

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Caratterizzazione meccanica di un acciaio da bonifica 39NiCrMo3 in funzione della temperatura di rinvenimento.

Relatore: Prof. Marco V. BONIARDI

Co-relatore: Ing. Andrea CASAROLI

Tesi di Laurea di:

Daniele FLOREANO

# Indice

<b>SOMMARIO .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1 .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Cenni di metallurgia degli acciai al carbonio .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Classificazione degli Acciai.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Acciai da costruzione di uso generale .....	9
1.2.2 Acciai speciali da costruzione .....	9
1.2.3 Acciai per utensili .....	12
1.2.4 Acciai inossidabili .....	13
1.2.5 Acciai per usi particolari .....	14
<b>1.3 Acciai da bonifica .....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITOLO 2 .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 I trattamenti termici .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Punti critici .....	17
2.1.2 Velocità di raffreddamento .....	18
2.1.3 Le curve di Bain T.T.T. (trasformazioni-temperatura-tempo).....	20
2.1.4 Le curve anisoterme dell'austenite.....	23
2.1.5 Effetti degli elementi di lega e di altri fattori sulle curve T.T.T e C.C.T. .....	24
<b>2.2 Le strutture degli acciai .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Austenite .....	25

2.2.2 Ferrite.....	26
2.2.3 Cementite.....	27
2.2.4 Perlite.....	27
2.2.5 Bainite.....	28
2.2.6 Martensite .....	28
<b>2.3 Trattamenti termici del ciclo tecnologico degli acciai da bonifica .....</b>	<b>30</b>
2.3.1 Normalizzazione e ricottura di lavorabilità .....	31
2.3.2 Tempra.....	32
2.3.3 Rinvenimento.....	35
<b>CAPITOLO 3.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Acciaio “39NiCrMo3” .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPITOLO 4.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Frattura duttile e fragile .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 La prova di trazione .....</b>	<b>47</b>
4.2.1 Macchina di prova .....	47
4.2.2 Provini .....	48
4.2.3 Analisi della prova di trazione.....	50
4.2.4 Grandezze della prova di trazione .....	55
<b>4.3 La prova di resilienza .....</b>	<b>56</b>
4.3.1 Macchina di prova .....	56
4.3.2 Provini .....	57
4.3.3 Analisi e grandezze della prova di resilienza .....	58
<b>4.4 La prova di meccanica della frattura.....</b>	<b>61</b>

4.4.1	Approccio alla meccanica della frattura: Inglis e Griffith .....	61
4.4.2	Il fattore di intensificazione degli sforzi “K” e la tenacità “K <sub>c</sub> ” .....	64
4.4.3	Meccanica della frattura elasto-plastica .....	67
4.4.4	Determinazione sperimentale della tenacità “K <sub>IC</sub> ” .....	68
4.4.5	Determinazione sperimentale di “J <sub>IC</sub> ” .....	70
<b>4.5</b>	<b>La prova di fatica .....</b>	<b>73</b>
4.5.1	La fatica.....	73
4.5.2	Carichi ripetuti e/o variabili nel tempo .....	75
4.5.3	Innesco e propagazione della cricca.....	76
4.5.4	La prova di fatica e la determinazione del limite di fatica.....	79
4.5.5	Provini.....	80
4.5.6	Dal provino al componente .....	81
<b>4.6</b>	<b>La prova di durezza .....</b>	<b>85</b>
<b>CAPITOLO 5</b>	<b>.....</b>	<b>86</b>
<b>5.1</b>	<b>Preparazione dei provini .....</b>	<b>86</b>
5.1.1	Taglio e codifica.....	86
5.1.2	Analisi chimica.....	90
5.1.3	Trattamenti termici.....	91
5.1.4	Disegni tecnici dei provini .....	92
<b>5.2</b>	<b>Prova di trazione .....</b>	<b>97</b>
5.2.1	Esecuzione e analisi della prova .....	97
5.2.2	Analisi macroscopica delle superfici di frattura.....	109
<b>5.3</b>	<b>Prova di resilienza .....</b>	<b>110</b>
5.3.1	Esecuzione e analisi della prova .....	110
5.3.2	Analisi macroscopica delle superfici di frattura.....	116

<b>5.4 Prova di meccanica della frattura .....</b>	<b>119</b>
5.4.1 Esecuzione e analisi della prova .....	119
5.4.2 Precricatura .....	120
5.4.3 Test per la determinazione di $J_{IC}$ .....	126
5.4.4 Determinazione della curva J-R.....	132
<b>5.5 Prova di fatica a flessione rotante .....</b>	<b>141</b>
5.5.1 Metodo “Dixon”, “UP-AND-DOWN” method.....	143
5.5.2 Esecuzione e analisi della prova .....	146
5.5.3 Tratto a termine, fatica a basso numero di cicli.....	152
5.5.4 Curve di Wöhler .....	156
<b>5.6 Prova di durezza Vickers .....</b>	<b>161</b>
<b>CAPITOLO 6.....</b>	<b>163</b>
<b>6.1 Analisi microscopica delle superfici di frattura.....</b>	<b>163</b>
6.1.1 Provini di trazione.....	164
6.1.2 Provini di resilienza .....	166
6.1.3 Provini di fatica.....	170
<b>6.2 Analisi metallografica.....</b>	<b>175</b>
6.2.1 Metallografie 39NiCrMo3 .....	176
<b>CAPITOLO 7.....</b>	<b>180</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>185</b>

## Sommario

Uno dei prerequisiti per la scelta di un materiale durante la progettazione di un nuovo componente meccanico è la conoscenza delle sue caratteristiche meccaniche. L'oggetto di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione meccanica di un acciaio da bonifica, il 39NiCrMo3. In particolare si è analizzato l'effetto della diversa temperatura di rinvenimento durante il trattamento termico di bonifica valutando con prove meccaniche e analisi metallografiche le diverse proprietà del materiale. I risultati dell'analisi sperimentale sono mirati a trovare l'effetto della temperatura del trattamento termico sulle proprietà meccaniche e microstrutturali.

**Parole chiave:** tempra, rinvenimento, bonifica, 39NiCrMo3, caratterizzazione meccanica.

## Abstract

One of the most important aspect when a new material has to be chosen for the design of a new mechanical component is the knowledge of its mechanical properties. The thesis aim is the mechanical characterization of a quenched and tempered steel, the 39NiCrMo3. The different properties of the material have been evaluated on the basis of mechanical proof and metallographic analysis. The aim of the experimental analysis results is to find out the effect of the heat treatment temperature on the mechanical and microstructural properties of the material.

**Keywords:** hardening, quenched and tempered steel, 39NiCrMo3 , mechanical characterization.

## Capitolo 3

### 3.1 Acciaio “39NiCrMo3”

Il materiale oggetto del seguente lavoro di tesi è un acciaio da bonifica ampiamente utilizzato in campo industriale. Le norme europee di riferimento per l'acciaio “39NiCrMo3” sono la UNI 10083-3 (laminati a caldo) e la UNI 10277-5 (deformati a freddo).

Essendo un acciaio da bonifica è classificabile come un acciaio del secondo gruppo e ricordandoci che questi vengono designati in base alla composizione chimica e i valori dei principali elementi di lega per il 39NiCrMo3 sono: 0,39% di carbonio, 0,75% di nichel, 0,75% di cromo e 0,3% di molibdeno.

I valori limite percentuali di composizione chimica secondo normativa sono riportati nella tabella 3.1:

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Pb</b>
<b>% min.</b>	0,35	0,15	0,5	-	0,02	0,06	0,15	0,7	0,02	0,15
<b>% max.</b>	0,43	0,4	0,8	0,025	0,035	1	0,25	1	0,05	0,3

*Tabella 3.1 Composizione chimica acciaio 39NiCrMo3*

Cerchiamo ora di approfondire l'importanza di nichel, cromo e molibdeno come elementi alliganti in questo acciaio.

Il nichel aggiunto in lega oltre ad essere un elemento austenitizzante conferisce importanti proprietà che facilitano l'esecuzione dei trattamenti termici portando grandi miglioramenti alle caratteristiche meccaniche del materiale:

- diminuzione della temperatura di ricottura e di tempra poiché abbassa i punti critici nella fase di riscaldamento, con tutti i vantaggi pratici che ne derivano;
- diminuzione della velocità critica con la possibilità di temprare con mezzi meno drastici evitando la possibilità di cricche da tempra;

- aumento della penetrazione di tempra, conseguenza anch'essa della riduzione della velocità critica; permette quindi di poter limitare le differenze di strutture ottenibili tra la periferia e il centro del pezzo a seguito del trattamento;
- aumento della tenacità a parità di resistenza alla trazione, molto importante per gli acciai con struttura di ricottura o martensitica rinvenuta; il nichel è quindi un elemento desiderabile negli acciai di questo tipo e a maggior ragione se devono essere impiegati a basse temperature.

Il cromo aggiunto in lega conferisce le seguenti proprietà:

- allo stato ricotto quando l'acciaio ha una struttura perlitica aumenta la resistenza a trazione senza ridurre eccessivamente le proprietà di duttilità e resilienza;
- incrementa la temprabilità dell'acciaio infatti all'aumentare della percentuale in lega di cromo diminuisce la velocità critica infatti è possibile per determinati contenuti di cromo eseguire un raffreddamento in aria;
- conferisce stabilità alle strutture sottoposte al rinvenimento;
- aumenta la resistenza all'usura grazie alla sua particolare tendenza a formare carburi.

Il molibdeno aggiunto in lega conferisce le seguenti proprietà:

- aumenta la temprabilità dell'acciaio in modo più marcato rispetto al cromo;
- aumenta la resistenza meccanica del materiale;
- aumenta la stabilità della martensite a temperature elevate;
- aumenta la resistenza allo scorrimento viscoso (creep) grazie alla formazione di carburi molibdeno-ferro molto stabili;

- incrementa il limite di fatica;
- elimina il pericolo della fragilità da rinvenimento;
- mantiene nell'acciaio le caratteristiche di lavorabilità a caldo, a freddo e di saldabilità.

Nonostante l'aggiunta degli elementi di lega che possono influenzare le differenti caratteristiche meccaniche o di lavorabilità è opportuno sottolineare che essendo un acciaio da bonifica le proprietà finali dipendono molto dalla temperatura di rinvenimento; a questo proposito riportiamo il diagramma in figura 3.1, fornito da Rodacciai, dove vengono illustrate le principali proprietà meccaniche di interesse in funzione appunto della temperatura di rinvenimento.

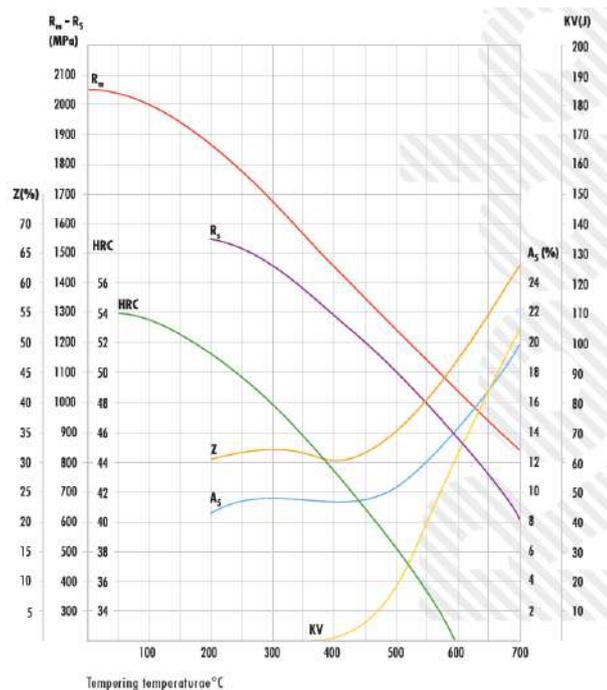


Figura 3.1 Andamento delle principali caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura di rinvenimento.

L'intervallo di temperatura suggerito per il trattamento di rinvenimento sull'acciaio 39NiCrMo3 è compreso tra 550÷650 [°C] e garantisce un buon

compromesso tra le caratteristiche di resistenza meccanica e di tenacità del materiale. Riportiamo le temperature e i diagrammi delle curve T.T.T e C.C.T. dell'acciaio oggetto della caratterizzazione, necessarie per il corretto svolgimento dei trattamenti termici.

#### WORKING TEMPERATURES RECOMMENDED

Operation	Hot forgings deformation	Isothermal annealing	Soft annealing	Quenching in oil	Tempering
°C	850÷1150	830÷860 → 650	640÷680	830÷850	550÷650

Tabella 3.2 Temperature raccomandate per i trattamenti termici dell'acciaio 39NiCrMo3.

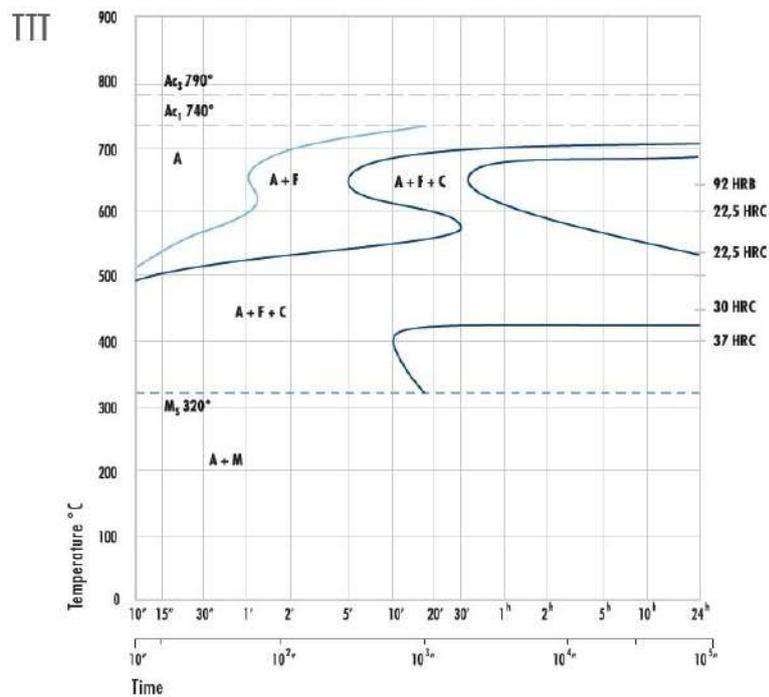


Figura 3.2 Curva T.T.T acciaio 39NiCrMo3.

CCT

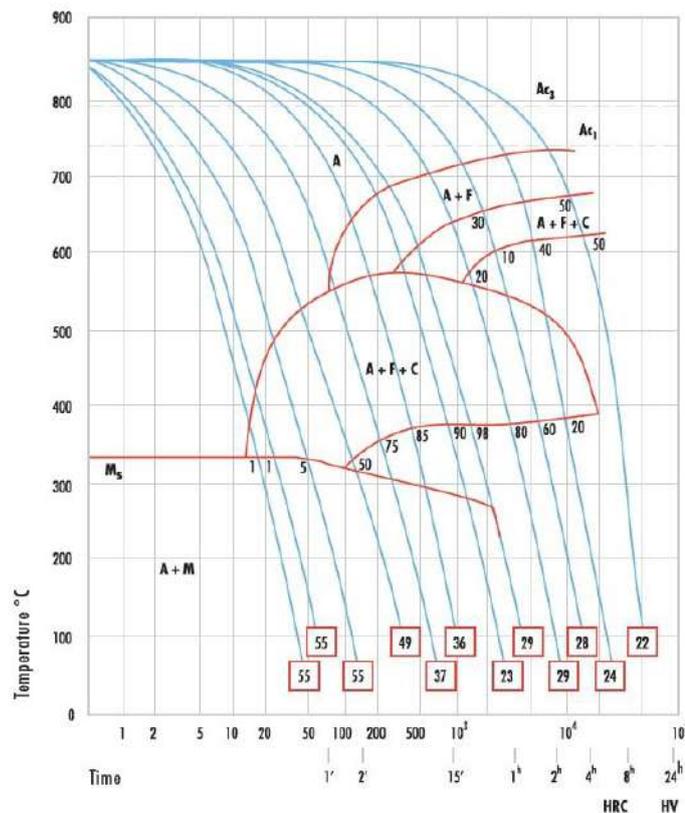


Figura 3.3 Curva C.C.T acciaio 39NiCrMo3.

Le elevate caratteristiche meccaniche che questo acciaio può assumere lo rendono uno tra gli acciai da bonifica più utilizzati in commercio. Grazie alla resistenza meccanica, alla tenacità anche a basse temperature, alla resistenza all'usura e alla resistenza a fenomeni di fatica i suoi impieghi possono spaziare dall'industria automobilistica a quella aeronautica dove sollecitazioni dinamiche di flessione, torsione e trazione gravano sui componenti in esercizio. In particolare il “39NiCrMo3” viene impiegato nella realizzazione di alberi di trasmissione, alberi a gomito, mandrini per macchine utensili, semiassi di automezzi, bielle, ingranaggi per trasmissione di potenza, valvole di aspirazione, ghiere, tiranti ecc.. Non meno importante è la buona temprabilità del materiale garantita fino a spessori fino a 100 [mm]. Di seguito riportiamo

alcune tabelle con le principali caratteristiche meccaniche del materiale e la curva di temprabilità della prova Jominy.

#### MECHANICAL PROPERTIES - AS ROLLED CONDITION

Size mm	HB max to condition:		Quenched and tempered (+QT)			
	Treated to improve shearability (+S)	Soft annealing (+A)	R <sub>p0.2</sub> (MPa) min	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%) min	KV (J) min
≤ 16	where the shearability is of importance, this steel should be ordered in the "soft annealed" condition	240	785	980±1180	11	30
> 16 ≤ 40		240	735	930±1130	11	30
> 40 ≤ 100		240	685	880±1080	12	30
> 100 ≤ 160		240	635	830±980	12	30
> 160 ≤ 250		240	540	740±880	13	30

#### MECHANICAL PROPERTIES - BRIGHT PRODUCTS CONDITION\*

Size mm	as Rolled + Turned (+A+SH)	Quenched + Tempered + Turned (+QT+SH)**			Quenched + Tempered + Cold Drawn (+QT+C)			as Rolled + Cold Drawn(+A+C)
	Hardness HB max	R <sub>p0.2</sub> (MPa) min	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%) min	R <sub>p0.2</sub> (MPa) min	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%) min	Hardness HB max
≥ 5 ≤ 10	-	-	-	-	735	980±1180	8	295
> 10 ≤ 16	-	-	-	-	700	930±1130	8	290
> 16 ≤ 40	240	735	930±1130	11	700	930±1130	9	285
> 40 ≤ 63	240	735	880±1080	12	625	880±1080	10	280
> 63 ≤ 100	240	735	880±1080	12	600	880±1080	10	280

\*For reference only \*\*This values are valid also for Cold Drawn - Quenched + Tempered Condition (+C+QT)  
For size <5 mm the mechanical properties may be agreed at the time of enquiry and order

Tabella 3.3 Principali caratteristiche meccaniche acciaio 39NiCrMo3.

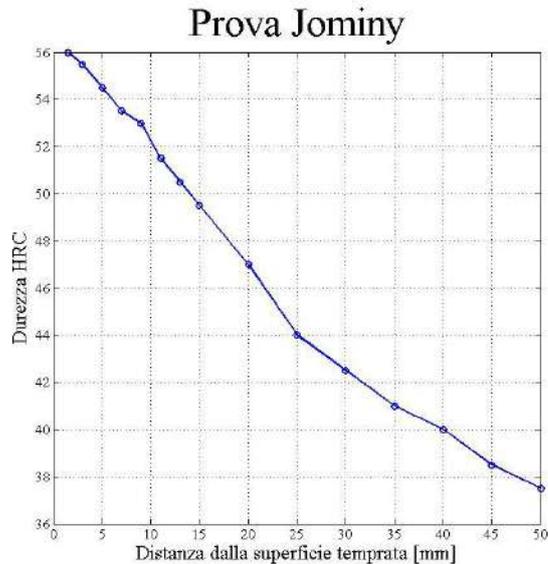


Figura 3.4 Temprabilità acciaio 39NiCrMo3.

