, succedono le micrografie di ogni punto di analisi ad un ingrandimento di 100x, come rappresentati in Fig.7.6.:

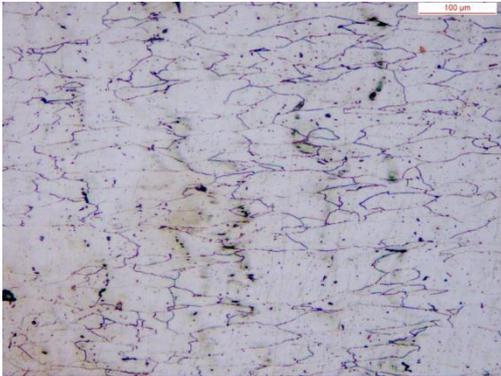
Punto 1 100x



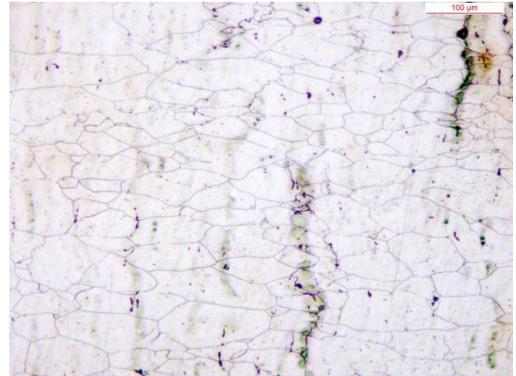
Punto 2 100x



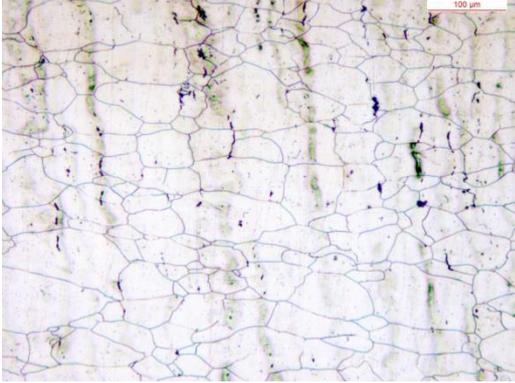
Punto 3 200x



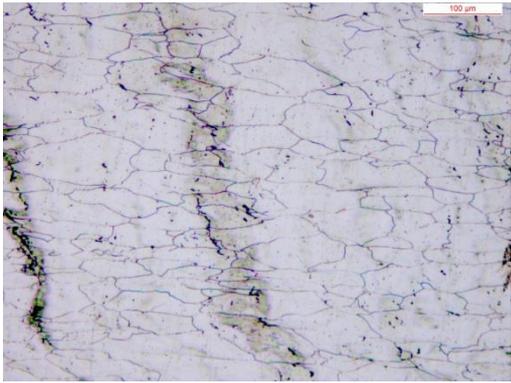
Punto 4 200x



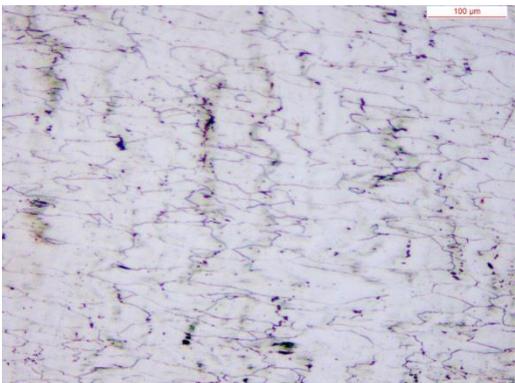
Punto 5 200x



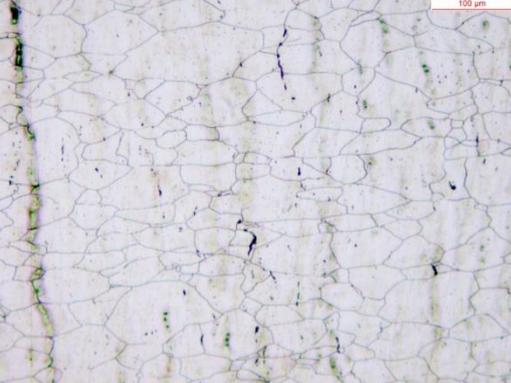
Punto 6 200x



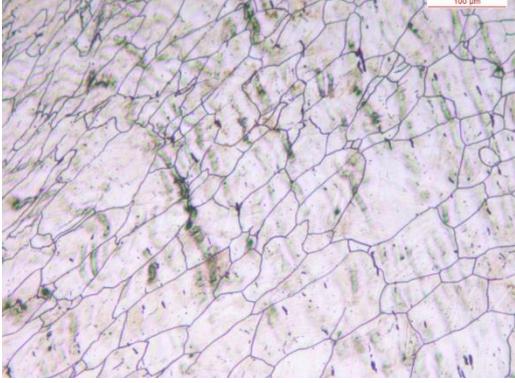
Punto 7 200x



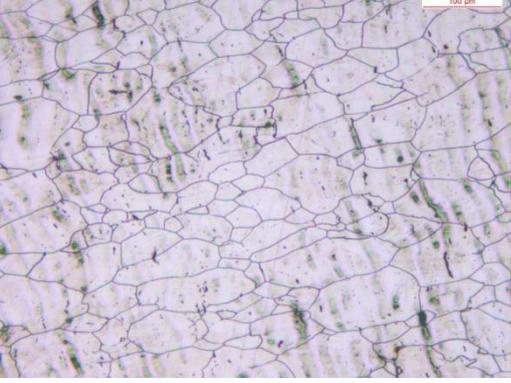
Punto 8 200x



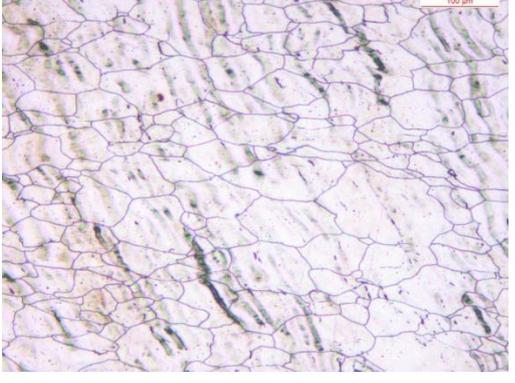
Punto 9 200x



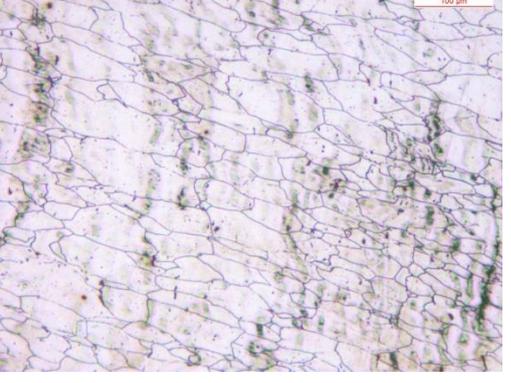
Punto 10 200x



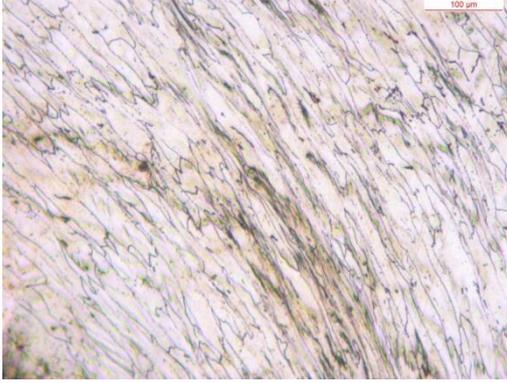
Punto 11 200x



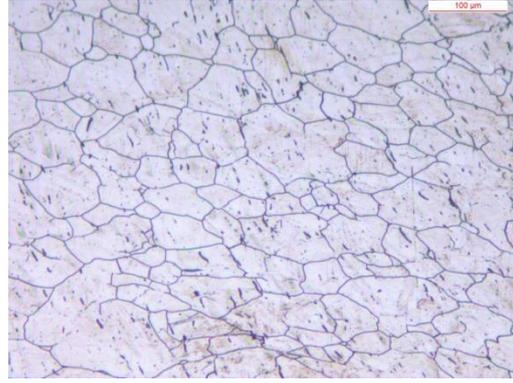
Punto 12 200x



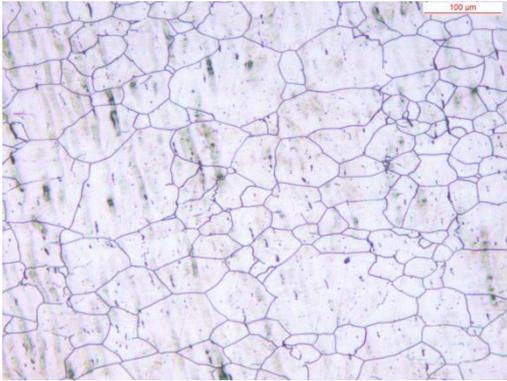
Punto 13 200x



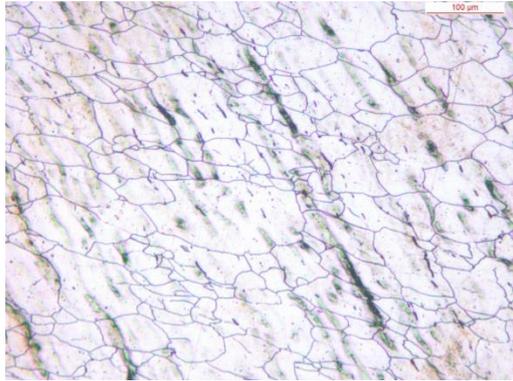
Punto 14 200x



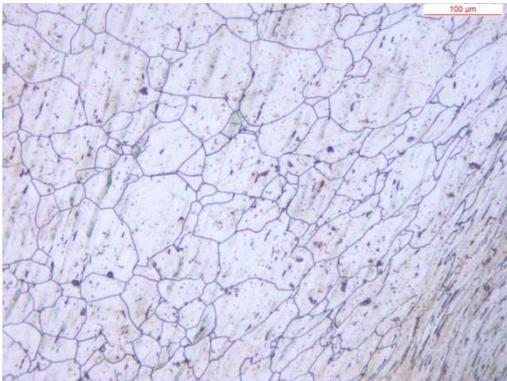
Punto 15 200x



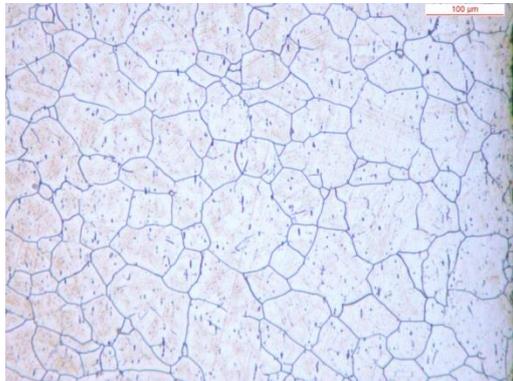
Punto 16 200x



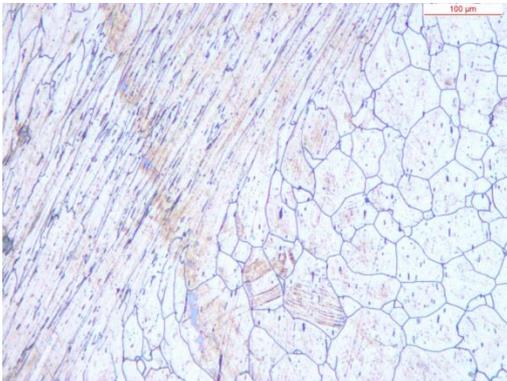
Punto 17 200x



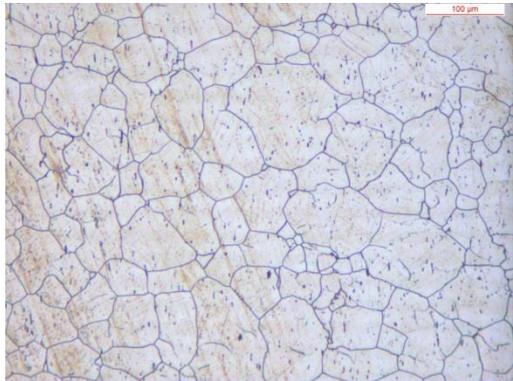
Punto 18 200x



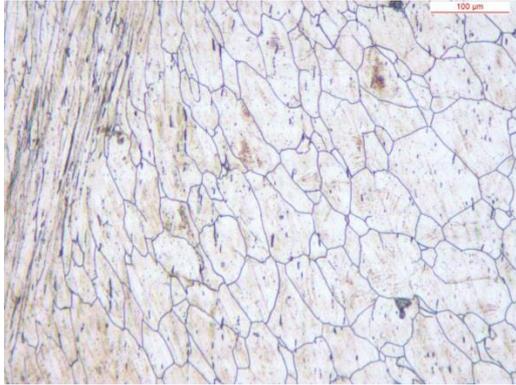
Punto 18A 200x



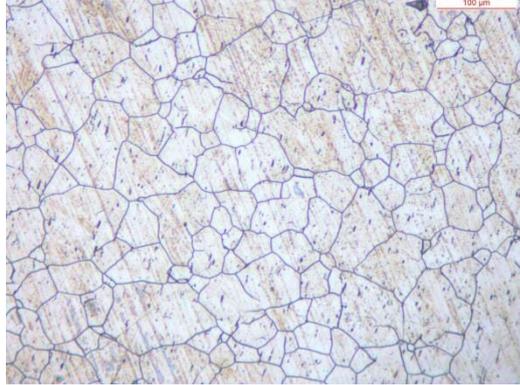
Punto 19 200x



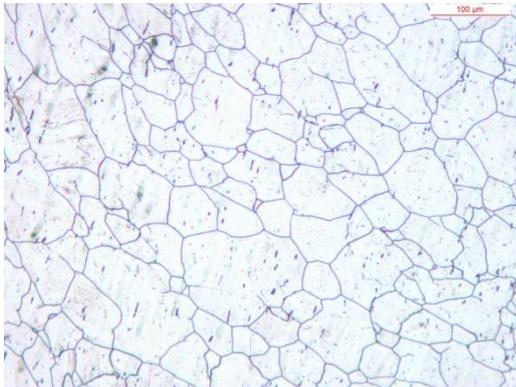
Punto 19A 200x



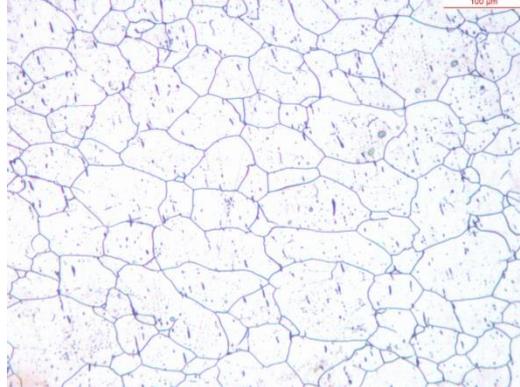
Punto 20 200x



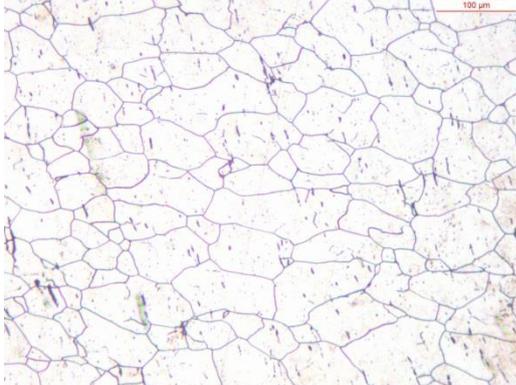
Punto 20A 200x



Punto 21 200x



Punto 21A 200x



F.2. Microdurezze

Sono riportate di seguito tutte le misure di microdurezza a 200g che sono state eseguite sul campione. Le durezze puntuali sono effettuate su profili precisi e già descritti in precedenza.

