

# Politecnico di Torino

---

Corso di Laurea Magistrale  
in Progettazione Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Effetti del rinvenimento rapido sulle proprietà meccaniche degli acciai a  
medio tenore di carbonio



Relatore  
Prof. Paolo Matteis

Candidato  
Giuseppe Matteo Rachetta

Correlatore  
Prof. Giorgio Scavino

---

Anno Accademico 2022/2023

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Trattamento termico di rinvenimento . . . . .	1
1.2	Parametri di Rinvenimento . . . . .	2
1.2.1	Metodo Liscic-Filetin . . . . .	2
1.2.2	Parametro di Hollomon-Jaffe . . . . .	3
1.3	Proprietà meccaniche degli acciai rinvenuti . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Materiali e metodi</b>	<b>14</b>
2.1	Materiali . . . . .	14
2.1.1	Composizione chimica dei materiali . . . . .	14
2.1.2	Geometria dei provini . . . . .	15
2.1.3	Trattamenti termici preliminari . . . . .	15
2.2	Trattamenti di rinvenimento . . . . .	16
2.2.1	Condizioni di rinvenimento convenzionale . . . . .	16
2.2.2	Determinazione del grado di rinvenimento . . . . .	17
2.2.3	Curve di riscaldamento e durata del trattamento di rinvenimento rapido	18
2.2.4	Temperature di rinvenimento rapido . . . . .	20
2.2.5	Forno a bagno di sale . . . . .	21
2.2.6	Sali per il trattamento termico di rinvenimento rapido . . . . .	22
2.2.7	Fase preliminare dei trattamenti e raffreddamento dei provini . . . . .	23
2.2.8	Condizioni di esecuzione delle prove di durezza . . . . .	23
2.2.9	Condizioni di esecuzione delle prove di trazione . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Risultati</b>	<b>27</b>
3.1	Microstruttura . . . . .	27
3.2	Prove di durezza . . . . .	29
3.2.1	Risultati delle prove di durezza . . . . .	29
3.2.2	Confronto tra le misure di durezza . . . . .	34
3.3	Prove di trazione . . . . .	35
3.3.1	Curve di trazione . . . . .	35
3.3.2	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ . . . . .	39
3.3.3	Tensione di rottura $R_m$ . . . . .	44
3.3.4	Allungamento uniforme plastico permanente . . . . .	49
3.3.5	Allungamento a rottura . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>59</b>

# Elenco delle figure

1.1	Tenacità di un acciaio a medio tenore di carbonio, basso legato e temprato in funzione della temperatura di rinvenimento <sup>[4]</sup> . . . . .	1
1.2	Relazione tra durata e temperatura di rinvenimento e parametro di Hollomon-Jaffe per acciai temprati che non mostrano indurimento secondario e per $c = 20$ <sup>[5]</sup> . . . . .	3
1.3	Relazione tra la costante $c$ e il contenuto di carbonio <sup>[5]</sup> . . . . .	4
1.4	Relazione che intercorre tra la durezza Rockwell il contenuto di carbonio <sup>[5]</sup> . . . . .	5
1.5	Tenacità dell'acciaio 300-M al variare della temperatura di rinvenimento <sup>[6]</sup> . . . . .	6
1.6	Variazione della percentuale di austenite residua misurata per diverse temperature di rinvenimento e per diversi livelli di carico per l'acciaio 300-M <sup>[6]</sup> . . . . .	7
1.7	Meccanismi di rottura per l'acciaio 300-M temprato in olio a. non rinvenuto manifesta una combinazione di rottura duttile, quasi-clivaggio e frattura intergranulare; b. rinvenuto a 300°C per 1h mostra una rottura duttile; c. rinvenuto a 400°C per 1h manifesta una combinazione di clivaggio transgranulare e rottura duttile; d. rinvenuto a 600°C per 1h mostra unicamente rottura duttile <sup>[6]</sup> . . . . .	8
1.8	Hardens Rockwell C (HRC) vs Tempering Parameter <sup>[9]</sup> . . . . .	9
1.9	Impact Energy (J) / Impact Energy (ft-lbs) vs Tempering Parameter <sup>[9]</sup> . . . . .	10
1.10	$\sigma_{0,2}$ (MPa) vs Tempering Parameter <sup>[9]</sup> . . . . .	10
1.11	$\sigma_{UTS}$ (MPa) vs Tempering Parameter <sup>[9]</sup> . . . . .	11
1.12	Impact Energy (J) / Impact Energy (ft-lbs) vs $\sigma_{UTS}$ (MPa) <sup>[9]</sup> . . . . .	11
1.13	Impact Energy (J) vs Tempering Parameter <sup>[10]</sup> . . . . .	12
1.14	Impact Energy (J) vs $\sigma_{UTS}$ (GPa) <sup>[10]</sup> . . . . .	12
2.1	Geometria dei provini. . . . .	15
2.2	Disegno semplificato di un forno a muffola. . . . .	16
2.3	Curve di riscaldamento del provino in acciaio 39NiCrMo3 in tre punti <sup>[11]</sup> . . . . .	18
2.4	Curve di riscaldamento del provino in acciaio C45 in tre punti <sup>[11]</sup> . . . . .	19
2.5	Forno a bagno di sale Borel, modello CU 1050-SE. . . . .	21
2.6	Schema semplificato di un forno a bagno di sale. . . . .	22
2.7	Curve sforzo-deformazione dallo snervamento: a) facilmente identificabile; b) difficilmente identificabile. . . . .	24
2.8	Estratto della norma UNI ISO 10002:2019 - velocità di applicazione della tensione sul provino. . . . .	25
3.1	Frammenti dei provini inglobati a caldo e lucidati. . . . .	27
3.2	Immagini al microscopio ottico dell'acciaio 39NiCrMo3: tal quale temprato, a sinistra; temprato e rinvenuto a 600°C, a destra. . . . .	28

3.3	Immagini al microscopio ottico dell'acciaio C45: tal quale temprato, a sinistra; temprato e rinvenuto a 600°C, a destra. . . . .	28
3.4	Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale. . . .	30
3.5	Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45- Rinvenimento convenzionale. . . . .	31
3.6	Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido. . . . .	32
3.7	Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs. parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45 - Rinvenimento rapido. . . . .	33
3.8	Durezza Vickers (HV) vs. Parametro di Hollomon-Jaffe (HP) per l'acciaio 39NiCrMo3. . . . .	34
3.9	Durezza Vickers (HV) vs. Parametro di Hollomon-Jaffe (HP) per l'acciaio C45. . . . .	34
3.10	Curve di trazione per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale. . . . .	35
3.11	Curve di trazione per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido. . . . .	36
3.12	Curve di trazione per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale. . . . .	37
3.13	Curve di trazione per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido. . . . .	38
3.14	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	39
3.15	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	40
3.16	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	41
3.17	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperature di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	42
3.18	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media . . . . .	42
3.19	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media. . . . .	43
3.20	Tensione di rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	44
3.21	Tensione di rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	45
3.22	Tensione di rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	46
3.23	Tensione di rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	47

3.24	Tensione a rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media. . . . .	48
3.25	Tensione a rottura $R_m$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media. . . . .	48
3.26	Allungamento uniforme vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	49
3.27	Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e media. . . . .	50
3.28	Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	51
3.29	Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> e Misura <sub>2</sub> . . . . .	52
3.30	Allungamento uniforme $A_g$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media. . . . .	52
3.31	Allungamento uniforme $A_g$ vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media. . . . .	53
3.32	Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di rinvenimento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Media. . . . .	54
3.33	Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento (°C) per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	55
3.34	Allungamento a rottura percentuale vs temperatura del trattamento (°C) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	56
3.35	Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Misura <sub>1</sub> , Misura <sub>2</sub> e Media. . . . .	57
3.36	Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media. . . . .	58
3.37	Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media. . . . .	58
4.1	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs allungamento uniforme per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rinvenimento rapido. . . . .	59
4.2	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ vs allungamento uniforme per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rinvenimento rapido. . . . .	61

# Elenco delle tabelle

1.1	Composizione chimica dell'acciaio 300-M (wt.%) <sup>[7]</sup> . . . . .	6
1.2	Classi di trattamento termico di rinvenimento <sup>[9]</sup> . . . . .	9
2.1	Composizione chimica dell'acciaio 39NiCrMo3 (wt.%) . . . . .	14
2.2	Composizione chimica dell'acciaio C45E (wt.%) . . . . .	14
2.3	Caratteristiche del trattamento di tempra . . . . .	15
2.4	Dati di rinvenimento convenzionale . . . . .	16
2.5	Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3 . . . . .	17
2.6	Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45 . . . . .	17
2.7	Parametro di Hollomon-Jaffe, durata e temperature di rinvenimento rapido per l'acciaio 39NiCrMo3 . . . . .	20
2.8	Durata e temperature di rinvenimento rapido per l'acciaio C45 . . . . .	20
2.9	Durata e temperature di rinvenimento rapido per entrambi gli acciai . . . . .	21
2.10	Caratteristiche geometriche e peso del forno a bagno di sale Borel, modello CU 1050-SE . . . . .	21
2.11	Dati tecnici <i>Saltquench 140</i> . . . . .	22
2.12	Dati tecnici <i>Durferrit GS430</i> . . . . .	22
2.13	Temperature di rinvenimento rapido e rispettivi sali impiegati . . . . .	23
3.1	Misure di durezza condotte sui provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale . . . . .	29
3.2	Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale . . . . .	29
3.3	Misure di durezza condotte sui provini in acciaio C45 - Rinvenimento convenzionale . . . . .	30
3.4	Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio C45 - Rinvenimento convenzionale . . . . .	30
3.5	Misure di durezza condotte sui provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido . . . . .	31
3.6	Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido . . . . .	32
3.7	Misure di durezza condotte sui provini in acciaio C45 - Rinvenimento rapido . . . . .	32
3.8	Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio C45 - Rinvenimento rapido . . . . .	33
3.9	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico . . . . .	39
3.10	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico . . . . .	40

3.11	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico. . . . .	41
3.12	Tensione di snervamento $R_{p0,2}$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico. . . . .	41
3.13	Tensione di rottura $R_m$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico. . . . .	44
3.14	Tensione di rottura $R_m$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico. . . . .	45
3.15	Tensione di rottura $R_m$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico. . . . .	46
3.16	Tensione di rottura $R_m$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperature di trattamento termico. . . . .	47
3.17	Misura dell'allungamento uniforme $A_g$ per le coppie di provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	49
3.18	Misura dell'allungamento uniforme $A_g$ per le coppie di provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti alle varie temperature del trattamento termico e alle temperature di trattamento termico.	50
3.19	Allungamento uniforme $A_g$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	50
3.20	Allungamento uniforme $A_g$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	51
3.21	Allungamento a rottura $A(\%)$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	54
3.22	Allungamento a rottura $A(\%)$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	54
3.23	Allungamento a rottura $A(\%)$ per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	55
3.24	Allungamento a rottura $A(\%)$ per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico. . . . .	56
4.1	Coppie di punti tensione di snervamento (MPa) - allungamento uniforme (%) per i provini in 39NiCrMo3. . . . .	59
4.2	Coppie di punti tensione di snervamento (MPa) - allungamento uniforme (%) per i provini in C45. . . . .	61

# 1 Introduzione

## 1.1 Trattamento termico di rinvenimento

Una volta sottoposto al trattamento termico di tempra, un acciaio martensitico dispone di un'elevata resistenza meccanica ma al contempo può rivelarsi eccessivamente fragile. Le ragioni della sua bassa tenacità sono molteplici: la formazione di carburi durante il trattamento di tempra nel caso di acciai per utensili; la diffusione di atomi di impurità ai bordi di grano dell'austenite residua; la distorsione del reticolo cristallino causata dagli atomi di carbonio intrappolati nei siti ottaedrici della martensite; le tensioni residue indotte dal trattamento di tempra. Il trattamento termico di rinvenimento, se opportunamente eseguito, consente di conferire ad un acciaio temprato una combinazione ottimale delle proprietà di resistenza e tenacità in relazione alla specifica applicazione<sup>[1-3]</sup>.

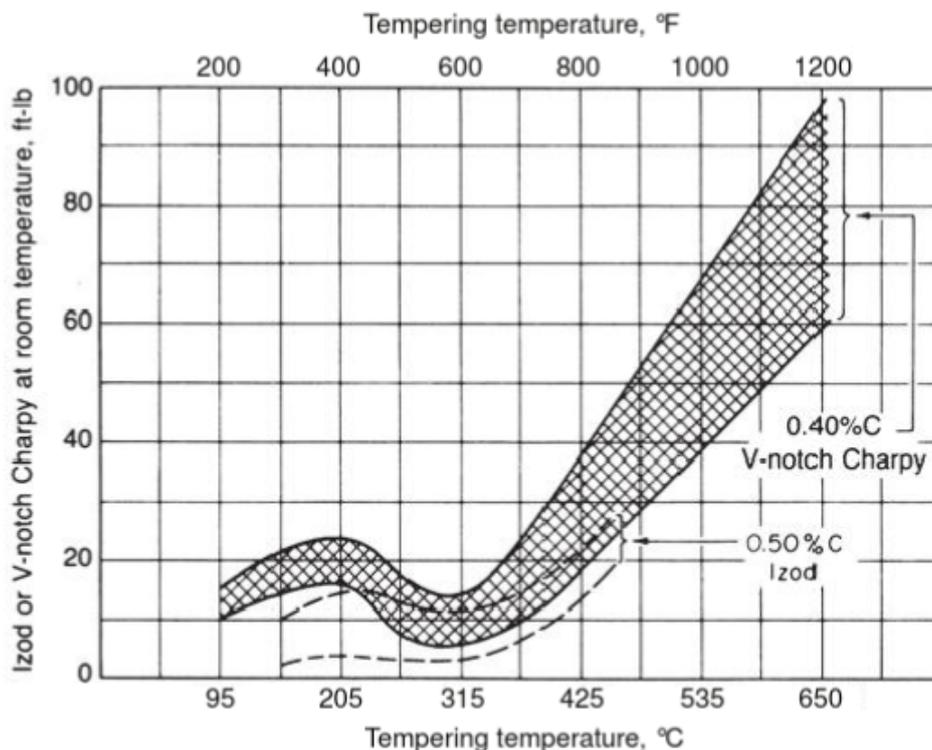


Figura 1.1: Tenacità di un acciaio a medio tenore di carbonio, basso legato e temprato in funzione della temperatura di rinvenimento <sup>[4]</sup>.

La Figura 1.1 mostra chiaramente quale sia il risultato del rinvenimento in termini di tenacità su di un acciaio a medio tenore di carbonio, basso legato e temprato, in funzione della temperatura a cui il trattamento è eseguito. Si osservi che tanto maggiore è la percentuale

di carbonio, minore è l'incidenza del trattamento sulla tenacità dell'acciaio. È possibile distinguere due range di temperatura in cui si assiste ad un aumento della tenacità dell'acciaio: 150-200°C e sopra i 425°C. Se eseguito nell'intervallo 150-200°C il rinvenimento produce un modesto incremento della tenacità corrispondente ad una minima riduzione della durezza e della resistenza meccanica. Tale range di temperatura può pertanto ritenersi adatto a quelle applicazioni che richiedono un'elevata resistenza meccanica statica e a fatica. Se eseguito al di sopra dei 425 °C il rinvenimento comporta un significativo aumento della tenacità ma al contempo una notevole riduzione della durezza e della resistenza meccanica. Per quanto detto, quest'ultimo range di temperatura viene adottato qualora la prima delle tre variabili sia ritenuta la principale.

## 1.2 Parametri di Rinvenimento

In letteratura compaiono diversi studi finalizzati a correlare le variabili del trattamento termico di rinvenimento, temperatura e durata, alla durezza del materiale a seguito del trattamento.