## Capitolo 4

Grande importanza nella caratterizzazione meccanica di un materiale rivestono i metodi di indagine per individuare le proprietà meccaniche di un materiale e delle sue leghe sia dal punto di vista scientifico che dal punto di vista dei controlli e dei collaudi necessari per le sue applicazioni.

Nel presente lavoro di tesi per la caratterizzazione meccanica dell'acciaio 39NiCrMo3 sono state effettuate prove meccaniche distruttive, e non distruttive.

Prove meccaniche distruttive:

- prova di trazione;
- prova di resilienza;
- prova di meccanica della frattura;
- prova di fatica a flessione rotante.

Prove non distruttive:

- prova di microdurezza;

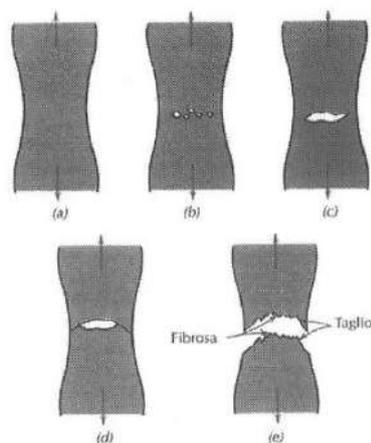
### 4.1 Frattura duttile e fragile

Prima di analizzare le prove è bene fare una distinzione sulle fratture che andremo ad analizzare nei capitoli successivi.

La frattura è un fenomeno che si presenta a causa di un carico oneroso che agisce sul materiale e consiste a livello macroscopico nella separazione in uno o più frammenti di un oggetto. Tale fenomeno è caratterizzato dalla disgregazione dei legami che coesistono tra gli atomi del materiale che vengono rotti per effetto dell'energia del carico esterno troppo intenso. La forza applicata può essere di trazione, compressione, taglio, flessione o torsione; gli acciai presentano due modalità con cui manifestano la frattura: duttile o fragile. Va specificato che questa non è una distinzione netta, infatti possono esserci casi in

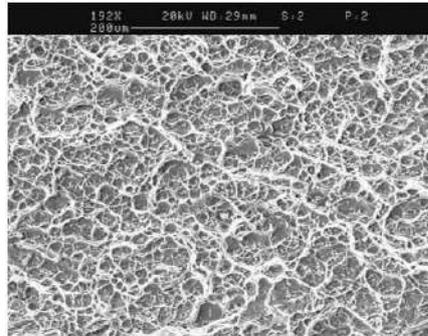
cui non sia chiaramente evidente il comportamento della frattura poiché questa può presentare caratteristiche di entrambe le tipologie.

La frattura duttile appartiene a quei materiali che prima della rottura sono accompagnati da evidenti deformazioni plastiche a livello macroscopico che corrispondono al movimento delle dislocazioni a livello microstrutturale del materiale. Questo tipo di frattura permette grazie alla plasticizzazione di avere un preavviso della rottura ed inoltre è indice di buona tenacità del materiale, in quanto l'energia necessaria per portarlo a frattura è elevata. Le rotture duttili sono normalmente caratterizzate dai profili riportati nella figura 4.1; possiamo osservare come il processo di rottura inizi con una fase iniziale di strizione (a), seguita dalla generazione di microvuoti lungo la sezione trasversale (b). Aumentando progressivamente il carico le deformazioni diventano sempre maggiori generando fenomeni di coalescenza tra le cavità generatesi (c). La cricca di forma ellittica continua ad espandersi lungo il perimetro (d), fino ad arrivare alla rottura lungo un piano inclinato di circa  $45^\circ$  rispetto all'asse dove le forze di taglio risultano massime (e). (ricordiamo che sono le forze di taglio a muovere le dislocazioni che permettono la deformazione). La frattura è generalmente chiamata a coppa cono per la sua particolare morfologia.



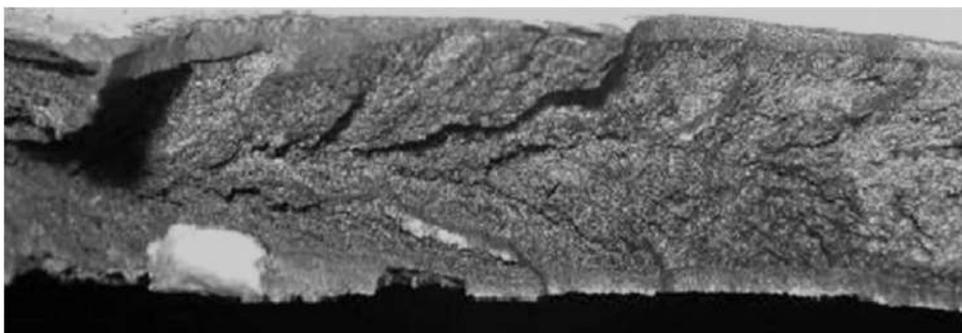
*Figura 4.1 Sviluppo di una frattura duttile.*

La superficie appare fibrosa e irregolare e caratterizzata a livello microscopico dai “dimples” le cavità che hanno dato inizio alle formazione dei microvuoti.



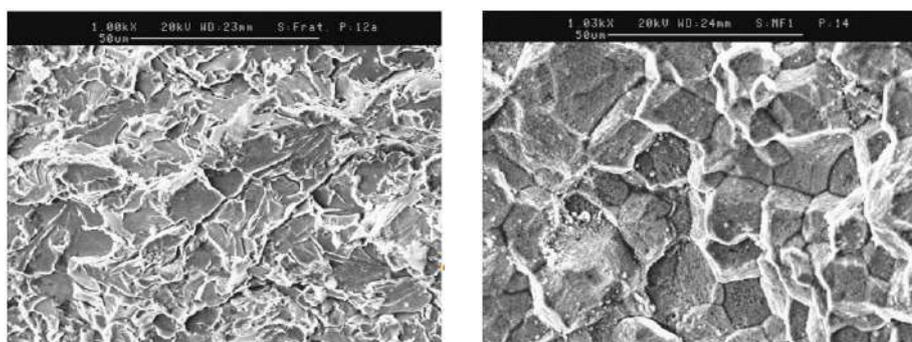
*Figura 4.2 Ingrandimento a 190X di dimples tipici della frattura duttile a livello microscopico.*

La frattura fragile al contrario avviene senza alcuna deformazione; è una rottura di schianto dove la propagazione della cricca avviene alla velocità di propagazione del suono nel materiale (per l'acciaio circa 5000 [m/s]). Generalmente la cricca si propaga in direzione perpendicolare alla direzione di applicazione del carico generando una superficie piana di rottura. Caratteristiche distintive a occhio nudo delle superfici di frattura fragile possono essere delle linee che richiamano delle V rovesciate che puntano nella zona di innesco della cricca, oppure creste disposte a ventaglio rispetto alla zona di innesco.



*Figura 4.3 Chevron pattern aspetto distintivo di una frattura macroscopicamente fragile.*

A livello microscopico la propagazione della cricca può presentarsi con successive rotture dei legami atomici, ed è questo il caso del clivaggio transgranulare dove le fratture attraversano i grani. In altri casi la rottura avviene lungo i bordi grano ed è quindi chiamata frattura intergranulare e generalmente è una conseguenza di infragilimento del materiale dovuto ad agenti esterni, come temperatura, intagli o elevata velocità di applicazione del carico.



*Figura 4.4 Ingrandimento a 1000X di frattura fragile transgranulare a sinistra e intergranulare a destra.*

## **4.2 La prova di trazione**

La prova di resistenza a trazione è una tra le più importanti e utilizzate; si esegue sui materiali allo scopo di rilevare le caratteristiche di resistenza, deformabilità e di elasticità ed è regolamentata dalla normativa UNI EN ISO 6892-1.

Con la prova di trazione statica si ricavano indici di confronto che per quanto convenzionali, consentono la formulazione di giudizi relativi allo stato del materiale, inoltre queste grandezze possono essere utilizzate in fase di progettazione, in fase di verifica di applicabilità di processi tecnologici e per indagini di carattere scientifico o di “Failure Analysis”.

La prova consiste nel sottoporre un campione di un dato materiale sottoposto a un carico statico di trazione applicato nel baricentro della sezione in direzione assiale. Il provino da esaminare deve rispettare rigorosamente geometrie e dimensioni prescritte dalla norma per garantire uniformità e confrontabilità alla prova. Durante il test il carico viene incrementato molto lentamente e gradualmente creando una condizione di quasi staticità fino al raggiungimento della rottura.

### **4.2.1 Macchina di prova**

La macchina per la prova di resistenza a trazione è generalmente costituita da un telaio rigido munito di una parte fissa e una mobile, quest’ultima dotata di un azionamento idraulico o meccanico che permette di imporre il carico al provino. La macchina è dotata inoltre di opportune ganasce che permettono l’afferraggio e l’applicazione del carico. Per poter registrare l’andamento della prova la macchina è strumentata con una cella di carico disposta in serie con il provino e da un estensometro per la misurazione dei relativi allungamenti. Riportiamo di seguito uno schema della macchina di prova.

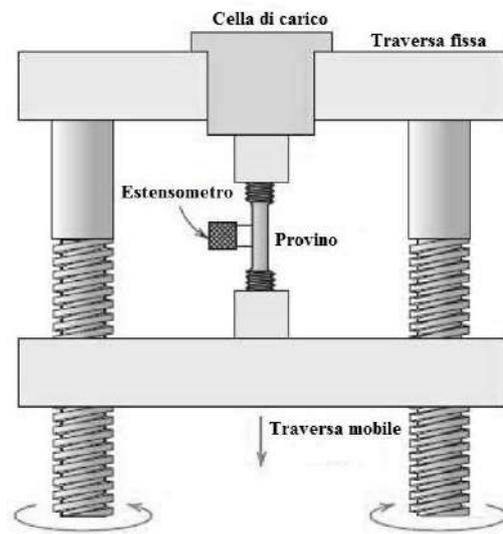


Figura 4.5 Schema semplificato di una macchina per prove di trazione.

#### 4.2.2 Provini

Come accennato precedentemente la geometria e dimensione dei provini rivestono un ruolo molto importante per quanto riguarda la prova di trazione perché fondamentale è poter comparare le grandezze misurate con quelle presenti in letteratura, ed è per questo che le provette devono essere prelevate e preparate in modo conforme alle normative.

Generalmente il provino è a sezione circolare eccetto per prodotti in lastre, fogli o lamiere dove il provino ricavato dal grezzo è ha sezione rettangolare. La geometria e le dimensioni caratteristiche dei provini secondo normativa UNI EN ISO 6892-1 sono riportate in figura 4.6 e 4.7; possiamo osservare come in entrambe siano presenti una lunghezza utile  $L_0$ , la lunghezza della parte calibrata  $L_C$  e alle estremità delle teste di attacco aventi forma e dimensioni appropriate ai dispositivi di serraggio della macchina di prova.

Molto importante è però in entrambi i casi il raccordo tra l'estremità e il tratto utile del provino necessario per ovviare a fenomeni di concentrazione degli

sforzi che comprometterebbero il risultato della prova. Come già detto i provini possono avere sezione circolare con diametro nominale  $d$ , oppure di sezione rettangolare di dimensioni nominali  $a$ ,  $b$ .

La lunghezza del tratto utile  $L_0$  è definita dalla formula:

$$L_0 = k * \sqrt{S_0} \quad S_0 = k * \sqrt{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$

dove  $S_0$  rappresenta l'area della superficie trasversale e  $k$  una costante opportuna per la significatività delle deformazioni misurate. Per la lunghezza del tratto calibrato si possono considerare valide le seguenti relazioni anche se si rimanda comunque alla normativa di riferimento:

$$L_c = L_0 + (0,5 \div 2) * d$$

$$L_c = L_0 + (1,5 \div 2,5) * \sqrt{S_0}$$

Le norme stabiliscono che per provini circolari  $L_0 = 5 * d$ , per provini proporzionali si deve utilizzare  $k = 5,65$  nel caso di provini normali corti e  $k = 11,3$  per provini normali lunghi.

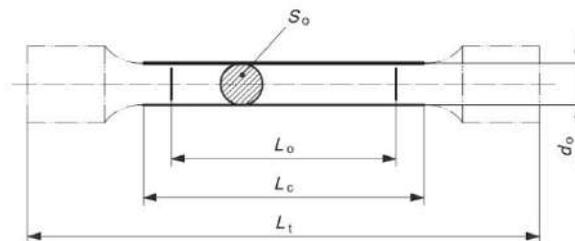


Figura 4.6 Provino cilindrico per la prova di trazione.

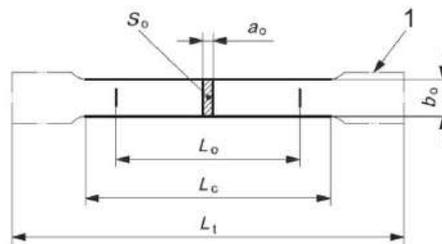


Figura 4.7 provino a sezione quadrata per la prova di trazione.

La normativa prevede inoltre delle indicazioni per quanto riguarda la misura di grandezze quali la lunghezza finale  $L_F$  (lunghezza del provino dopo la rottura), e il diametro finale di massima strizione  $d_F$ . Prima della prova il provino viene opportunamente suddiviso in tratti di lunghezza pari a 5-10 mm nella zona del tratto utile. Dopo la prova per misurare la lunghezza finale le due parti del provino vengono accuratamente avvicinate facendo combaciare le superfici di frattura, ricavandone così la lunghezza. Questa procedura risulta importante per la validazione della prova in quanto la frattura per essere confrontabile deve avvenire nel tratto compreso nella lunghezza utile  $L_0$ .

#### 4.2.3 Analisi della prova di trazione

Durante la prova tramite la cella di carico e l'estensometro è possibile registrare la curva dei carichi e delle deformazioni. Generalmente da questa curva è possibile distinguere diverse zone; naturalmente la forma della curva dipende dal tipo di materiale che stiamo testando; nel caso di un materiale duttile possiamo distinguere sul diagramma sforzi-deformazioni:

- campo elastico;
- campo plastico;
- strizione;

- rottura;

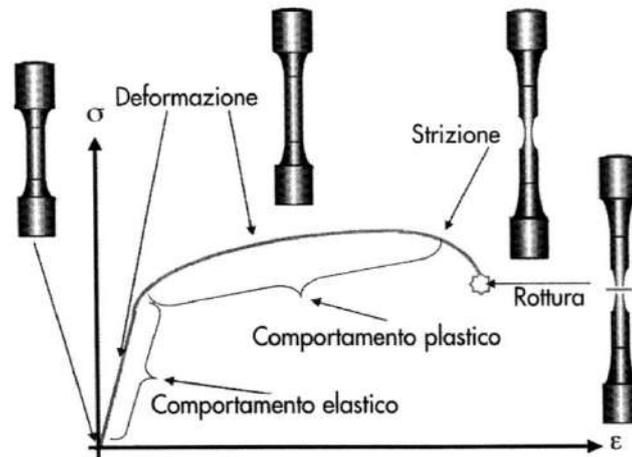


Figura 4.8 Diagramma sforzi deformazioni.

Prendendo come riferimento il diagramma di figura 4.9 (in ascissa gli allungamenti percentuali e in ordinata le forze applicate) analizziamo ora in maniera più dettagliata una prova di trazione.

Il primo tratto della curva detto elastico ha un andamento lineare crescente in cui il progressivo aumento del carico applicato agisce generando una deformazione uniformemente distribuita lungo tutto il provino; questo comportamento è osservabile finché il carico è inferiore al limite di proporzionalità  $F_p$ . In questa fase i costituenti del solido cristallino si deformano elasticamente in quanto la deformazione può considerarsi reversibile infatti è possibile, proiettando il punto limite di proporzionalità sull'asse delle ascisse, definire un'area elastica dove qualsiasi deformazione venga annullata se si rimuovono i carichi che l'hanno generata. È opportuno fare una piccola precisazione infatti in questa zona le deformazioni non sono completamente reversibili ma è stato definito sperimentalmente che queste non superino un valore pari a  $\epsilon = L_0 \cdot 0,001\%$  che può essere ingegneristicamente considerato trascurabile.

Proseguendo nella prova si entra in una zona di transizione tra campo elastico e campo plastico detta “elasto-plastica”; l’aumento progressivo del carico agente sul provino innesca ulteriori deformazioni, ma alcune di queste a causa della loro maggiore velocità di accrescimento rispetto al carico iniziano ad essere permanenti senza possibilità di essere recuperate elasticamente. Nel diagramma questo effetto si traduce con un andamento non più lineare fino al raggiungimento del carico limite di elasticità  $F_{le}$ . Questo punto viene così definito perché pur essendo in campo elasto-plastico annullando il carico si ha un recupero pressoché totale degli allungamenti.

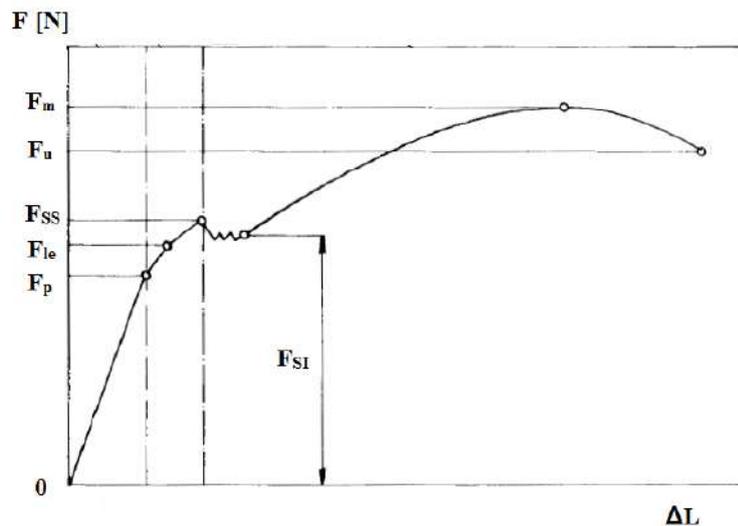


Figura 4.9 Diagramma prova di trazione forze-allungamenti.

Continuando ad incrementare il carico il provino continua a deformarsi ed il diagramma evolve allontanandosi in maniera importante dalla configurazione lineare rimanendo comunque nel campo elasto-plastico. Al raggiungimento del carico di snervamento superiore  $F_{SS}$  effettuando lo scarico del provino si vanno a registrare delle deformazioni residue permanenti che denotano l’inizio del campo plastico della prova. In questa zona si nota un rilassamento del materiale in quanto una volta superato il carico di snervamento superiore la curva tende a

scendere raggiungendo un punto chiamato carico di snervamento inferiore  $F_{SI}$ , dopodiché il materiale ha una ripresa fino a raggiungere il carico massimo nel diagramma  $F_m$ . Lo snervamento è quel fenomeno che si manifesta in alcuni materiali i quali durante la prova di trazione subiscono delle deformazioni plastiche senza un sostanziale aumento del carico applicato. Va specificato che per alcuni materiali il fenomeno dello snervamento dovuto all'effetto di incrudimento dei cristalli deformati plasticamente, non è rilevabile direttamente sulla curva carichi- deformazioni, quindi convenzionalmente viene sostituito con il carico che induce al materiale una deformazione permanente pari allo 0,2%, e viene chiamato  $F_{p0.2}$ .

Ritornando all'analisi della curva di trazione in corrispondenza del carico massimo  $F_m$  possiamo ricavare utilizzando la superficie nominale del provino il carico unitario di resistenza a trazione semplice  $R_m$  espresso in [MPa] che rappresenta la resistenza a trazione del materiale .

Una volta superato il carico unitario di rottura avviene un fenomeno detto strizione che consiste in una riduzione della sezione resistente del provino riconoscibile nel grafico con l'andamento parabolico discendente. Questa è la zona di strizione che si arresta in corrispondenza del carico ultimo  $F_u$  dove avviene la rottura del provino. Il carico unitario di rottura  $R_u$  corrispondente viene calcolato utilizzando l'area della sezione sottoposta alla strizione e non quella nominale del provino  $S_0$ .