Percorso 1

verticale dal punto 1 al punto 4

Passo 1,125mm

Distanza	Tutte le misure									Media	Deviazione
0	350	357								353,5	4,9497
1,125	376	314	343	360	327	307	312	310		331,13	25,892
2,25	359	372	292	337	327	359	349	288	339	335,78	29,269
3,375	382	387	379							382,67	4,0415
4,5	354	361	387	377	358					367,4	14,011
5,625	350	411	411	415						396,75	31,224
6,75	394	383	386							387,67	5,6862
7,875	361	395	283	335	372	377	370	362	394	361	34,395
9	396	393	397							395,33	2,0817

Percorso 2

verticale dal punto 5 al punto 8

Passo 1,18mm

Distanza	Tutte le misure									Media	Deviazione
0	360	352	315	285	360					334,4	33,306
1,18	364	309	363	382	372	393	376	391		368,75	26,585
2,375	349	382	379	365	355	373	363			366,57	12,191
3,36	405	398	374	378	370					385	15,524
4,75	384	357	385	352	370					369,6	15,11
5,93	350	333	367	388	383	377				366,33	21,163
7,1	404	364	362	353						370,75	22,677
8,31	350	388	358	376	333	321	367			356,14	23,59
9,4	383	335	360	350	354	360				357	15,723

Percorso 3

verticale dal punto 9 al punto 13

Passo 1,5mm

Distanza	Tutte le misure									Media	Deviazione
0	430	403	400	417	382	361				398,83	24,637
1,5	387	411	400	421	428	300				391,17	47,004
3	382	338	320	316	373	365	384	363		365,2	31,996
4,5	348	368	382	342	333	395	382	370		371,8	26,989
6	339	375	367	338	395	388	374	328		363	24,946
7,5	411	404	403							406	4,3589
9	360	324	362	365						352,75	19,276
10,5	337	364	372	370						360,75	16,194

verticale dal punto 14 al
punto 17**Percorso 4**

Passo 1,2mm

Distanza	Tutte le misure									Media	Deviazione
0	351	353	297	349						337,5	27,049
1,2	376	411	415	402	372	402				396,33	18,074
2,4	350	317	323	370	394	329	349	369	353	339,13	24,567
3,6	355	347	369	321	313	348	332	328		339,13	18,788
4,8	372	335	317	378	329	363	330	342		345,75	22,397
6	380	376	373							376,33	3,5119
7,2	294	360	359	322	352					337,4	28,772
8,4	379	329	355	376	359	380	355			361,86	18,28
9,6	358	372	404	351	407	356				374,67	24,897

Si supponga un piano orizzontale posto ad 1mm dal punto più basso della gamba destra, coinvolti i punti dal 20 al 17

Percorso I

Percorso verticale dal basso verso l'alto a 0,5 mm dal bordo destro

Passo 1,14mm

Distanza	Tutte le misure							Media	Deviazione
0	313	309	300					307,33	6,6583
1,14	330	331	309	315	367	343	338	333,29	19,12
2,28	330	310	378	350	325	330		337,17	23,752
3,42	321	340	343	323	293	329		324,83	17,938
4,57	410	423	420	420				418,25	5,6789

5,71	354	373	377	371		368,75	10,145	
6,85	412	400	356	332	376	400	379,33	30,716
8	351	359	336	366			353	12,884

Percorso II

Percorso verticale dal basso verso l'alto a 1mm dal bordo destro

Passo 1,14mm

Distanza	Tutte le misure						Media	Deviazione
0	346	344	340				343,33	3,0551
1,14	312	323	316				317	5,5678
2,28	362	340	341	339			345,5	11,03
3,42	380	341	360	325	335	329	345	21,081
4,57	348	377	402	391	374		378,4	20,379
5,71	383	378	372				377,67	5,5076
6,85	392	442	392	371	332		385,8	39,84
8	382	382	333	405	394		379,2	27,545

Percorso III

Passo 1,14mm

Percorso verticale dal basso verso l'alto a 2mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Deviazione
0	313	303	353	327	320		323,2	18,873
1,14	345	340	353				346	6,5574
2,28	365	362	317	334	328	375	346,83	23,507
3,42	402	368	341	339	342		358,4	27,116
4,57	373	393	405	373			386	15,79
5,71	357	326	360	320	365	375	350,5	22,242
6,85	436	360	395	368	411	421	398,5	29,978
8	369	390	342	366	300		353,4	34,363

APPENDICE G

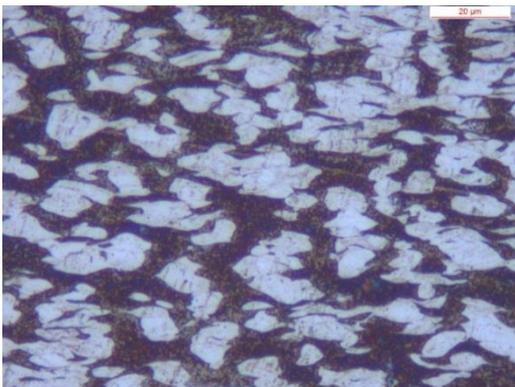
SAF 2205 3ST NAT

G.1. Micrografie

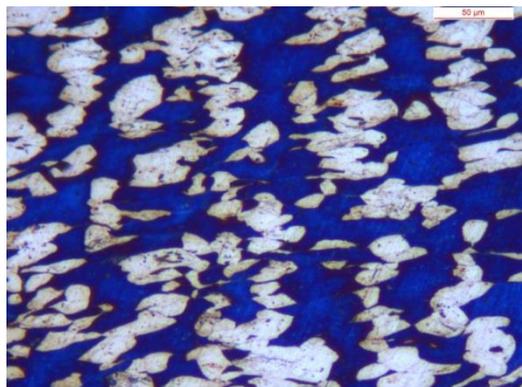
L'appendice in oggetto è riservata alle immagini registrate dopo che il campione abbia subito un attacco chimico utilizzando il Beraha. Le micrografie che succederanno possono essere individuate sulla sezione del campione tramite la figura 7.7.

I contributi che ora seguono sono stati raccolti tramite il microscopio ottico LAS, per migliorare la chiarezza informativa delle immagini si è provveduto a rilevarle con due ingrandimenti diversi: 200x per orientarsi nella sezione e 500x per apprezzare la struttura del materiale. In ordine numerico dunque abbiamo:

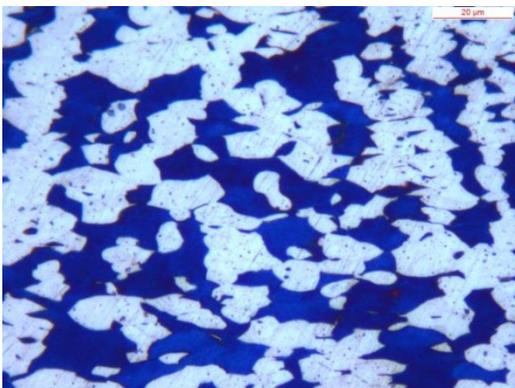
Punto 1 500x



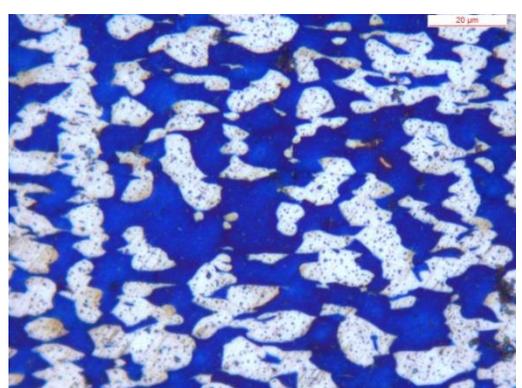
Punto 2 500x



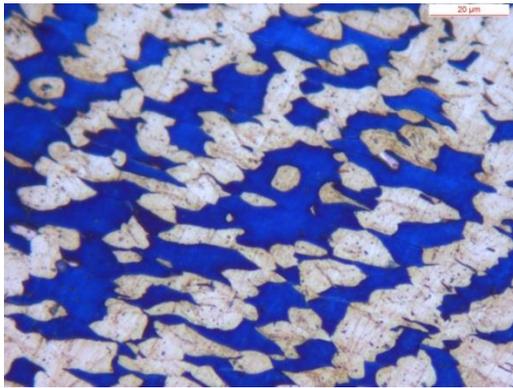
Punto 3 500x



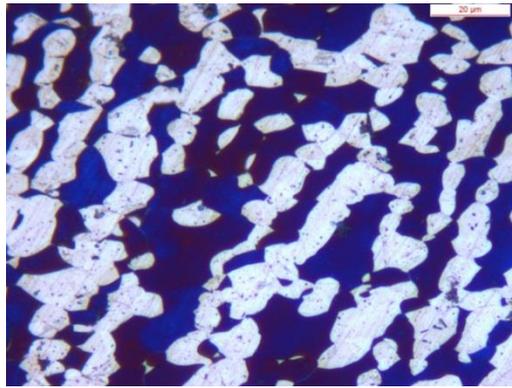
Punto 4 500x



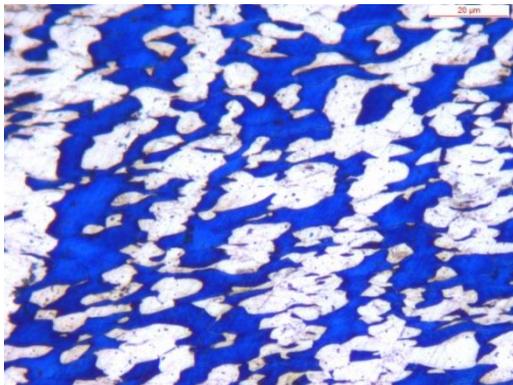
Punto 5 500x



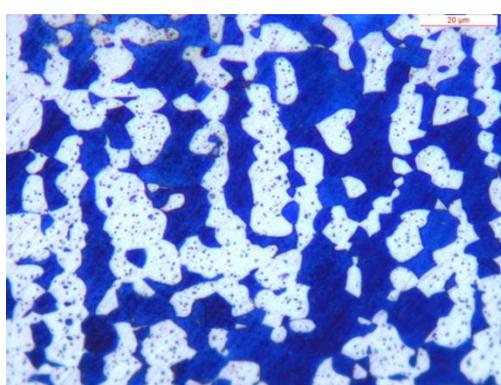
Punto 6 500x



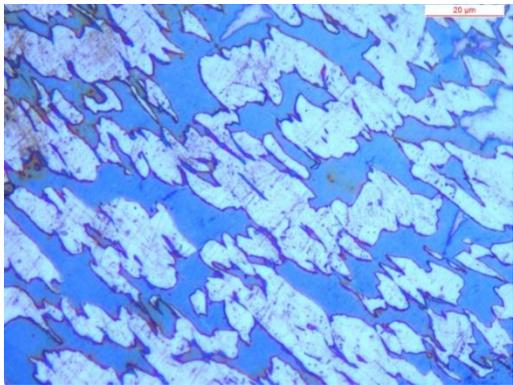
Punto 7 500x



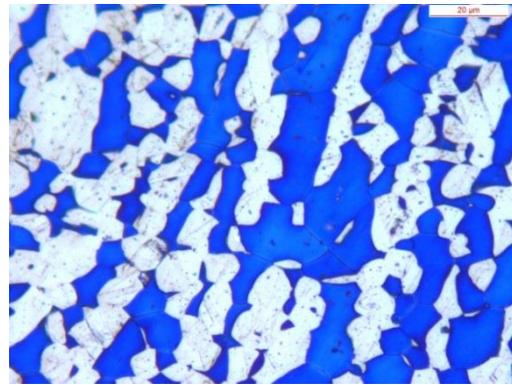
Punto 8 500x



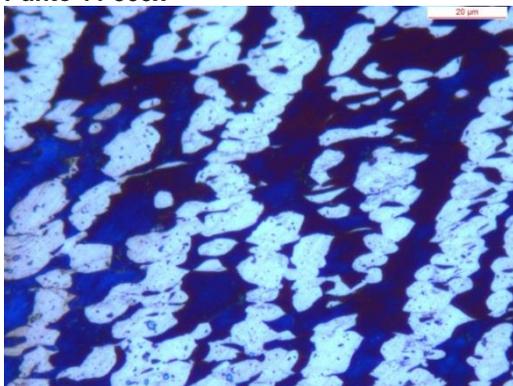
Punto 9 500x



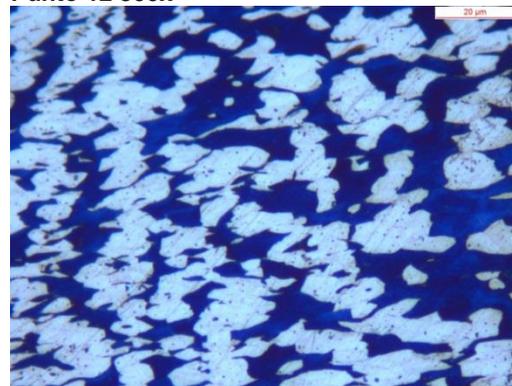
Punto 10 500x



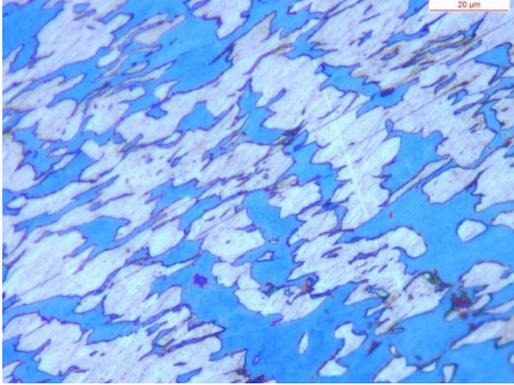
Punto 11 500x



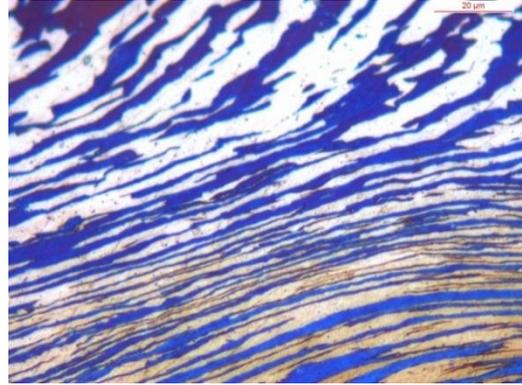
Punto 12 500x



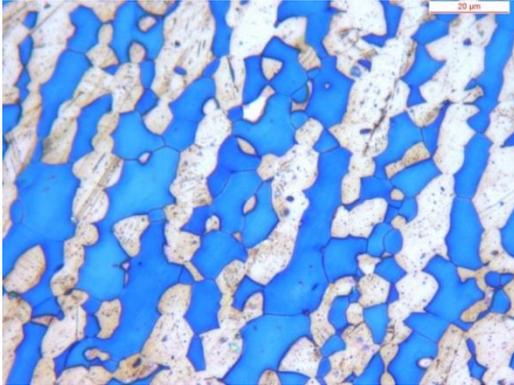
Punto 13 500x



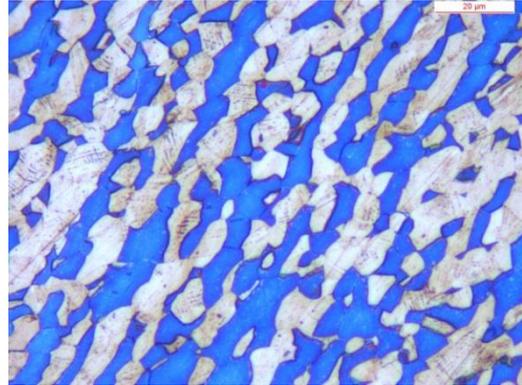
Punto 14 500x



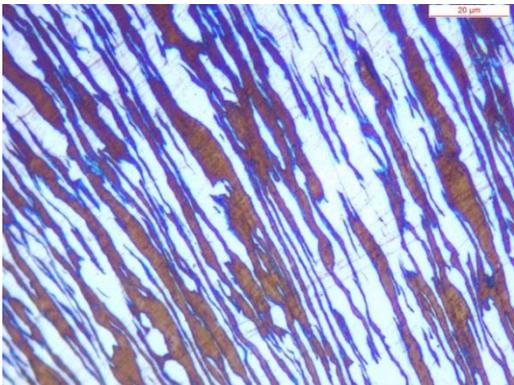
Punto 15 500x



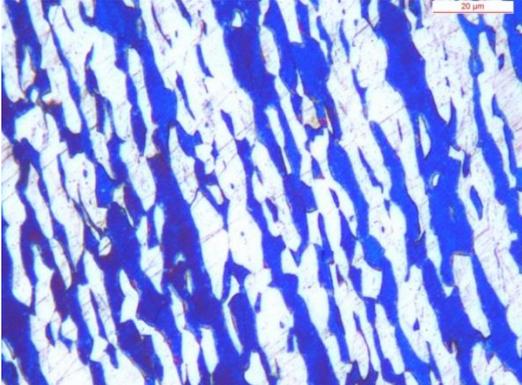
Punto 16 500x



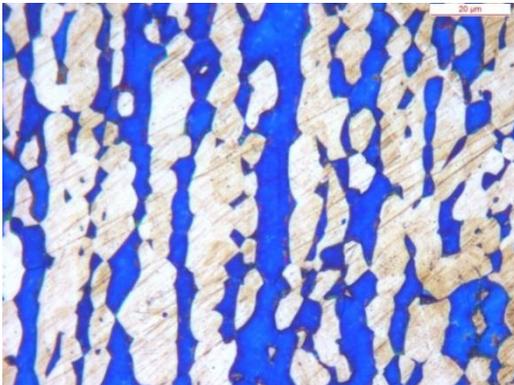
Punto 17 500x



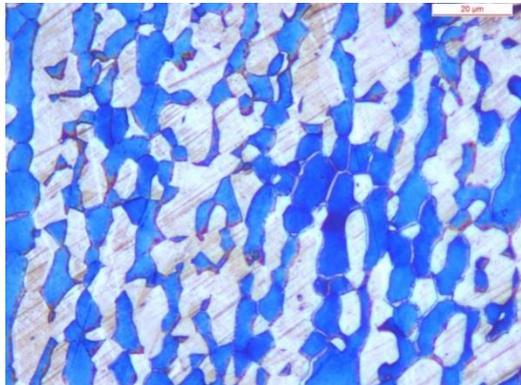
Punto 18 500x



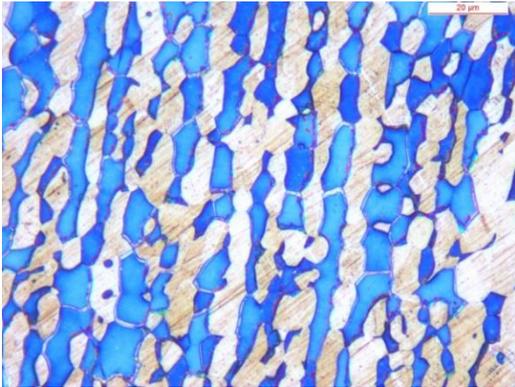
Punto 18A 500x



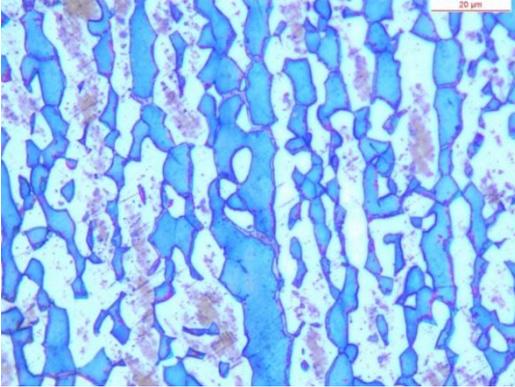
Punto 19 500x



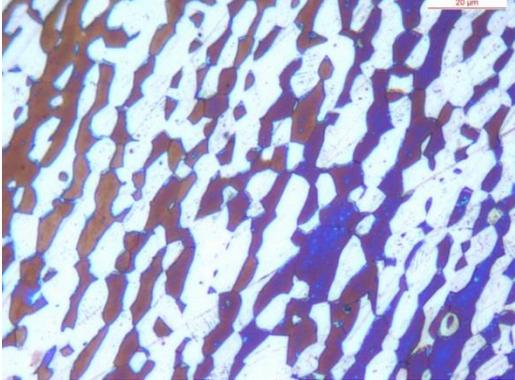
Punto 19A 500x



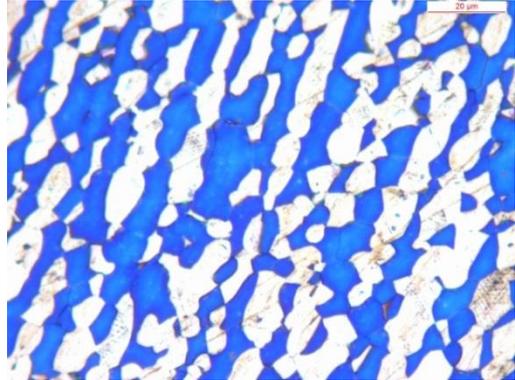
Punto 20 500x



Punto 21 500x



Punto 21A 500x



APPENDICE H

SAE 1005 MONOSTADIO

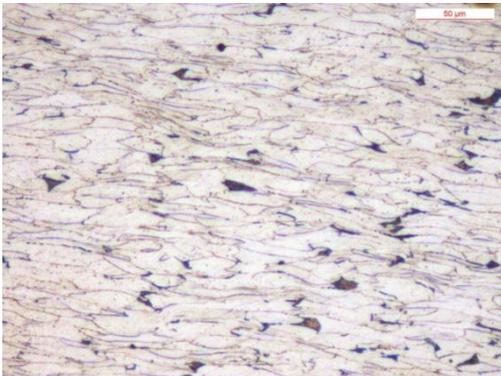
H.1.Micrografie

Questo spazio, come già scritto per tutti gli altri campioni soggetto della nostra analisi, è riservato alla mostra di tutte le immagini micrografiche raccolte e che sono state oggetto di analisi con il software del microscopio ottico. Le stesse i cui responsi fanno fornito le misure delle variabili di: orientazione, rapporto d'aspetto e diametro equivalente.

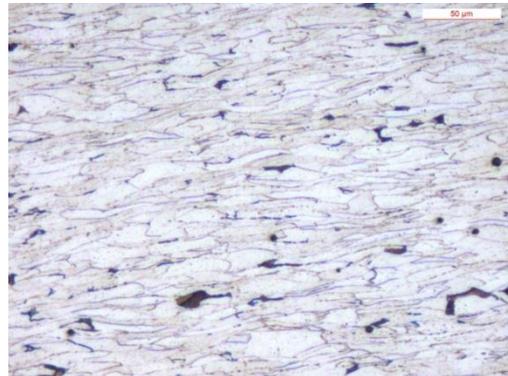
Valgono anche in questo caso i punti precedentemente stabili per i provini realizzati con un solo ciclo di stampaggio, ricapitolando si hanno i punti di figura 7.8.

Per localizzare fisicamente la posizione del punto analizzato nella sezione si fornisce l'immagine a ingrandimenti minori, 50x; mentre per poter apprezzare il grano ferritico viene fornita anche la micrografia a 200x. In ordine di numerazione abbiamo:

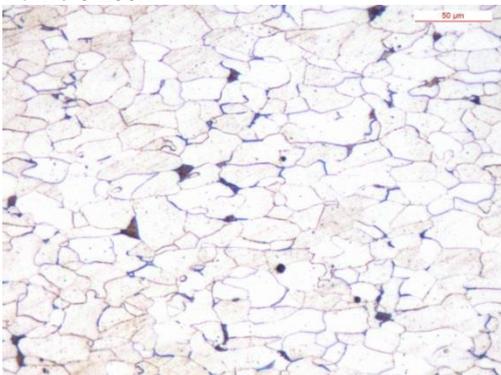
Punto 1 200x



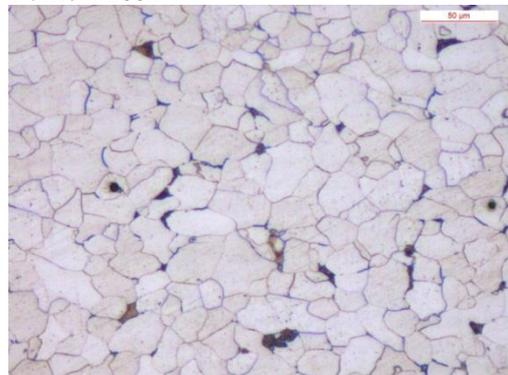
Punto 2 200x



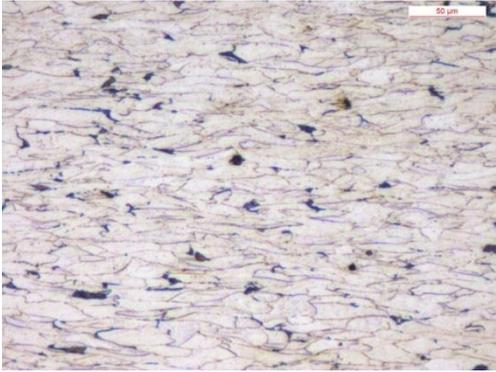
Punto 3 200x



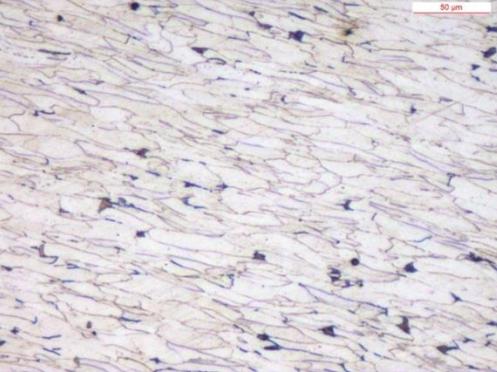
Punto 4 200x



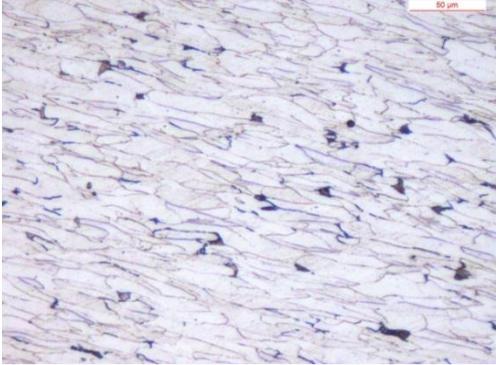
Punto 5 200x



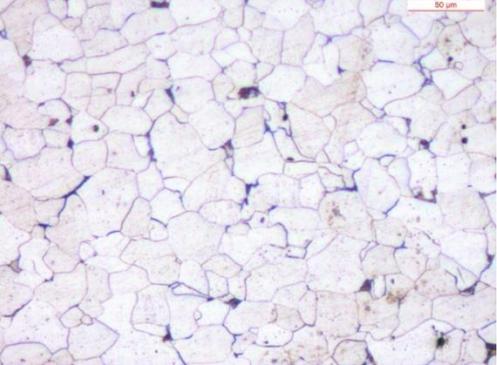
Punto 6 200x



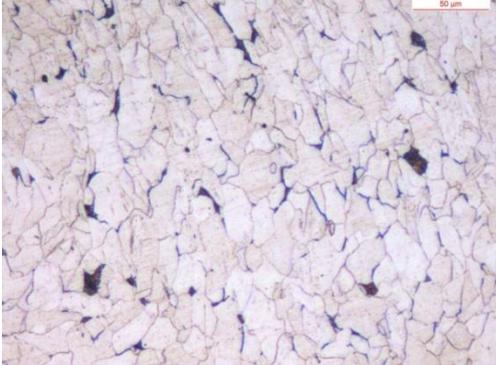
Punto 7 200x



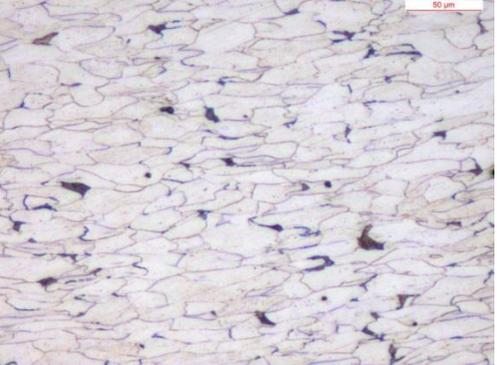
Punto 8 200x



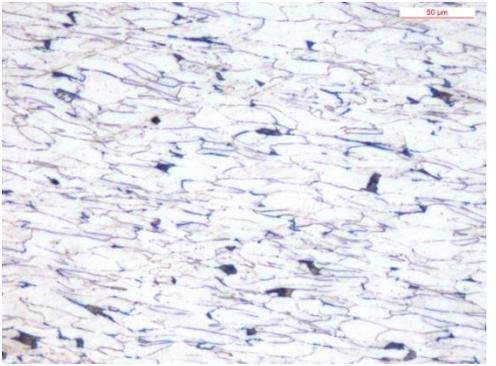
Punto 9 200x



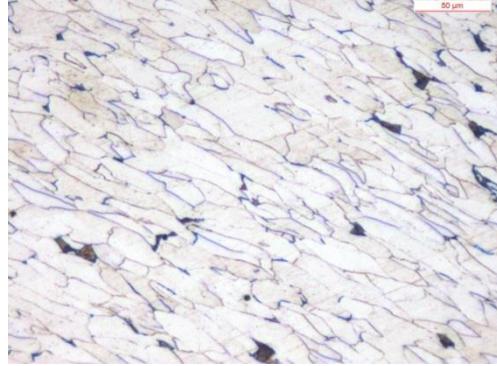
Punto 10 200x



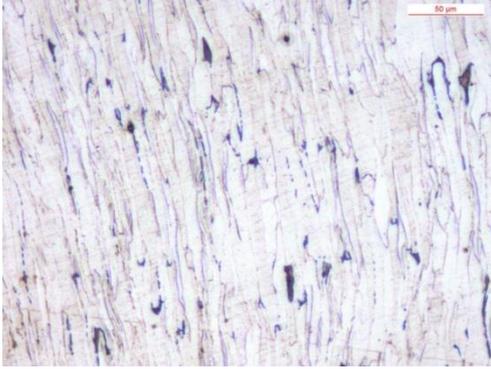
Punto 11 200x



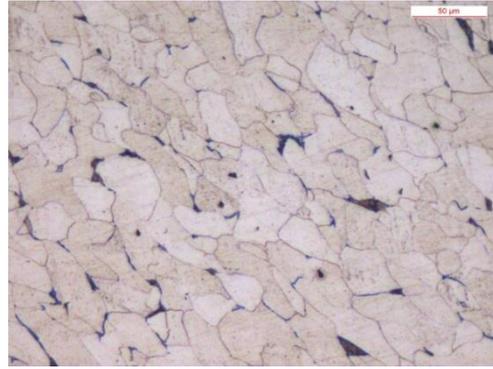
Punto 12 200x



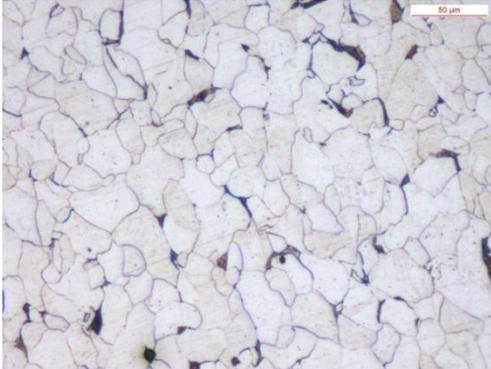
Punto 13 200x



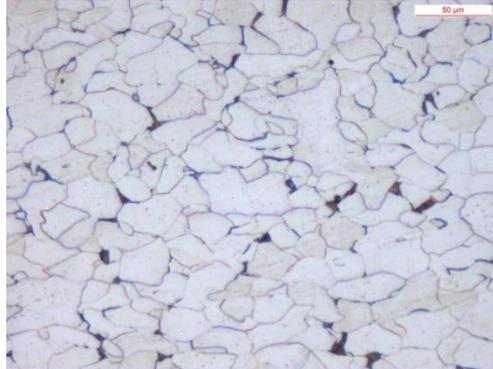
Punto 14 200x



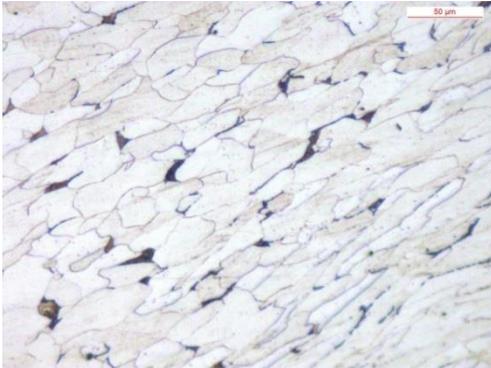
Punto 15 200x



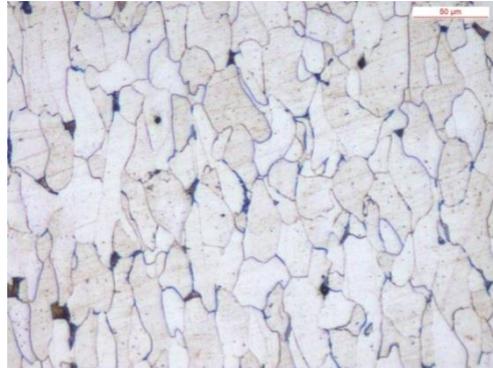
Punto 16 200x



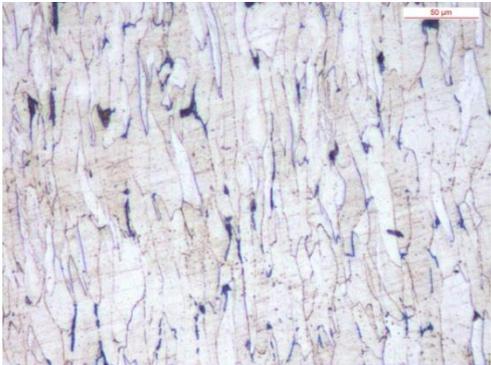
Punto 17 200x



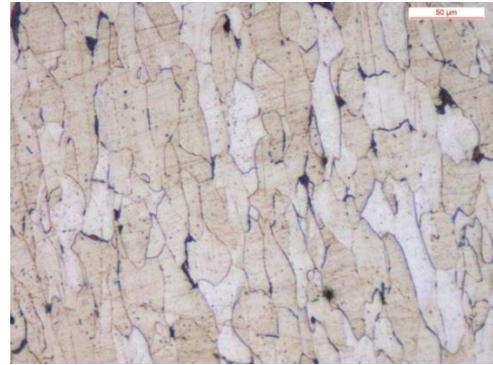
Punto 18 200x



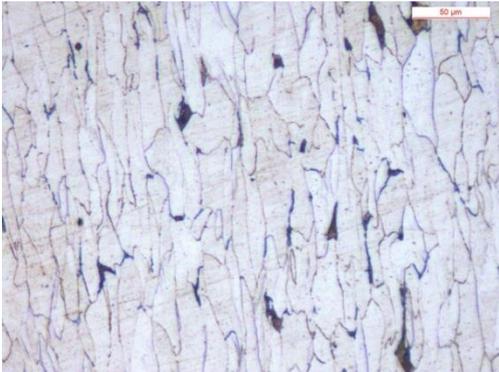
Punto 18A 200x



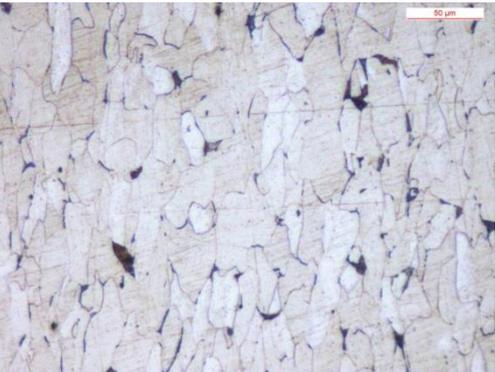
Punto 19 200x



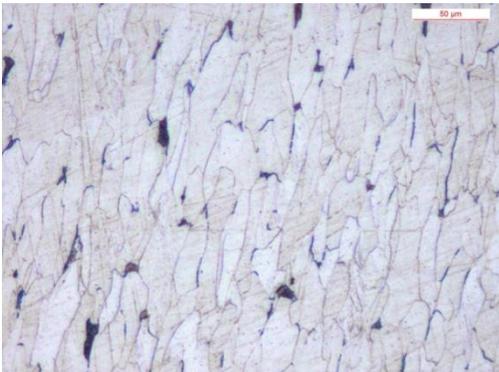
Punto 19A 200x



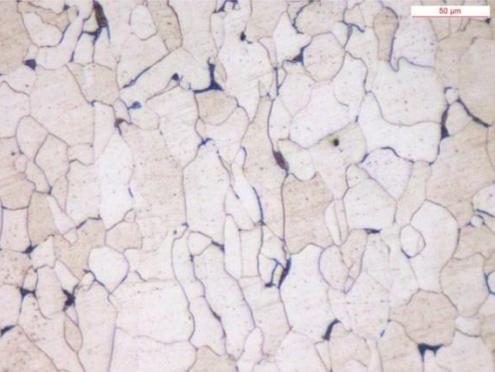
Punto 20 200x



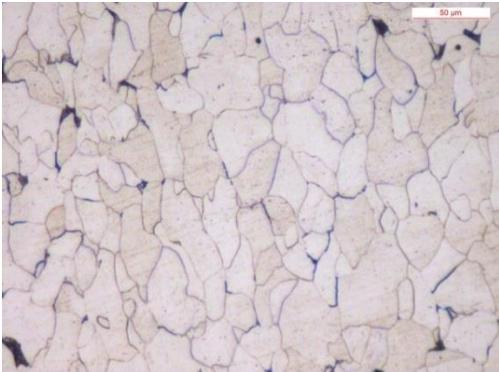
Punto 20A 200x



Punto 21 200x



Punto 21A 200x



H.2.Microdurezze

Si provvede alla presentazione delle misurazione della microdurezza nei profili, qui denominati percorsi, stabili per risalire dove e come il materiale sia sottoposto a deformazione.

Percorso1 verticale dal punto 1 al punto 4

Passo 0,78

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	247	243	231	240,333	8,327
0,78	248	234	230	237,333	9,452
1,57	246	231	230	235,667	8,963
2,36	211	217	218	215,333	3,786
3,15	215	209	211	211,667	3,055
3,93	196	190	192	192,667	3,055
4,75	178	186	180	181,333	4,163
5,31	184	175	179	179,333	4,509
6,3	184	186	191	187,000	3,606

Percorso2 verticale dal punto 5 al punto 8

Passo 0,93

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	230	222	220	224	5,2915026
0,93	238	233	243	238	5
1,87	234	232	233	233	1
2,81	223	231	213	222,3333	9,0184995
3,75	238	223	236	232,3333	8,1445278
4,68	224	225	231	226,6667	3,7859389
5,62	219	215	215	216,3333	2,3094011
6,56	205	207	200	204	3,6055513
7,5	195	186	206	195,6667	10,016653

Percorso3 verticale dal punto 9 al punto 14

Passo 0,83

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	228	207	249	228,000	21,000
0,83	210	218	214	214,000	4,000
1,66	217	245	232	231,333	14,012

2,49	211	211	215	212,333	2,309
3,32	235	229	224	229,333	5,508
4,15	217	207	228	217,333	10,504
4,98	210	209	210	209,667	0,577
5,81	210	203	210	207,667	4,041
6,64	221	224	215	220,000	4,583
7,47	233	241	244	239,333	5,686
8,13	254	262	244	253,333	9,018

Percorso4 verticale dal punto 14 al punto 17

Passo 1,05

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	188	185	168	180,333	10,786
1,05	198	209	199	202,000	6,083
2,1	176	190	190	185,333	8,083
3,15	190	203	177	190,000	13,000
4,2	196	195	189	193,333	3,786
5,25	200	200	186	195,333	8,083
6,3	192	195	185	190,667	5,132
7,35	181	187	178	182,000	4,583
8,4	215	249	251	238,333	20,232

Fissato un piano orizzontale a un millimetro dal punto più basso della gamba destra

Percorso I a 0,5mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	212	211	214	212,333	1,528
1,14	210	219	211	213,333	4,933
2,28	218	223	234	225,000	8,185
3,42	219	230	211	220,000	9,539
4,57	226	218	229	224,333	5,686
5,71	206	209	206	207,000	1,732
6,85	202	190	201	197,667	6,658
8	192	206	199	199,000	7,000

Percorsoll a 1mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	218	223	228	223,000	5,000
1,14	228	218	222	222,667	5,033
2,28	223	219	216	219,333	3,512

3,42	160	230	228	206,000	39,850
4,57	212	217	217	215,333	2,887
5,71	210	204	212	208,667	4,163
6,85	213	210	212	211,667	1,528
8	214	217	214	215,000	1,732

Percorso III a 1,5mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure			Media	Devstd
0	241	235	248	241,333	6,506
1,14	213	227	223	221,000	7,211
2,28	213	224	243	226,667	15,177
3,42	232	227	238	232,333	5,508
4,57	235	237	245	239,000	5,292
5,71	231	226	233	230,000	3,606
6,85	228	221	238	229,000	8,544
8	233	243	237	237,667	5,033

APPENDICE I

AISI 304 MONOSTADIO

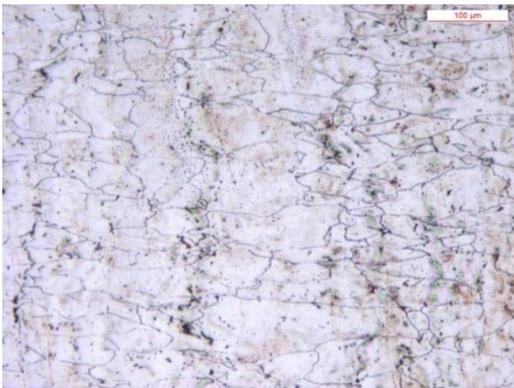
I.1. Micrografie

Si riportano in questi spazi tutti i dati relativi al campione siglato come 304 Monostadio, sia per quanto riguarda le micrografie sia per i profili di microdurezza.