### 1.2.1 Metodo Liscic-Filetin

Perché il materiale raggiunga la durezza voluta, il metodo Liscic-Filetin prevede che si determini dapprima la temperatura alla quale eseguire il trattamento termico di rinvenimento, quindi la sua durata.

$$T_t = 917 \sqrt[6]{\frac{\ln\left(\frac{H_q-8}{H_t-8}\right)}{S}} - 273^\circ\text{C} \quad (1)$$

dove:

$T_t$ , temperatura assoluta di rinvenimento (K), valida per il range di temperatura 390-660 °C;

$H_q$ , durezza dopo tempra (HRC) calcolato come:

$$H_q = S(20 + 60C^{0,5}) \quad (2)$$

dove:

C, percentuale di carbonio nell'acciaio.

$H_t$ , durezza desiderata a seguito de rinvenimento (HRC);

S, grado di rinvenimento calcolato come:

$$S = \frac{H_q}{H_{max}} \quad (3)$$

dove:

$H_{max}$ , massima durezza dopo tempra per la classe di acciai cui appartiene quello rinvenuto.

$$t = a \frac{m}{A} + b \quad (4)$$

dove:

t, durata complessiva di riscaldamento del forno e rinvenimento (min);

m, massa del componente o del provino (kg);

A, superficie del provino o del componente ( $m^2$ );

a e b, costanti che dipendono dalle modalità e dalle attrezzature adottate per il rinvenimento e determinate per regressione lineare delle durate di rinvenimento e corrispondenti a massa m e superficie A dei provini o componenti per ogni modalità e attrezzatura.

Il metodo risulta poco vantaggioso per via del notevole lavoro sperimentale necessario per la determinazione delle costanti a e b e da ripetersi per ogni acciaio di interesse, per ogni combinazione delle variabili di rinvenimento e per ogni differente attrezzatura adottata per l'esecuzione del trattamento. Inoltre, il metodo non consente di stabilire se più condizioni di rinvenimento, cioè combinazioni delle variabili temperatura e durata del trattamento, producano il medesimo risultato in termini di durezza.

### 1.2.2 Parametro di Hollomon-Jaffe

Il parametro di Hollomon-Jaffe<sup>[5]</sup> è comunemente impiegato per correlare le variabili durata e temperatura del trattamento di rinvenimento:

$$HP = T(\log(t) + c) \times 10^{-3} \quad (5)$$

dove T(K) e t(h) sono rispettivamente temperatura e durata del trattamento mentre c è una costante funzione del materiale. Trattamenti termici diversi in temperatura e durata ma di ugual HP producono il medesimo risultato in termini di durezza e pertanto il parametro di Hollomon-Jaffe viene considerato un indicatore del grado di rinvenimento. Fin dalla sua formulazione il parametro è stato adottato con successo in relazione ad una grande varietà di combinazioni temperatura-durata.

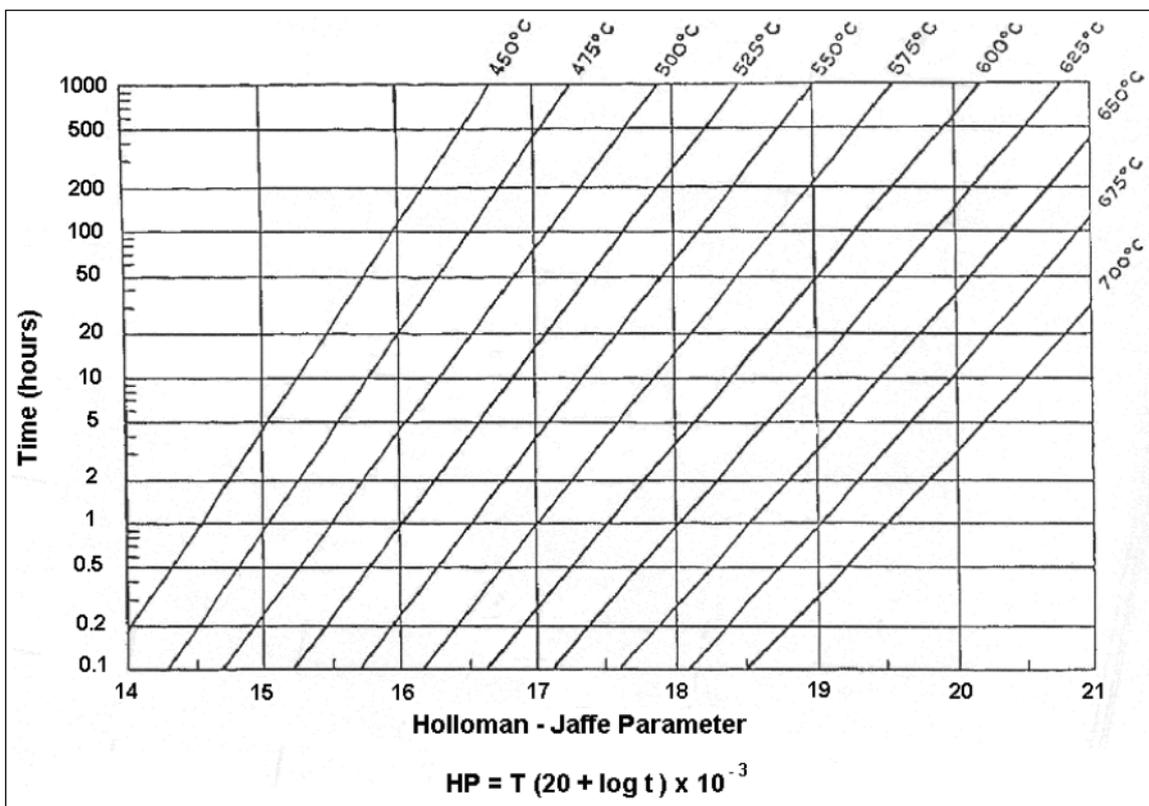


Figura 1.2: Relazione tra durata e temperatura di rinvenimento e parametro di Hollomon-Jaffe per acciai temprati che non mostrano indurimento secondario e per c = 20 <sup>[5]</sup>.

Per trattamenti di rinvenimento che comportano un uguale parametro di Hollomon-Jaffe vale:

$$T_1(c + \log t_1) = T_2(c + \log t_2)$$

$$c = -\frac{T_1 \log t_1 - T_2 \log t_2}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

Hollomon e Jaffe determinarono sperimentalmente il valore di c per gli acciai di loro interesse eseguendo trattamenti di rinvenimento differenti per la combinazione delle variabili durata-temperatura, determinando per ciascuno la durezza risultante del provino, stabilendo quali combinazioni di durata e temperatura producessero uguale TP, quindi impiegando l'equazione (6).

Alla luce del lavoro sperimentale svolto<sup>[5]</sup>:

- la costante c varia a seconda della classe dell'acciaio e per ciascuna classe di acciaio decresce linearmente con il contenuto di carbonio;

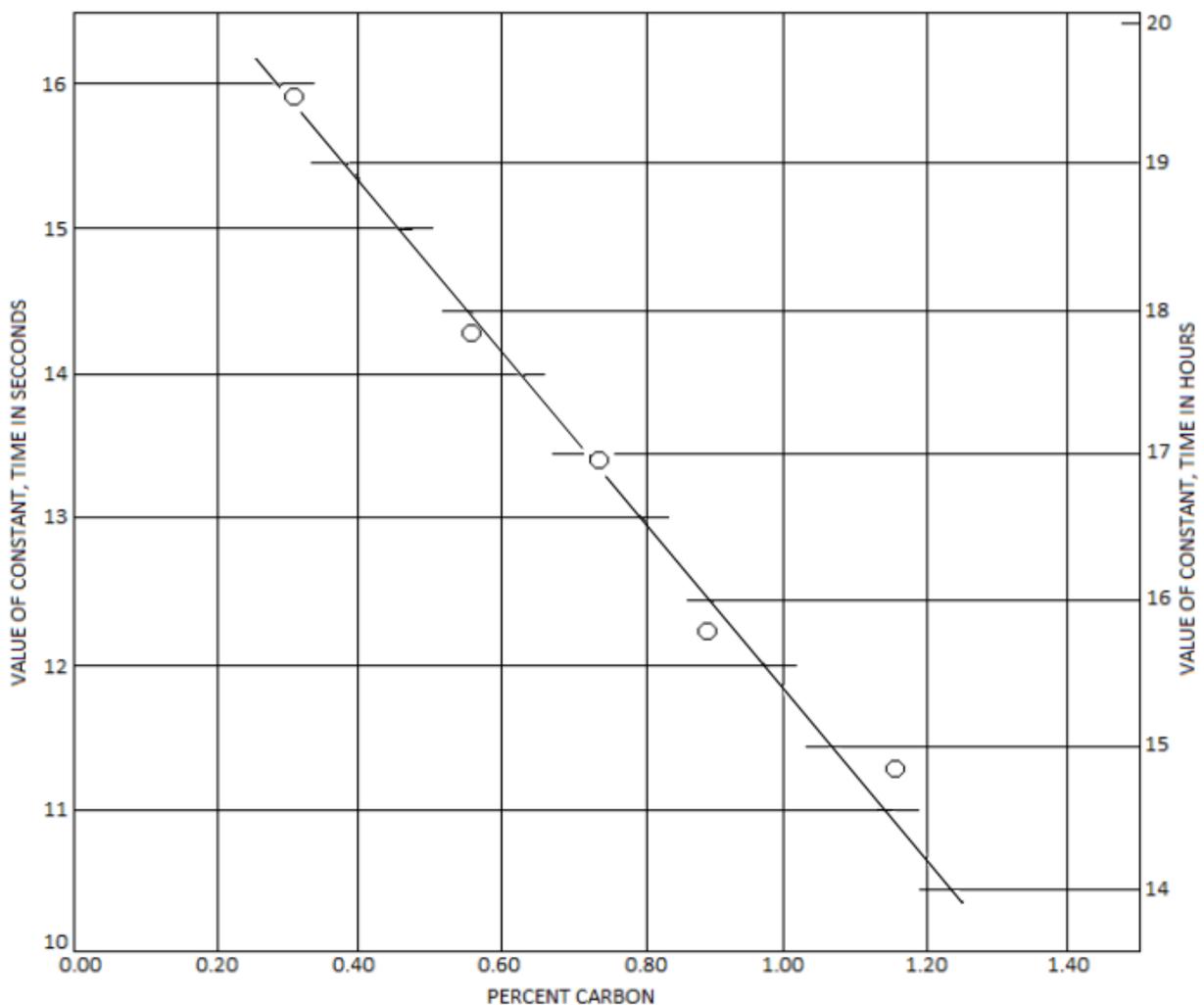


Figura 1.3: Relazione tra la costante c e il contenuto di carbonio <sup>[5]</sup>.

- Hollomon e Jaffe propongono 19,5 quale valore di  $c$  per acciai al carbonio e acciai legati con un contenuto di carbonio di 0,25-0,4% e quello di 15 per gli acciai dal contenuto di carbonio di 0,9-1,2%, espressa la durata del rinvenimento in ore;
- in mancanza di indurimento secondario la durezza Rockwell e quella Brinell variano linearmente con la percentuale di carbonio per un intervallo significativo.

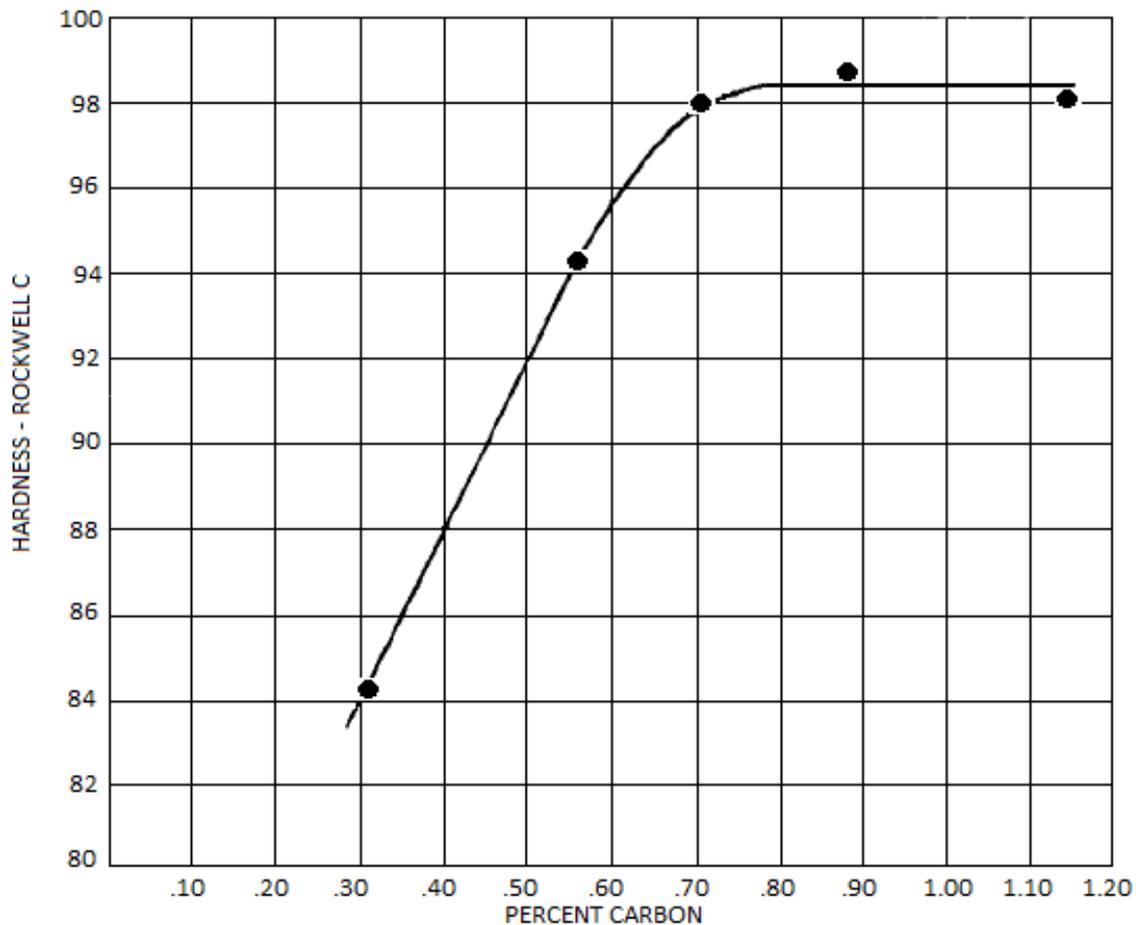


Figura 1.4: Relazione che intercorre tra la durezza Rockwell il contenuto di carbonio [5].

### 1.3 Proprietà meccaniche degli acciai rinvenuti

Si è sperimentato che nel caso di acciai dal medio tenore di carbonio e basso legati, come quello presi in esame nel lavoro di tesi, un rinvenimento dalla durata convenzionale di 1h, se eseguito ad una temperatura compresa tra i 260°C e i 370°C, provoca al contrario una riduzione della tenacità. Il fenomeno, noto con il termine inglese "Tempered Martensite Embrittlement" (TME)<sup>[6-8]</sup>, è stato correlato alla diffusione verso i bordi di grano di impurità e dei cosiddetti "tramp elements" (S, P, Sn e altri ancora) e storicamente attribuito a più cause concomitanti:

- la decomposizione chimica e meccanica dell'austenite residua;
- la precipitazione e la crescita a bordo grano della martensite di particelle di cementite in concomitanza con la scomparsa del carburo  $\epsilon$ .

In passato fu avanzata qualche perplessità circa il contributo all'infragilimento martensitico dell'austenite residua: il raffreddamento dell'acciaio a seguito del trattamento di tempra, che si supponeva dovesse rimuovere gran parte dell'austenite residua, non impediva l'infragilimento; non si era stati in grado fino ad allora di spiegare in maniera esaustiva come la decomposizione dell'austenite provocasse un aumento dell'incidenza di fratture intergranulari, credute tipiche del fenomeno. In verità è stato sperimentalmente verificato che nel caso degli acciai basso legati, il raffreddamento a seguito della tempra opera solo una parziale rimozione dell'austenite residua e che l'infragilimento da rinvenimento non comporta necessariamente fratture intergranulari.