Durante la strizione la curva reale non segue una parabola discendente ma bensì una curva che tende a crescere, come illustrato nella figura 4.10; questo è dovuto al fatto che le dimensioni effettive della sezione trasversale del provino dipendono dal carico applicato, dalla duttilità del materiale e dal volume del provino stesso, per cui rapportando il carico applicato sempre rispetto all' area  $S_0$  osserveremo un grafico con la curva che nella zona di strizione avrà un andamento discendente parabolico mentre nel caso in cui venga considerata istante per istante la riduzione della sezione trasversale del provino osserveremo

una curva che nella zona di strizione avrà un andamento crescente del carico unitario.

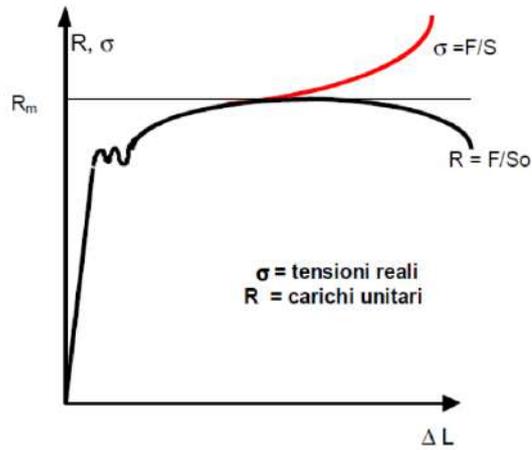


Figura 4.10 Diagramma sforzi deformazioni ingegneristico (curva nera) e diagramma sforzi deformazioni (reale).

Nella pratica viene comunque scelto di utilizzare in fase di progettazione il carico unitario di rottura  $R_m$  che opera a vantaggio della sicurezza.

Riportiamo di seguito i principali andamenti del diagramma sforzi-deformazioni testando materiali con caratteristiche differenti.

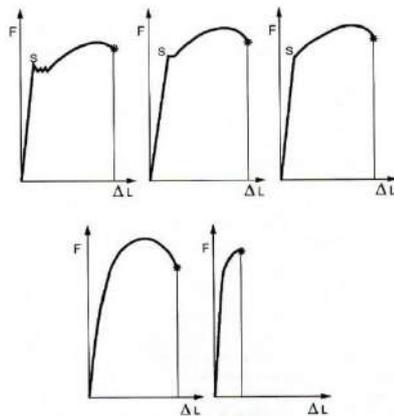


Figura 4.11 Tipici andamenti della prova di trazione.

#### 4.2.4 Grandezze della prova di trazione

Dalla prova di trazione possono essere ricavate diverse grandezze di interesse ingegneristico:

- Modulo di elasticità a trazione o modulo elastico E

Possiamo calcolarlo considerando il tratto elastico della curva senza superare il carico limite di proporzionalità  $F_p$ , servendoci della legge di Hooke:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \text{con } F < F_p \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- Carico unitario di snervamento  $R_s$  [MPa]

$$R_s = \frac{F_s}{S_0} \quad R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}$$

- Carico unitario di rottura  $R_m$  [Mpa] rappresenta il carico unitario di resistenza alla trazione, riferito alla sezione nominale che il materiale può sopportare prima di rompersi; possiamo calcolarlo come:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

- Allungamento percentuale a rottura A ha espressione:

$$A\% = \frac{L_F - L_0}{L_0} * 100$$

- Coefficiente percentuale di strizione Z :

$$Z\% = \frac{S_0 - S_F}{S_0} * 100$$

$S_F$ : sezione finale del provino alla rottura.

### **4.3 La prova di resilienza**

Il concetto di resilienza nasce dalla considerazione che è possibile, mediante differenti trattamenti termici, ottenere campioni di uno stesso acciaio che diano risultati praticamente identici nelle prove di trazione e durezza, e più in generale nelle prove statiche ma che, se sottoposti a prove di tipo dinamico o impulsivo, reagiscono in modalità differente evidenziando comportamenti di tipo fragile o duttile. Da queste considerazioni possiamo capire il motivo del concetto di resilienza, definita come l'attitudine di un materiale ad assorbire valori più o meno elevati di energia durante fenomeni con carichi di tipo impulsivo che sono molto frequenti in componenti di normali applicazioni industriali.

La prova di resilienza, UNI EN ISO 148-1 è uno dei metodi classici per caratterizzare il comportamento di un materiale soggetto a un impatto, fornendo dati convenzionali sulla duttilità o fragilità come confronto tra diversi materiali. Le condizioni della prova sono quelle che rappresentano le condizioni più severe relativamente al potenziale di frattura: temperatura relativamente bassa, alta velocità di deformazione, condizioni di carico triassiali e la presenza di un intaglio.

La prova consiste nel portare a rottura il provino tramite un unico impatto generato da un'asta oscillante. Il valore ricavato dalla prova indicato con KCU, o KV (a seconda dell'intaglio sul provino utilizzato) rappresenta l'energia assorbita dalla provetta durante la prova.

#### **4.3.1 Macchina di prova**

La macchina utilizzata per la prova di resilienza è il pendolo di Charpy, dal nome dell'ingegnere francese Augustin Albert Charpy che, nel 1905, ideò il test. Esso è composto da un pesante basamento in ghisa, fissato a terra, che sostiene un telaio al quale è incernierata un'asta oscillante. All'estremità dell'asta è

fissata una mazza, dotata di pesi e di una forma aerodinamica per minimizzare le perdite di energia legate all'attrito con l'aria, su cui alloggia il percussore, opportunamente sagomato secondo normativa, che andrà ad impattare sul provino.

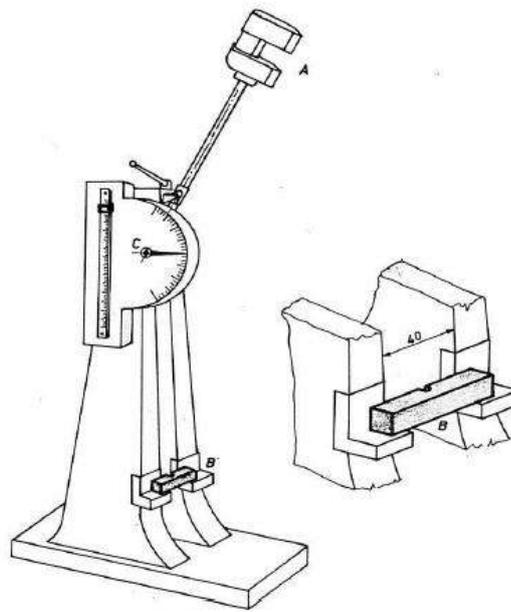


Figura 4.12 Pendolo di Charpy.

### 4.3.2 Provini

I provini per la prova di resilienza sono tipicamente di due tipi a seconda delle caratteristiche dell'intaglio; possiamo avere provini con intaglio con geometria a "V" oppure intagli con geometrie a "U". Entrambe le tipologie sono caratterizzate da una sezione quadrata di 10 [mm] e di 55 [mm] di lunghezza, con l'intaglio ricavato generalmente tramite lavorazioni di fresatura in corrispondenza della mezzeria del provino perpendicolarmente all'asse longitudinale. Nella preparazione dei provini è necessario evitare alterazioni del

materiale dovute alla temperatura che porterebbero a risultati non comparabili della prova.

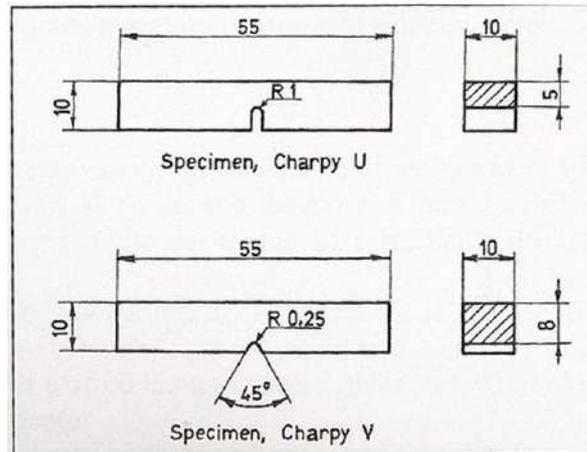


Figura 4.13 provini per la prova di resilienza “KU” e “KV”.

### 4.3.3 Analisi e grandezze della prova di resilienza

La prova, rappresentata schematicamente nella figura 4.14, consiste nel portare l’asta nel punto A, ad un altezza  $h$  in modo tale da raggiungere un valore di  $300 \pm 10$  [J], poi di lasciarla cadere per il solo effetto della gravità. La mazza scende verso il basso seguendo una traiettoria curvilinea ed impatta il provino ad una velocità di circa  $5 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , rompendolo o deformandolo e fermandosi poi ad un’altezza  $h'$ . La differenza di energia potenziale tra il punto  $h$  e  $h'$  rappresenta l’energia assorbita dal provino durante l’impatto. Possiamo così ottenere la grandezza  $K$  misurata in [J] :

$$K = m \cdot g \cdot h' - m \cdot g \cdot h$$

dove  $m$  è la massa del pendolo,  $g$  l'accelerazione di gravità è  $h$  e  $h'$  sono le altezze iniziali e finali della mazza. Maggiore è l'indice  $K$  maggiore sarà l'energia assorbita dal provino e quindi migliore sarà il suo livello di tenacità.

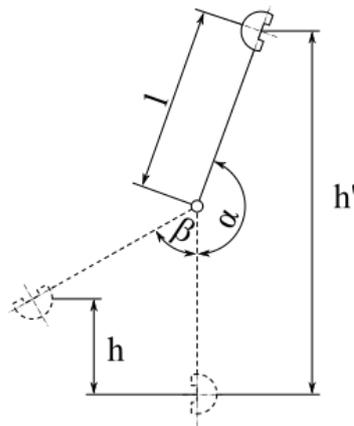
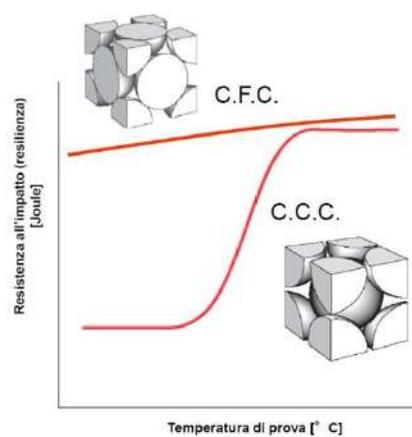


Figura 4.14 Schematizzazione prova di resilienza.

Analizzando in modo dettagliato la prova possiamo affermare come abbia a suo sfavore la criticità di essere molto influenzata da alcuni fattori, principalmente dalle geometrie degli intagli dei provini e conseguentemente da come questi siano stati eseguiti. Possiamo dire come confermano studi presenti in letteratura che questa prova non può dare indicazioni quantitative in fase di progetto ma può dare solo un'indicazione qualitativa di come un provino di uno specifico materiale a temperatura di  $23 \pm 5$  [°C] resista o meno ad un carico impulsivo. La cosa interessante che può essere invece ricavata utilizzando la prova di resilienza è quella di stimare se un materiale presenta la transizione duttile-fragile al diminuire della temperatura. Sappiamo che generalmente gli acciai essendo per la maggioranza con una struttura CCC (cubico a corpo centrato) presentano generalmente un brusco abbassamento del valore  $K$  a basse temperature. Possiamo osservare nella figura 4.15 come al diminuire della temperatura i valori dell'energia assorbita diminuiscono evidenziando una transizione del comportamento da duttile a fragile. Esistono però altri materiali o

leghe che non presentano questa transizione CFC (cubici a facce centrate) che nonostante l'abbassamento della temperatura, mantengono un comportamento tenace. Con queste considerazioni possiamo capire come la prova di resilienza eseguita a diverse temperatura possa darci uno strumento per valutare in fase di progettazione se il materiale che stiamo scegliendo possa lavorare in sicurezza nelle condizioni al contorno in cui andremo ad impiegarlo.



*Figura 4.15 Andamento dei valori di resilienza in funzione della temperatura per materiali C.C.C. e C.F.C..*

## **4.4 La prova di meccanica della frattura**

La meccanica della frattura è una disciplina che si concentra sulla valutazione dei difetti nei materiali e sulle possibili relazioni quantitative sulle dimensioni dei difetti, carichi applicati e resistenza dei materiali. I primi studi iniziarono intorno al 1920 con le pubblicazioni di A.A. Griffith sulle fratture fragili dei materiali; proseguirono poi più in dettaglio durante la seconda guerra mondiale in seguito ai cedimenti delle navi “Liberty”, dove dei 2700 esemplari costruiti 400 mostrarono cedimenti importanti. Gli approfondimenti mostrarono che non vi furono errori di carattere progettuale in quanto i carichi applicati erano inferiori ai limiti di resistenza, però si notò che le fratture erano tutte in prossimità delle zone saldate o in prossimità di intagli o geometrie particolari e che la prova di resilienza evidenziò una scarsa tenacità del materiale. Successivamente molte furono le ricerche con approcci energetici o di intensificazione degli sforzi passando dal campo lineare elastico a quello elasto-plastico ma il passo fondamentale fu quello di adottare un nuovo tipo di approccio progettuale, non più quello della meccanica tradizionale ma quello della meccanica della frattura dove i parametri di interesse sono i carichi applicati, le caratteristiche del materiale, le dimensioni e geometrie dei difetti e la loro velocità di propagazione.

### **4.4.1 Approccio alla meccanica della frattura: Inglis e Griffith**

In tutti i materiali utilizzati per la realizzazione di componenti meccanici, è nota la presenza di difetti che possono derivare dal processo di fabbricazione, da processi di deformazione plastica, da lavorazioni meccaniche o da processi di saldatura o di trattamenti termici. Generalmente possiamo incontrare inclusioni, segregazioni, intagli e cricche. Questi difetti sono generalmente caratterizzati da una forma allungata con raggi di raccordo molto piccoli che rappresentano zone

preferenziali per l'intensificazione dei carichi, portando in determinate condizioni a rotture improvvise del materiale. In queste condizioni volendo seguire l'approccio della meccanica classica la pericolosità del difetto non verrebbe tenuta in considerazione in quanto le ipotesi presuppongono un materiale isotropo omogeneo e senza alcun tipo di difettosità.

I primi studi su relazioni quantitative tra i difetti e le sovrasolleccitazioni furono fatti da Inglis nel 1913, il quale prese una lastra piana, sottile, con una fessura passante di tipo ellittico e applicò un carico di trazione come rappresentato nella figura 4.16. Inglis rivelò come l'andamento dello sforzo in prossimità dell'intaglio non era più uniforme come sul resto della lastra, ma assumeva un valore massimo proporzionale allo sforzo nominale ricavabile dalla meccanica classica e al coefficiente di intaglio teorico  $K_t$ . In particolare calcolando il valore del coefficiente  $K_t$  si accorse che al tendere del raggio del difetto a zero si potesse creare riferendosi all'approccio tradizionale una condizione di criticità in quanto il valore  $K_t$  e quindi dello sforzo applicato tendevano all'infinito.

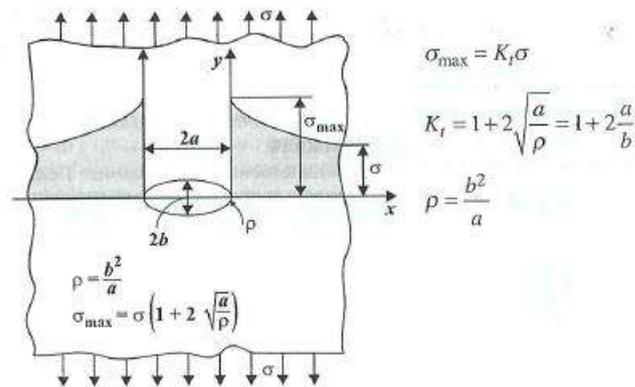


Figura 4.16 Sovrasolleccitazioni in una lastra piana e coefficiente  $K_t$ .

Un altro approccio alla meccanica della frattura fu appunto quello di Griffith che sviluppò una teoria basata sull'energia; egli pensava che applicando uno sforzo

all'apice di un difetto l'energia associata di deformazione si trasformasse in energia di frattura. Poiché l'energia totale del sistema durante la trasformazione può diminuire o rimanere costante, a seconda se la condizione immediatamente successiva la trasformazione non sia o sia di equilibrio, Griffith definì come condizione critica di frattura quella in corrispondenza della quale il difetto si forma in condizione di equilibrio, senza variazione dell'energia totale. Definendo  $dA$  la variazione dell'area della cricca possiamo scrivere:

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{W_s}{dA} = 0$$

dove:  $E$  = energia totale;

$\Pi$  = energia potenziale data dall'energia di deformazione e dal lavoro delle forze esterne;

$W_s$  = lavoro necessario per creare nuove superfici di cricca.

Possiamo quindi dire che:

$$\frac{d\Pi}{dA} = -\frac{W_s}{dA}$$

La condizione secondo Griffith per cui un difetto possa crescere è quella che ci sia un'energia potenziale uguale o superiore a quella necessaria alla frattura. Queste teorie rappresentano molto bene il comportamento di materiali fragili come il vetro ma non sono applicabili a materiali con caratteristiche di duttilità maggiore. Le considerazioni furono modificate aggiungendo termini che tenevano in considerazione anche la capacità del materiale di plasticizzarsi nell'intorno del difetto. Venne introdotta anche l'energia di frattura  $W_f$  che andò ad aggiungersi a  $W_s$  già considerato da Griffith per descrivere meglio il comportamento plastico dei materiali.

#### 4.4.2 Il fattore di intensificazione degli sforzi “K” e la tenacità “K<sub>c</sub>”

In alcune condizioni assumendo di avere un materiale lineare elastico e isotropo è possibile determinare le espressioni del campo degli sforzi all’apice della cricca. Alcuni studiosi dimostrarono che verificando le ipotesi sopra elencate e adottando un sistema di coordinate polari lo stato di sforzo ha la seguente espressione:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) * f_{ij}(\theta)$$

dove:  $\sigma_{ij}$ = tensore degli sforzi;

r e  $\theta$  sistema di coordinate;

K=costante;

$f_{ij}$ = funzione adimensionale (tabellata).

I valori di K e di  $f_{ij}$  dipendono dal modo di applicazione del carico che può essere distinto in tre modi rappresentati in figura.

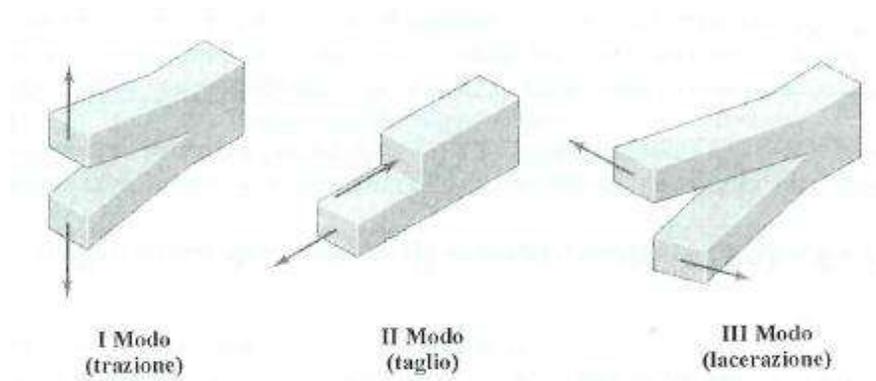


Figura 4.17 Modi di carico per l’apertura di un difetto

Osservando l’equazione dello stato di sforzo possiamo notare come una volta definito il modo di carico (per semplicità nelle considerazioni successive useremo il modo I) l’unica cosa che rimane da definire è il fattore di

intensificazione K noti i carichi e la geometria del difetto. Considerando una lastra come in figura 4.18 a) di dimensione infinita sottoposta a uno sforzo  $\sigma$  [Mpa] e con un difetto al centro di lunghezza “2a” è possibile tramite un’analisi dimensionale ricavare l’espressione del fattore di intensificazione degli sforzi K:

$$K = \beta * \frac{P}{A} * \sqrt{\pi * a} \text{ [MPa} * \sqrt{\text{m}} \text{]}$$

dove “ $\beta$ ” è un parametro che definisce la forma dell’intaglio o del difetto che dipende da  $a/W$ , “P” è il carico in [N] applicato, “A” è l’area nominale soggetta al carico in [mm<sup>2</sup>] e “a” è la lunghezza del difetto in [m] come rappresentato in figura 4.18 b).