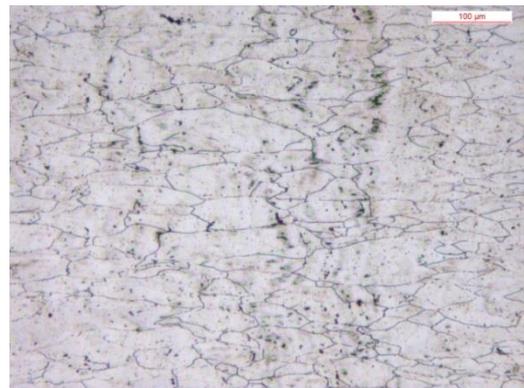
Ricapitolando i punti di analisi del campione sono stati quelli considerati in figura 7.9.

Viene dunque riportata la versione integrale delle micrografie di ogni singolo punto, anche quei punti che sono stati introdotti successivamente con il pedice A, realizzate con ingrandimenti di 50x e 100x:

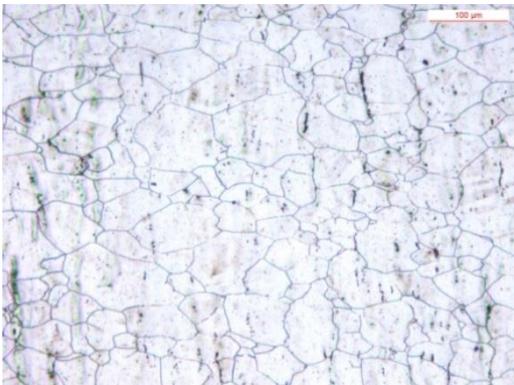
Punto 1 100x



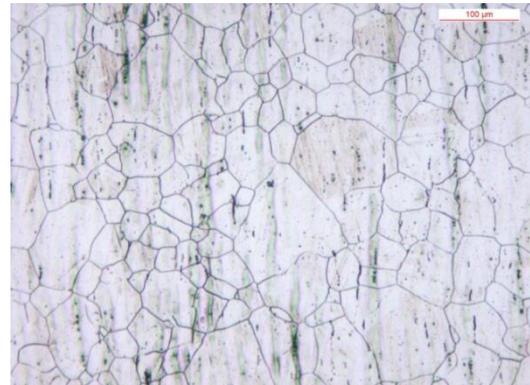
Punto 2 100x



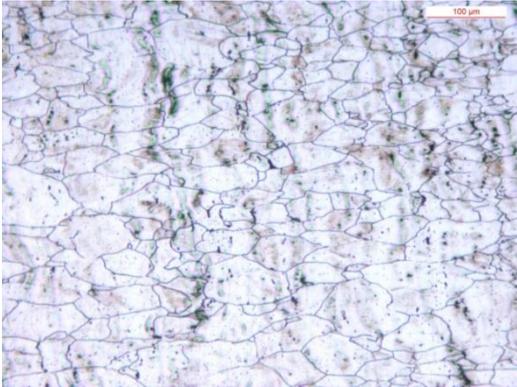
Punto 3 100x



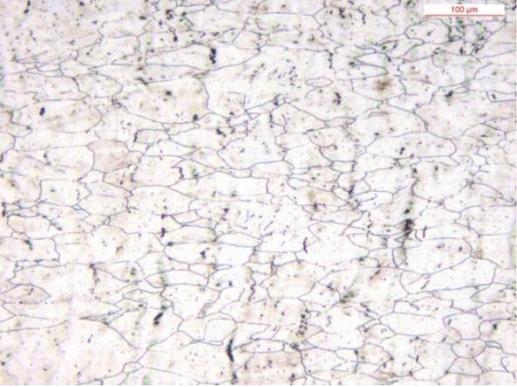
Punto 4 100x



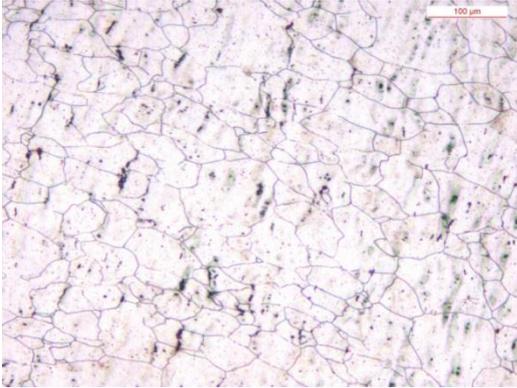
Punto 5 100x



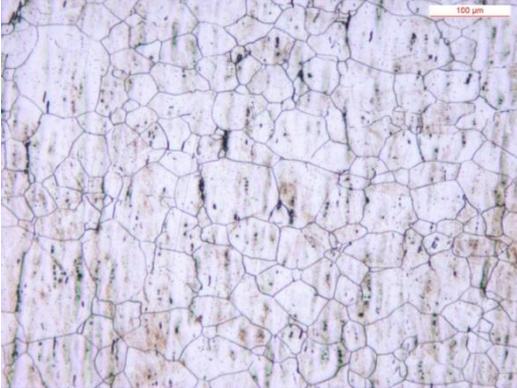
Punto 6 100x



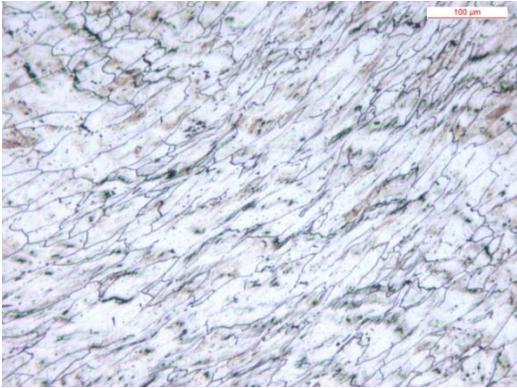
Punto 7 100x



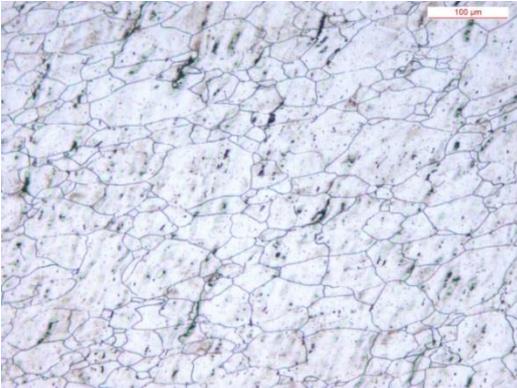
Punto 8 100x



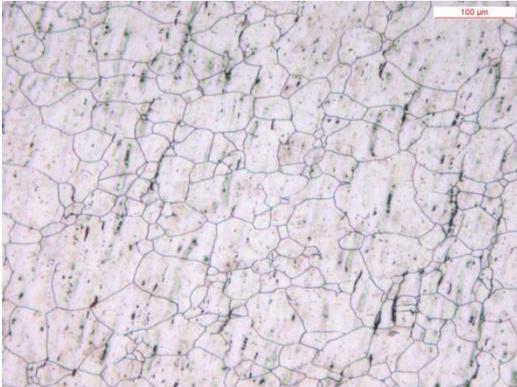
Punto 9 100x



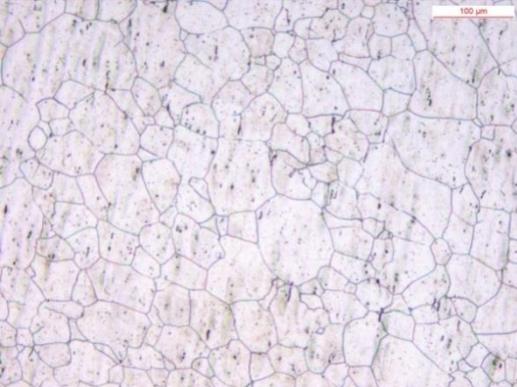
Punto 10 100x



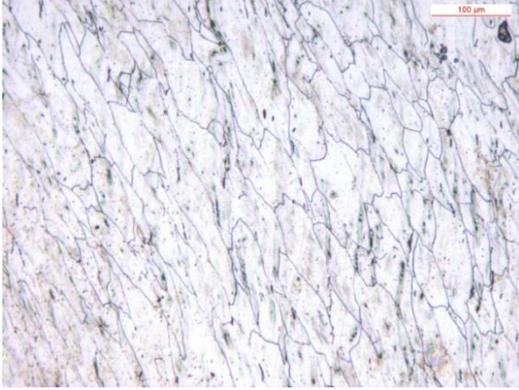
Punto 11 100x



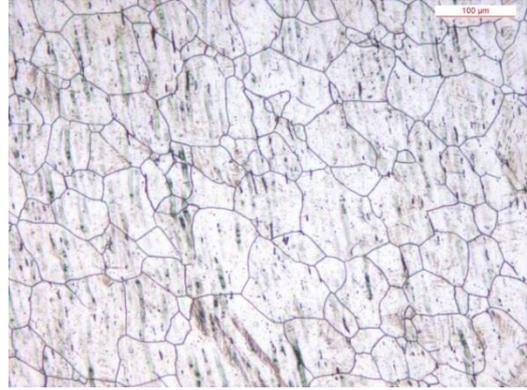
Punto 12 100x



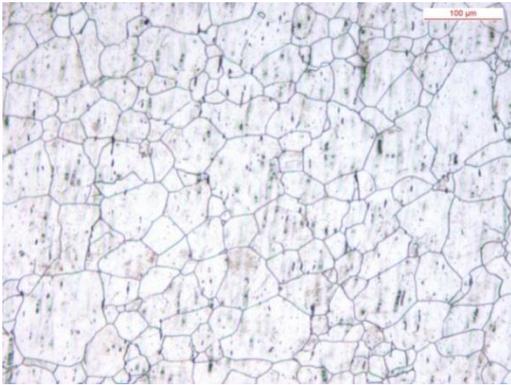
Punto 13 100x



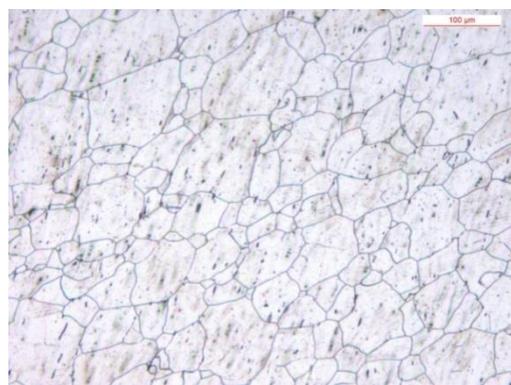
Punto 14 100x



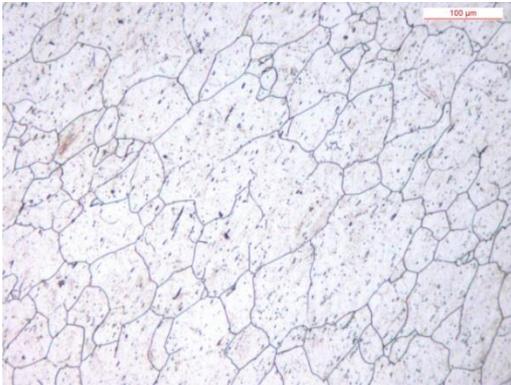
Punto 15 100x



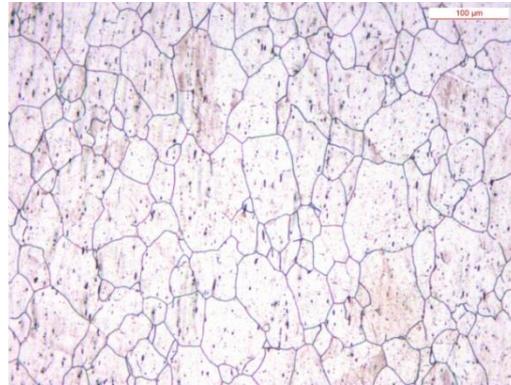
Punto 16 100x



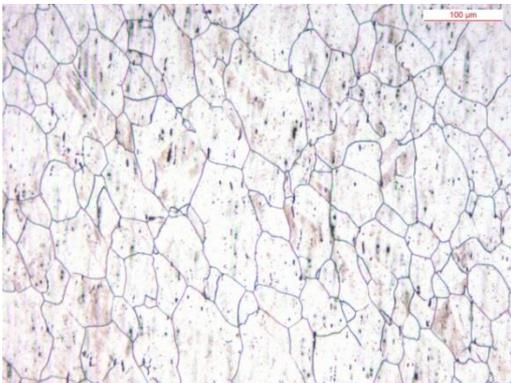
Punto 17 100x



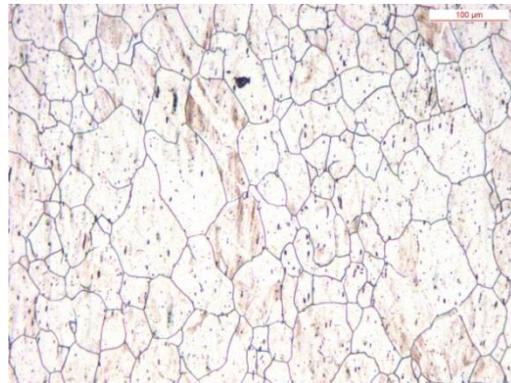
Punto 18 100x



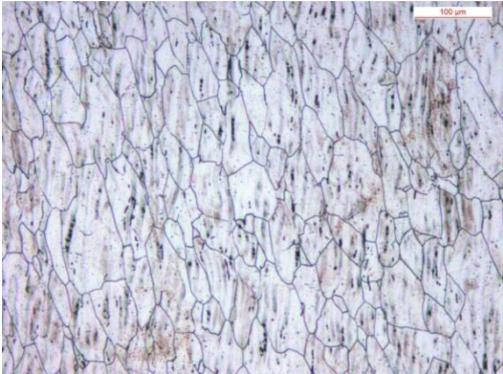
Punto 18A 100x



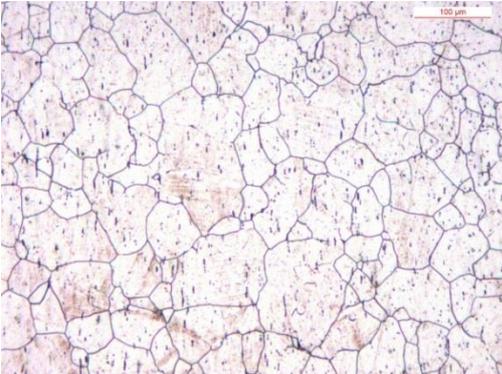
Punto 19 100x



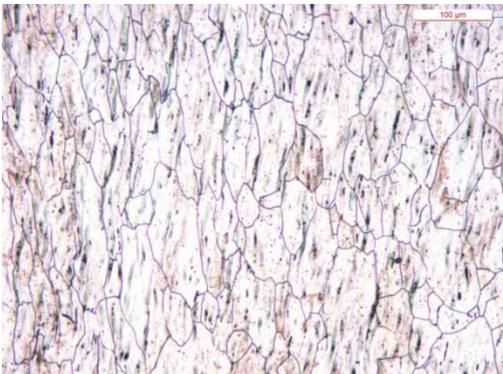
Punto 19A 100x



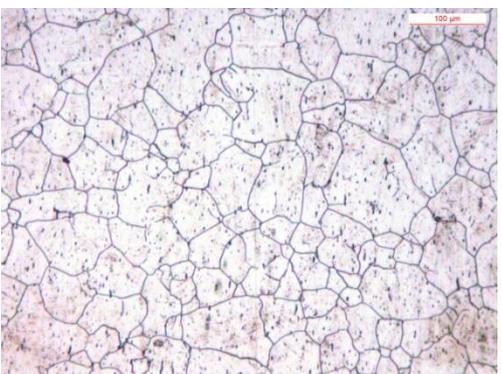
Punto 20 100x



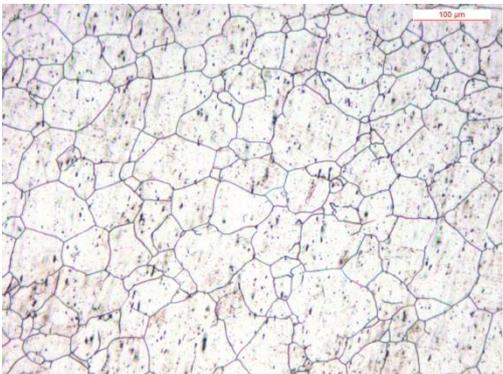
Punto 20A 100x



Punto 21 100x



Punto 21A 100x



I.2. Microdurezze

Si riportano ora tutte le misure di microdurezza eseguite con i profili, qui chiamati percorsi, che sono stati tracciati:

Percorso 1

Passo 1,39 Percorso verticale dal punto 1 al 4

Distanza	Tutte le misure							Media	Devstd
0	452	402	412	435	423			424,8	19,56272
1,23	388	394	404	381				391,75	9,742518
2,47	380	345	386	393				376	21,33854
3,71	412	365	412	413				400,5	23,67136
4,95	394	370	358	374	353	370		369,8333	14,31666
6,81	381	405	339	338	350	360	379	364,5714	24,85194
7,42	290	275	277	263				276,25	11,05667
8,66	253	228	240	243				241	10,29563
9,9	316	369	401	288	369	334	314	341,5714	39,53419

Percorso 2

Passo 1,34 Percorso verticale dal punto 5 al 8

Distanza	Tutte le misure						Media	Devstd	
0	434	427	385	363	391			400	29,83287
1,34	388	375	354	380				374,25	14,52297
2,68	348	362	367	342	383	363		360,8333	14,52469
4,03	350	374	381	360	335			360	18,45264
5,37	325	362	400	339	321	313		343,3333	32,65986
6,71	335	359	361	385	327			353,4	23,0391
8,06	400	363	386	356	376			376,2	17,64086
9,4	342	351	351					348	5,196152
10,75	397	333	387	320				359,25	38,40464

Percorso 3

passo 1,15 Percorso verticale dal punto 9 al 13

Distanza	Tutte le misure					Media	Devstd		
0	470	424	304	410	411			403,8	60,91141
1,15	378	409	421	406				403,5	18,19341
2,3	380	326	404	361	406			375,4	33,25357
3,45	415	400	413	388	384	400		400	12,60159
4,6	352	349	363	345				352,25	7,719024

5,75	383	388	386			385,6667	2,516611
6,9	319	320	333			324	7,81025
8,05	352	386	337	341	329	349	22,28228
9,2	380	353	367	364		366	11,10555
10,35	419	405	442	386	377	405,8	26,01346
11,5	436	413	444	431		431	13,14027

Percorso 4

Passo 0,875 Percorso verticale dal punto 14 al 17

Distanza	Tutte le misure					Media	Devstd
0	271	298	276	297	270	282,4	13,97498
0,875	306	287	290	314	360	311,4	29,37346
1,75	271	286	273			276,6667	8,144528
2,625	245	278	264	266		263,25	13,64734
3,5	301	291	276	288		289	10,29563
4,375	271	272	263			268,6667	4,932883
5,25	300	266	263	289	259	275,4	18,03607
6,125	296	309	316	307		307	8,286535
7	319	295	302	290		301,5	12,66228

Si ponga un piano di riferimento ad 1mm del punto più basso della gamba destra

Percorso I

Passo 1,14 Verticale dal basso verso l'alto a 0,5mm dal lato detsro

Distanza	Tutte le misure					Media	Devstd
0	301	312	310			307,6667	5,859465
1,14	338	352	347	309	352	339,6	18,03607
2,28	329	380	309	344	324	337,2	26,99444
3,42	357	335	369	335	341	347,4	15,05988
4,57	325	338	342	343		337	8,286535
5,71	316	333	329	337		328,75	9,105859
6,85	313	363	326	353	310	333	23,8642
8	317	306	311			311,3333	5,507571

Percorso II

Passo 1,14 Verticale dal basso verso l'alto a 1mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure					Media	Devstd
	319	342	353	321	350	337	16,04681
1,14	377	380	364	322	376	363,8	24,14953
2,28	333	332	335			333,3333	1,527525
3,42	385	363	406	343	405	380,4	27,30934
4,57	353	350	333	328	332	339,2	11,43241
5,71	304	317	326	346	339	326,4	16,83152
6,85	346	309	336	338		332,25	16,09089
8	316	312	289	336		313,25	19,2765

Percorso III

Passo 1,14 Verticale dal basso verso l'alto a 2mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure					Media	Devstd
0	379	369	360	371		369,75	7,804913
1,14	353	359	380	390	381	372,6	15,78924
2,28	376	348	352	341		354,25	15,19594
3,42	363	380	360	360		365,75	9,604686
4,57	365	343	358	363		357,25	9,945686
5,71	346	341	353			346,6667	6,027714
6,85	310	319	324	321		318,5	6,027714
8	330	345	310	324	345	330,8	14,85598

APPENDICE L

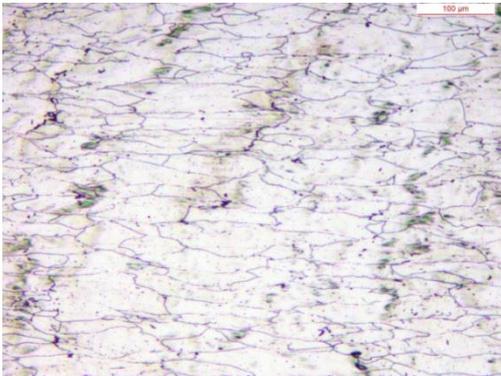
AISI 316 MONOSTADIO

L.1.Micrografie

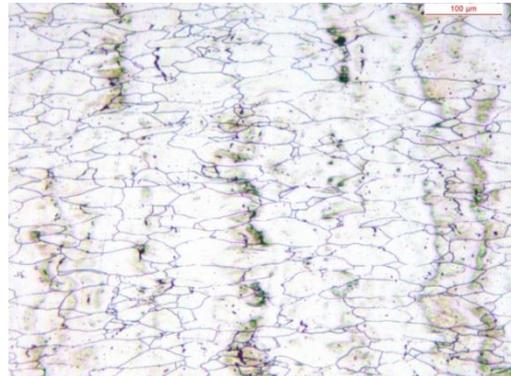
Vengo riportate come visto per gli altri campioni le micrografie relative ai punti di osservazione accordati, riportati per una maggior completezza nella figura 7.10.

Seguendo l'ordine numerico prefissato seguono le micrografie a 50 e 100x di ingrandimento dei diversi punti:

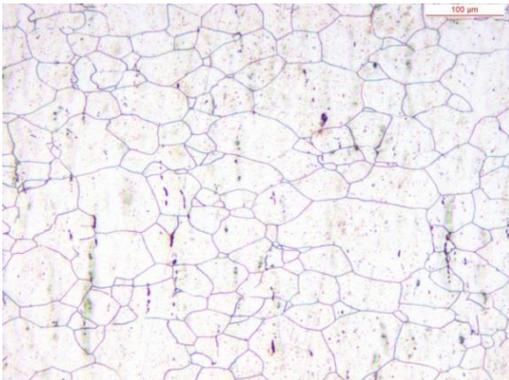
Punto 1 100x



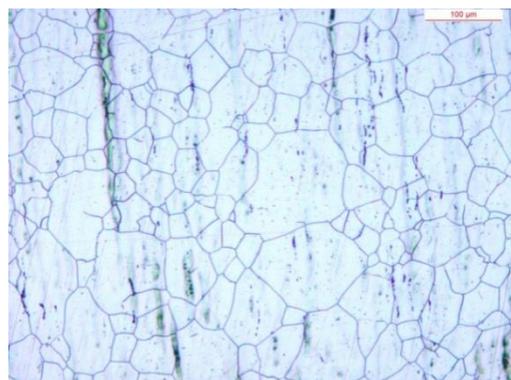
Punto 2 100x



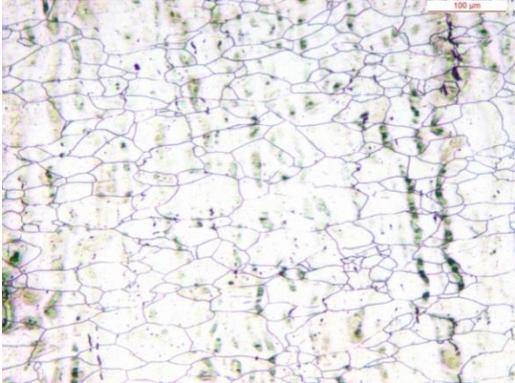
Punto 3 100x



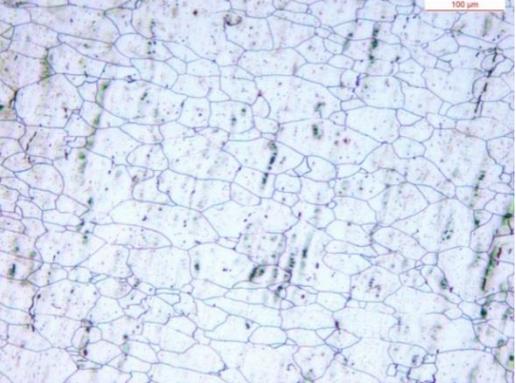
Punto 4 100x



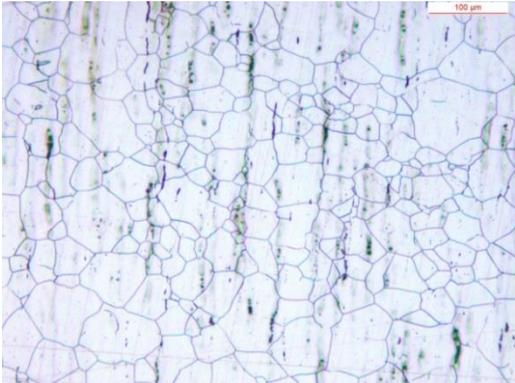
Punto 5 100x



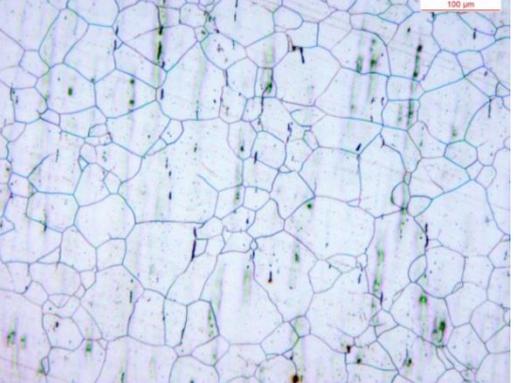
Punto 6 100x



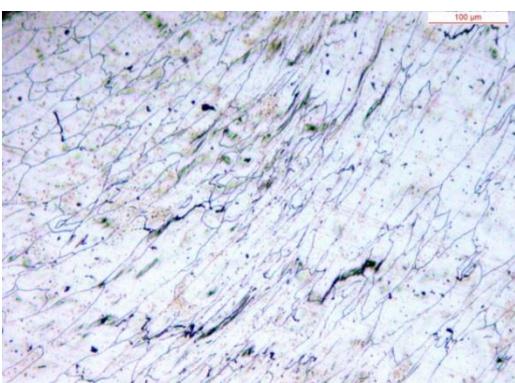
Punto 7 100x



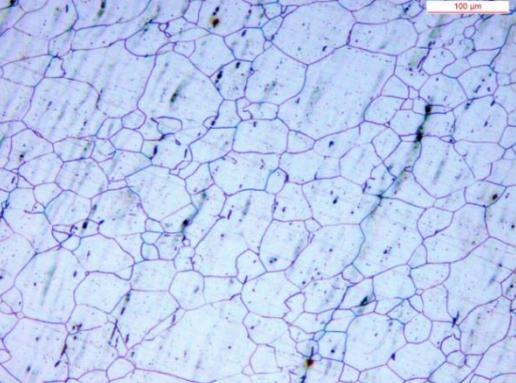
Punto 8 100x



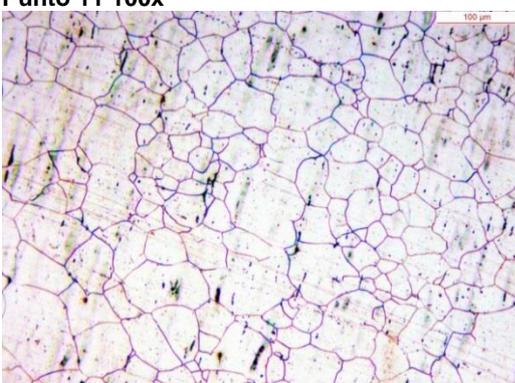
Punto 9 100x



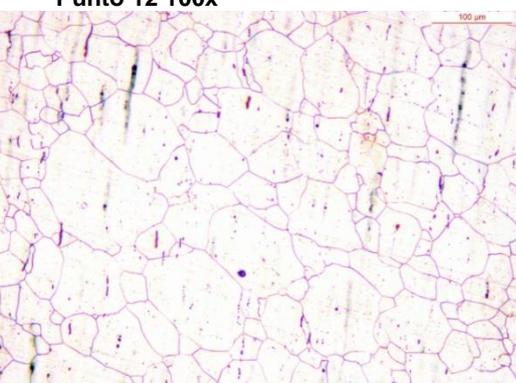
Punto 10 100x



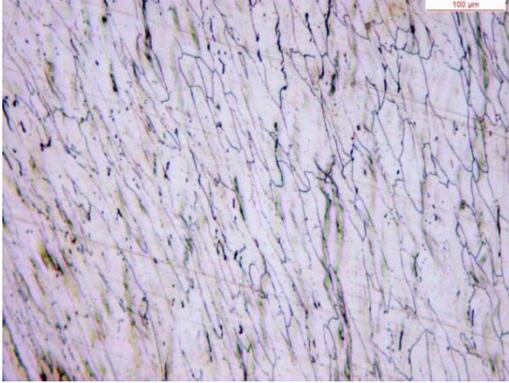
Punto 11 100x



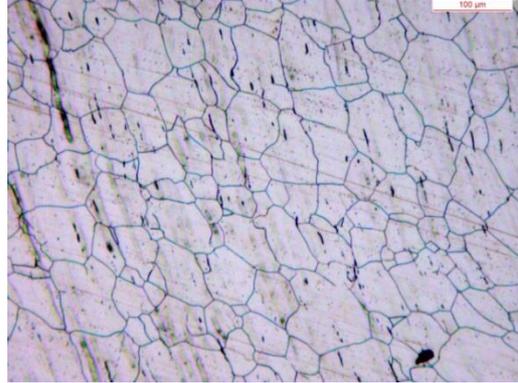
Punto 12 100x



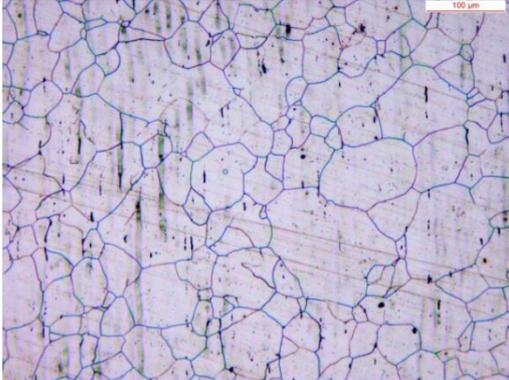
Punto 13 100x



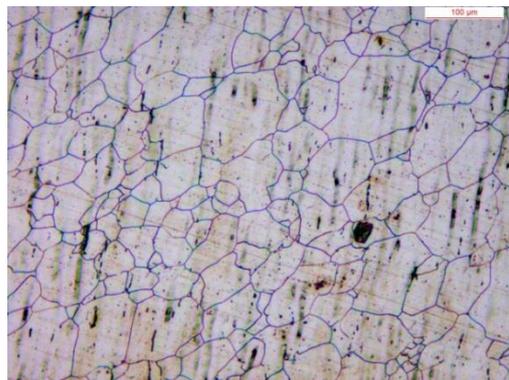
Punto 14 100x



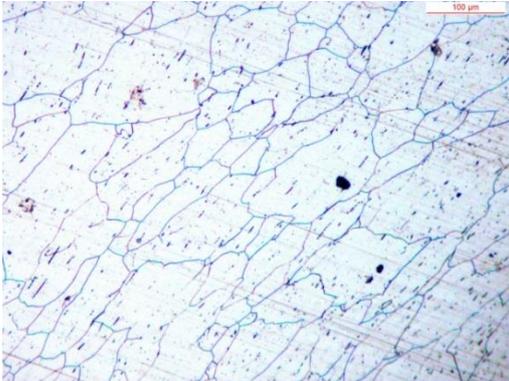
Punto 15 100x



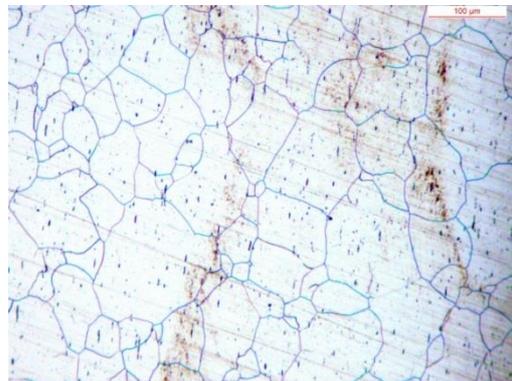
Punto 16 100x



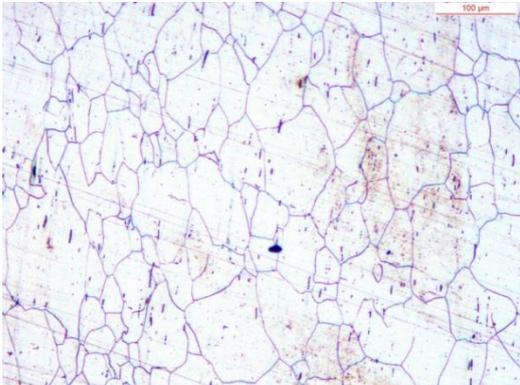
Punto 17 100x



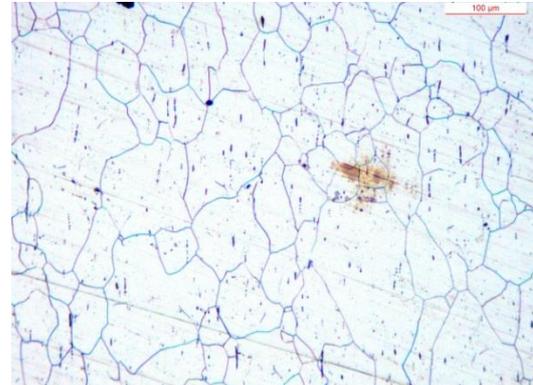
Punto 18 100x



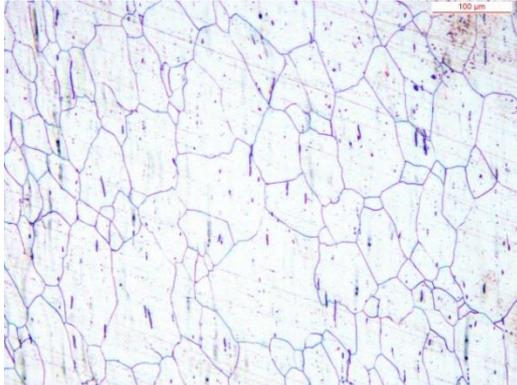
Punto 18A 100x



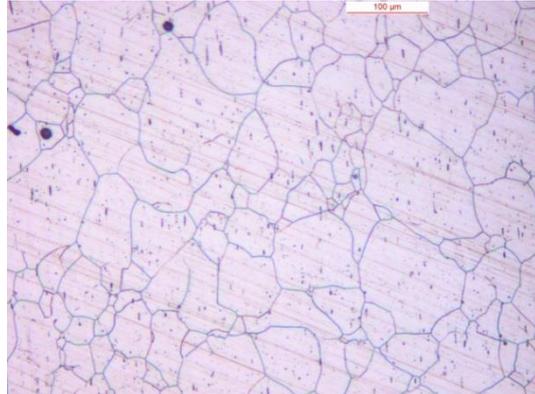
Punto 19 100x



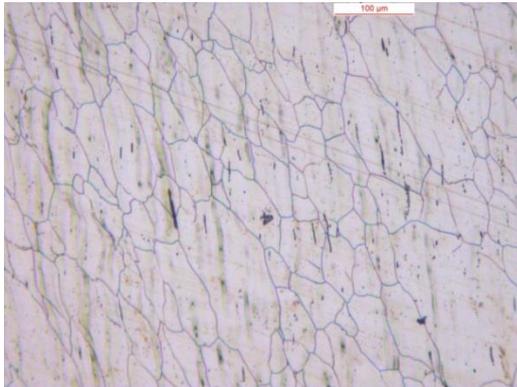
Punto 19A 100x



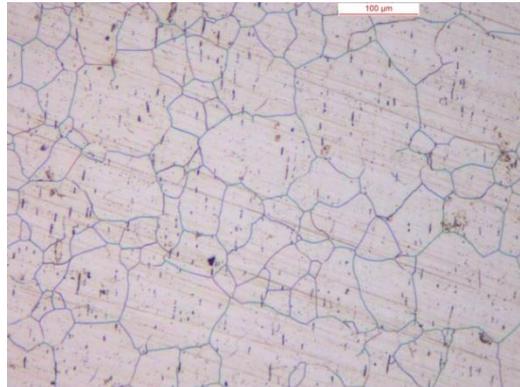
Punto 20 100x



Punto 20A 100x



Punto 21 100x



L.2.Microdurezze

Lo spazio che segue vede la lista delle microdurezze effettuate sul provino con tanto di media e deviazione standard, per ogni singolo punto.

I parametri di realizzazione sono gli stessi validi per i rimanenti campioni.

Percorso 1

Passo 1,39 percorso verticale dal punto 1 al 4

Distanza	Tutte le misure								Media	Dev std
0	357	367	375	370					367,25	7,588368
1,39	342	373	382	367	398	358	384		372	18,44813
2,78	357	365	317	405	375				363,8	31,8622
4,17	354	337	335	376	366	382	363		359	18,11077
5,56	326	339	329						331,3333	6,806859
6,95	245	236	262	257	257				251,4	10,64425
8,35	249	236	250						245	7,81025
9,74	327	296	321	325					317,25	14,3846

Percorso 2

Passo 1,51 Percorso verticale dal punto 5 al 8

Distanza	Tutte le misure						Media	Dev std
0	336	372	355	374	371		361,6	16,19568
1,51	348	387	353	379	361	373	366,7143	13,98469
3,02	383	312	350	371	331	380	354,5	28,68275
4,54	335	367	357	378	311	331	346,5	25,1217
6,06	332	336	321	326			328,75	6,601767
7,57	319	322	319				320	1,732051
9,08	319	354	361	342	371	329	348,4286	19,12988
10,6	346	349	369	357			355,25	10,27538

Percorso 3

Passo 1,15 Percorso verticale dal punto 9 al 13

Distanza	Tutte le misure						Media	Dev std
0	373	396	375	418	418	360	390	24,56827
1,15	370	383	383	383			379,75	6,5
2,3	387	397	335	396			378,75	29,5113
3,45	360	346	367	358			357,75	8,732125
4,7	377	342	340	340			349,75	18,19112
5,75	338	328	318	335			329,75	8,883505
6,9	341	312	335	336			331	12,93574
8,05	335	361	313	336	328		334,6	17,38678
9,2	372	342	358	351			355,75	12,65899
10,35	361	351	353				355	5,291503
11,5	352	419	415	411			399,25	31,66886

Percorso 4

Passo 0,86 Percorso verticale dal punto 14 al 17

Distanza	Tutte le misure					Media	Dev std
0	352	354	320	364		347,5	19,07005
0,86	340	342	338			340	2
1,73	358	322	347	381	328	347,2	23,78445
2,6	325	313	313			317	6,928203
3,46	332	326	322			326,6667	5,033223
4,33	333	291	313	292	299	305,6	17,65786
5,2	334	343	301	318	313	321,8	16,7541
6,07	340	357	351	348		349	7,071068
6,93	382	366	371	379		374,5	7,325754
7,8	392	421	385	388		396,5	16,58312

Considerando un piano orizzontale a distanza 1mm dal punto più basso della gamba destra

Percorso I

Passo 1,14 Percorso verticale dal basso verso l'alto a 0,5mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Dev std
0	336	348	345				343	6,244998
1,14	310	330	340	310	333		324,6	13,81304
2,28	349	336	329	326			335	10,23067
3,42	340	325	330	351	328		334,8	10,66302
4,47	319	353	301	342	336	333	330,6667	18,31575
5,71	313	330	310	313			316,5	9,110434
6,85	300	336	308	298	322		312,8	16,03746
8	345	338	351	335			342,25	7,182154

Percorso ii

Passo 1,14 Percorso verticale dal basso verso l'alto a 1mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Dev std
0	310	313	312				311,6667	1,527525
1,14	337	372	350	362	338	336	349,1667	15,05213
2,28	333	306	336	334			327,25	14,22146
3,42	319	327	341	326			328,25	9,215024
4,47	334	369	363	319	353		347,6	20,7798
5,71	304	353	310	323	328		323,6	19,06043
6,85	298	313	303	329	336	310	314,8333	14,82453
8	370	367	306	334	320	387	347,3333	31,96039

Percorso III

Passo 1,14 Percorso verticale dal basso verso l'alto a 2mm dal bordo destro

Distanza	Tutte le misure						Media	Dev std
0	350	372	383	388			373,25	16,87947
1,14	355	349	378	321	352		351	20,3101
2,28	344	363	353	340			350	10,23067
3,42	358	341	322	353			343,5	16,01041
4,47	376	385	383				381,3333	4,725816
5,71	361	342	344	342			347,25	9,215024
6,85	388	327	348	334			349,25	27,26872
8	308	365	338	325	351	338	337,5	19,82675

APPENDICE M

SAF 2205 MONOSTADIO

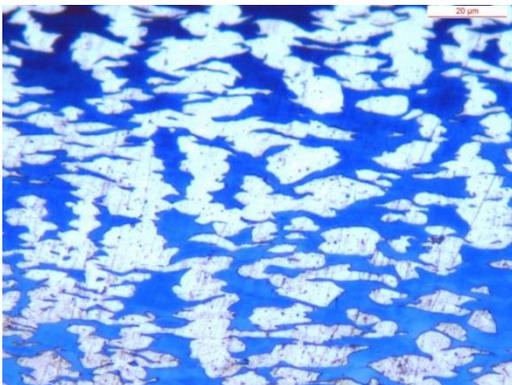
M.1.Micrografie

Appendice riservata alle micrografie ottenute tramite il LAS del provino in acciaio inossidabile austeno-ferritico stampato con la pressa Erfurt. Le immagini fanno riferimento a precise parti del campione in esame che sono dunque riassumibili come quelli rappresentati in figura 7.11..

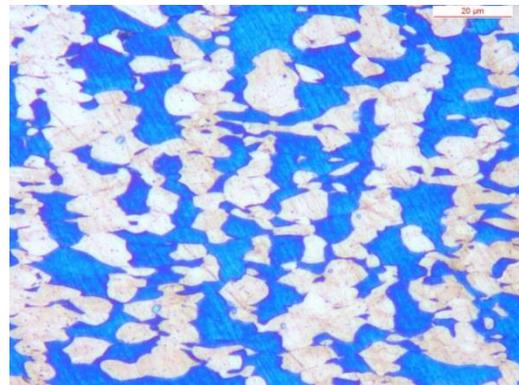
Si preannuncia però che il punto 20A non è stato inserito in quanto la parte interna della gamba destra non risultava così formata da permettere da permette l'ottenimento di una micrografia adeguata.