Tabella 1.1: Composizione chimica dell'acciaio 300-M (wt.%) [7].

C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P	V
0,42	0,76	0,76	1,76	0,41	1,59	0,002	0,007	0,10

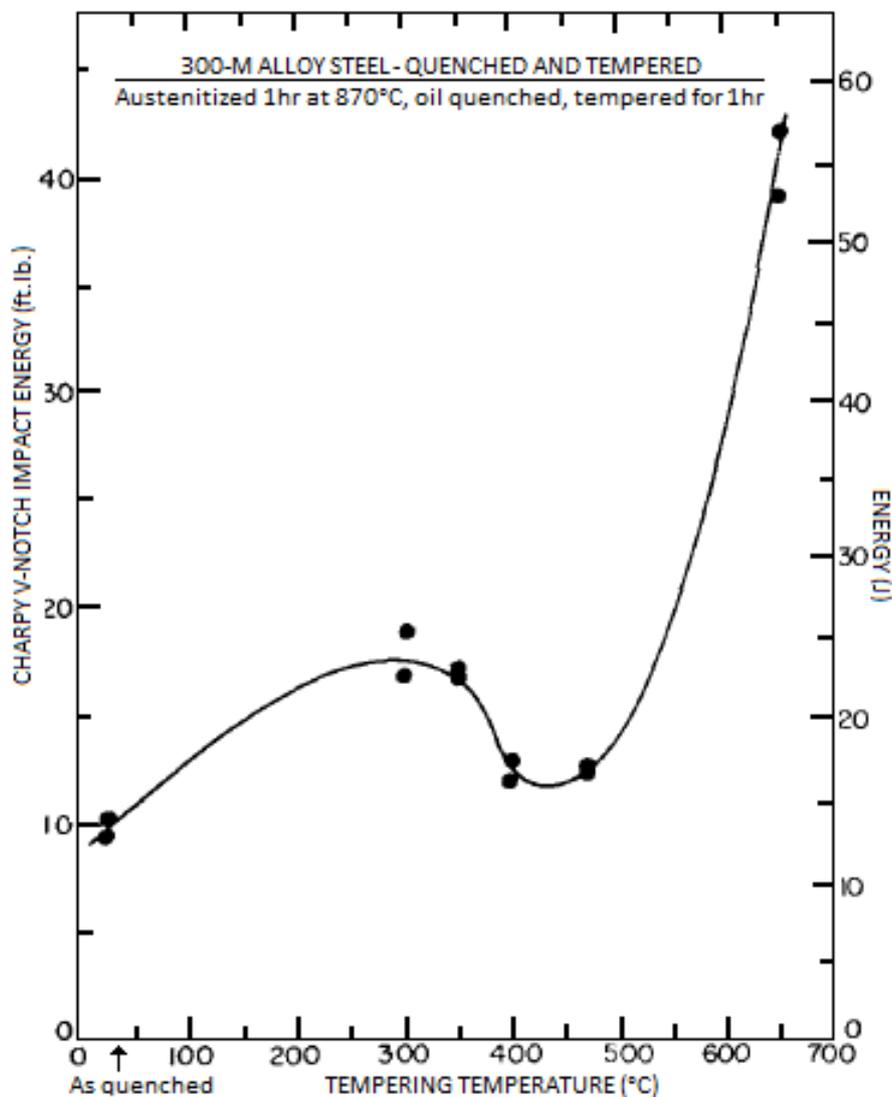


Figura 1.5: Tenacità dell'acciaio 300-M al variare della temperatura di rinvenimento [6].

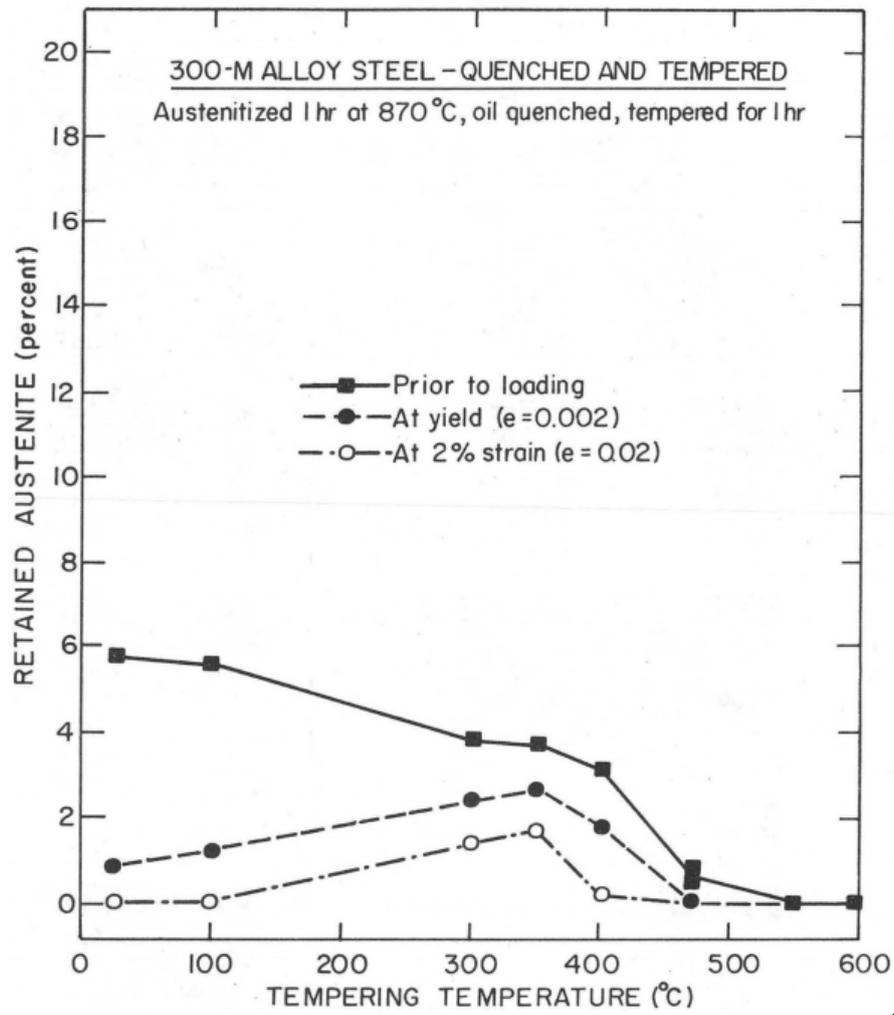


Figura 1.6: Variazione della percentuale di austenite residua misurata per diverse temperature di rinvenimento e per diversi livelli di carico per l'acciaio 300-M<sup>[6]</sup>.

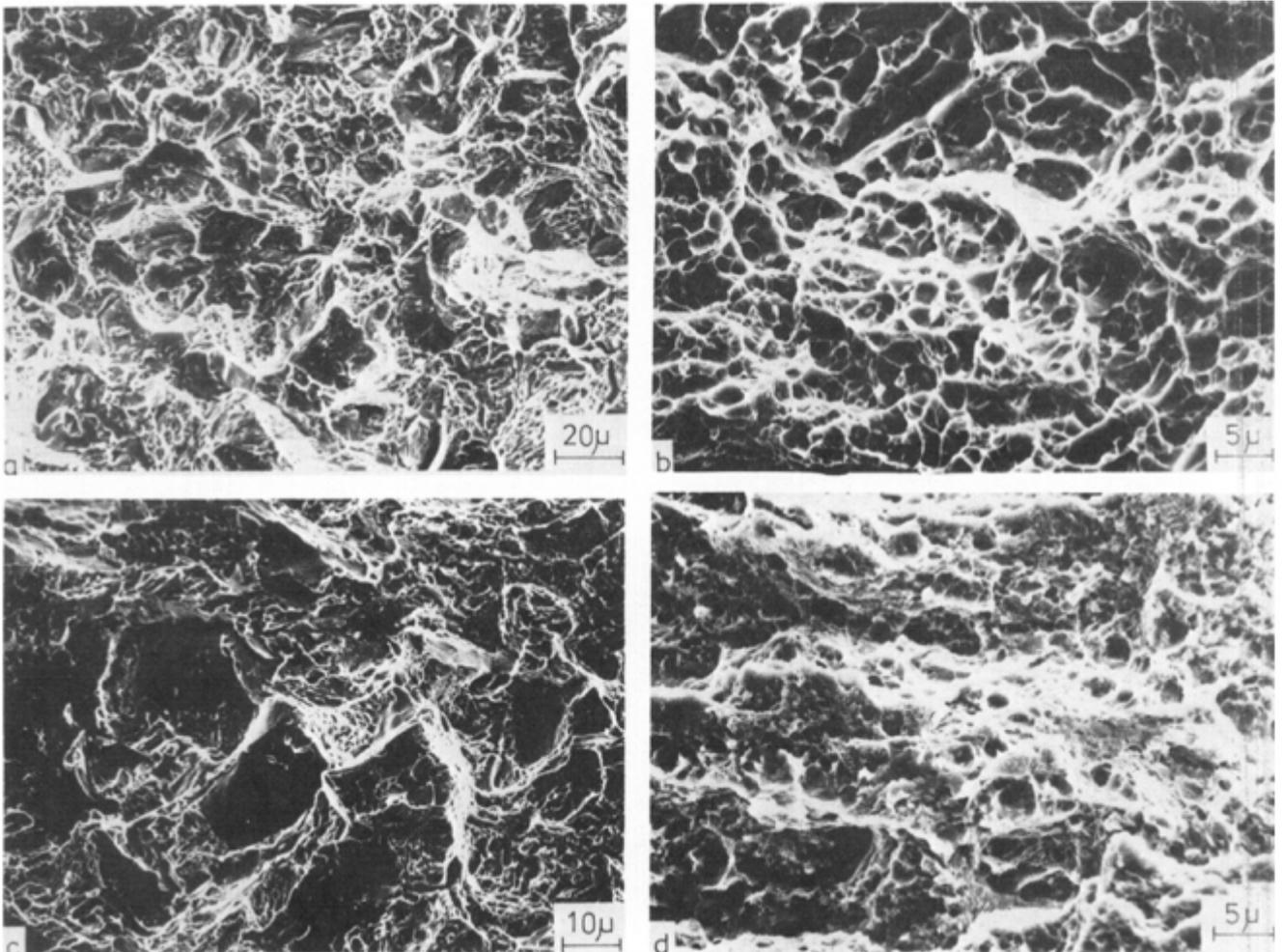


Figura 1.7: Meccanismi di rottura per l'acciaio 300-M temprato in olio a. non rinvenuto manifesta una combinazione di rottura duttile, quasi-clivaggio e frattura intergranulare; b. rinvenuto a 300°C per 1h mostra una rottura duttile; c. rinvenuto a 400°C per 1h manifesta una combinazione di clivaggio transgranulare e rottura duttile; d. rinvenuto a 600°C per 1h mostra unicamente rottura duttile<sup>[6]</sup>.

Studi hanno indiscutibilmente provato che ritardare in termini di temperatura la sostituzione del carburo  $\epsilon$  ad opera della cementite, tramite l'aggiunta di elementi quali ad esempio silicio e alluminio, equivale a posticipare il TME. Oltre all'aggiunta di elementi leganti è possibile evitare l'infragilimento operando un sovra-rinvenimento, realizzando cioè il trattamento a temperature maggiori di quelle alle quali si manifesterebbe il fenomeno. Ciò, d'altro canto, comporta una maggiore riduzione della resistenza meccanica. Alcuni studi condotti per alte temperature (773-973K) e brevi tempi di rinvenimento hanno suggerito che altri fattori di rilevanza sono la densità di dislocazioni e la dimensione dei precipitati di cementite: tempi di rinvenimento brevi limitano il recovery delle dislocazioni e provocano un aumento dei siti di nucleazione della cementite; una maggiore velocità di riscaldamento del materiale comporta un aumento della temperatura alla quale precipita la cementite che godrà per questa ragione di una maggiore velocità di nucleazione. Per questa ragione, secondo tali studi, si osserva una più fine distribuzione dei precipitati di cementite con cui si spiega l'aumento di tenacità del materiale. Altre ricerche sono state condotte per brevi tempi ma per temperature minori (473-773K). Judge e collaboratori spiegano la maggiore tenacità del materiale come l'effetto di tempi di rinvenimento minori sulla decomposizione dell'austenite residua, Nakashima e Libsch con la distribuzione di cementite più fine e di

forma globulare.

Studi recenti hanno impiegato il parametro di Hollomon-Jaffe con lo scopo di confrontare le caratteristiche meccaniche di acciai dal medio tenore di carbonio e basso legati sottoposti a trattamenti termici di rinvenimento differenti in termini di durata-temperatura.

V.K. Euser et al<sup>[9]</sup> hanno individuato per l'acciaio 4340 delle durate del trattamento termico di rinvenimento, dopodiché, per ciascuna, hanno stabilito quale dovesse essere la temperatura a cui eseguire il trattamento perché la combinazione delle due grandezze producesse un ugual valore del parametro di Hollomon-Jaffe. Il processo è stato ripetuto così da produrre la matrice durata-temperatura sottostante.

Tabella 1.2: Classi di trattamento termico di rinvenimento<sup>[9]</sup>.

Time (s)	Temperatura [K(°C)]				
1	578 (305)	639 (366)	700 (427)	762 (489)	823 (550)
10	544 (271)	602 (329)	659 (386)	717 (444)	774 (501)
100	514 (241)	568 (295)	623 (350)	677 (404)	731 (458)
3600	473 (200)	523 (250)	573 (300)	623 (350)	673 (400)
Tempering Parameter*	9000	10.000	11.000	12.000	13.000

Le prove di durezza condotte hanno permesso di verificare che, per ciascun valore del parametro di Hollomon-Jaffe, i valori di durezza Rockwell C (HRC) corrispondenti alle differenti durate del trattamento fossero comparabili. Pertanto, nel caso specifico, il parametro di Hollomon-Jaffe predice accuratamente le temperature di rinvenimento tali da ottenere valori equivalenti di durezza per le differenti durate del trattamento, incluse quelle più piccole.

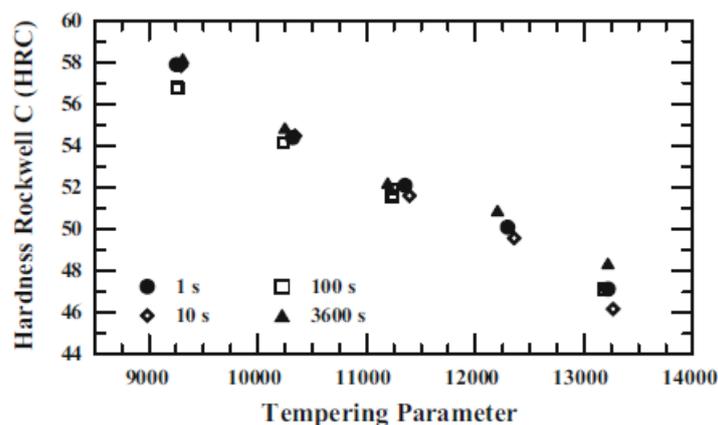


Figura 1.8: Hardens Rockwell C (HRC) vs Tempering Parameter<sup>[9]</sup>.

Per ciascuna combinazione durata-temperatura sono state condotte delle prove Charpy così da determinare i valori di tenacità e delle prove di trazione per appurare quelli della tensione di snervamento e della tensione di rottura. Le due grandezze sono state dunque diagrammate in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe.