A questo punto definito l’intensificatore degli sforzi è necessario definire un valore limite per poter controllare la criticità della cricca; è dunque possibile trovare un parametro paragonabile allo sforzo ammissibile nella meccanica classica tale per cui lo stato di sforzo e quindi K non devono oltrepassare la condizione critica detta  $K_C$ . Questo limite è chiamato tenacità ed è il valore più alto che il fattore di intensificazione degli sforzi può assumere prima che gli sforzi all’apice della cricca siano troppo elevati da sopportare per il materiale.

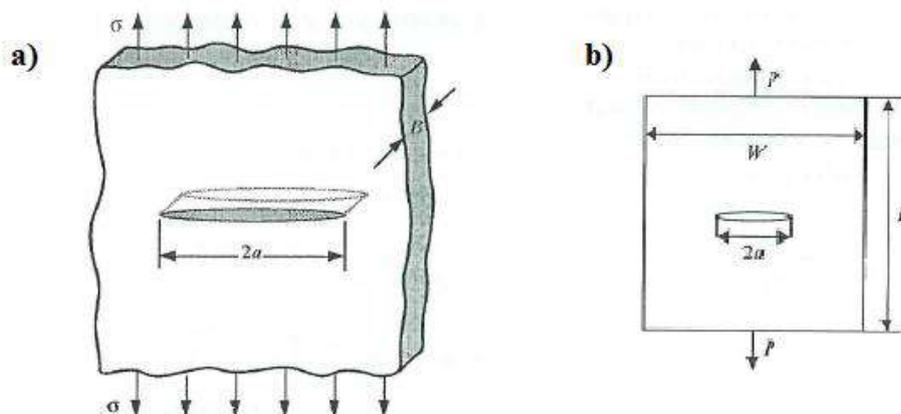


Figura 4.18 a) Lastra piana infinita; b) lastra piana di dimensioni finite con difetto centrale passante.

Per completare il discorso sulla tenacità  $K_{IC}$  di un materiale è importante fare una considerazione sullo spessore della lastra; fino a qui questo parametro non è stato considerato né nella definizione dello stato di sforzo né nella definizione del fattore di intensificazione degli sforzi. È stato però verificato sperimentalmente come la tenacità di un materiale abbia un comportamento come mostrato nel grafico di figura 4.19 dove all'aumentare dello spessore lo stato di sforzo del materiale passi da sforzo piano per piccoli spessori a stato di deformazione piana per spessori più elevati con una conseguente diminuzione del valore di tenacità. Si può osservare dal grafico come al di sopra di un certo valore di  $B_{min}$  la tenacità abbia un andamento pressoché costante nella regione di deformazione piana che risulta la più critica per i materiali. È stato dunque definito il valore caratteristico di tenacità del materiale quello in corrispondenza dello stato di deformazione piana eliminando così l'influenza dalle dimensioni dell'elemento considerato, inoltre è stata definita una relazione empirica per stabilire lo spessore minimo per avere una condizione di deformazione piana:

$$B_{min} \geq \frac{2,5 * K_{IC}^2}{R_{p02}^2}$$

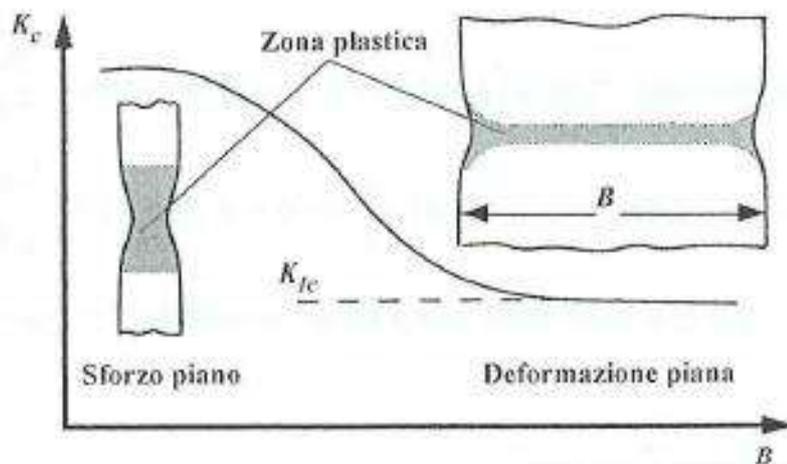


Figura 4.19 Influenza dello spessore sui valori di tenacità.

Infine è d'obbligo sottolineare che tutte le considerazioni fatte valgono sotto le ipotesi che il materiale abbia un comportamento lineare elastico. Quando all'apice della cricca si raggiunge il valore di tenacità del materiale gli sforzi sono tali da generare plasticizzazioni locali che se limitate a una piccola zona, detta raggio plastico, allora le ipotesi di linearità sono rispettate e le equazioni definite in precedenza sono valide, al contrario è necessario fare considerazioni di altro tipo utilizzando non più la meccanica della frattura lineare elastica ma quella elasto-plastica.

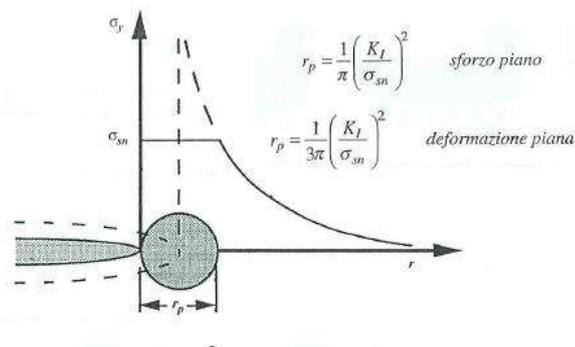


Figura 4.20 Definizione del raggio plastico secondo Irwin.

#### 4.4.3 Meccanica della frattura elasto-plastica

Nel caso in cui si abbia a che fare con un materiale il cui comportamento non lineare all'apice del difetto si manifesti al di fuori dall'area delimitata dal raggio plastico è necessario utilizzare un approccio diverso rispetto a quello analizzato nel paragrafo precedente. Utilizzando l'approccio energetico di Griffith per descrivere il caso di un materiale con un comportamento lineare elastico la condizione di propagazione di un difetto è definito dal seguente bilancio energetico:

$$-\frac{dU}{dA} = \frac{dW}{dA}$$

dove “dU” è l’energia di deformazione e “dW” è l’energia necessaria per la propagazione; chiamando il rapporto “dU/dA” “G” [N/m] (energia di deformazione) e “dW/dA” “R” (variazione di energia assorbita per la propagazione).

La condizione critica di frattura è:

$$G=R$$

$$\frac{K_I^2}{E} = \frac{K_{IC}^2}{E}$$

Quando però la condizione di linearità non è rispettata la tenacità non è più definibile in quanto servirebbero spessori B troppo elevati per essere in condizioni di deformazione piana; ecco perché fu introdotto un parametro “J” che descrive lo stato dell’apice della cricca in una condizione del materiale non più lineare e che ha lo stesso significato dell’energia di deformazione “G”.

#### 4.4.4 Determinazione sperimentale della tenacità “K<sub>IC</sub>”

Avendo un materiale con caratteristiche pressoché lineari elastiche è possibile seguendo normative ASTM determinare mediante un prova sperimentale la tenacità di un materiale in stato di deformazione piana.

La prova è distinta in due fasi una prima parte chiamata precriccatura in cui un carico variabile applicato genera una cricca sul fondo dell’intaglio ricavato in precedenza sul provino. Questa operazione è necessaria per avere un difetto con un raggio sul fondo sufficientemente piccolo per evitare l’influenza degli intagli generati dalle lavorazioni meccaniche di costruzione del campione. Nella seconda parte invece viene applicato un carico P crescente fino alla rottura del provino. Durante la prova vengono registrati i carichi e gli spostamenti δ tramite uno strumento chiamato clip gage, come rappresentato in figura 4.21 a). Al

termine della prova viene stampato un grafico, come quelli in figura 4.21 b), dove in corrispondenza di “ $P_Q$ ” è possibile ricavare a seconda del provino utilizzato “ $K_Q$ ” e una volta verificate le condizioni di deformazione piana è possibile ricavare la tenacità del materiale eguagliando “ $K_Q$ ” a “ $K_{IC}$ ”.

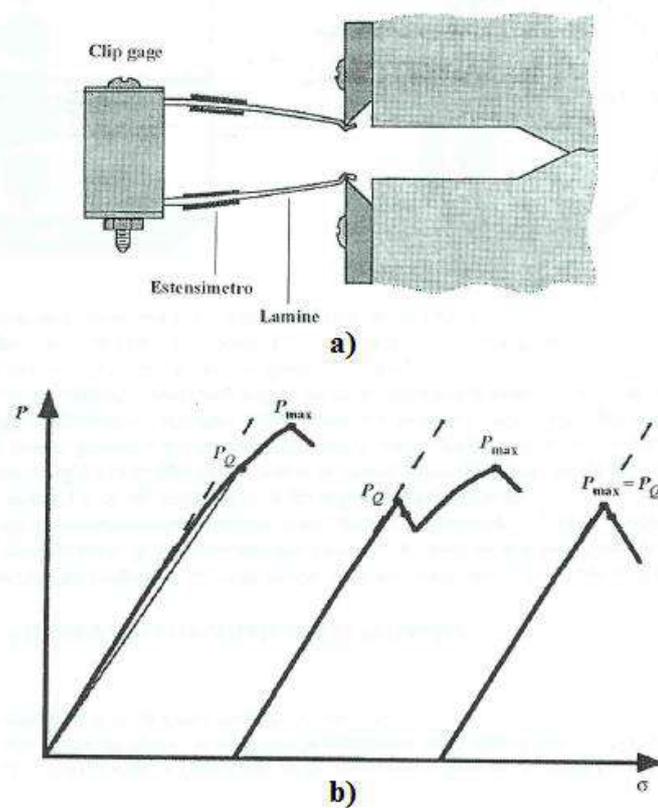


Figura 4.21 a) “Clip gage”; b) diagramma per la determinazione del carico critico  $P_Q$ .

I provini utilizzati definiti dalla normativa possono essere di tre tipi il CT “compact test”, il DCT “disk compact test e il provino a flessione. Naturalmente le dimensioni e le tolleranze geometriche e dimensionali sono tutte normate per garantire una confrontabilità dei risultati.

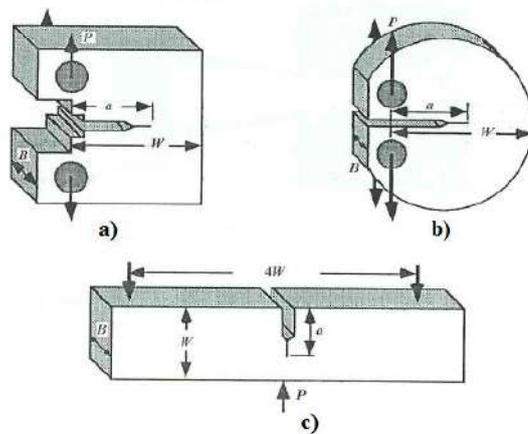


Figura 4.22 a) CT; b) DCT; c) provino a flessione.

#### 4.4.5 Determinazione sperimentale di “ $J_{IC}$ ”

Nel caso in cui il materiale abbia una tenacità elevata e quindi un comportamento non lineare elastico è necessario come descritto precedentemente definire un parametro chiamato “ $J_{IC}$ ” per risalire alla tenacità del materiale. Sono possibili due procedure una detta di base dove vengono utilizzati più provini e da ognuno di questi si ricava un punto della curva “ $J-\Delta a$ ” che rappresenta l’andamento dell’energia di deformazione in funzione della propagazione della cricca; l’altra consiste nel ricavare la stessa curva ma utilizzando un solo provino.

La procedura base consiste dunque nel generare come nel caso della prova del “ $K_{IC}$ ” una cricca mediante una sollecitazione di fatica “ $\Delta a_0$ ”; successivamente il provino viene sottoposto a un carico “ $P$ ” registrando lo spostamento  $\delta$  e facendo in modo che il carico riesca a far propagare la cricca in modo stabile. Applicando diversi livelli di carico è possibile registrare l’avanzamento della cricca e a fine della prova vengono misurate sperimentalmente come

rappresentato in figura 4.23 le effettive lunghezze della precricatura e della propagazione stabile della cricca.

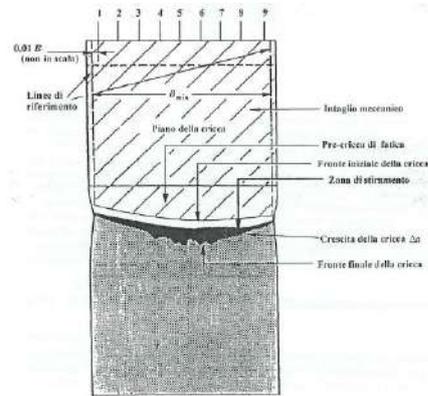


Figura 4.23 Superficie di frattura provino CT e schematizzazione della misura

A questo punto è possibile costruire la curva “ $J-\Delta a$ ” e determinare l’intersezione con la “blunting line” che segna l’inizio della propagazione della cricca; questo punto definisce il valore di “ $J_{IC}$ ” da cui è possibile risalire al valore della tenacità.

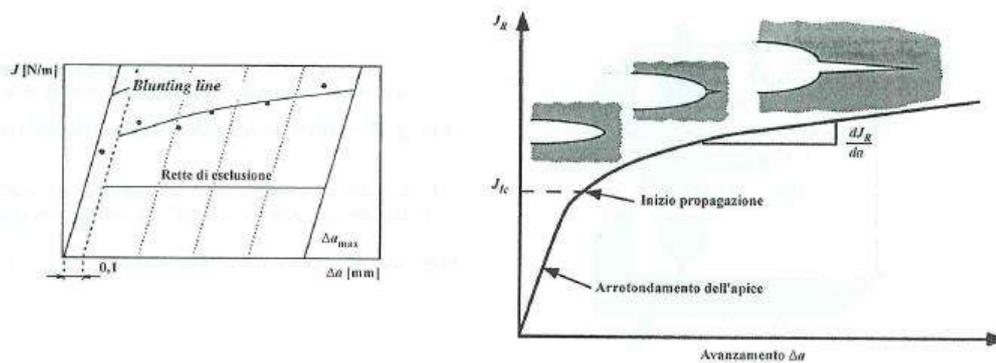


Figura 4.24 Curva “ $J-\Delta a$ ”

La procedura base però è molto lunga e dispendiosa in quanto richiede l'utilizzo di molti provini e inoltre da problemi di incertezza nella determinazione della propagazione stabile della cricca. È quindi possibile utilizzare un'altra procedura che permette con un solo provino di determinare tutta la curva "J-Δa" chiamate curva di resistenza "R" o "J-R". la prima parte della prova è sempre caratterizzata dalla precricatura del provino e successivamente vengono applicati dei carichi via via crescenti dove ad ogni livello di "P" si hanno degli scarichi parziali. Il diagramma "P- δ" sarà differente rispetto alla procedura base e avrà una forma come quella della figura 4.25, da cui mediante opportune calibrazioni si può risalire alla lunghezza della cricca e al valore di "J". Come per la procedura base è possibile ricavare il valore di "J<sub>IC</sub>" e successivamente quello di "K<sub>IC</sub>". Anche nelle procedure di determinazione di "J<sub>IC</sub>" sono presenti delle limitazioni sullo spessore B del campione:

$$B \geq \frac{25 * J_{IC}}{R_{p02}}$$

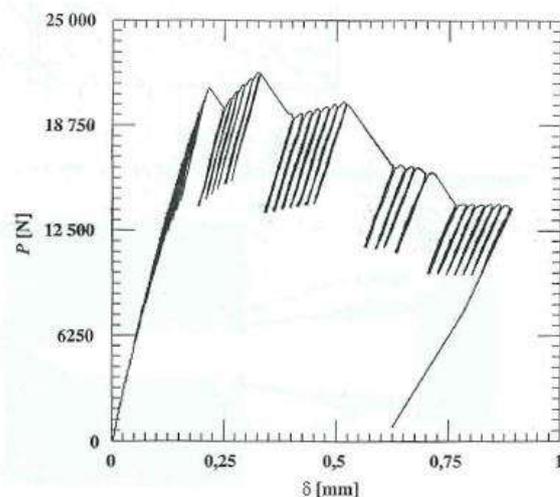


Figura 4.25 Diagramma "P- δ" della prova per la determinazione di "J<sub>IC</sub>"

## **4.5 La prova di fatica**

### **4.5.1 La fatica**

I componenti delle macchine sono generalmente soggetti a carichi variabili e ripetuti nel tempo; questa condizione di estrema variabilità, può causare fenomeni di cedimento dove la sollecitazione che provoca la frattura può essere inferiore al limite di rottura statica del materiale. Il fenomeno prende il nome di fatica e consiste in un progressivo danneggiamento del materiale che si sviluppa coinvolgendo i grani a livello microscopico e successivamente estendendosi gradualmente fino ad avere una dimensione tale da provocare la rottura del componente. Gli studiosi si avvicinarono a questo comportamento dal 1800, ottenendo con Wöhler nel 1850 i primi risultati relativi alla relazione tra carichi applicati e durata dei componenti (curve di Wöhler).

La fatica è un fenomeno molto complesso, che coinvolge circa il 75% delle fratture di componenti meccanici; da un punto di vista fenomenologico si può dire che esistono sempre tre fasi, se nel materiale non sono presenti difetti: la nucleazione, dove il difetto è esteso a qualche grano, la propagazione che estende il difetto a livello macroscopico e la rottura di schianto; nel caso sia già presente un difetto si hanno le sole fasi di propagazione e rottura di schianto. La superficie di frattura si presenta divisa in due zone distinte: una che si può considerare “liscia” che corrisponde alla fase di propagazione caratterizzata da delle linee concentriche rispetto all’innescò del difetto, denominate “linee di spiaggia” e una “ruvida” che corrisponde invece alla fase finale di rottura del componente. Molto importante riveste l’attenta osservazione della superficie di frattura in quanto può dare importanti informazioni relativamente alle modalità di cedimento. Particolare attenzione va messa anche nella valutazione della zona di propagazione della cricca e da cosa questa si sia sviluppata, se da un difetto intrinseco del materiale oppure da particolari condizioni di carico. Nello specifico se la zona di propagazione è molto estesa indica che il valore

dell'ampiezza della sollecitazione è basso, al contrario se la propagazione è limitata alla zona limitrofa alla zona di innesco il carico è elevato.

Il comportamento a fatica di un materiale è definito tramite prove sperimentali, i cui risultati sono riportati in termini di ampiezza del carico applicato e del numero di cicli, come rappresentato nell'esempio in figura 4.26, dove possiamo osservare due andamenti differenti: quello della curva a) caratteristico degli acciai dove si vede la curva tendere asintoticamente al valore  $\sigma_f$ , che rappresenta il limite di fatica, sotto il quale il materiale può sopportare teoricamente un numero infinito di cicli a fatica; la curva b) invece è caratteristica dei materiali non ferrosi, dove non si ha un limite di fatica definito, e di conseguenza si prende arbitrariamente  $\sigma_f$  in corrispondenza di un numero di cicli elevati (solitamente  $10^7$  cicli).

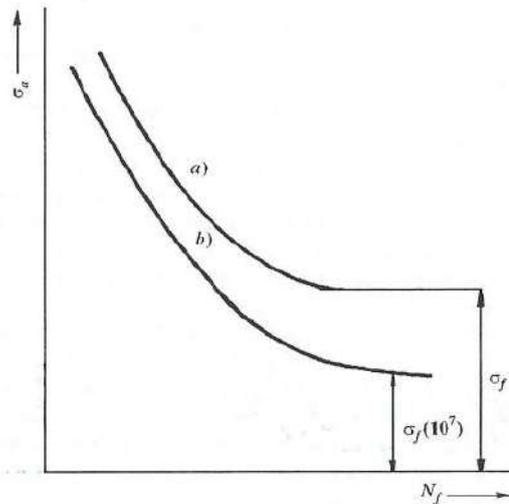


Figura 4.26 a) Comportamento a fatica tipico di un acciaio; b) comportamento a fatica tipico di un materiale non ferroso

Osservando invece ora la figura 4.27, possiamo dire che da un punto di vista fenomenologico la curva del comportamento del materiale a fatica può essere distinto in due zone: nella prima detta a basso numero di cicli sono presenti

sforzi elevati associati ad estese deformazioni plastiche e durate limitate dove prevale la propagazione della cricca; nella seconda detta ad alto numero di cicli sono presenti sforzi contenuti e durate elevate dove la nucleazione diventa preponderante. Valutando invece la curva ingegneristicamente possiamo distinguere ancora due zone: quella a vita finita, e quella a vita infinita. Come già accennato molti sono i fattori che influenzano il comportamento a fatica di un materiale, come microstruttura, grandezza del grano cristallino, difetti, intagli e i carichi che vengono applicati.