Le immagini micrografiche che saranno presentate riprendono il punto in analisi, in primis con un minor ingrandimento 200x in modo da permettere la localizzazione dello stesso nella sezione; poi un ingrandimento elevato tale da permettere di apprezzare in modo adeguato la microstruttura attaccata. In ordine abbiamo:

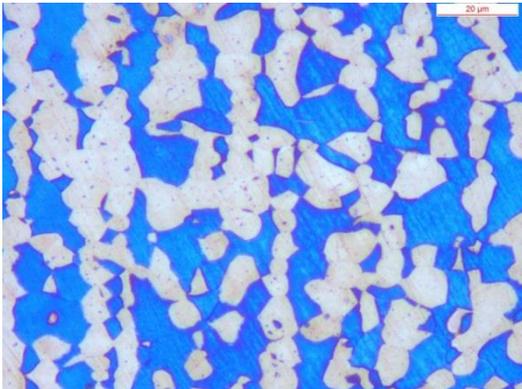
Punto 1 500x



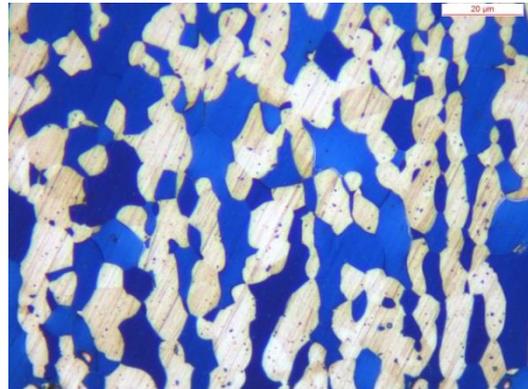
Punto 2 500x



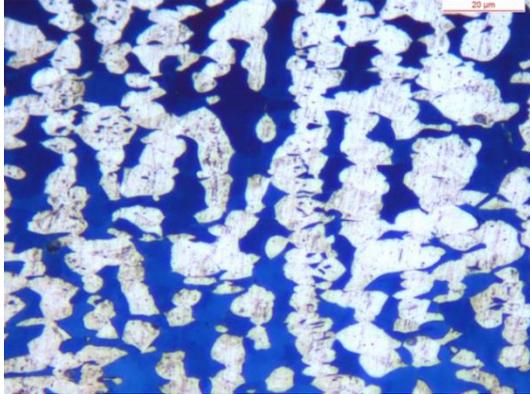
Punto 3 500x



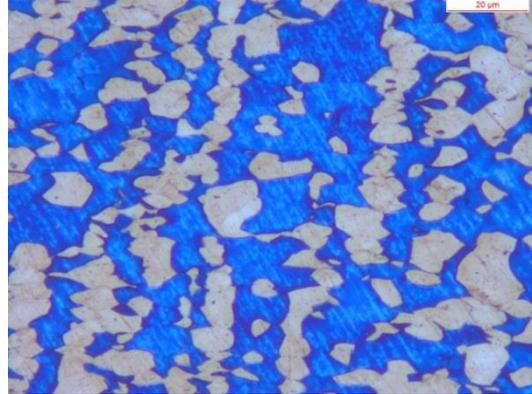
Punto 4 500x



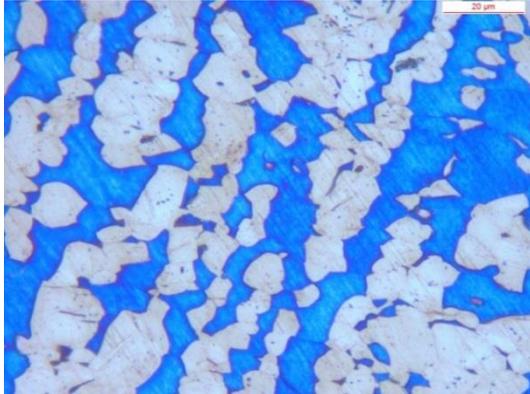
Punto 5 500x



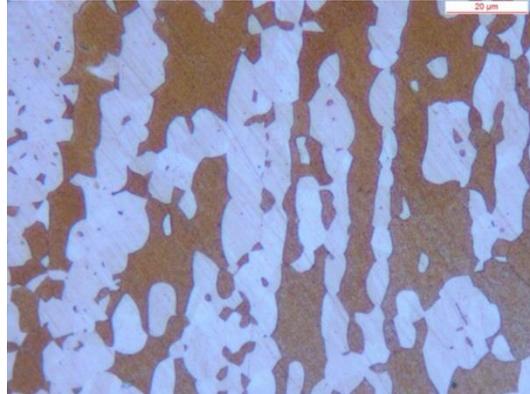
Punto 6 500x



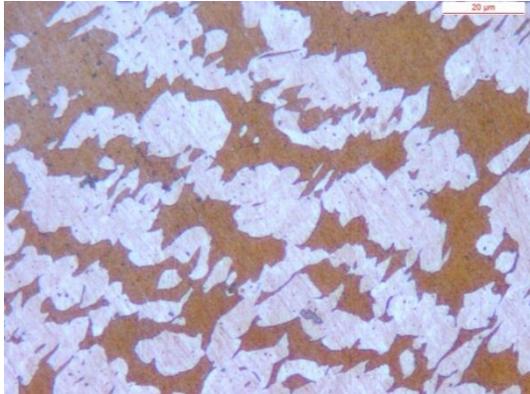
Punto 7 500x



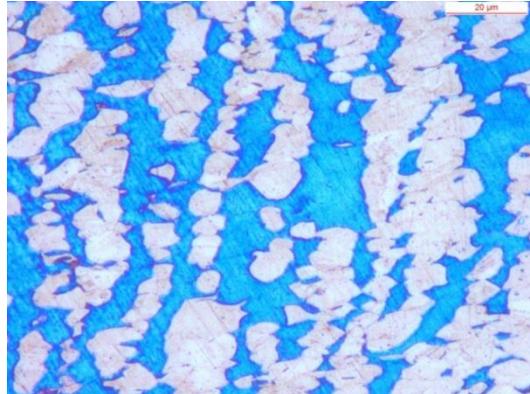
Punto 8 500x



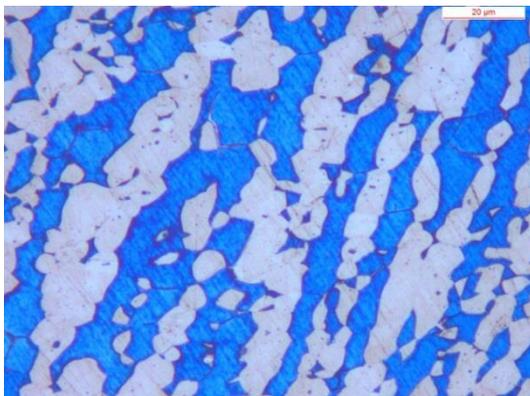
Punto 9 500x



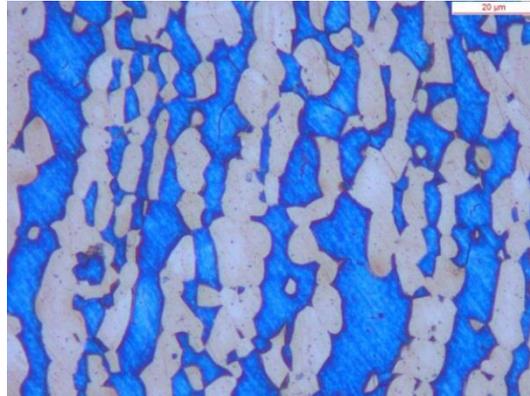
Punto 10 500x



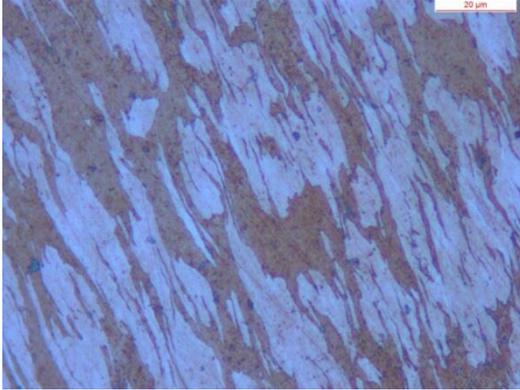
Punto 11 500x



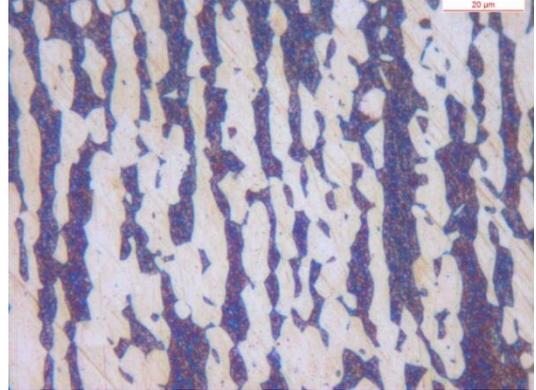
Punto 12 500x



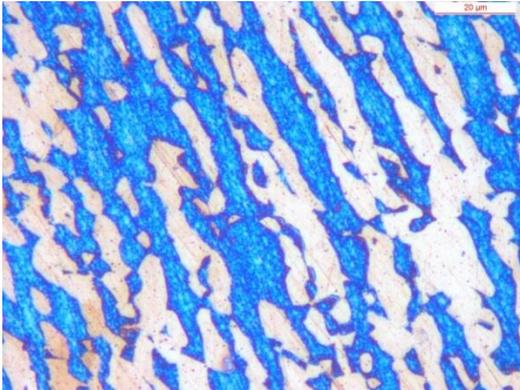
Punto 13 500x



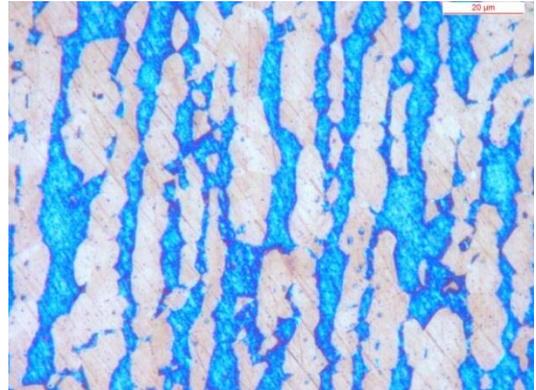
Punto 14 500x



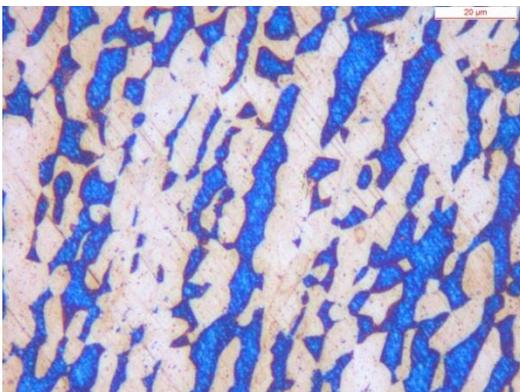
Punto 15 500x



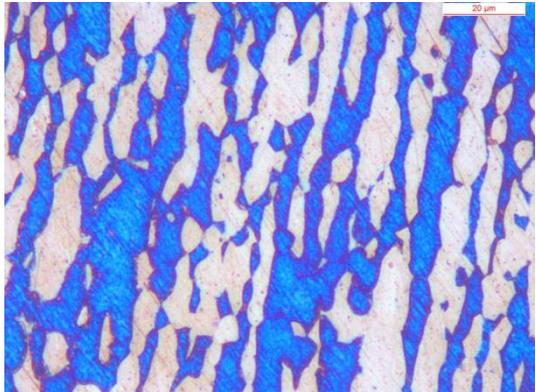
Punto 16 500x



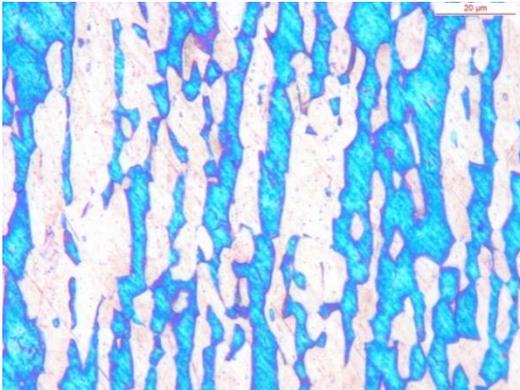
Punto 17 500x



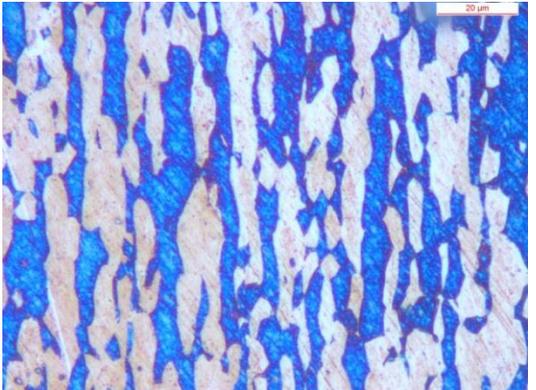
Punto 18 500x



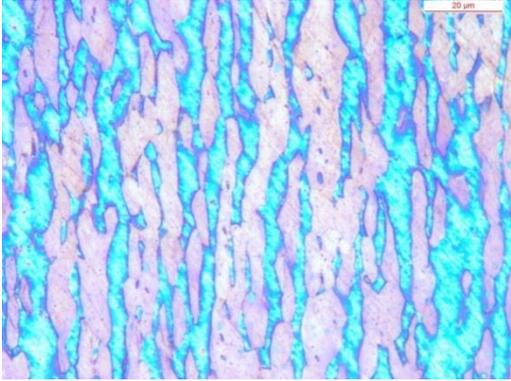
Punto 18A 500x



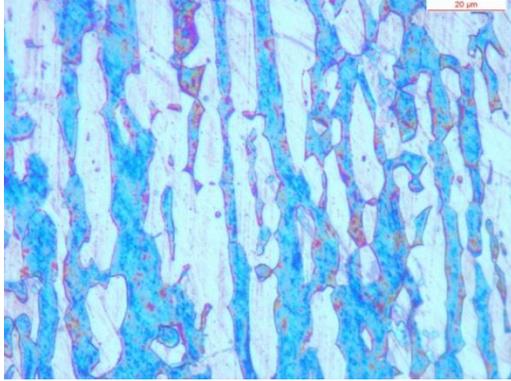
Punto 19 500x



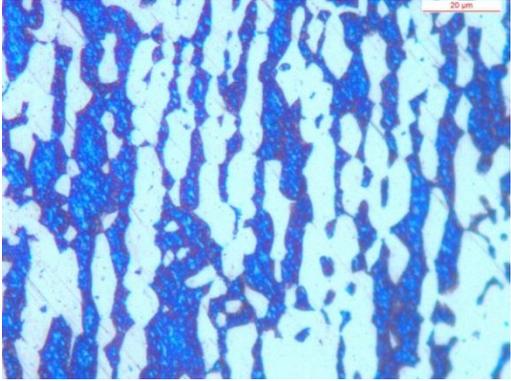
Punto 19A 500x



Punto 20 500x



Punto 21 500x



Punto 21A 500x