Si può osservare che:

- al netto dell'infragilimento associato al fenomeno del TME, all'aumentare del parametro di Hollomon-Jaffe, aumenta la tenacità del materiale;
- per un certo valore del parametro di Hollomon-Jaffe, minore è la durata del trattamento di rinvenimento, maggiore è la tenacità del materiale e meno severo è l'infragilimento associato al fenomeno del TME.

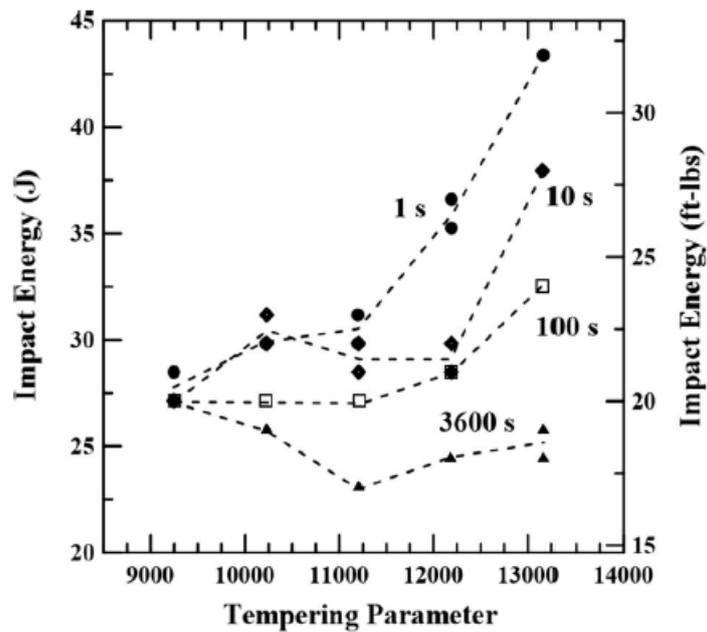


Figura 1.9: Impact Energy (J) / Impact Energy (ft-lbs) vs Tempering Parameter<sup>[9]</sup>.

Le Figure sottostanti consentono invece di verificare che, per un ugual valore del parametro di Hollomon-Jaffe e tanto più quanto più tal valore è elevato, al diminuire della durata del trattamento, si riducono la tensione di snervamento e quella di rottura.

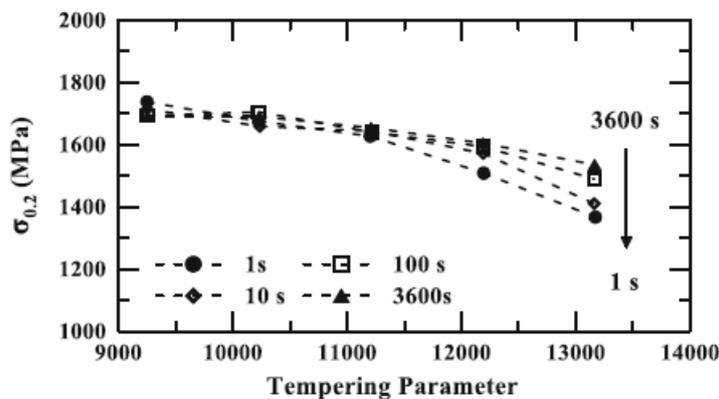


Figura 1.10:  $\sigma_{0.2}$  (MPa) vs Tempering Parameter<sup>[9]</sup>.

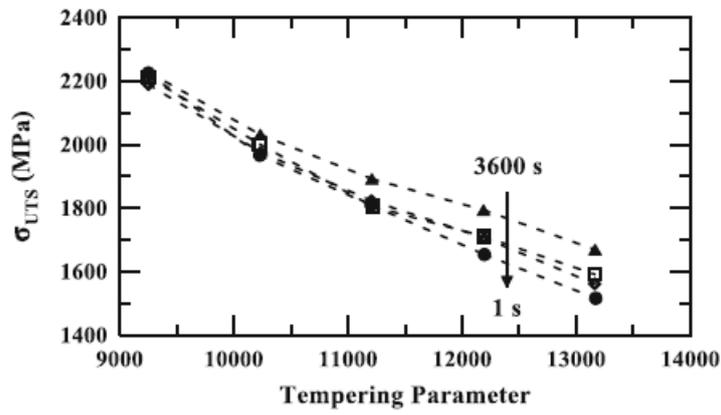


Figura 1.11:  $\sigma_{UTS}$  (MPa) vs Tempering Parameter<sup>[9]</sup>.

Nella Figura sottostante infine viene mostrato l'andamento della tenacità del materiale in funzione della tensione di rottura.

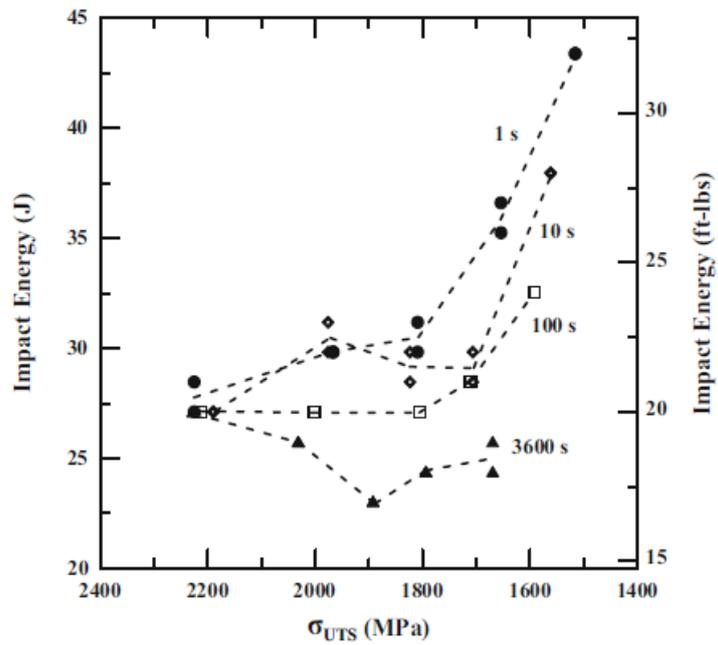


Figura 1.12: Impact Energy (J) / Impact Energy (ft-lbs) vs  $\sigma_{UTS}$  (MPa)<sup>[9]</sup>.

Un altro studio<sup>[10]</sup>, anch'esso assai recente, ha condotto alle medesime conclusioni.

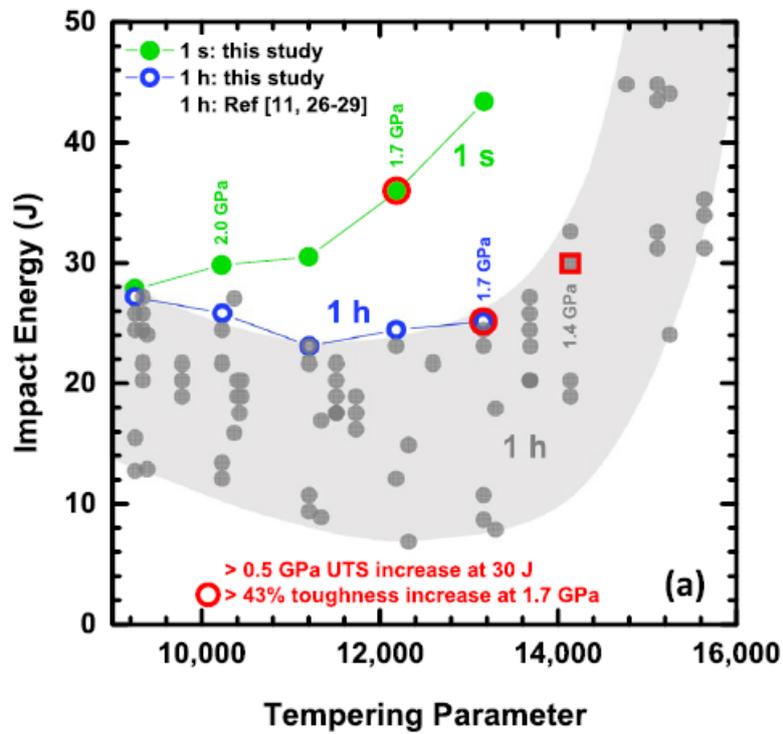


Figura 1.13: Impact Energy (J) vs Tempering Parameter<sup>[10]</sup>.

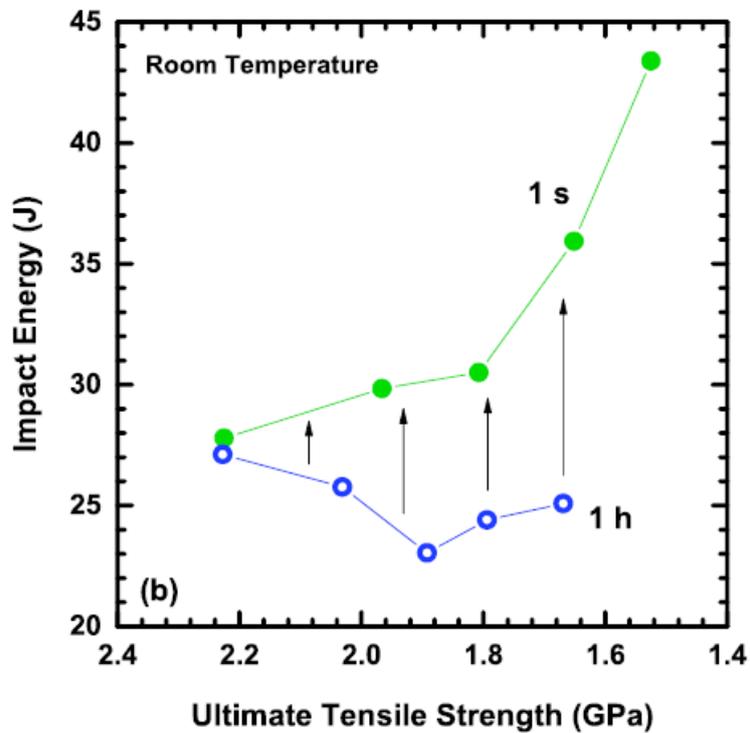


Figura 1.14: Impact Energy (J) vs  $\sigma_{UTS}$  (GPa)<sup>[10]</sup>.

Alla luce di quanto finora esposto si vogliono indagare le proprietà meccaniche di acciai dal medio tenore di carbonio, basso legati e sottoposti a tempra. Più nello specifico, si intende confrontare le proprietà meccaniche dei medesimi materiali sottoposti a trattamenti termici di rinvenimento differenti per durata-temperatura ma dal medesimo grado di rinvenimento.

## 2 Materiali e metodi

La sperimentazione ha interessato gli acciai 39NiCrMo3 (norma UNI EN 10083-3) e C45E (norma UNI EN ISO 683-1).

### 2.1 Materiali

#### 2.1.1 Composizione chimica dei materiali

Di seguito si riporta la composizione chimica degli acciai sottoposti a sperimentazione come da analisi di colata:

Tabella 2.1: Composizione chimica dell'acciaio 39NiCrMo3 (wt.%).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
0,400	0,740	0,260	0,840	0,900	0,220	0,018	0,021

Tabella 2.2: Composizione chimica dell'acciaio C45E (wt.%).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,470	0,672	0,227	0,011	0,001	0,230	0,037

### 2.1.2 Geometria dei provini

Sono stati fabbricati da officina meccanica provini dalla tipica forma "a osso di cane" e dalle caratteristiche geometriche di seguito riportate:

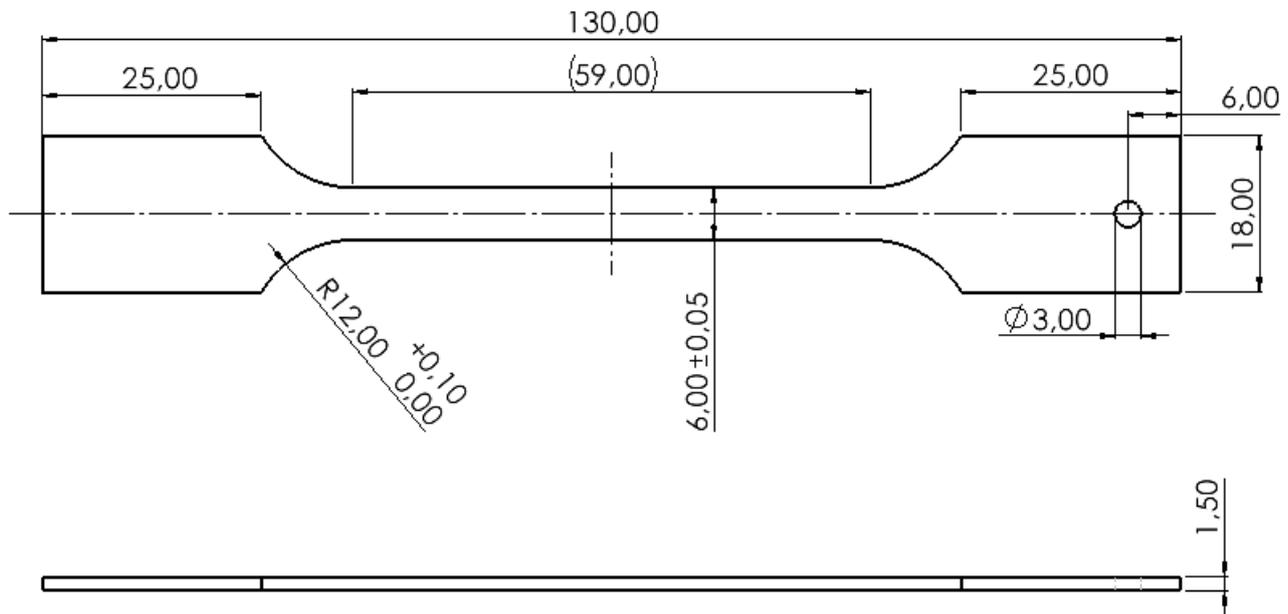


Figura 2.1: Geometria dei provini.

### 2.1.3 Trattamenti termici preliminari

I campioni sono stati temprati a titolo totalmente gratuito dall'azienda Cullati - Proterm Group con sede in Via Andrea Sansovino, 243/65/s, 10151 Torino (TO) che per tale ragione sentitamente si ringrazia.

Tabella 2.3: Caratteristiche del trattamento di tempra.

Tempra in olio
Temperatura di austenizzazione: 680°C
Tempo di austenizzazione: 2h
Atmosfera di austenizzazione: ENDOGAS "neutro" con potenziale di carbonio pari a 0,4

Si suppone che, nel caso dell'acciaio C45, per via del fatto che il potenziale di carbonio dell'atmosfera di austenizzazione fosse minore del tenore di carbonio dell'acciaio, durante il trattamento termico si debba essere raggiunta una condizione di equilibrio.

## 2.2 Trattamenti di rinvenimento

### 2.2.1 Condizioni di rinvenimento convenzionale

Lo studio ha previsto, tra le fasi preliminari, la realizzazione di una serie di trattamenti termici di rinvenimento in un comune forno a muffola, alle temperature e per la durata di seguito riportate.

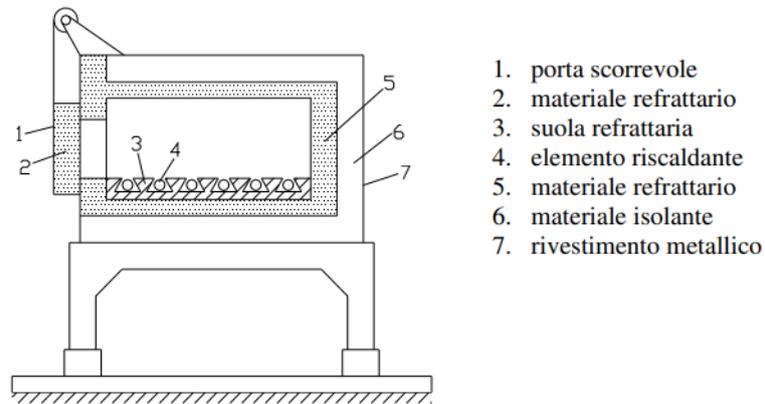


Figura 2.2: Disegno semplificato di un forno a muffola.