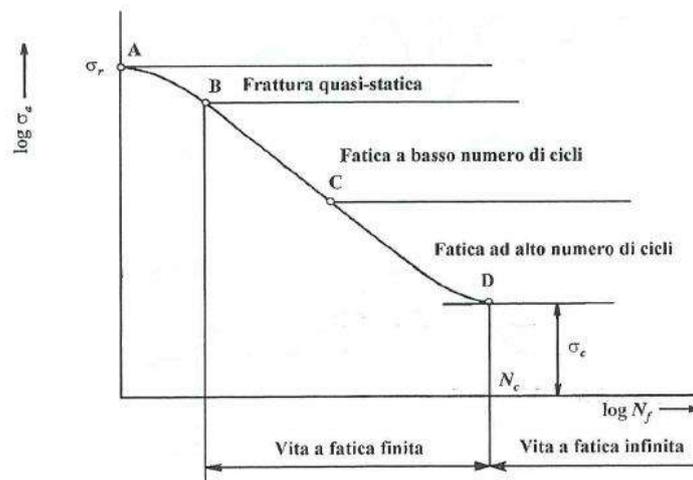


Figura 4.27 Suddivisione della curva sforzi-vita a fatica di un materiale.

#### 4.5.2 Carichi ripetuti e/o variabili nel tempo

Come accennato in precedenza le rotture per fatica avvengono anche sotto l'azione di carichi che sono generalmente inferiori ai limiti di resistenza statica dei materiali. Questa situazione si verifica quando si hanno delle situazioni di sollecitazione che possono essere ripetute con continuità nel tempo. I carichi applicati per fatica risultano essere di trazione, compressione, flessione e

torsione che però possono avere delle fluttuazioni nel tempo quindi agire non in modo statico sul materiale ma in maniera dinamica. L'andamento degli sforzi nel tempo generalmente nei componenti meccanici è di tipo casuale, ma nello studio dei fenomeni di fatica è impossibile riprodurre una situazione randomica delle sollecitazioni quindi si fanno delle semplificazioni utilizzando delle sinusoidi per riprodurre la variazione nel tempo del carico. Definiamo ora i parametri caratteristici per definire un ciclo di fatica:

- sforzo massimo e minimo del ciclo  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  ;
- sforzo medio  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$  ;
- ampiezza del ciclo di sforzo  $\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2}$  ;
- rapporto di carico  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  ;

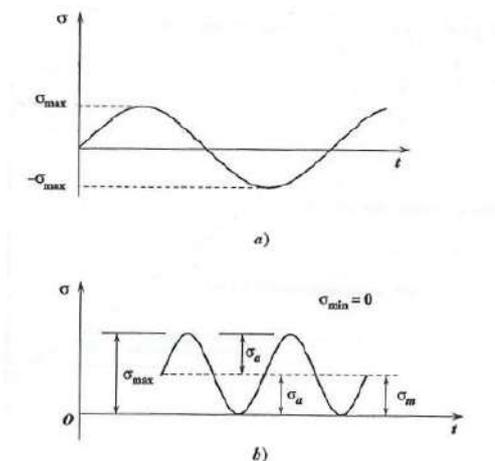


Figura 4.28 a) Carico alternato simmetrico; b) carico pulsante dallo zero.

### 4.5.3 Innesco e propagazione della cricca

La rottura per fatica come precedentemente accennato si distingue in tre fasi:

- innesco della cricca in una zona dove solitamente vi è una concentrazione degli sforzi;

- propagazione della cricca dovuto alla sollecitazione ciclica di carico;
- rottura finale che avviene in modo rapido una volta raggiunte le dimensioni critiche di cricca.

Possiamo quindi dire che la vita a fatica del componente  $N_f$  sia la somma del numero di cicli per avere l'innescò  $N_i$ , del numero di cicli per la propagazione della cricca  $N_p$  e il numero di cicli della rottura finale che può però essere trascurato in quanto insignificante rispetto agli altri due. I due contributi dipendono dal materiale e dalle condizioni di carico applicate. Abbiamo già detto come ci sia una relazione tra il carico e l'estensione delle zone di innescò e di propagazione; possiamo inoltre legare l'entità del carico con numero di cicli  $N_i$  e  $N_p$  infatti minore sarà il valore dello sforzo applicato maggiori saranno i cicli necessari per innescare la cricca mentre aumentando il livello di carico le cricche si genereranno in modo più rapido e la fase di propagazione sarà maggiore.

Le cricche per fatica si innescano generalmente sulle superfici dei componenti dove sono sempre presenti piccoli difetti del materiale oppure delle zone geometricamente soggette a intensificazioni degli sforzi come raccordi, spigoli vivi, spallamenti, cambi di sezione, ecc.. Una volta che la cricca o le cricche si sono innescate queste in un primo momento propagano a livello dei grani del reticolo cristallino lungo la direzione dove lo sforzo di taglio è massimo a  $45^\circ$  poi successivamente la direzione di avanzamento diventa perpendicolare alla direzione di applicazione del carico aumentando notevolmente la velocità di propagazione andando ad interessare completamente la sezione del materiale.

Il comportamento sopra descritto e in particolar modo la seconda parte genera sulla superficie segni distintivi della rottura per fatica. A occhio nudo è possibile vedere delle linee circolari o semicircolari concentriche che si sviluppano dalla zona di innescò della cricca; queste rappresentano il successivo avanzamento del difetto a seguito di ripetute interruzioni di carico e scarico dello sforzo. È inoltre

possibile osservare utilizzando un microscopio elettronico a scansione delle linee dette striature di fatica che anch'esse riconducono alla zona di innesco della cricca, le striature al contrario delle linee di spiaggia rappresentano l'avanzamento della cricca durante un ciclo di carico e le loro dimensioni dipendono dall'entità dello sforzo applicato.

Avendo quindi a disposizione questi segni caratteristici delle rotture per fatica, è possibile risalire alla causa di cedimento di un componente osservando attentamente la superficie di frattura; osservando la zona caratterizzata dalle linee di spiaggia è interessante notare come la superficie risulti liscia mentre al contrario dove è avvenuto il cedimento la superficie è rugosa e presenta segni di deformazione plastica. La rottura che macroscopicamente appare fragile, con pochissime deformazioni e disposta perpendicolarmente rispetto alla direzione di applicazione del carico, avviene quando la propagazione della cricca è tale da aver ridotto la sezione resistente al punto da cedere sotto l'azione del carico applicato. Nonostante la frattura appaia ad occhio nudo fragile è in realtà microscopicamente duttile. Riportiamo ora uno schema che riassume le diverse tipologie di rottura per fatica divise in base all'entità del carico, al tipo di sollecitazione applicata e all'entità della concentrazione degli sforzi.

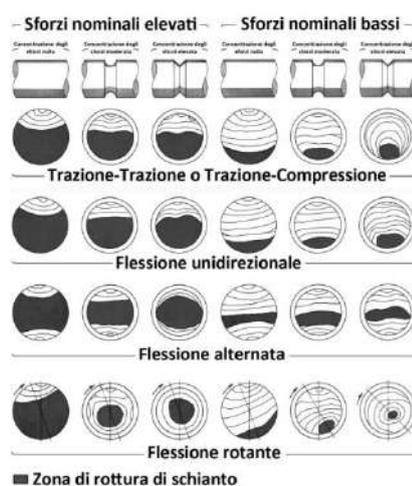


Figura 4.29 Morfologia macroscopica di superfici di frattura rotte per fatica.

#### 4.5.4 La prova di fatica e la determinazione del limite di fatica

Abbiamo già accennato nei paragrafi precedenti come il comportamento a fatica di un materiale sia rappresentato molto bene dai diagrammi sforzi-numero di cicli di carico, detti anche di Wöhler. Lo schema della figura 4.30 rappresenta un esempio di un diagramma di Wöhler in scala doppio logaritmica dove è possibile osservare la distinzione di tre zone: la I la zona dove si hanno sforzi elevati e durate brevi, la II dove i carichi sono meno importanti ma ancora si verificano rotture tra  $10^3$  e  $10^6$  cicli infine la III dove i carichi sono inferiori al limite di fatica e non si hanno rotture. Durante le prove di fatica i parametri che si vanno a definire sono :

- N numero di cicli per la quale si ha una rottura di un provino;
- la resistenza a fatica che è il valore dell'ampiezza dello sforzo che provoca la rottura in corrispondenza del numero di cicli N;
- il limite di fatica che è il valore di resistenza a fatica in corrispondenza di un valore di numero di cicli compreso tra  $10^6 \div 10^7$ .

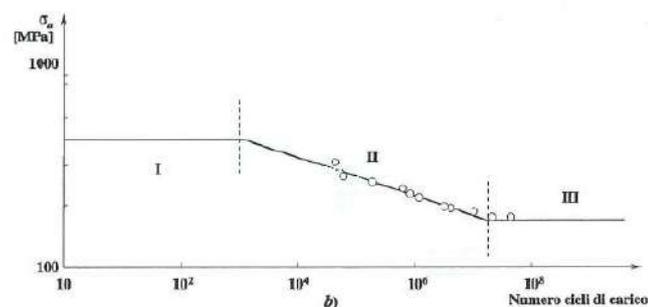


Figura 4.30 Diagramma di Wöhler.

Per la stima della curva di Wöhler è necessario ottenere un gran numero di dati sperimentali che generalmente, a causa dei molteplici fattori che influenzano la fatica, hanno una forte dispersione e per questo è utile trattarli con analisi

statistiche. Spesso è utilizzato il metodo detto “Stair Case” che consente di determinare il limite di fatica con quel valore di sforzo per il quale si ha il 50% di probabilità di rompere il provino. Il metodo consiste nell’individuare preventivamente un limite inferiore e uno superiore rispetto al limite di fatica e dividere il gap in una serie di valori intermedi equi spaziatati. A questo punto si prende un numero dispari di provini e si eseguono le prove diminuendo o aumentando il carico delle prove seguenti a seconda che il provino si sia rotto o meno. Avendo un numero iniziale dispari le rotture e le non rotture saranno diverse quindi si considera la serie dell’evento meno frequente e si calcola la media sottraendoli o sommandoli la metà del salto tra i livelli a seconda della serie considerata.

Per quanto riguarda la macchina di prova è importante ricordare che questa modificherà la sua struttura e l’applicazione del carico in funzione del limite di fatica da stimare (flessionale, torsionale, assiale). Di seguito riportiamo una schema semplificato di una macchina per la prova di flessione rotante.

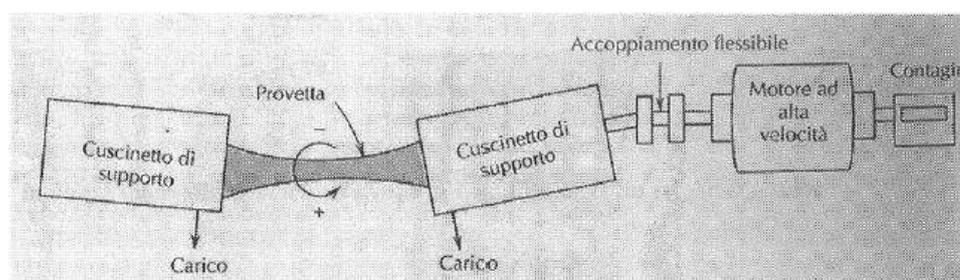


Figura 4.31 Schema di una macchina di prova per fatica a flessione rotante.

#### 4.5.5 Provini

Per ottenere dei risultati corretti e confrontabili dalle prove di fatica la realizzazione dei provini è molto importante. Come abbiamo detto molti sono i fattori che influenzano il fenomeno della fatica e tra questi sappiamo come

difetti superficiali e geometrie giocino un ruolo molto importante per l'innescò di eventuali cricche. I provini di fatica possono essere cilindrici o a clessidra con sezione circolare o quadrata. È fondamentale che la zona degli afferraggi dei campioni siano raccordati con il tratto utile della prova con raggi di raccordo il più ampi possibile in modo da scongiurare la presenza di un'intensificazione degli sforzi inoltre la finitura superficiale quindi la rugosità media  $R_a$  sui raccordi e nel tratto utile deve avere un valore non superiore a  $0,3 [\mu\text{m}]$ .

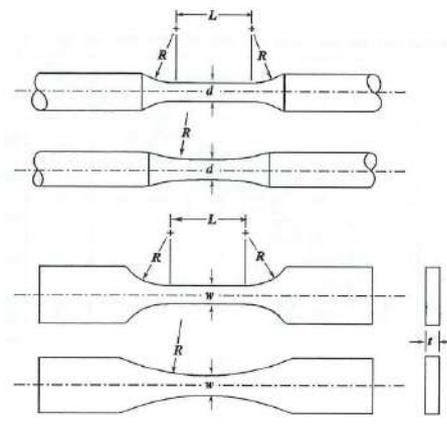


Figura 4.32 Provini di fatica.

#### 4.5.6 Dal provino al componente

Le resistenza e il limite di fatica dei materiali come abbiamo appena descritto vengono ricavati secondo determinate procedure e utilizzando provini standard preparati secondo le rispettive norme di riferimento. Questi risultati però non sono sufficienti a descrivere il comportamento a fatica di un componente realizzato con quel materiale in una situazione reale, in quanto le dimensioni, le geometrie e la finitura superficiale non corrispondono a quelle dei provini utilizzati nella prova per determinare il limite di fatica. È quindi fondamentale

sapere che il limite di fatica del componente è diverso e ragionevolmente inferiore rispetto a quello del materiale poiché vi sono parametri come gli intagli, la finitura superficiale le dimensioni che lo influenzano, quindi sono necessari dei coefficienti correttivi per tenerne conto.

Riportiamo ora una panoramica dei principali coefficienti correttivi per il limite di fatica e la loro determinazione:

- effetto di intaglio è indicato con  $K_f$  un coefficiente per tenere in considerazione l'effetto di particolari geometrie sul componente che possono generare in alcune condizioni delle intensificazioni degli sforzi. Generalmente ha un valore inferiore rispetto al coefficiente di intaglio teorico  $K_t$  e si calcola come:

$$K_f = 1 + q * (K_t - 1)$$

dove  $q$  è la sensibilità all'intaglio che può assumere valori fra 0 e 1 ed è ricavabile da dei diagrammi che tengono conto del gradiente degli sforzi, dal raggio di raccordo e del materiale. La sensibilità all'intaglio è anche calcolabile mediante le formule di:

Peterson:  $q = \frac{1}{1 + \frac{a}{r}}$       Neuber:  $q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}}$  dove "r" è la dimensione del

raggio di raccordo in prossimità dell'intaglio mentre  $a$  è un parametro che dipende dal materiale mentre "p" è sempre una caratteristica del materiale che ha l'andamento rappresentato in figura 4.33;

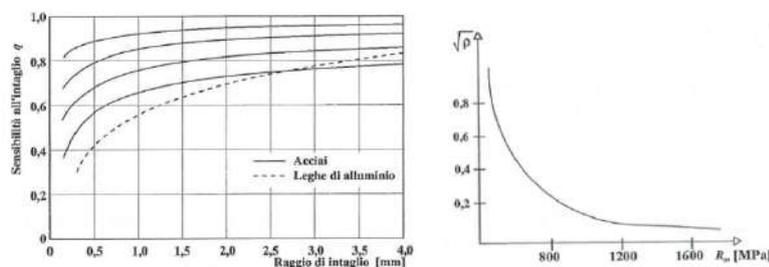


Figura 4.33 Diagrammi per la determinazione della sensibilità all'intaglio.

- effetto della dimensione è indicato con  $b_2$  un coefficiente che tiene conto della diminuzione del limite di fatica dovuto alle dimensioni del componente in quanto maggiori sono le dimensioni maggiori sono le probabilità di trovare difetti superficiali nel componente ma in maniera più marcata con dimensioni maggiori a parità di sollecitazione massima, il gradiente degli sforzi è minore e quindi la sollecitazione media sul singolo grano risulta maggiore. Il coefficiente  $b_2$  è diagrammato in funzione del diametro o dello spessore del componente;

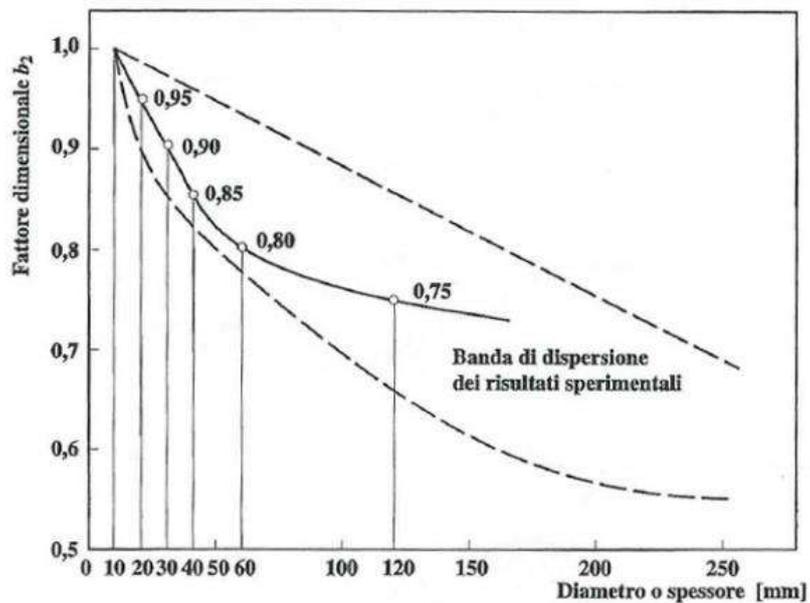


Figura 4.34 Coefficiente dimensionale  $b_2$ .

- effetto della finitura superficiale è indicato con  $b_3$  un coefficiente che tiene in considerazione la rugosità del componente (quindi del processo tecnologico con cui è stato ottenuto) e della resistenza meccanica del materiale. La determinazione del coefficiente è molto

immediata utilizzando dei grafici che mettono in relazione  $b_3$  con la rugosità della lavorazione e il carico di rottura del componente.

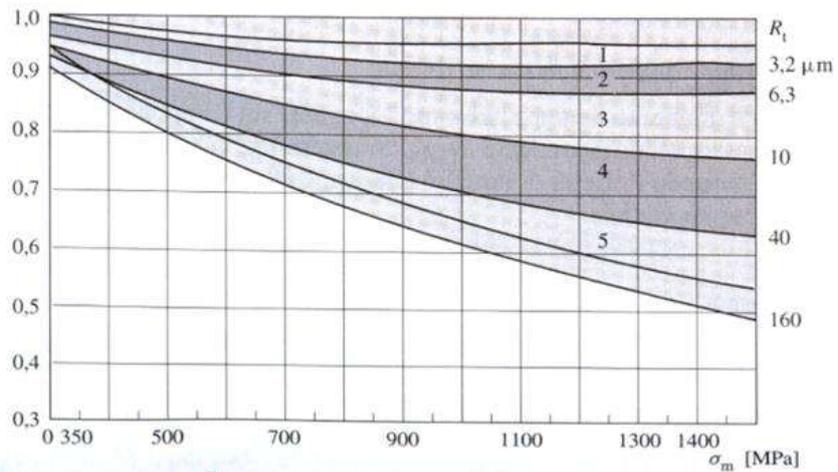


Figura 4.35 Coefficiente  $b_3$  in funzione della rugosità e del carico unitario di rottura.

Questi tre coefficienti permettono di passare dal limite di fatica del materiale stimato con la prova di fatica al limite di fatica di uno specifico componente:

$$\sigma_{lim.F\_componente} = \frac{\sigma_{lim\_materiale} * b_2 * b_3}{K_f} \text{ [MPa]}.$$

## 4.6 La prova di durezza

La durezza è una caratteristica di un materiale che esprime la resistenza che esso oppone alla penetrazione di un materiale più duro secondo una compressione localizzata. La prova di durezza al contrario delle precedenti è una prova non distruttiva. Oltre al vantaggio di essere un test non distruttivo la prova di durezza offre vantaggi di tipo economico, di rapidità e facilità di esecuzione. Diverse sono le modalità per l'esecuzione della prova tra cui ricordiamo la Brinell, la Vickers, la Knoop e la Rockwell.

Riportiamo di seguito uno schema che riassume i parametri delle principali prove di durezza generalmente utilizzate dove vengono definiti il tipo di penetratore, il carico applicabile e la formula per il calcolo della durezza.

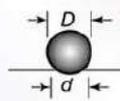
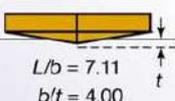
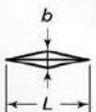
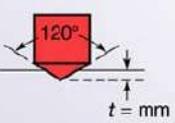
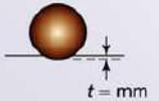
Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10-mm steel or tungsten carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Diamond pyramid			25 g-5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg	HRA } HRC } HRD } = 100 - 500t
				150 kg	
				100 kg	
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in. diameter steel ball			100 kg	HRB } HRF } HRG } = 130 - 500t
				60 kg	
				150 kg	
E	$\frac{1}{8}$ -in. diameter steel ball			100 kg	HRE }

Tabella 4.1 Parametri delle principali prove di durezza.

# Capitolo 5

## 5.1 Preparazione dei provini

### 5.1.1 Taglio e codifica

I provini per l'esecuzione dell'analisi sperimentale sono stati ricavati da barre di 39NiCrMo3 fornite dall'azienda Rodacciai; in particolare si è partiti da barre di 18 [mm] di diametro e 1000 [mm] di lunghezza per i provini di trazione, resilienza e fatica a flessione rotante, mentre per i provini di meccanica della frattura è stata utilizzata una barra da 50 [mm] di diametro per 1000 [mm] di lunghezza. Prima di tutto le barre da 18 [mm] sono state troncate in modo da ottenere 63 grezzi della lunghezza di 180 [mm] per ricavare 9 provini per la prova di trazione, 54 per la prova di resilienza e 36 per la prova di fatica, mentre dalla barra da 50 [mm] sono stati ricavati 12 cilindri con spessore di 25 [mm] per la prova di meccanica della frattura.

Successivamente le barre sono state suddivise e codificate in base al trattamento termico e alla prova meccanica a cui erano destinate. Ogni provino è stato codificato con un numero progressivo, una lettera e un colore: i colori giallo, bianco e rosso indicano rispettivamente i campioni rinvenuti a 550, 600 e 650 [°C], mentre le lettere T, R, M e F indicano rispettivamente la prova di trazione, resilienza, meccanica della frattura e fatica a flessione rotante. Si riporta nelle tabelle seguenti la codifica utilizzata

Provini di trazione		Normativa UNI EN ISO 6892-1
Provino n°	Temperatura di rinvenimento (2h)	Codifica
1	550	1T
2	550	2T
3	550	3T
4	600	4T
5	600	5T
6	600	6T
7	650	7T
8	650	8T
9	650	9T

Tabella 5.1 Tabella di codifica provini di trazione.

Provini di resilienza intaglio a "V"		Normativa UNI EN ISO 148-1-2011
Provino n°	Temperatura di rinvenimento (2h)	Codifica
1	550	1R
2	550	2R
3	550	3R
4	550	4R
5	550	5R
6	550	6R
7	550	7R
8	550	8R
9	550	9R
10	550	10R
11	550	11R
12	550	12R
13	550	13R
14	550	14R
15	550	15R
16	550	16R
17	550	17R
18	550	18R
19	600	19R
20	600	20R
21	600	21R
22	600	22R

23	600	<b>23R</b>
24	600	<b>24R</b>
25	600	<b>25R</b>
26	600	<b>26R</b>
27	600	<b>27R</b>
28	600	<b>28R</b>
29	600	<b>29R</b>
30	600	<b>30R</b>
31	600	<b>31R</b>
32	600	<b>32R</b>
33	600	<b>33R</b>
34	600	<b>34R</b>
35	600	<b>35R</b>
36	600	<b>36R</b>
37	650	<b>37R</b>
38	650	<b>38R</b>
39	650	<b>39R</b>
40	650	<b>40R</b>
41	650	<b>41R</b>
42	650	<b>42R</b>
43	650	<b>43R</b>
44	650	<b>44R</b>
45	650	<b>45R</b>
46	650	<b>46R</b>
47	650	<b>47R</b>
48	650	<b>48R</b>
49	650	<b>49R</b>
50	650	<b>50R</b>
51	650	<b>51R</b>
52	650	<b>52R</b>
53	650	<b>53R</b>
54	650	<b>54R</b>

*Tabella 5.2 Tabella di codifica provini di resilienza.*

<b>Provini di meccanica della frattura Normativa ASTM 1820-13</b>		
<b>Provino n°</b>	<b>Temperatura di rinvenimento (2h)</b>	<b>Codifica</b>
1	550	1M
2	550	2M
3	550	3M
4	550	4M
5	600	5M
6	600	6M
7	600	7M
8	600	8M
9	650	9M
10	650	10M
11	650	11M
12	650	12M

*Tabella 5.3 Tabella codifica provini meccanica della frattura.*

<b>Provini di Fatica a flessione rotante Normativa ISO 1143</b>		
<b>Provino n°</b>	<b>Temperatura di rinvenimento (2h)</b>	<b>Codifica</b>
1	550	1F
2	550	2F
3	550	3F
4	550	4F
5	550	5F
6	550	6F
7	550	7F
8	550	8F
9	550	9F
10	550	10F
11	550	11F
12	550	12F
13	600	13F
14	600	14F
15	600	15F
16	600	16F
17	600	17F
18	600	18F
19	600	19F

20	600	<b>20F</b>
21	600	<b>21F</b>
22	600	<b>22F</b>
23	600	<b>23F</b>
24	600	<b>24F</b>
25	650	<b>25F</b>
26	650	<b>26F</b>
27	650	<b>27F</b>
28	650	<b>28F</b>
29	650	<b>29F</b>
30	650	<b>30F</b>
31	650	<b>31F</b>
32	650	<b>32F</b>
33	650	<b>33F</b>
34	650	<b>34F</b>
35	650	<b>35F</b>
36	650	<b>36F</b>

*Tabella 5.4 Tabella provini fatica a flessione rotante.*

### 5.1.2 Analisi chimica

Prima di procedere ai trattamenti termici sono stati prelevati due campioni di materiale: uno è stato estratto da una delle barre di diametro 18 [mm] mentre l'altro dalla barra di diametro 50 [mm]. Sui campioni è stata fatta un'analisi chimica presso il laboratorio Hammer di Rho per verificare la corrispondenza dell'acciaio acquistato. Nelle tabelle riportiamo i risultati delle analisi effettive, ampiamente confrontabili con i limiti riportati nel capitolo 3.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Pb</b>
<b>Barra 18</b>	0,40	0,28	0,77	0,009	0,015	0,74	0,17	0,77	0,024	0,0002
<b>Barra 50</b>	0,42	0,29	0,8	0,009	0,02	0,74	0,18	0,76	0,025	0,0002

*Tabella 5.5 Analisi chimica effettiva dell'acciaio 39NiCrMo3 usato nel lavoro di tesi.*

### 5.1.3 Trattamenti termici

Una volta codificati e suddivisi i grezzi hanno subito il trattamento termico di bonifica, tempra con raffreddamento in olio e successivo rinvenimento. I trattamenti sono stati eseguiti principalmente nei laboratori del Politecnico di Milano ad eccezione di alcuni provini rinvenuti presso l'azienda di "Figini Edoardo" di Olginale (LC).



*Figura 5.1 Forni utilizzati per i trattamenti termici di tempra e rinvenimento.*

Il trattamento di tempra, uguale per tutti i campioni, si è svolto a 850 [°C] con un periodo di preriscaldamento di trenta minuti per omogenizzare la temperatura in tutto il campione, un mantenimento di due ore e infine il raffreddamento in olio. La fase di raffreddamento è durata tre minuti per ogni campione, immergendo con delle pinze il provino in una vasca e muovendolo in modo circolare al suo interno per migliorare il ricambio del fluido a contatto con le superfici. Notare che si è potuto eseguire un solo trattamento di tempra al giorno in quanto il mezzo di raffreddamento dopo un ciclo di dieci campioni raggiungeva alte temperature che non permettevano la buona riuscita del trattamento termico. Una volta temprati i provini ancora grezzi sono stati rinvenuti, come detto in precedenza a differenti temperature, 550, 600 e 650 [°C] con un mantenimento in forno di due ore. Terminata questa fase i provini sono stati contrassegnati,

come rappresentato in figura 5.2, con la giusta codifica per poi essere inviati alla ditta SMT di Milano, per eseguire le lavorazioni meccaniche.



*Figura 5.2 Provini grezzi codificati.*

#### **5.1.4 Disegni tecnici dei provini**

Tutti i provini sono stati disegnati e realizzati seguendo le normative di riferimento:

- UNI EN ISO 6892-1 per le trazioni;
- UNI EN ISO 148-1 per le resilienze;
- ASTM E1820-13 per la meccanica della frattura;
- ISO 1143 per la fatica a flessione rotante;

Provino per la prova di trazione:

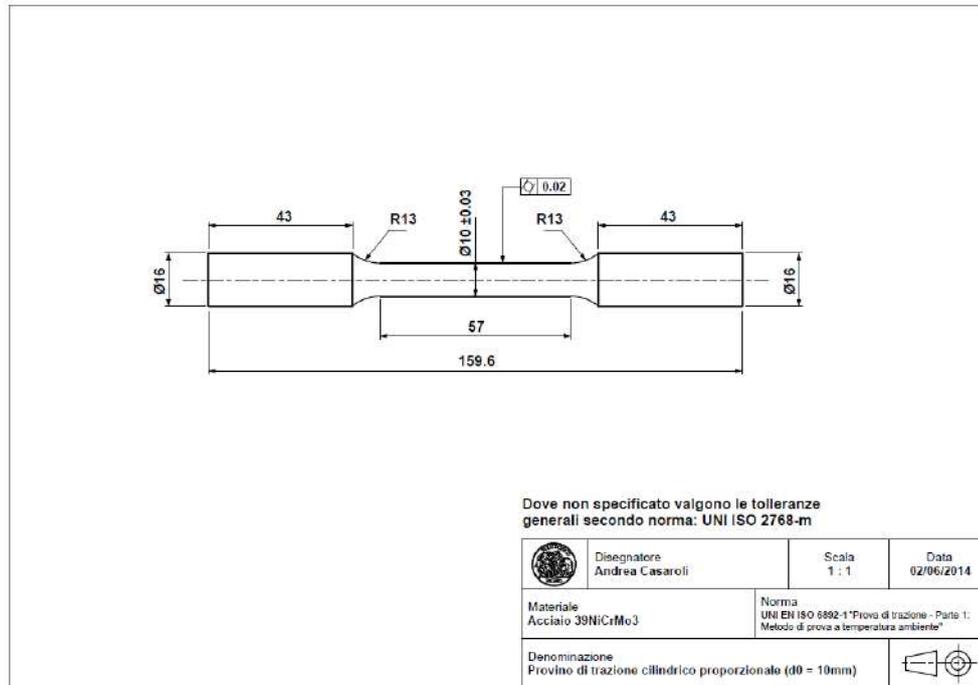


Figura 5.3 Disegno provino di trazione.

Riportiamo di seguito un'immagine di un provino per la prova di trazione con un testimone di lavorazione che è stato successivamente rimosso per permettere poi la corretta esecuzione della prova come riportato nell'immagine a fianco.



Figura 5.4 Provino di trazione con e senza testimone di lavorazione.

Provino per la prova di resilienza “KV”:

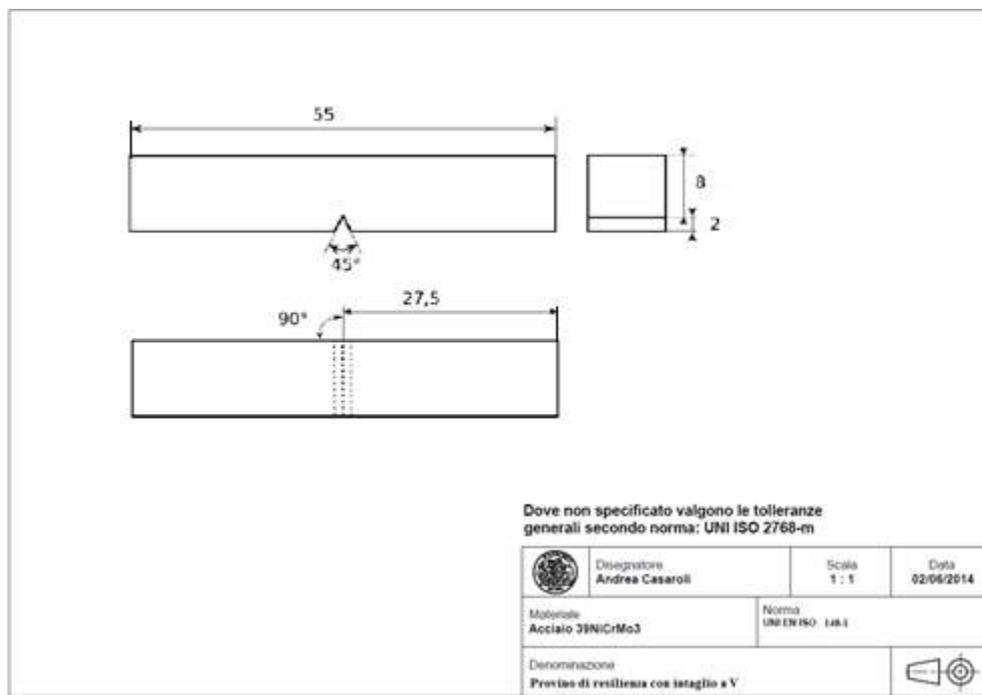


Figura 5.5 Disegno provino di resilienza.

Riportiamo di seguito i provini per le prove di resilienza, che sono stati realizzati come mostrato in figura 5.6: a sinistra tre provini per ognuno dei 18 grezzi e poi successivamente separati come mostrato in figura 5.6 a destra.



Figura 5.6 Provini di resilienza.

Provino per la prova di meccanica della frattura “DCT”:

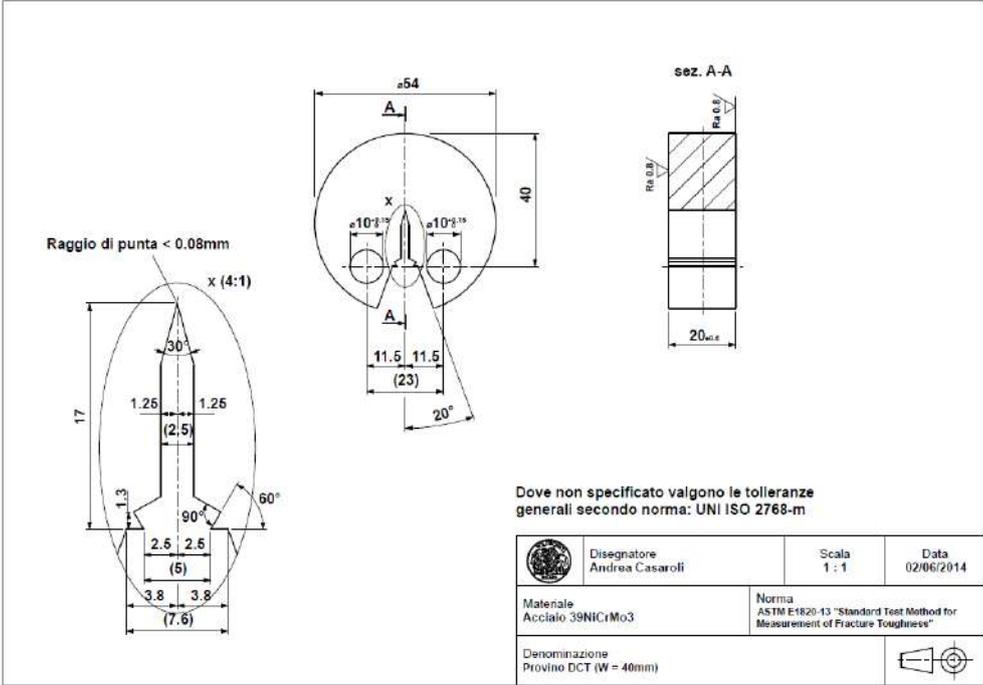


Figura 5.7 Disegno provino di meccanica della frattura.



Figura 5.8 Provino di meccanica della frattura.

Provino per la prova di fatica a flessione rotante:

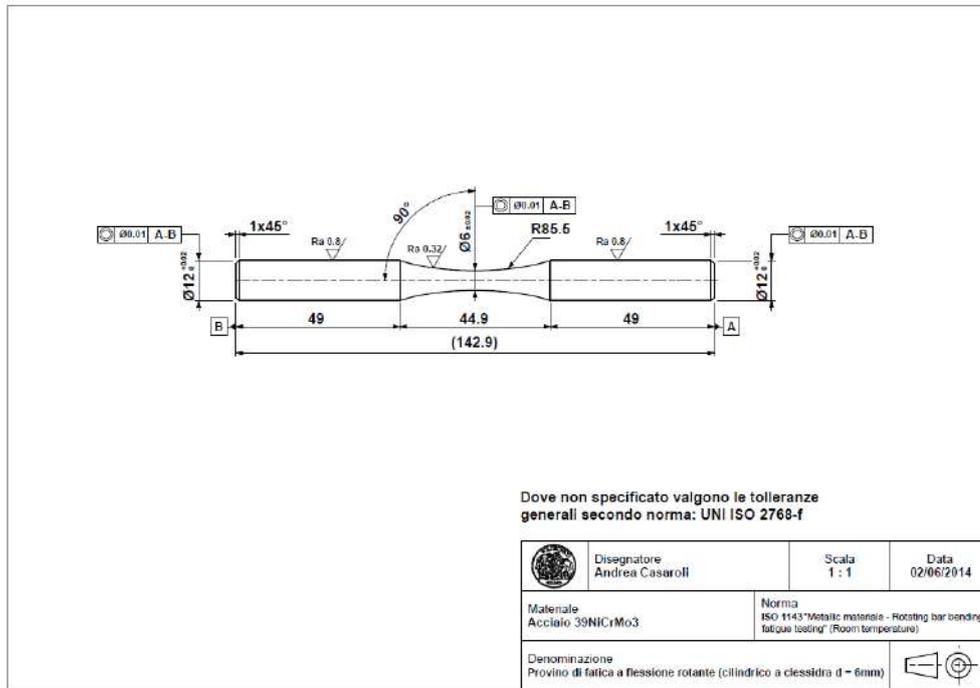


Figura 5.9 Disegno provino di fatica a flessione rotante.

Nella figura seguente riportiamo il provino con il testimone di lavorazione, a fianco il provino dopo la rimozione del testimone di lavorazione.



Figura 5.10 Provino di fatica a flessione rotante con e senza testimone di lavorazione.

## 5.2 Prova di trazione

La prova di trazione è stata eseguita presso i laboratori del Politecnico di Milano secondo la normativa UNI EN ISO 6892-1. Innanzitutto i campioni sono stati misurati per controllare la correttezza delle lavorazioni meccaniche e in particolare sono state fatte mediante un calibro tre misure lungo il tratto utile  $L_0$  del diametro  $d_0$ . Successivamente i provini sono stati preparati eseguendo come mostrato in figura 5.11 dei riferimenti per la validazione della prova e il calcolo manuale dell'allungamento percentuale  $A\%$  che sarà mostrato in seguito.