Tabella 2.4: Dati di rinvenimento convenzionale.

Temperatura (°C)	Durata
20	1h
180	
240	
300	
360	
420	
480	
540	
600	

### 2.2.2 Determinazione del grado di rinvenimento

Allo scopo di confrontare le caratteristiche meccaniche dei provini sottoposti a trattamento di rinvenimento convenzionale e quelle dei provini oggetto invece del rinvenimento rapido si è reso necessario stabilire il grado di rinvenimento dei primi. Solo per un uguale grado di rinvenimento dei provini è infatti ragionevole accostare i risultati derivanti dalle due campagne di trattamento termico. Tra gli indici del grado di rinvenimento presenti in letteratura si è scelto di adoperare il parametro di Hollomon-Jaffe che pertanto si è determinato per ciascuno dei trattamenti termici di rinvenimento convenzionale eseguiti tramite l'equazione (5). Il valore della costante  $c$  per i due acciai oggetti dello studio si è ricavato tramite il grafico in Figura 1.7.

Tabella 2.5: Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	Durata	c	HP
20	293	1h	19	5,6
180	453			8,6
240	513			9,7
300	573			10,9
360	633			12,0
420	693			13,2
480	753			14,3
540	813			15,4
600	873			16,6

Tabella 2.6: Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	Durata	c	HP
20	293	1h	18.5	5,4
180	453			8,4
240	513			9,5
300	573			10,6
360	633			11,7
420	693			12,8
480	753			13,9
540	813			15,0
600	873			16,2

### 2.2.3 Curve di riscaldamento e durata del trattamento di rinvenimento rapido

La durata del trattamento di rinvenimento rapido è stata decisa sulla base di una simulazione<sup>[11]</sup> realizzata tramite il software di calcolo Matlab e presentata in un lavoro di tesi precedente. Tale simulazione ha permesso di ottenere le curve di riscaldamento di provini della medesima geometria e degli stessi materiali di quelli a disposizione calati nel bagno di sale. Ispiratasi ad un metodo di calcolo presente in letteratura, la simulazione ha previsto si considerassero costanti le variabili caratteristiche del processo. A seguire si presentano le curve di riscaldamento dei provini in acciaio 39NiCrMo3 e C45 imposta al forno una temperatura di 520°C.

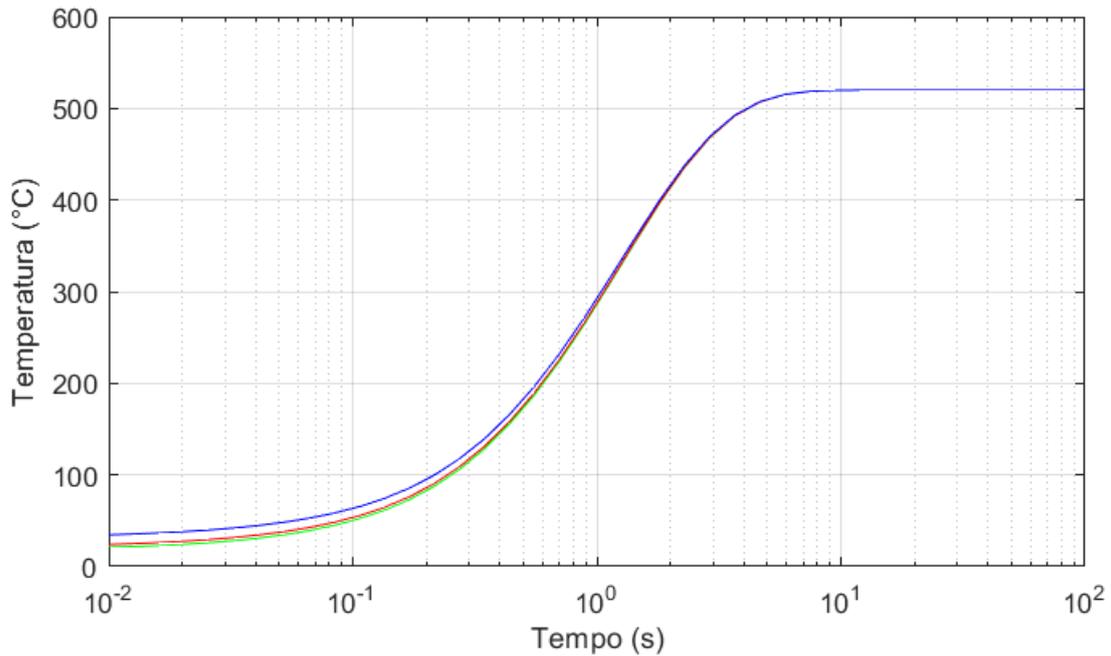


Figura 2.3: Curve di riscaldamento del provino in acciaio 39NiCrMo3 in tre punti<sup>[11]</sup>.

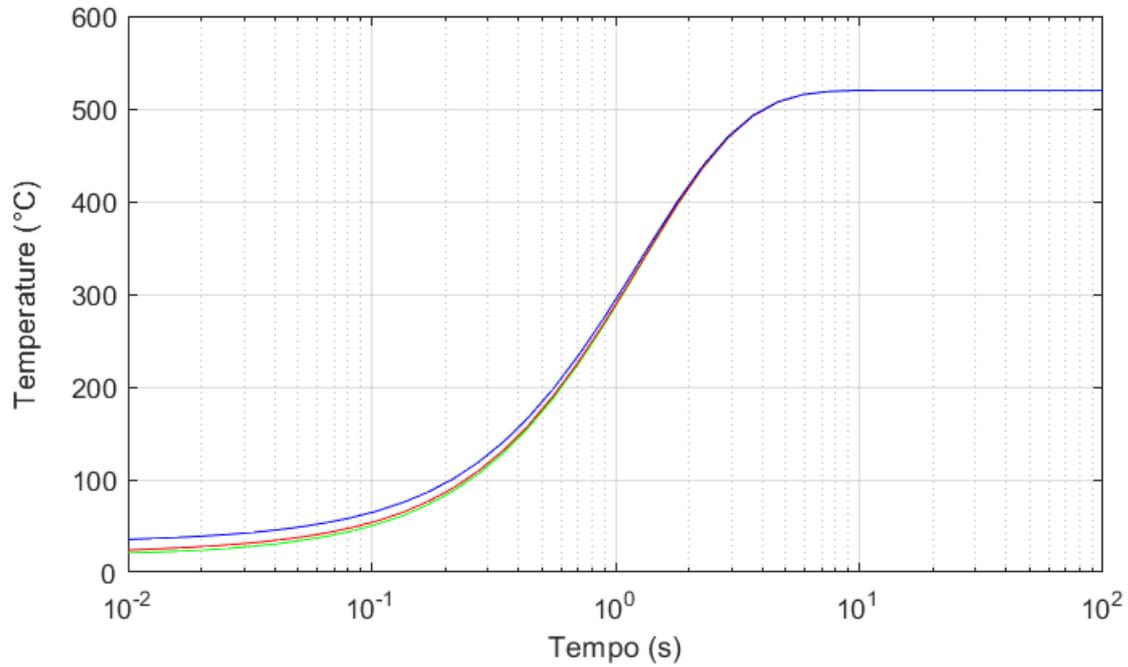


Figura 2.4: Curve di riscaldamento del provino in acciaio C45 in tre punti<sup>[11]</sup>.

Le curve appena presentate attestano che per entrambi gli acciai occorrono all'incirca 10s perché i provini, immersi nel bagno di sale, raggiungano la temperatura desiderata. Poiché l'analisi ha previsto variabili di processo costanti, l'osservazione rimane valida qualunque sia la temperatura dei sali fusi. In via cautelativa si sceglie di adottare una durata di 20s per il trattamento di rinvenimento rapido.

## 2.2.4 Temperature di rinvenimento rapido

Determinato il parametro di Hollomon-Jaffe per ogni differente condizione di rinvenimento convenzionale e stabilita la durata di quello rapido è stato possibile determinarne le temperature che assicurassero un ugual grado del trattamento:

Tabella 2.7: Parametro di Hollomon-Jaffe, durata e temperature di rinvenimento rapido per l'acciaio 39NiCrMo3.

HP	Durata	Temperatura (°C)	Temperatura (K)
5,6	20s	20	293,1
8,6		241,0	514,2
9,7		309,1	582,3
10,9		377,2	650,3
12,0		445,3	718,4
13,2		513,4	786,5
14,3		581,4	854,6
15,4		649,5	922,7
16,6		717,6	990,8

Tabella 2.8: Durata e temperature di rinvenimento rapido per l'acciaio C45.

HP	Durata	Temperatura (°C)	Temperatura (K)
5,4	20s	20	293,1
8,4		242,9	516,1
9,5		311,2	584,4
10,6		379,6	652,7
11,7		447,9	721,1
12,8		516,2	789,4
13,9		584,6	857,7
15,0		652,9	926,0
16,2		721,2	994,4

Per i ricavati valori del parametro di Hollomon-Jaffe, le temperature cui i due materiali oggetto di studio dovrebbero essere sottoposti durante il trattamento termico di rinvenimento rapido sono all'incirca uguali. Pertanto, si sceglie di adottare, quale temperatura del trattamento termico dei due materiali, la media dei valori di temperatura ottenuti. I risultati delle prove realizzate sui provini saranno pertanto riferiti alla media dei valori del parametro di Hollomon-Jaffe dei due materiali.

Tabella 2.9: Durata e temperature di rinvenimento rapido per entrambi gli acciai.

Durata	Temperatura (°C)	Temperatura (K)
20s	20	293
	242	515
	310	583
	378	652
	447	720
	515	788
	583	856
	651	924
	719	993

### 2.2.5 Forno a bagno di sale

I trattamenti termici di rinvenimento rapido si sono realizzati nel forno a bagno di sale *CU 1050-SE* fabbricato dall'azienda svizzera *Borel*.



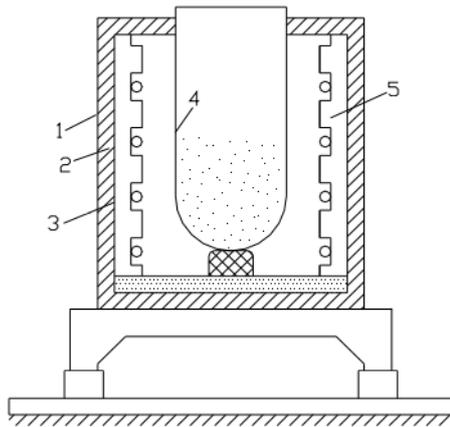
Figura 2.5: Forno a bagno di sale Borel, modello CU 1050-SE.

Il forno necessita di un'alimentazione da 230VAC alla frequenza di 50Hz e ha una potenza di 2,0kW. Un regolatore PID, fabbricato dall'azienda Axros Swiss, si occupa del controllo della temperatura che può raggiungere un massimo di 1000°C. L'accesso al crogiolo refrattario avviene dalla parte superiore del forno, dalla chiusura manuale.

Si riportano a seguire caratteristiche geometriche e peso del forno.

Tabella 2.10: Caratteristiche geometriche e peso del forno a bagno di sale Borel, modello CU 1050-SE.

Vol. Int. (L)	Dim. Int. (DxH) (mm)	Dim. Est. (LxHxP) (mm)	Peso (kg)
0,7	80x135	400x650x500	45



1. rivestimento di lamiera
2. materiale isolante
3. muratura di materiale refrattario
4. crogiolo
5. elementi riscaldanti

5

Figura 2.6: Schema semplificato di un forno a bagno di sale.

Per via della collocazione delle termocoppie, disposte adiacenti alla superficie esterna del crogiolo, è ragionevole aspettarsi che la temperatura del sale all'interno del crogiolo sia in realtà minore, sebbene di poco, di quella impostata.

### 2.2.6 Sali per il trattamento termico di rinvenimento rapido

I sali per trattamenti termici hanno certe proprietà e un certo campo di impiego in termini di temperatura. Per la realizzazione dei trattamenti termici di rinvenimento rapido si è scelto di impiegare il *Saltquench 140* fornito dall'azienda *MacDermid Enthone* ed il *Durferrit GS430* della *Hef Durferrit* di cui seguito si riportano le principali caratteristiche:

Tabella 2.11: Dati tecnici *Saltquench 140*.

Temperatura di fusione	142°C ± 2°C
Peso specifico a 200°C	1,9kg/dm <sup>3</sup>
Peso specifico a 450°C	1,7kg/dm <sup>3</sup>
Calore specifico da 200°C a 550°C	0,37cal/g °C
Calore di fusione	61cal/g
Campo di impiego	160-550°C

Tabella 2.12: Dati tecnici *Durferrit GS430*.

Temperatura di fusione	430°C circa
Peso specifico a 700°C	2,2kg/dm <sup>3</sup>
Calore specifico	0,15cal/g °C
Calore di fusione	43,5cal/g
Campo di impiego	500-700°C

A seguire si riporta per quali temperature del trattamento si è adottato l'uno e per quali invece l'altro.

Tabella 2.13: Temperature di rinvenimento rapido e rispettivi sali impiegati.

Sale	Temperatura di rinvenimento (°C)
<i>Saltquench 140</i>	242
	310
	378
	447
<i>GS430</i>	515
	583
	651
	719

### 2.2.7 Fase preliminare dei trattamenti e raffreddamento dei provini

In entrambi i casi il forno è stato preriscaldato alla temperatura desiderata e si è atteso che la suddetta si stabilizzasse prima di dare inizio al trattamento.

Nel forno a muffolla i provini sono stati di volta in volta disposti su due piccoli sostegni in materiale refrattario in modo da realizzarne un corretto rinvenimento del tratto calibrato e impedire reazioni chimiche con eventuali impurità presenti. Conclusosi il trattamento, i provini sono stati disposti in ugual maniera su appoggi del medesimo tipo e lasciati raffreddare in aria.

L'impiego del forno a bagno di sale ha invece richiesto che si verificasse di volta in volta che il sale si trovasse allo stato liquido per l'intera altezza del crogiolo. Ultimato il trattamento, i provini sono stati raffreddati in acqua dalla temperatura di circa 20°C entro circa 2s dalla loro estrazione dal forno, attentamente ripuliti dei residui del sale impiegato, privati del fil di ferro che ne aveva permesso l'immersione e opportunamente conservati.

### 2.2.8 Condizioni di esecuzione delle prove di durezza

Le prove di durezza si sono eseguite nel rispetto della norma EN ISO 6507-1 del 2018<sup>[12]</sup>. Innanzitutto si è provveduto a ripulire le superfici dei provini, tal quali e rinvenuti, di entrambi i materiali oggetto di studio, con della carta abrasiva. Si è verificato che lo spessore del provino, pari a 1.5mm, fosse almeno uguale a 1.5 volte la lunghezza della diagonale dell'indentatore. Le prove si sono svolte a temperatura ambiente, in media pari a 18°C nel mese di maggio nella città di Torino. Si è scelto di adottare una forza di indentazione pari a 30kgf e di applicarla per un intervallo di tempo approssimativamente pari a 15s. In tutti i casi le diagonali delle impronte sono risultate maggiori di 0,020mm. Pertanto, tutte le condizioni imposte dalla norma EN ISO 6507-1 del 2018 per la validità dei risultati sono state rispettate.

### 2.2.9 Condizioni di esecuzione delle prove di trazione

Forma e dimensione dei provini per prove di trazione dipendono da quelli del prodotto metallico da cui i primi sono stati ricavati. La loro sezione trasversale può essere circolare, quadrangolare, rettangolare, anulare o di forma diversa in casi particolari.