*Figura 5.11 Provino di trazione con i riferimenti.*

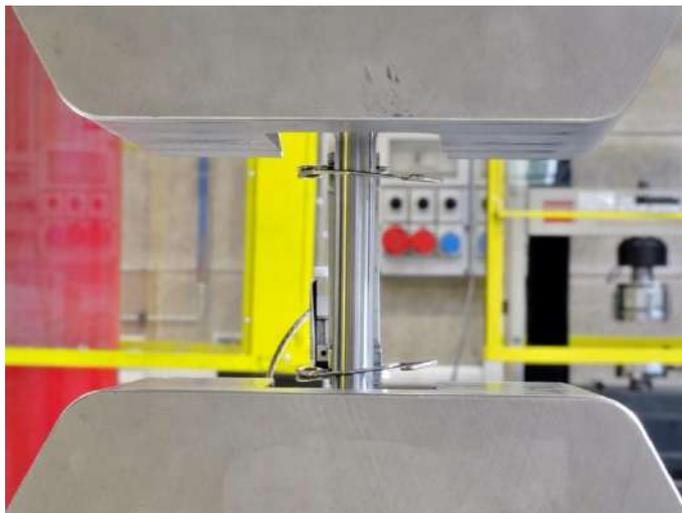
### 5.2.1 Esecuzione e analisi della prova

I provini vengono montati sulla macchina afferrandoli con le apposite ganasce, e successivamente si procede con il montaggio e l'azzeramento dell'estensometro e della cella di carico tramite il software di gestione della macchina; vengono poi definite nell'interfaccia del software la lunghezza utile  $L_0$  e il diametro iniziale  $d_0$  e la velocità di incremento del carico, che da normativa per un

materiale con  $E$ , modulo di Young, maggiore di 150000 [MPa] deve essere compresa tra 6 e 60 [MPa\*s<sup>-1</sup>].



*Figura 5.12 Macchina per la prova di trazione del Politecnico di Milano.*



*Figura 5.13 Particolare macchina per la prova di trazione (estensimetro).*

Una volta settati i parametri della macchina si procede con l'esecuzione della prova; alla fine di essa il software richiede di inserire le misure della lunghezza finale  $L_F$  del provino e del diametro  $d_F$  dove è avvenuta la rottura per poter calcolare alcune grandezze caratteristiche della prova. Si procede smontando il provino e con l'utilizzo di un calibro si eseguono le misurazioni necessarie, come mostrato in figura 5.14.

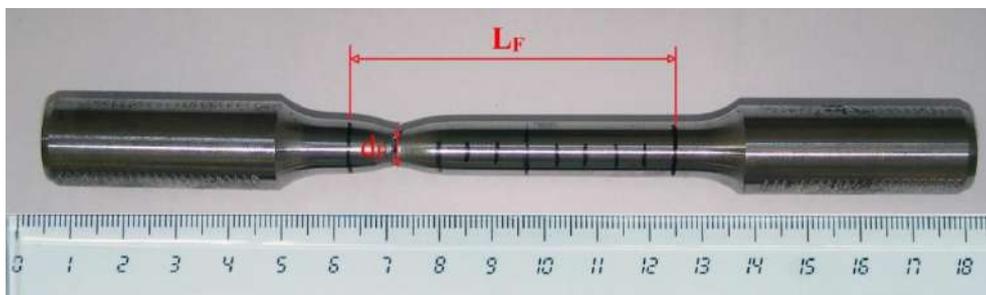


Figura 5.14 Misurazione della lunghezza e del diametro finale.

La macchina al termine della prova restituisce dei report con le grandezze di interesse e il diagramma sforzi deformazioni. Di seguito riportiamo i risultati delle nove prove effettuate.

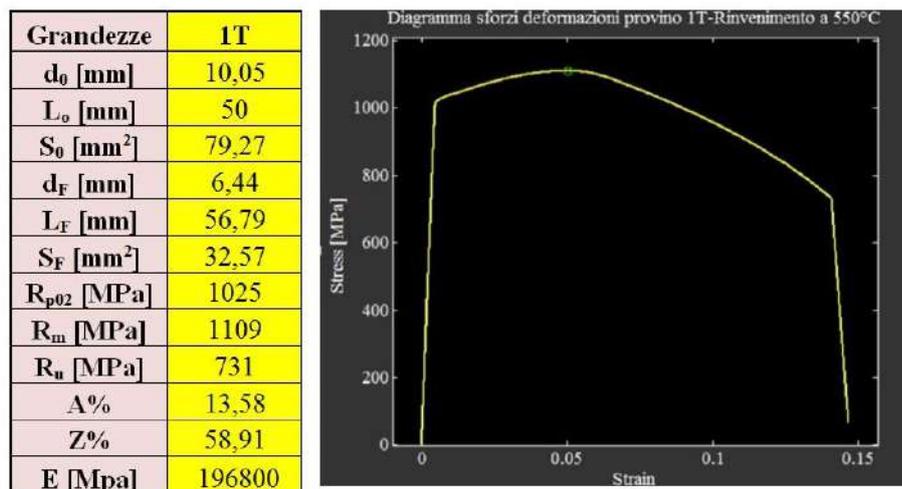


Figura 5.15 Grandezze prova di trazione del provino 1T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	2T
$d_0$ [mm]	10,05
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,33
$d_F$ [mm]	6,6
$L_F$ [mm]	58
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	34,21
$R_{p0,2}$ [MPa]	989
$R_m$ [MPa]	1078
$R_u$ [MPa]	718
A%	16
Z%	56,87
E [Mpa]	196800

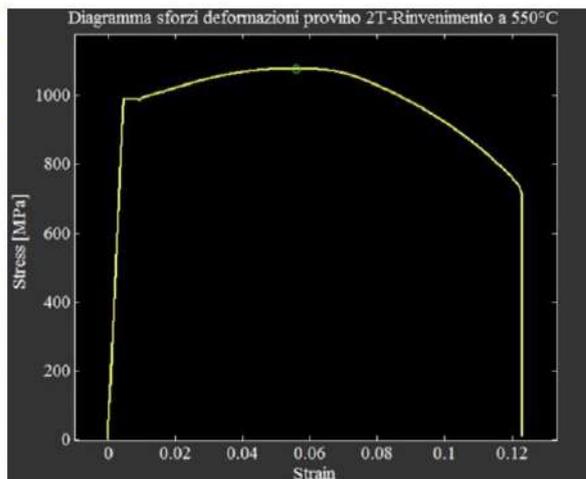


Figura 5.16 Grandezze prova di trazione del provino 2T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	3T
$d_0$ [mm]	10,05
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,27
$d_F$ [mm]	6,7
$L_F$ [mm]	55,53
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	35,26
$R_{p0,2}$ [MPa]	1010
$R_m$ [MPa]	1095
$R_u$ [MPa]	755
A%	13,96
Z%	55,53
E [Mpa]	196800

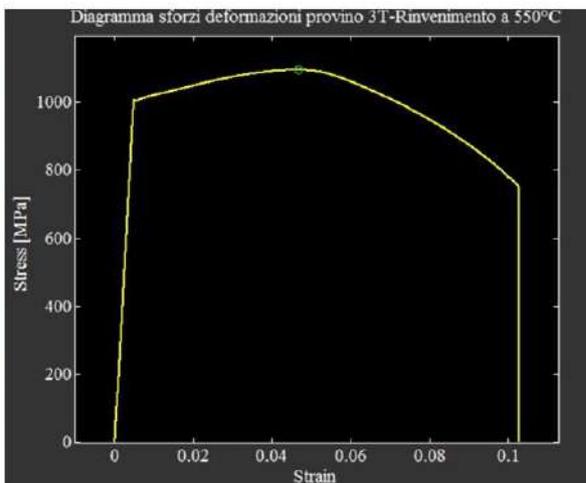


Figura 5.17 Grandezze prova di trazione del provino 3T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	4T
$d_0$ [mm]	10,03
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,06
$d_F$ [mm]	6,48
$L_F$ [mm]	57,08
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	32,98
$R_{p0,2}$ [MPa]	850
$R_m$ [MPa]	954
$R_u$ [MPa]	625
A%	14,16
Z%	58,29
E [Mpa]	196800

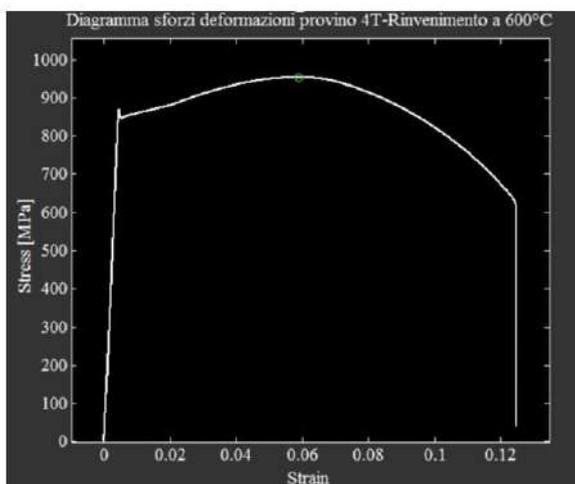


Figura 5.18 Grandezze prova di trazione del provino 4T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	5T
$d_0$ [mm]	10,03
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,01
$d_F$ [mm]	6,48
$L_F$ [mm]	57,67
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	32,99
$R_{p0,2}$ [MPa]	844
$R_m$ [MPa]	948
$R_u$ [MPa]	669
A%	15,34
Z%	58,26
E [Mpa]	196800

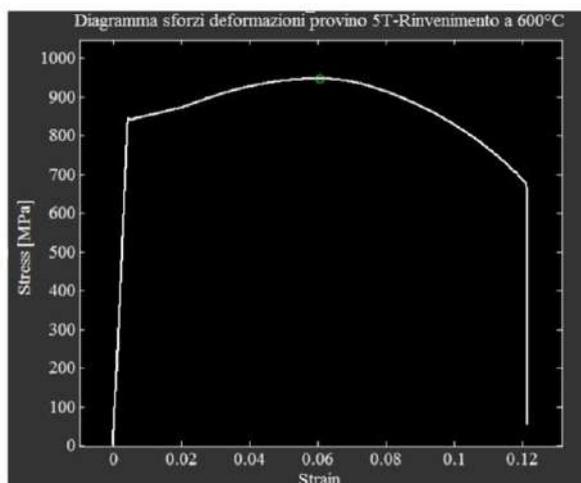


Figura 5.19 Grandezze prova di trazione del provino 5T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	6T
$d_0$ [mm]	10,03
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	78,96
$d_F$ [mm]	6,18
$L_F$ [mm]	57,6
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	29,99
$R_{p0,2}$ [MPa]	846
$R_m$ [MPa]	949
$R_u$ [MPa]	623
A%	15,2
Z%	62,01
E [Mpa]	196800

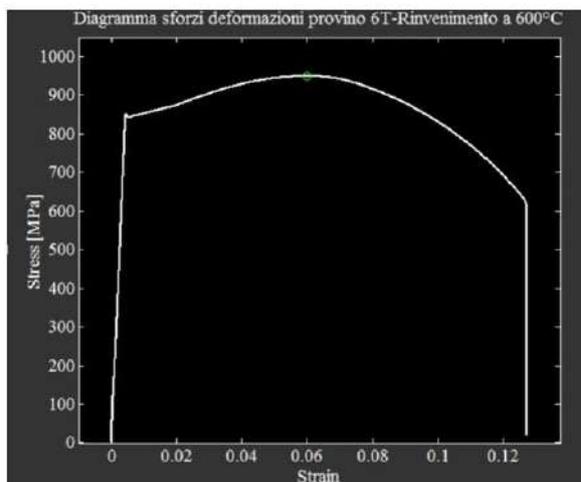


Figura 5.20 Grandezze prova di trazione del provino 6T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	7T
$d_0$ [mm]	10,01
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	78,96
$d_F$ [mm]	6,3
$L_F$ [mm]	59,66
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	31,17
$R_{p0,2}$ [MPa]	762
$R_m$ [MPa]	870
$R_u$ [MPa]	590
A%	19,32
Z%	60,52
E [Mpa]	196800

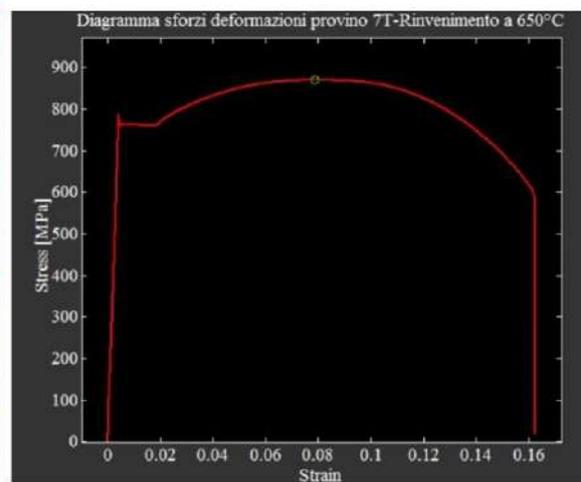


Figura 5.21 Grandezze prova di trazione del provino 7T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	8T
$d_0$ [mm]	10,04
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,17
$d_F$ [mm]	6,1
$L_F$ [mm]	59,27
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	29,22
$R_{p0,2}$ [MPa]	762
$R_m$ [MPa]	867
$R_u$ [MPa]	558
A%	18,54
Z%	63,09
E [Mpa]	196800

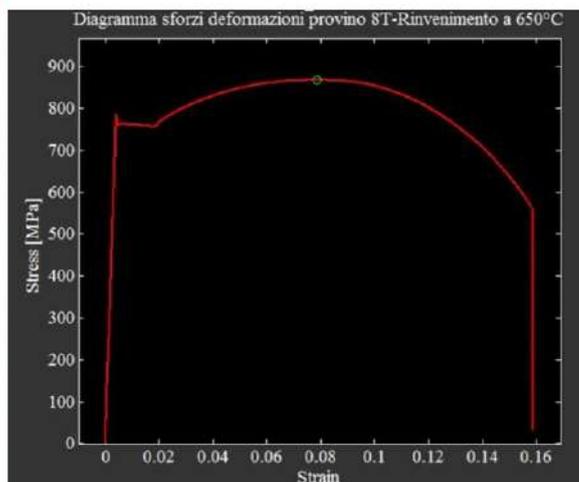


Figura 5.22 Grandezze prova di trazione del provino 8T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Grandezze	9T
$d_0$ [mm]	10,04
$L_0$ [mm]	50
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	79,17
$d_F$ [mm]	6,02
$L_F$ [mm]	60,64
$S_F$ [mm <sup>2</sup> ]	28,46
$R_{p02}$ [MPa]	755
$R_m$ [MPa]	861
$R_u$ [MPa]	534
A%	21,28
Z%	64,05
E [Mpa]	196800

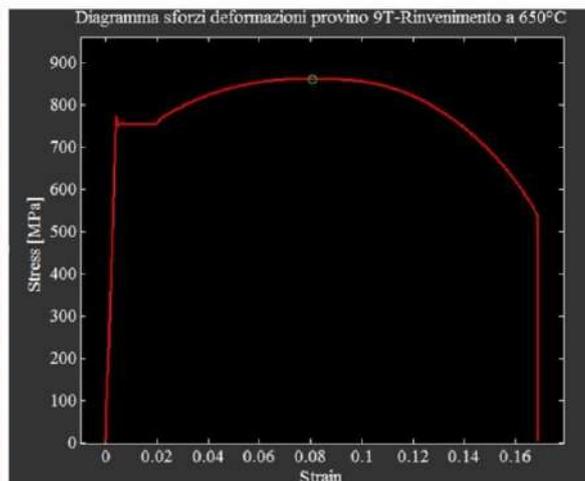


Figura 5.23 Grandezze prova di trazione del provino 9T e diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Analizzando i dati possiamo osservare come la prova sia stata ripetibile nelle tre condizioni di trattamento termico eseguite; i risultati confermano il comportamento dell'acciaio 39NiCrMo3 rinvenuto a differenti temperature, infatti aumentando la temperatura diminuisce la resistenza meccanica del

materiale ma in compenso migliora la capacità del materiale di deformarsi. Di seguito riportiamo una tabella riassuntiva delle principali caratteristiche medie e il confronto tra i diagrammi sforzi-deformazioni ricavati dalle prove di trazione.

Temperatura [°C]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	E [Mpa]	A%	Z%
550	1094	1008	196800	14,5	57,1
600	950	847	196800	14,9	59,5
650	866	760	196800	19,7	62,6

Tabella 5.6 Grandezze medie ricavate dalla prova di trazione per le condizioni di rinvenimento sperimentate.

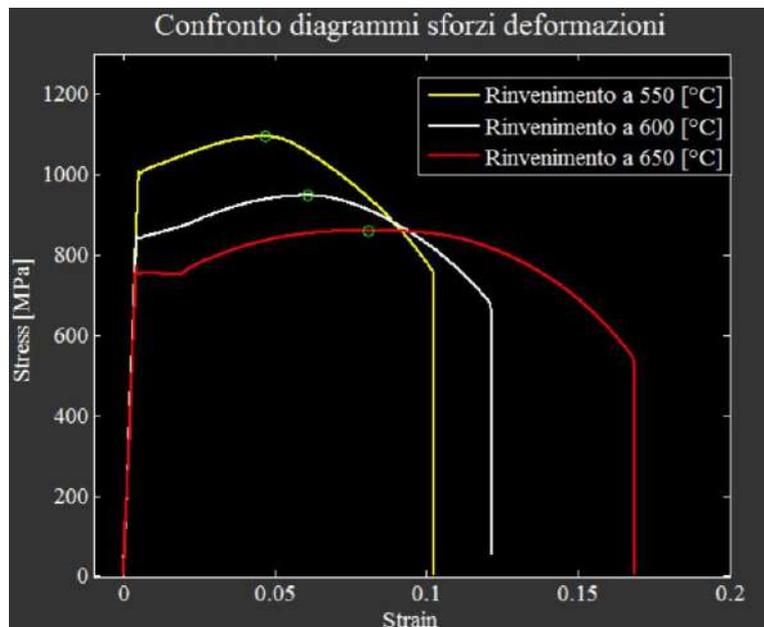


Figura 5.24 Confronto diagrammi  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Ad ulteriore conferma della ripetibilità e dei buoni risultati ottenuti possiamo osservare i diagrammi sforzi-deformazioni, di seguito nelle figure 5.25, 5.26, 5.27, dove si può notare una buona sovrapposizione delle curve nelle tre condizioni sperimentali, in particolar modo nella prima parte del grafico, dove nel tratto elastico le curve sono perfettamente sovrapposte.

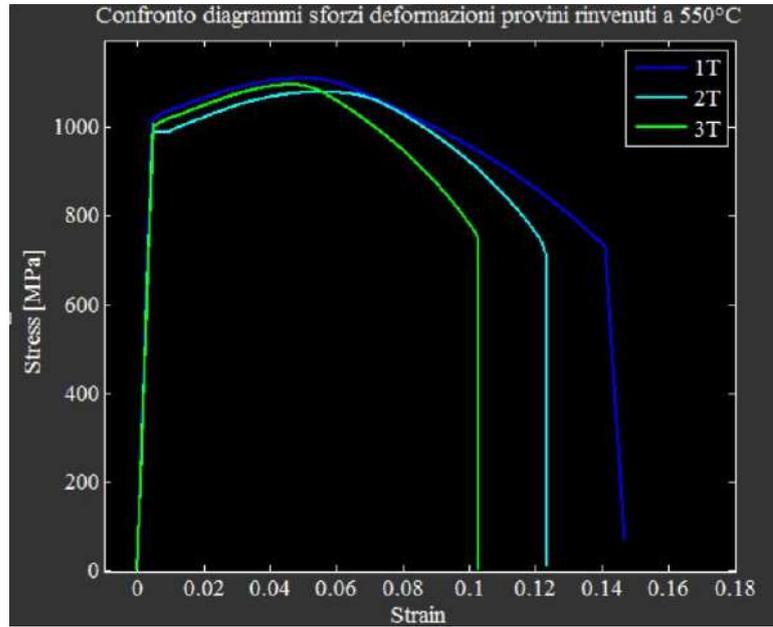


Figura 5.25 Confronto diagrammi  $\sigma$ - $\varepsilon$  rinvenimento a 550 [°C].

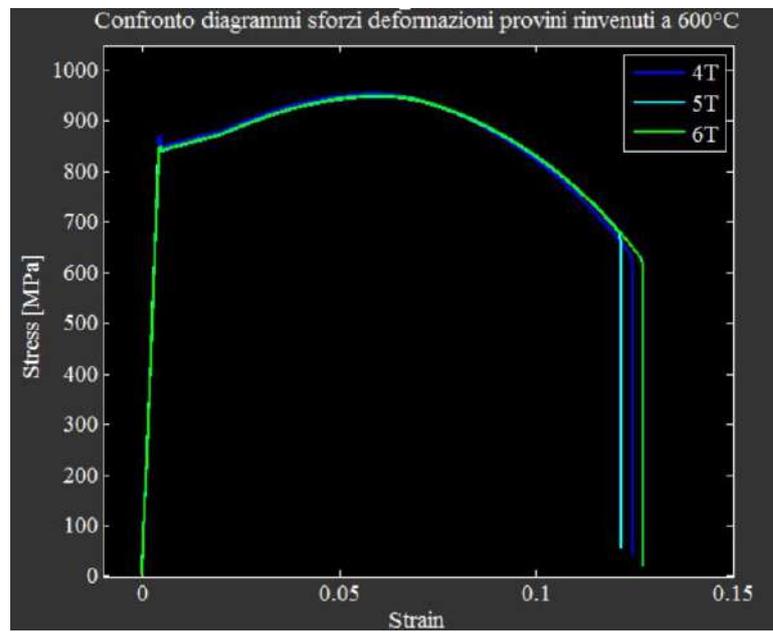


Figura 5.26 Confronto diagrammi  $\sigma$ - $\varepsilon$  rinvenimento a 600 [°C].

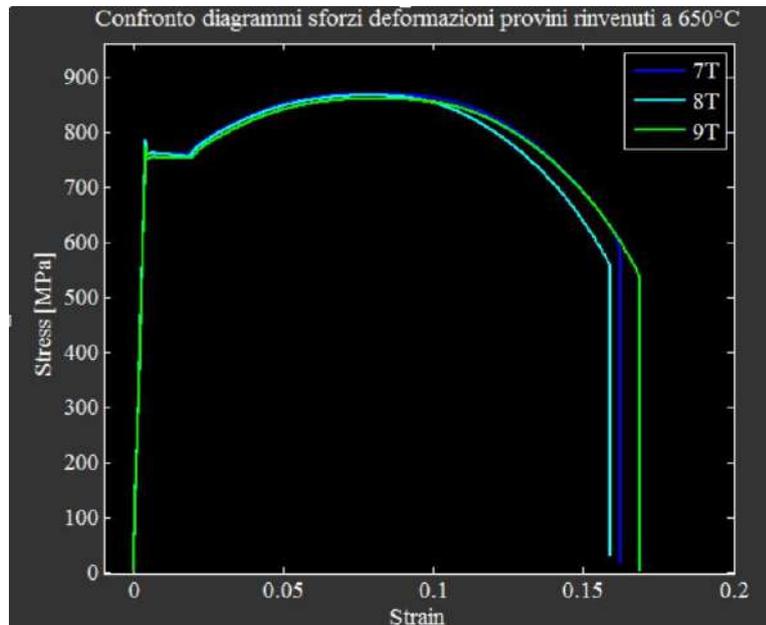
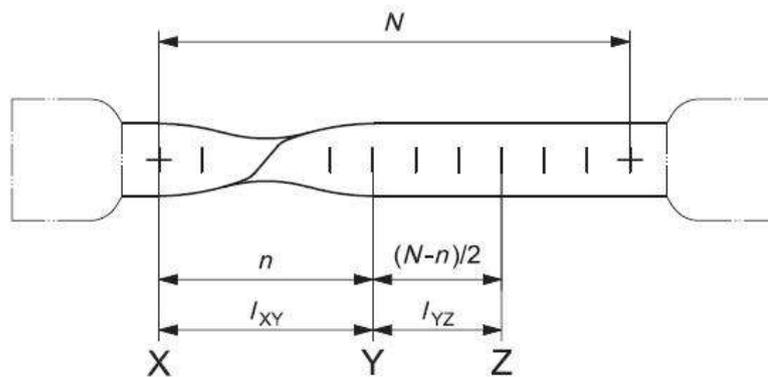


Figura 5.27 Confronto diagrammi  $\sigma$ - $\varepsilon$  rinvenimento a 650 [°C].

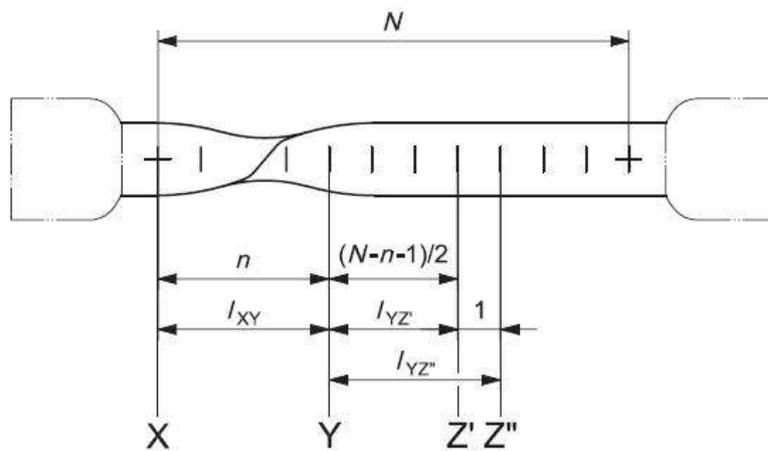
A seguito della rottura sono stati calcolati manualmente gli allungamenti percentuali seguendo il metodo descritto nella normativa. In particolare prima di eseguire la prova, la lunghezza iniziale  $L_0$  del campione è stata suddivisa in dieci intervalli equi spazati,  $N$ , di ampiezza 5 [mm]. Terminato il test si definiscono:

- $X$  che è il riferimento della lunghezza utile sulla parte del provino più corta;
- $Y$  che è il riferimento della lunghezza utile sulla parte di provino più lunga alla stessa distanza della frattura dal riferimento  $X$ ;
- $n$  numero di intervalli tra i riferimenti  $X$  e  $Y$ ;

a questo punto a seconda che  $N-n$  sia un numero pari o dispari si definiscono altre grandezze come mostrato nello schema rappresentato in figura 5.28, tratto dalla normativa, si utilizzano rispettivamente la formula a) per  $N-n$  pari e la formula b) per  $N-n$  dispari per ricavare l'allungamento percentuale  $A\%$ .



a)  $N - n$  is an even number



b)  $N - n$  is an odd number

Figura 5.28 Schema per il calcolo manuale dell'allungamento percentuale  $A\%$ .

$$A = \frac{l_{XY} + 2l_{YZ} - L_0}{L_0} * 100$$

Formula a)

$$A = \frac{l_{XY} + l_{YZ'} + l_{YZ''} - L_0}{L_0} * 100$$

Formula b)

Riportiamo di seguito un esempio della procedura per il calcolo di  $A\%$  eseguita sul provino 3T, rinvenuto a  $550[^\circ\text{C}]$ .

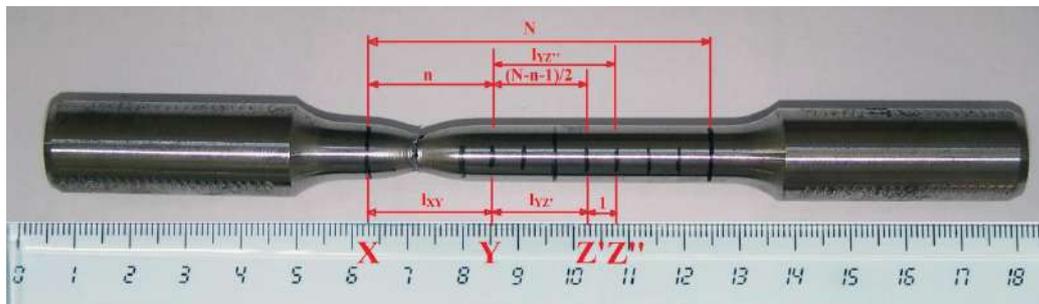


Figura 5.29 Procedura sul provino 3T per il calcolo di A%.

Come si può osservare in figura, essendo  $N=10$  e  $n=3$ , per questo campione, la differenza è un numero dispari quindi si è utilizzata la procedura in figura 5.28 b), definendo i riferimenti X, Y, Z' e Z'' e successivamente con l'utilizzo di un calibro si è passati alla misurazione delle lunghezze  $l_{XY}$ ,  $l_{YZ'}$  e  $l_{YZ''}$ ; infine con la formula b) si sono calcolati gli allungamenti percentuali che come si può notare dai dati nella tabella di seguito sono confrontabili con quelli ottenuti in output da software di gestione della macchina di prova.

Provino	N	n	N-n	$l_{XY}$	(N-n)/2 o (N-n-1)/2	$l_{YZ}$	$l_{YZ'}$	$l_{YZ''}$	A%
1T	10	3	7	20,94	3	-	15,45	20,91	14,6
2T	10	5	5	31,83	2	-	10,91	15,71	16,9
3T	10	3	7	20,63	3	-	15,6	20,52	13,5
4T	10	3	7	20,75	3	-	16,13	21,3	16,36
5T	10	3	7	20,6	3	-	15,9	21,46	15,92
6T	10	3	7	21,2	3	-	15,7	21,22	16,24
7T	10	5	5	32,97	2	-	11,15	16,16	20,56
8T	10	4	6	27,46	3	16,23	-	-	19,84
9T	10	5	5	32,77	2	-	11,3	16,77	21,68

Tabella 5.7 Allungamenti percentuali calcolati manualmente secondo normativa.

### 5.2.2 Analisi macroscopica delle superfici di frattura

Infine per tutti i campioni sono state scattate delle fotografie alle superfici di frattura, per evidenziare eventualmente delle differenze macroscopiche tra le diverse condizioni di trattamento termico. Da una prima analisi visiva come si può osservare non si notano particolari diversità tra i campioni, ma si può apprezzare una frattura di tipo duttile evidenziata dalle grandi deformazioni plastiche, la cui analisi verrà approfondita più avanti. In figura da sinistra a destra i campioni 1T, 5T e 9T.



*Figura 5.30 Superfici di frattura campioni 1T,5T e 9T.*

## Capitolo 7

La scelta delle prove effettuate è stata fatta in modo tale da poter caratterizzare il materiale meccanicamente definendo i parametri di progettazione generali: la prova di trazione ci ha dato modo di definire i carichi unitari di rottura a trazione semplice e il carico unitario di snervamento dell'acciaio 39NiCrMo3 sottoposto a tre differenti temperature di rinvenimento; la prova di resilienza ci ha permesso di ricavare la curva di transizione del materiale osservando come il materiale possa essere utilizzato anche a temperature inferiori alla temperatura ambiente mantenendo buone caratteristiche di tenacità, inoltre si è potuto stimare la temperatura di transizione; la prova di meccanica della frattura ci ha dato la possibilità di quantificare i valori di tenacità del materiale in modo da avere un parametro, " $K_{JIC}$ ", da utilizzare per la progettazione; infine con la prova di fatica a flessione rotante si è potuto definire il limite di fatica delle tre condizioni sperimentali nonché la stima della curva di Wöhler.

Riassumiamo ora in una tabella le caratteristiche meccaniche ottenute per le condizioni di rinvenimento sperimentate (550, 600 e 650 [°C]):

	$R_m$ [MPa]	$R_{p02}$ [MPa]	$KV_{20^\circ C}$ [J]	$T_{transizione}$ [°C]	$K_{JIC}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$\sigma_{lim\_fat}$ [MPa]	HV
<b>550 [°C]</b>	1094	1008	81	-60 ÷ -90	89	597	356
<b>600 [°C]</b>	950	847	108	-90 ÷ -120	107	560	300
<b>650 [°C]</b>	866	760	147	-90 ÷ -120	114	501	279

*Tabella 7.1 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio 39NiCrMo3 per le tre condizioni di rinvenimento sperimentate.*

I risultati delle prove meccaniche evidenziano come le caratteristiche dell'acciaio 39NiCrMo3 siano influenzate dalla temperatura di rinvenimento nonostante la differenza tra i livelli di temperatura fosse solamente di 50 [°C]. in particolare osserviamo come la resistenza meccanica,  $R_m$  e  $R_{p02}$ , diminuisca

all'aumentare della temperatura di rinvenimento; questo effetto è dovuto alla diffusione del carbonio durante il trattamento il quale permette alla struttura martensitica formatasi nella fase precedente di tempra di distendersi riducendo la resistenza meccanica ma nel complesso migliorando le sue caratteristiche. La stessa osservazione può essere fatta per il limite di fatica e la durezza del materiale che diminuiscono anch'essi all'aumentare della temperatura di rinvenimento che facilita man mano la diffusione del carbonio. Notare come i limiti di fatica delle diverse condizioni di trattamento abbiano valori decisamente elevati infatti confrontandoli con i rispettivi carichi unitari di rottura a trazione semplice i rapporti sono superiori al 50% che spiega il largo impiego di questo materiale in applicazioni di componenti meccanici per il settore automobilistico e aeronautico . Effetto diverso ha invece la temperatura di rinvenimento sui parametri di tenacità, infatti osservando i risultati in tabella possiamo vedere come sia i risultati della prova di impatto con il pendolo di Charpy che quelli della meccanica della frattura aumentino con l'aumentare della temperatura del trattamento.

Anche la duttilità del materiale cresce al crescere della temperatura di rinvenimento; in particolare per le condizioni di rinvenimento a 550 e 600 [°C] si ha un allungamento percentuale a rottura A% del 14-15% mentre a 650 [°C] si arriva quasi al 20%. Anche la strizione percentuale a rottura Z% manifesta un incremento dal 57 al 63% aumentando la temperatura di rinvenimento.

Riportiamo di seguito i confronti tra il carico unitario di rottura a trazione semplice, il carico unitario di snervamento e il limite di fatica a flessione rotante figura 7.1 ; inoltre si riportano le correlazioni ottenute dalle sperimentazioni:

- durezza Vickers-Carico unitario di rottura a trazione semplice figura 7.2:

$$R_m = 3,1026 * HV + 2,2564 \text{ [Mpa]};$$

- resilienza KV- Tenacità  $K_{JIC}$  figura 7.3:

$$K_{JIC} = 0,8168 * KV_{20\text{ °C}} + 8,8891 \text{ [MPa}\cdot\sqrt{\text{m}} \text{]}.$$

Un appunto va fatto sulle due correlazioni riportate in precedenza; avendo a disposizione solo tre livelli di temperatura di rinvenimento non ci ha permesso di avere dati sufficienti per correlare su un campo più ampio i parametri di resistenza meccanica, durezza, resilienza e tenacità. Aggiungendo però come dato fittizio il punto (0,0) è stato possibile ricavare delle correlazioni che anche con valori di durezza HV e resilienza  $KV_{20^{\circ}C}$  prossimi allo zero restituiscano valori di  $R_m$  e  $K_{JIC}$  coerenti con la realtà (in particolare se un materiale ha una durezza teoricamente nulla è ragionevole aspettarsi che la sua resistenza meccanica sia anch'essa prossima allo zero e lo stesso vale per la resilienza e la tenacità). Si può vedere come i parametri delle rette stimate e in particolare i coefficienti angolari sono confrontabili con quelli presenti in letteratura dove si ha un fattore pari a circa 3,3 tra  $R_m$  e HV e un fattore di  $0,8 \div 0,9$  tra  $K_{JIC}$  e  $KV_{20^{\circ}C}$ .

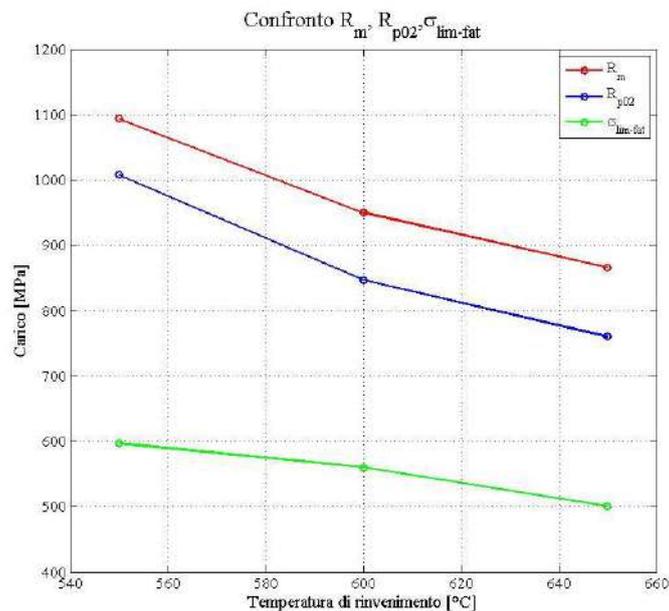


Figura 7.1 Confronto tra il carico di rottura, carico di snervamento e limite di fatica dell'acciaio 39NiCrMo3.

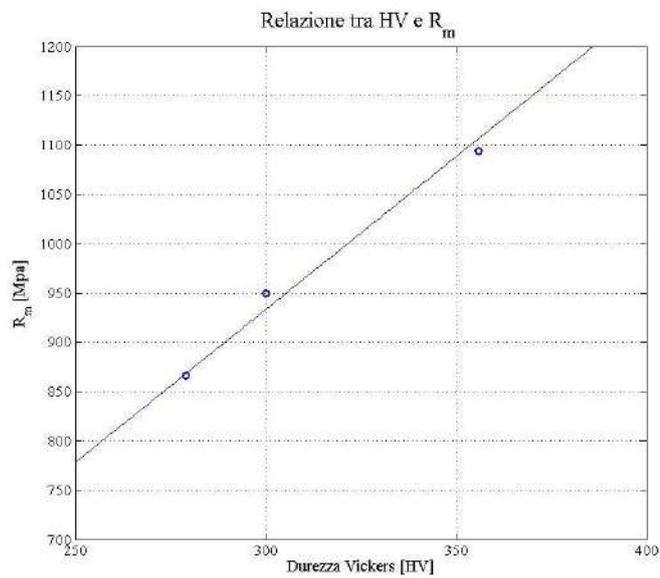


Figura 7.2 Correlazione tra la durezza HV e il carico unitario di rottura dell'acciaio 39NiCrMo3.

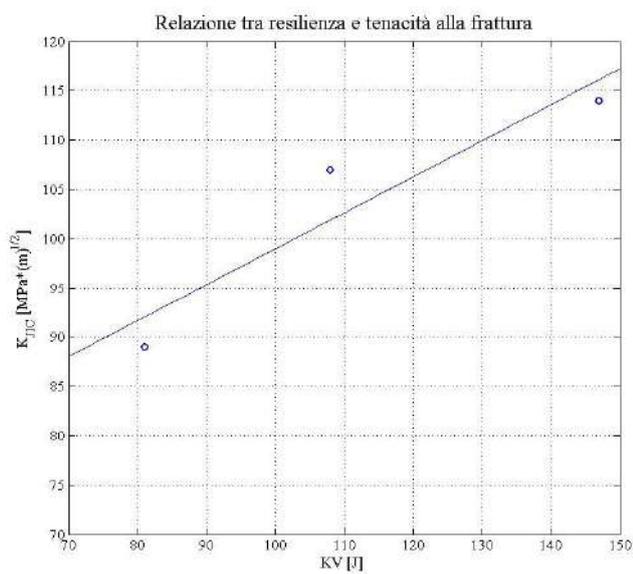


Figura 7.3 Correlazione tra la resilienza e la tenacità dell'acciaio 39NiCrMo3.

L'analisi delle superfici di frattura a livello macroscopico e microscopico hanno evidenziato un comportamento del materiale nel complesso duttile; questa caratteristica del materiale migliora aumentando la temperatura di rinvenimento dell'acciaio.

In conclusione possiamo dire che per approfondire ulteriormente la caratterizzazione del materiale si potrebbero eseguire delle prove di meccanica della frattura a bassa temperatura per confrontarle con quelle di resilienza sempre a bassa temperatura, inoltre si potrebbero stimare i comportamenti a fatica assiale e torsionale.