I provini esaminati durante questo lavoro di tesi hanno sezione trasversale di forma rettangolare e dimensioni 6,00mm x 1,50mm. La norma UNI ISO 10002 del 2019<sup>[13]</sup> prevede che la lunghezza  $L_0$  del tratto compreso tra i riferimenti sia legata all'area della sezione trasversale  $S_0$  dalla seguente relazione:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (7)$$

dove  $k$  è una costante pari a 5,65.

La lunghezza del tratto compreso tra i riferimenti risulta essere:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{9} = 17mm$$

Poiché  $L_0$  è inferiore a 20mm, i provini impiegati non possono dirsi proporzionali. La normativa prevede che si possano comunque svolgere le prove di trazione.

In accordo con la norma UNI ISO 10002 del 2019, il tratto di lunghezza  $L_0$  può essere circoscritto lungo il tratto calibrato del provino da segni realizzati tramite un pennarello dalla punta fine e dall'inchiostro indelebile. Poiché la lunghezza del tratto calibrato  $L_c$  risultava essere assai maggiore di quella  $L_0$  si sono individuati più tratti successivi della medesima lunghezza, tre, come la norma prevede si possa fare.

A seconda della composizione chimica e dei trattamenti termici cui sono stati sottoposti, gli acciai manifestano differenti comportamenti a trazione: per certuni è possibile riconoscere chiaramente l'inizio del fenomeno dello snervamento, per altri risulta invece assai difficile farlo poiché lo scostamento della curva dalla linearità risulta graduale.

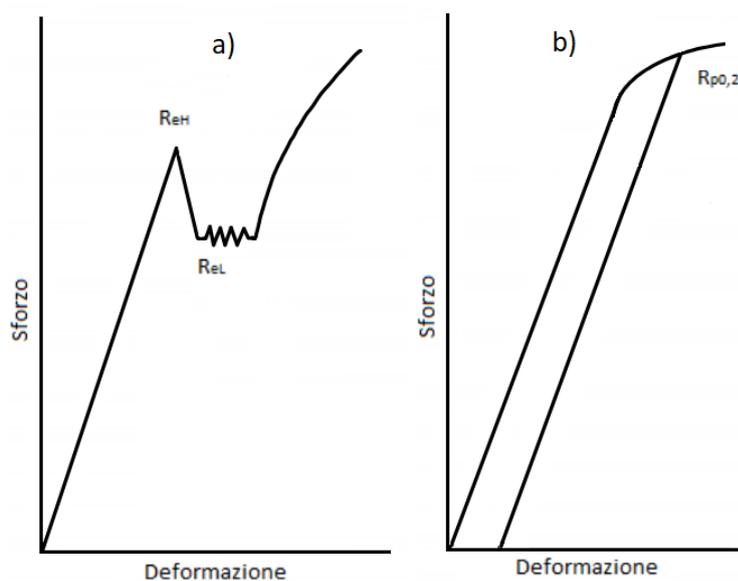


Figura 2.7: Curve sforzo-deformazione dallo snervamento: a) facilmente identificabile; b) difficilmente identificabile.

Qualora si debbano determinare le grandezze  $R_{eH}$  e  $R_{eL}$ , la norma UNI ISO 10002 del 2019 prescrive che, entro il regime elastico, la velocità alla quale le traverse della macchina di prova si allontanano debba essere mantenuta per quanto possibile costante e tale per cui lo stress rate soddisfi le seguenti condizioni:

Modulus of elasticity of the material (E) MPa	Stress rate MPa·s <sup>-1</sup>	
	min	max
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

Figura 2.8: Estratto della norma UNI ISO 10002:2019 - velocità di applicazione della tensione sul provino.

Entrambi gli acciai sottoposti a prova di trazione hanno notoriamente modulo elastico  $E$  ben al di sopra del valore di 150.000 MPa e perciò, qualora manifestassero il comportamento in Fig. 4.2 a. se sottoposti a trazione, lo stress rate sarebbe da imporsi di valore compreso tra i 6 MPa s<sup>-1</sup> e i 60 MPa s<sup>-1</sup>. Gli acciai 39NiCrMo3 e C45, dalla composizione precedentemente resa nota e sottoposti ai trattamenti termici indicati, se caricati a trazione, manifestano invece il comportamento in Fig. 4.2 b. Pertanto non si è dovuta rispettare la condizione riguardante lo stress rate.

Per quegli acciai la cui curva di trazione si discosta gradualmente dalla linearità, si definisce la tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  come la tensione corrispondente ad una deformazione pari allo 0,2% della lunghezza base dell'estensimetro, pari a 25mm. Nel caso in esame non potendosi ritenere sempre affidabili le misure ricavate tramite estensimetro, si è scelto di individuare la tensione di snervamento come quella corrispondente ad una deformazione pari allo 0,2% della lunghezza complessiva del tratto calibrato, 59mm. La tensione di snervamento dei materiali è stata pertanto determinata tracciando una retta parallela al tratto iniziale della curva di trazione a partire da quel punto sull'asse dello spostamento di valore pari a 0,118 e dividendo poi per la sezione nominale del provino, 9mm<sup>2</sup> il valore del carico corrispondente.

La tensione di rottura  $R_m$  individuata come quella corrispondente al carico massimo di trazione come la norma prescrive.

Durante le prove di trazione si adopera un estensimetro meccanico per la determinazione delle deformazioni dei provini. Lo strumento dispone di due coltelli disposti su un'apposta incasellatura che costituiscono la sua base di misura. I coltelli si distinguono in mobile e fisso. Lo strumento dovrebbe essere collocato di volta in volta, per quanto possibile nella maniera più precisa, nella parte centrale del provino. Lo spostamento del coltello mobile rispetto a quello fisso misura l'allungamento del provino a partire dal cui valore si determina la corrispondente deformazione.

L'allungamento uniforme  $A_g$  viene definito come quello corrispondente al massimo carico registrato durante la prova di trazione.

Lo si è determinato procedendo in tal modo:

- misurazione tramite calibro della lunghezza dei due tratti in cui non si era manifestata la rottura o dell'intero tratto calibrato qualora la rottura fosse avvenuta al di fuori d'esso;

- rapporto tra la somma delle due lunghezze o del tratto calibrato per la corrispondente lunghezza ante-prova, rispettivamente 34mm e 51mm.

La norma definisce l'allungamento a rottura  $A$  (mm) come quello permanente del tratto compreso tra i riferimenti tracciati sul provino indeformato.

Alla determinazione dell'allungamento a rottura tramite misure dell'estensimetro si è deciso di preferire quella calcolata in relazione alla corsa della traversa. I dati restituiti dalla macchina di trazione circa il movimento della traversa sono certamente meno precisi di quelli offerti dall'estensimetro e sono soggetti a errori. Si è deciso di trascurare l'imprecisione di tali dati e si è ragionevolmente ammesso che, avendo impiegato sempre la medesima macchina di prova e provini di stessa forma e stesse dimensioni, gli errori fossero sempre i medesimi e che quindi fossero influenti allo scopo che lo studio in questione si prefigge. Chiaramente, poiché tali misure si riferiscono allo spostamento della traversa, la grandezza, se espressa in percentuale, dovrà riferirsi alla lunghezza dell'intero tratto calibrato pari 59mm.

# 3 Risultati

## 3.1 Microstruttura

Si è voluto verificare che la tempra ed il successivo rinvenimento avvenuto nell'atmosfera del forno a muffola avessero prodotto la microstruttura desiderata. Tanto più alta è la temperatura prevista del trattamento termico, tanto più importante è il fenomeno della decarburazione. Per questa ragione, in via cautelativa, oltre ai provini tal quali temprati, si è deciso di esaminare cosa fosse avvenuto nel caso dei provini rinvenuti ad una temperatura più alta e pari di 600°C. A tal fine si sono ricavati, dalle teste dei provini in C45 e 39NiCr-Mo3 tal quali temprati e rinvenuti a tale temperatura, dei frammenti tramite troncattrice a disco. Questi sono stati poi inglobati a caldo, sottoposti prima a lucidatura tramite carte abrasive di rugosità via via decrescente e infine attaccati chimicamente.

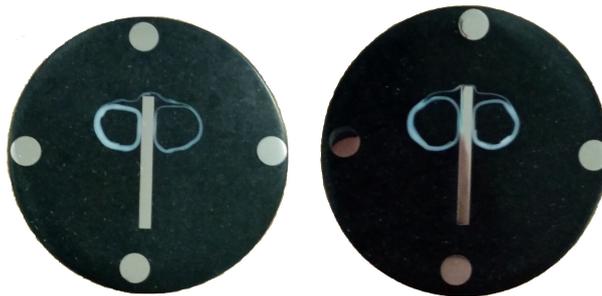


Figura 3.1: Frammenti dei provini inglobati a caldo e lucidati.

Di seguito si riportano le immagini catturate al microscopio ottico.

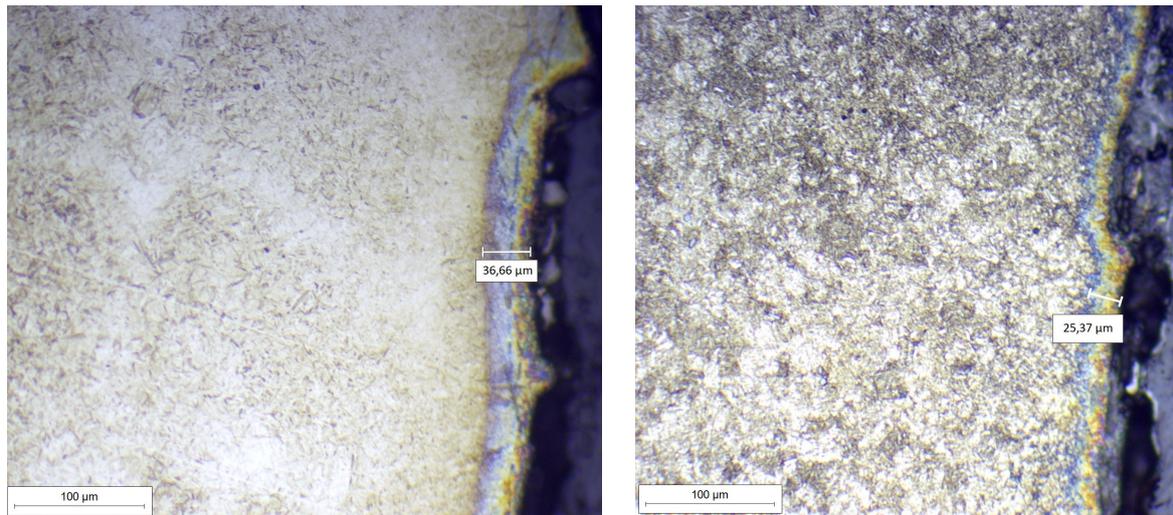


Figura 3.2: Immagini al microscopio ottico dell'acciaio 39NiCrMo3: tal quale temprato, a sinistra; temprato e rinvenuto a 600°C, a destra.

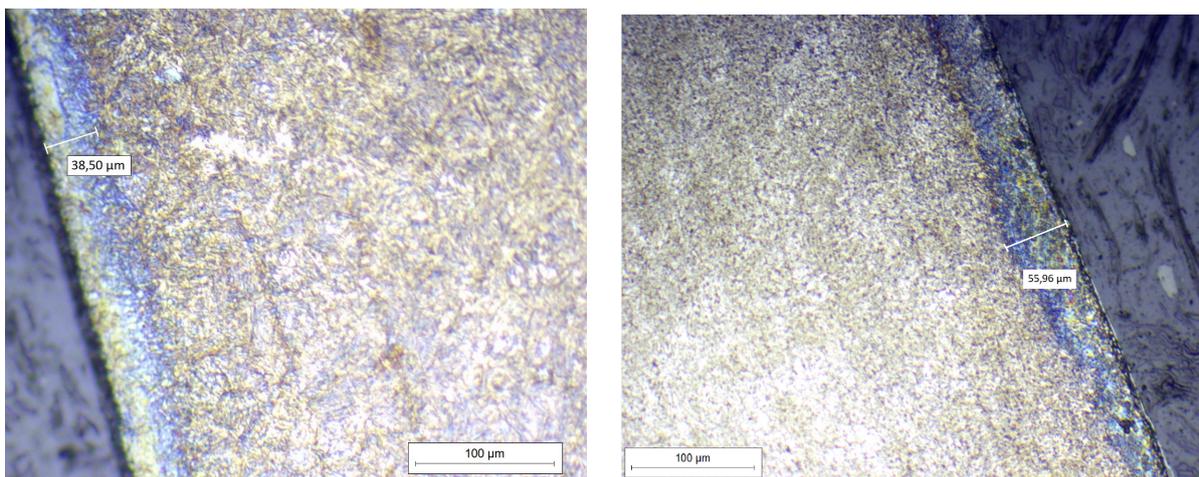


Figura 3.3: Immagini al microscopio ottico dell'acciaio C45: tal quale temprato, a sinistra; temprato e rinvenuto a 600°C, a destra.

Le immagini suggeriscono che, come c'era da aspettarsi, la microstruttura, corrispondente a quella di martensite in un caso e martensite rinvenuta nell'altro, è omogenea e non mostra segni di decarburazione.

## 3.2 Prove di durezza

### 3.2.1 Risultati delle prove di durezza

Tabella 3.1: Misure di durezza condotte sui provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale.

Temp. di Rinv.(°C)	Parametro H-J	Misura 1 (mm)			Misura 2 (mm)			Misura 3 (mm)		
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>
Non rinv.	5,5	0,280	0,280	0,280	0,280	0,274	0,277	0,277	0,280	0,279
180	8,5	0,284	0,289	0,287	0,278	0,277	0,278	0,280	0,280	0,280
240	9,6	0,302	0,307	0,305	0,315	0,310	0,313	0,310	0,305	0,308
300	10,7	0,310	0,310	0,310	0,314	0,311	0,313	0,312	0,310	0,311
360	11,9	0,327	0,323	0,325	0,323	0,320	0,322	0,320	0,323	0,322
420	13,0	0,340	0,356	0,348	0,342	0,345	0,344	0,335	0,337	0,336
480	14,1	0,340	0,340	0,340	0,344	0,343	0,344	0,341	0,341	0,341
540	15,2	0,392	0,392	0,392	0,382	0,386	0,384	0,385	0,391	0,388
600	16,4	0,413	0,425	0,419	0,419	0,416	0,418	0,410	0,411	0,411

Tabella 3.2: Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale.

Temp. Rinv. (°C)	Parametro H-J	Durezza Vickers (VH)			
		Valore <sub>1</sub>	Valore <sub>2</sub>	Valore <sub>3</sub>	Valore <sub>medio</sub>
Non Rinv.	5,5	709,85	725,31	717,52	717,56
180	8,5	678,85	722,70	709,85	703,52
240	9,6	604,18	588,56	588,56	593,77
300	10,7	600,22	569,88	588,56	586,22
360	11,9	526,88	538,42	538,42	534,57
420	13,0	459,54	471,66	492,95	474,72
480	14,1	481,42	471,66	478,60	477,23
540	15,2	362,17	377,42	369,67	369,75
600	16,4	317,37	319,28	330,26	322,30

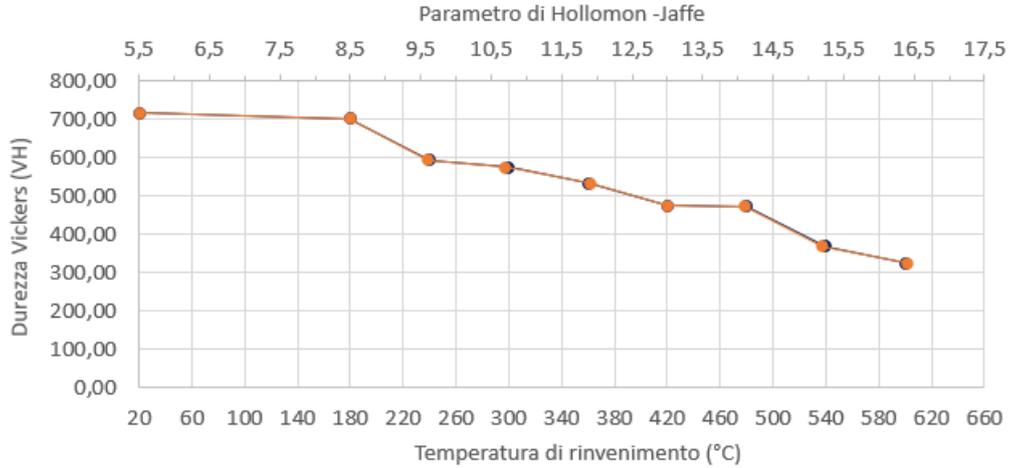


Figura 3.4: Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento convenzionale.

Come previsto sulla base degli studi reperibili in letteratura e che è stato possibile consultare, la durezza Vickers diminuisce all'aumentare della temperatura di rinvenimento.

Tabella 3.3: Misure di durezza condotte sui provini in acciaio C45 - Rinvenimento convenzionale.

Temp. di Rinv.(°C)	Parametro H-J	Misura 1 (mm)			Misura 2 (mm)			Misura 3 (mm)		
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>
Non Rinv.	5,5	0,293	0,294	0,294	0,293	0,290	0,292	0,291	0,290	0,291
180	8,5	0,296	0,295	0,296	0,289	0,290	0,290	0,315	0,320	0,318
240	9,6	0,390	0,397	0,394	0,373	0,378	0,282	0,382	0,280	0,381
300	10,7	0,344	0,344	0,344	0,347	0,350	0,349	0,317	0,318	0,318
360	11,9	0,339	0,341	0,340	0,336	0,335	0,336	0,333	0,335	0,334
420	13,0	0,364	0,367	0,336	0,367	0,370	0,369	0,372	0,373	0,373
480	14,1	0,385	0,391	0,388	0,390	0,392	0,391	0,393	0,392	0,393
540	15,2	0,450	0,451	0,451	0,457	0,449	0,453	0,454	0,457	0,456
600	16,4	0,460	0,458	0,459	0,461	0,461	0,461	0,465	0,460	0,463

Tabella 3.4: Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio C45 - Rinvenimento convenzionale.

Temp. di Rinv.	Parametro H-J	Durezza Vickers (VH)			
		Valore <sub>1</sub>	Valore <sub>2</sub>	Valore <sub>3</sub>	Valore <sub>medio</sub>
Non. Rinv.	5,5	646,05	702,30	659,46	669,27
180	8,5	637,33	664,03	552,07	617,81
240	9,6	359,41	389,49	383,38	377,43
300	10,7	470,29	458,22	552,07	493,53
360	11,9	481,42	494,42	498,87	491,57
420	13,0	416,59	409,83	401,08	409,17
480	14,1	369,67	364,02	361,25	364,98
540	15,2	274,22	271,20	268,23	271,21
600	16,4	264,15	261,87	260,17	262,06

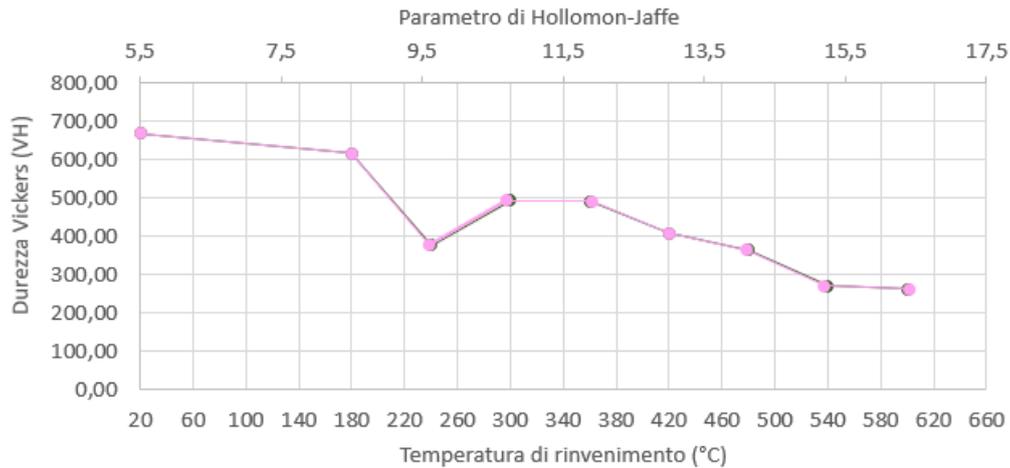


Figura 3.5: Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45- Rinvenimento convenzionale.

Nel caso dell'acciaio C45 si è manifestato un indurimento secondario nell'intervallo di temperatura compreso tra i 240°C e i 360°C. Le curve di rinvenimento dell'acciaio C45 che si è riusciti a reperire da letteratura non prevedono il manifestarsi del fenomeno. Per questa ragione i trattamenti termici di rinvenimento alle temperature di 180°C, 240°C, 300°C e 360°C sono stati ripetuti e nuove prove di durezza sono state eseguite. A trattamenti di rinvenimento eseguiti, le nuove prove di durezza hanno tuttavia confermato i risultati sperimentali precedentemente registrati.

Tabella 3.5: Misure di durezza condotte sui provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido.

Temp. di Rinv.(°C)	Parametro H-J	Misura 1 (mm)			Misura 2 (mm)			Misura 3 (mm)		
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>
Non Rinv.	5,5	0,280	0,280	0,280	0,280	0,274	0,277	0,277	0,280	0,279
242	8,5	0,278	0,275	0,277	0,280	0,282	0,281	0,280	0,282	0,281
310	9,6	0,280	0,275	0,278	0,285	0,285	0,285	0,282	0,285	0,284
378	10,7	0,295	0,295	0,295	0,292	0,293	0,293	0,300	0,300	0,300
447	11,9	0,296	0,296	0,296	0,310	0,311	0,311	0,300	0,301	0,301
515	13,0	0,307	0,310	0,309	0,313	0,315	0,314	0,309	0,310	0,310
583	14,1	0,327	0,328	0,328	0,328	0,326	0,327	0,328	0,329	0,329
651	15,2	0,336	0,332	0,334	0,335	0,338	0,337	0,332	0,336	0,334
719	16,4	0,343	0,346	0,345	0,348	0,345	0,347	0,348	0,349	0,349

Tabella 3.6: Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido.

Durezza Vickers (VH)					
Temp di Rinv. (°C)	Parametro H-J	Valore <sub>1</sub>	Valore <sub>2</sub>	Valore <sub>3</sub>	Valore <sub>medio</sub>
Non. Rinv.	5,5	709,85	725,31	717,52	717,56
242	8,5	727,93	704,81	704,81	712,51
310	9,6	722,70	685,16	692,43	700,10
378	10,7	639,50	650,47	618,36	636,11
447	11,9	635,18	577,24	616,30	609,58
515	13,0	584,75	564,45	580,98	576,73
583	14,1	518,87	520,46	515,72	518,35
651	15,2	498,87	491,49	498,87	496,41
719	16,4	468,92	463,53	458,22	463,56

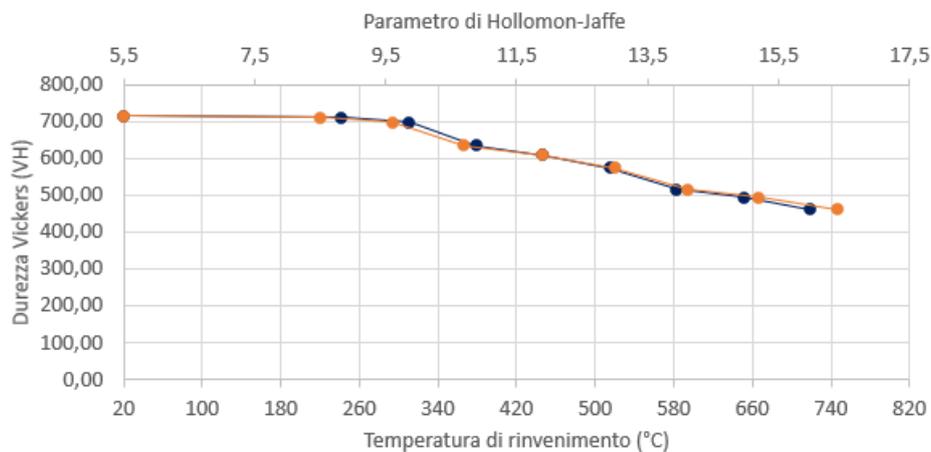


Figura 3.6: Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs Parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio 39NiCrMo3 - Rinvenimento rapido.

Tabella 3.7: Misure di durezza condotte sui provini in acciaio C45 - Rinvenimento rapido.

Temp di Rinv.(°C)	Parametro H-J	Misura 1 (mm)			Misura 2 (mm)			Misura 3 (mm)		
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>media</sub>
Non Rinv.	5,5	0,293	0,294	0,294	0,293	0,290	0,292	0,291	0,290	0,291
242	8,5	0,275	0,277	0,276	0,288	0,288	0,288	0,275	0,275	0,275
310	9,6	0,280	0,279	0,280	0,282	0,280	0,281	0,280	0,280	0,280
378	10,7	0,290	0,290	0,290	0,292	0,291	0,292	0,290	0,291	0,291
447	11,9	0,290	0,290	0,290	0,291	0,295	0,293	0,306	0,310	0,308
515	13,0	0,385	0,382	0,384	0,396	0,396	0,396	0,373	0,372	0,373
583	14,1	0,340	0,337	0,339	0,341	0,340	0,341	0,366	0,340	0,353
651	15,2	0,419	0,420	0,420	0,414	0,416	0,415	0,410	0,410	0,410
719	16,4	0,380	0,380	0,380	0,377	0,380	0,379	0,373	0,375	0,374

Tabella 3.8: Durezza Vickers (VH) per i provini in acciaio C45 - Rinvenimento rapido.

Durezza Vickers (VH)					
Temp. di Rinv. (°C)	Parametro H-J	Valore <sub>1</sub>	Valore <sub>2</sub>	Valore <sub>3</sub>	Valore <sub>medio</sub>
Non Rinv.	5,5	730,57	670,96	735,90	712,48
242	8,5	730,57	670,96	735,90	712,48
310	9,6	712,39	704,81	709,85	709,01
378	10,7	661,74	654,94	659,46	658,71
447	11,9	661,74	648,26	586,65	632,22
515	13,0	378,40	354,89	401,08	378,12
583	14,1	485,70	480,01	446,61	470,77
651	15,2	316,24	323,14	331,07	323,48
719	16,4	385,40	388,46	397,87	390,58

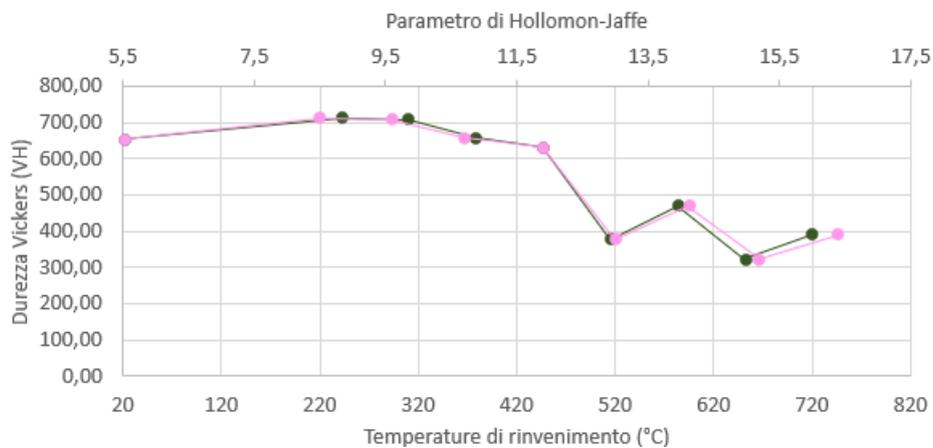


Figura 3.7: Durezza Vickers (HV) vs. temperatura di rinvenimento (°C) vs. parametro di Hollomon-Jaffe per l'acciaio C45 - Rinvenimento rapido.

### 3.2.2 Confronto tra le misure di durezza

Si riportano a seguire gli andamenti della durezza Vickers in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe per gli acciai oggetti dello studio. Come può osservarsi, per ugual valore del parametro, i valori di durezza Vickers dei provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti ai differenti trattamenti termici sono prossimi gli uni agli altri. Lo stesso non può dirsi per i provini in acciaio C45, o almeno per quelli rinvenuti alle temperature minori. Per tale ragione si raccomanda, qualora si vogliano realizzare ulteriori studi su un acciaio di stessa o quantomeno simile composizione, di adottare un diverso valore della costante c.

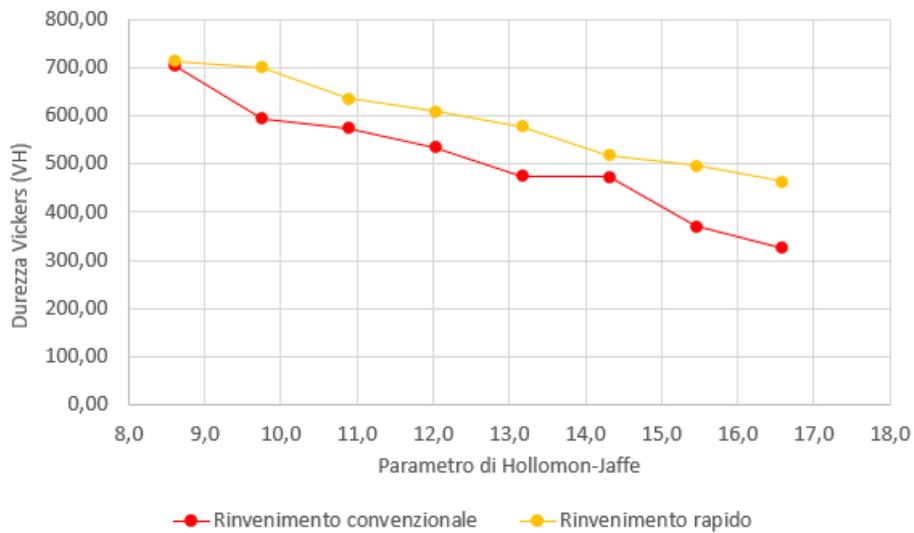


Figura 3.8: Durezza Vickers (HV) vs. Parametro di Hollomon-Jaffe (HP) per l'acciaio 39NiCrMo3.

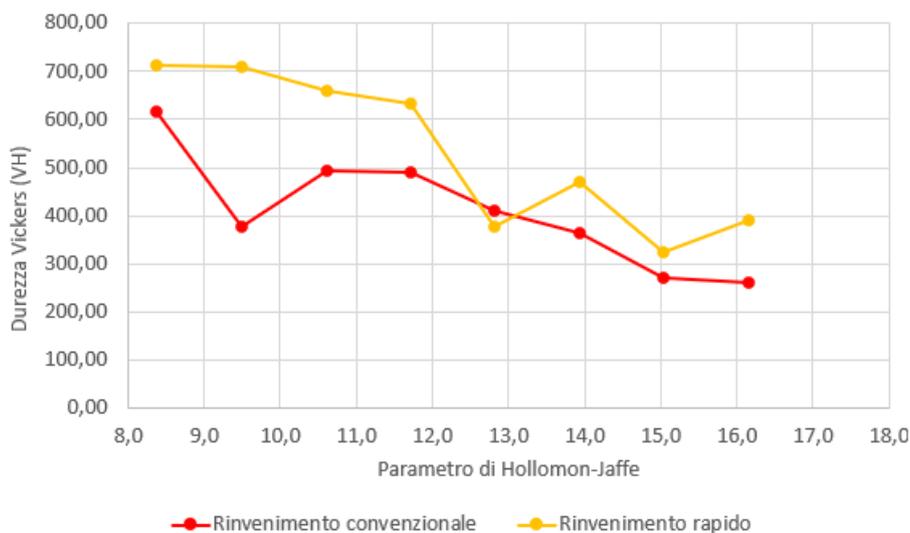


Figura 3.9: Durezza Vickers (HV) vs. Parametro di Hollomon-Jaffe (HP) per l'acciaio C45.

### 3.3 Prove di trazione

#### 3.3.1 Curve di trazione

A seguire si riportano le curve di trazione ricavate per i materiali oggetti dello studio sottoposti ai due differenti trattamenti termici di rinvenimento. Si precisa che nei grafici sottostanti per spostamento si intende quello della traversa della macchina di prova.

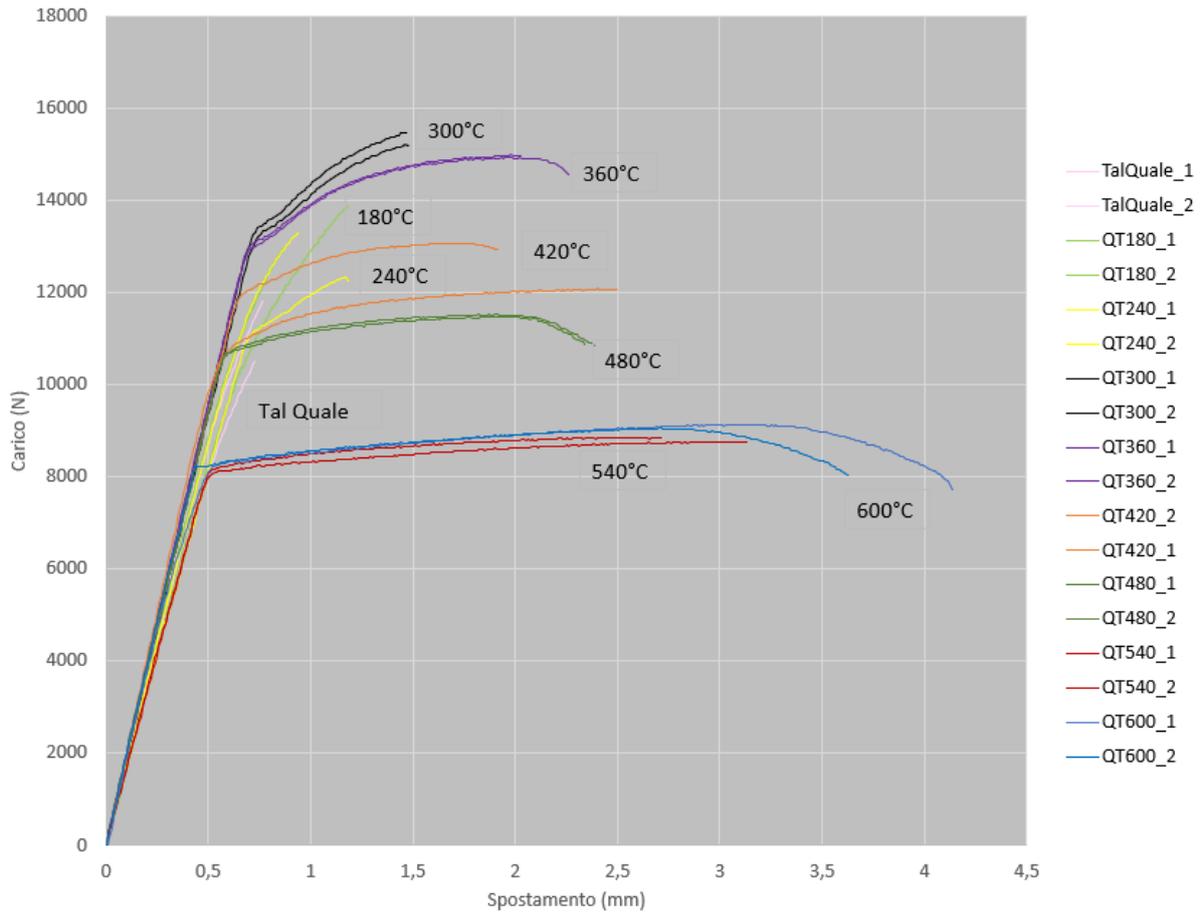


Figura 3.10: Curve di trazione per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale.

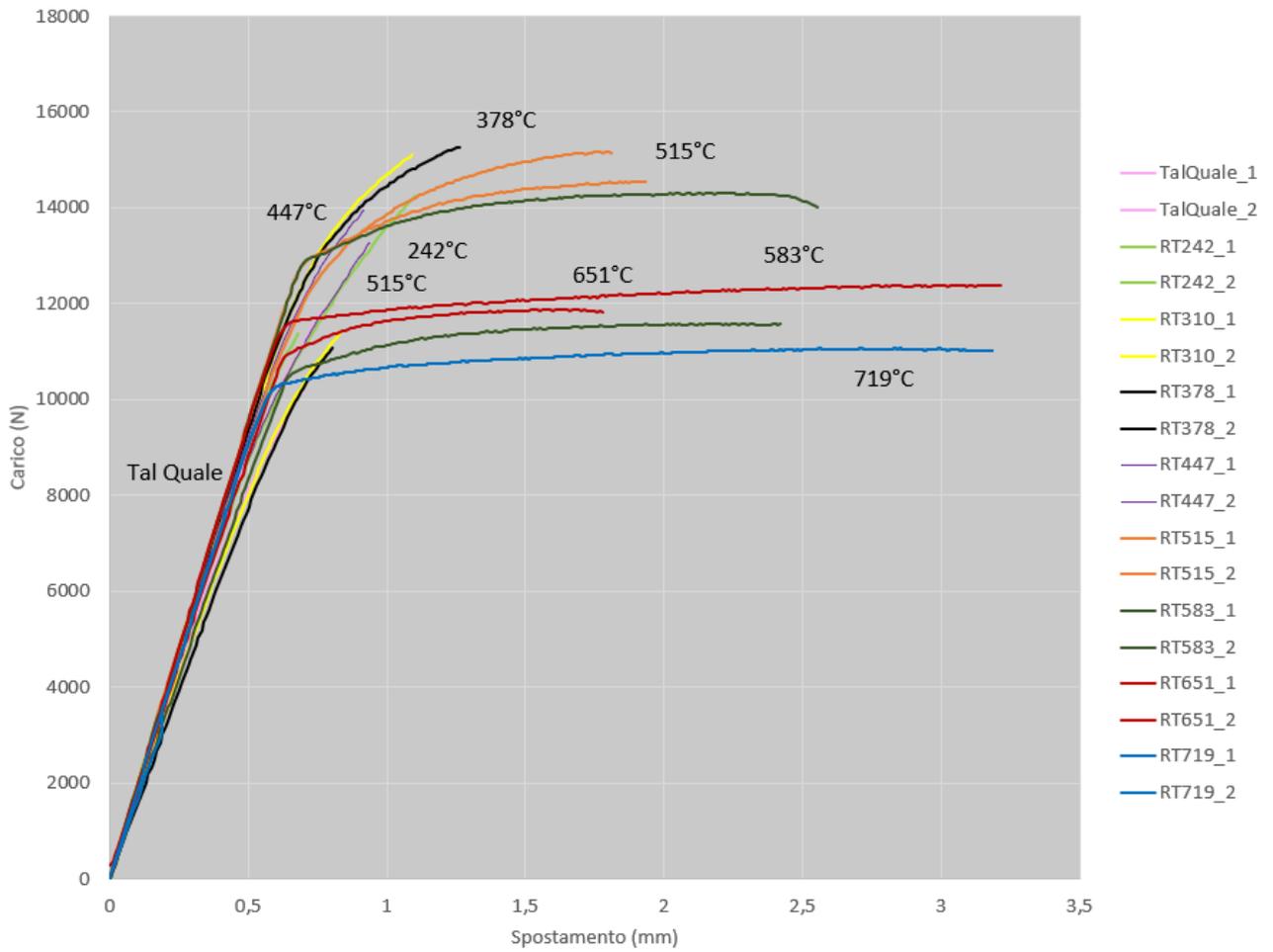


Figura 3.11: Curve di trazione per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido.

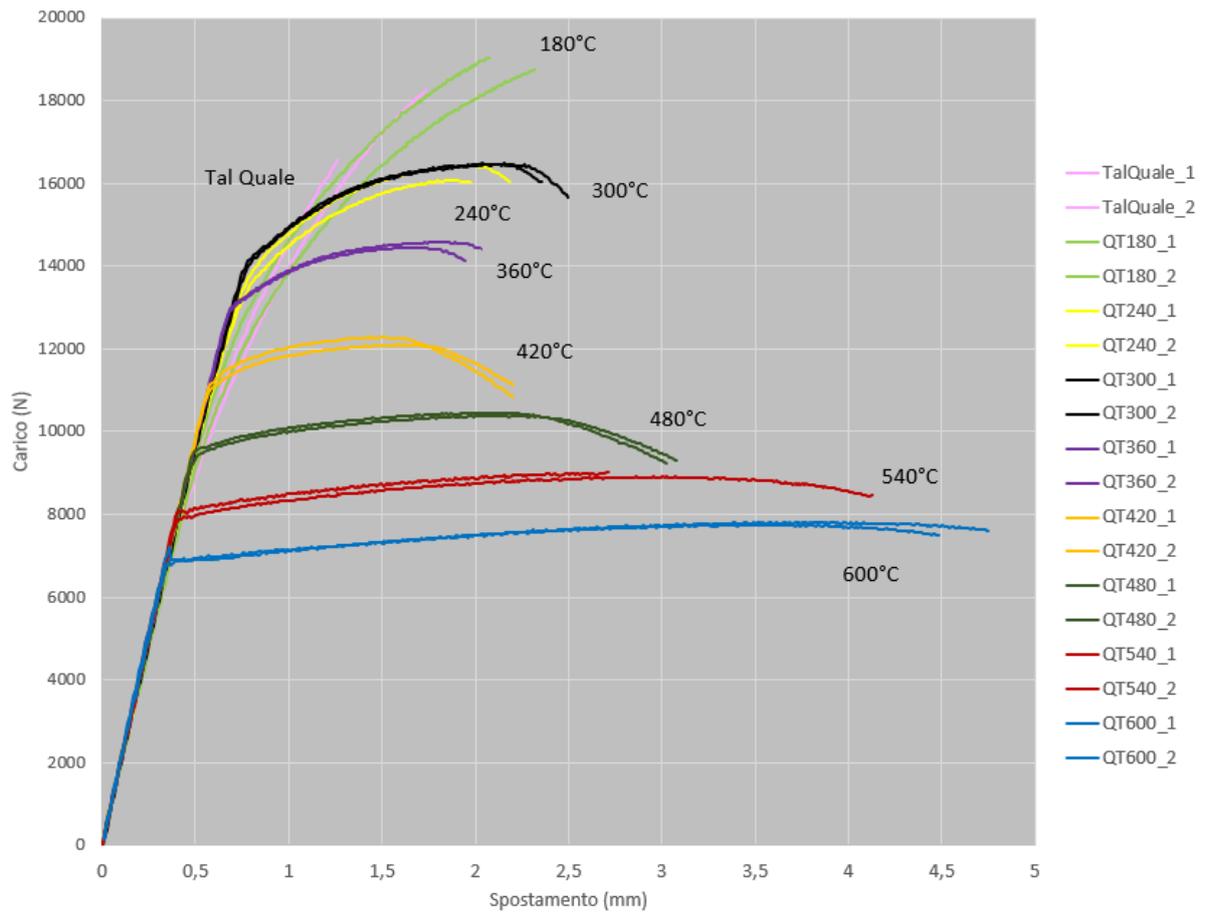


Figura 3.12: Curve di trazione per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale.

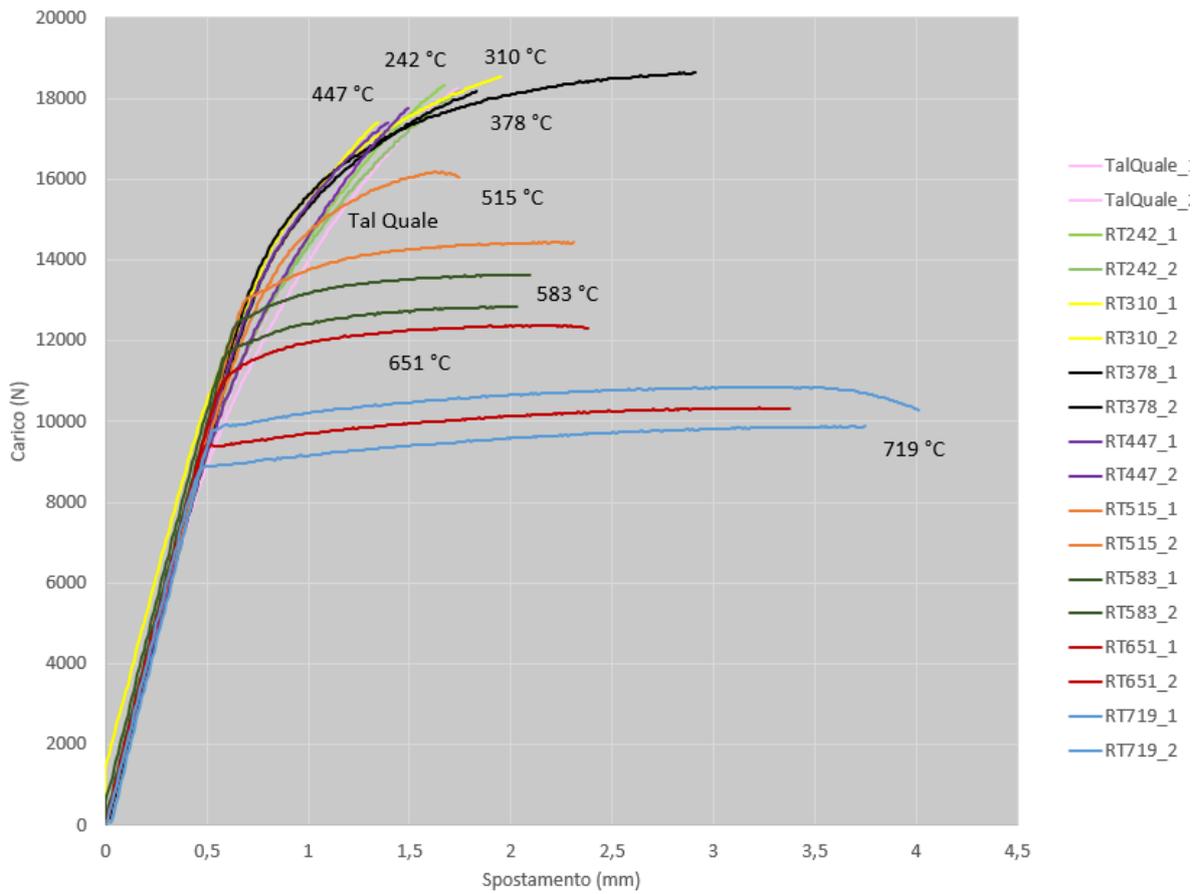


Figura 3.13: Curve di trazione per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido.

### 3.3.2 Tensione di snervamento $R_{p0,2}$

A seguire vengono riportate in tabelle le misure della tensione di snervamento e i grafici che ne illustrano l'andamento al variare del parametro di Hollomon-Jaffe della temperatura di rinvenimento.

Tabella 3.9: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	600	916,67	911,11	913,89
15,2	540	911,11	900,00	905,56
14,1	480	1200,00	1177,78	1188,89
13,0	420	1072,22	1211,11	1141,67
11,9	360	1477,78	1475,00	1476,39
10,7	300	1527,78	1500,00	1513,89
9,6	240	1200,00	1261,11	1230,56
8,5	180	1350,00	1255,56	1302,78
5,5	20	1111,11	1125,00	1118,06

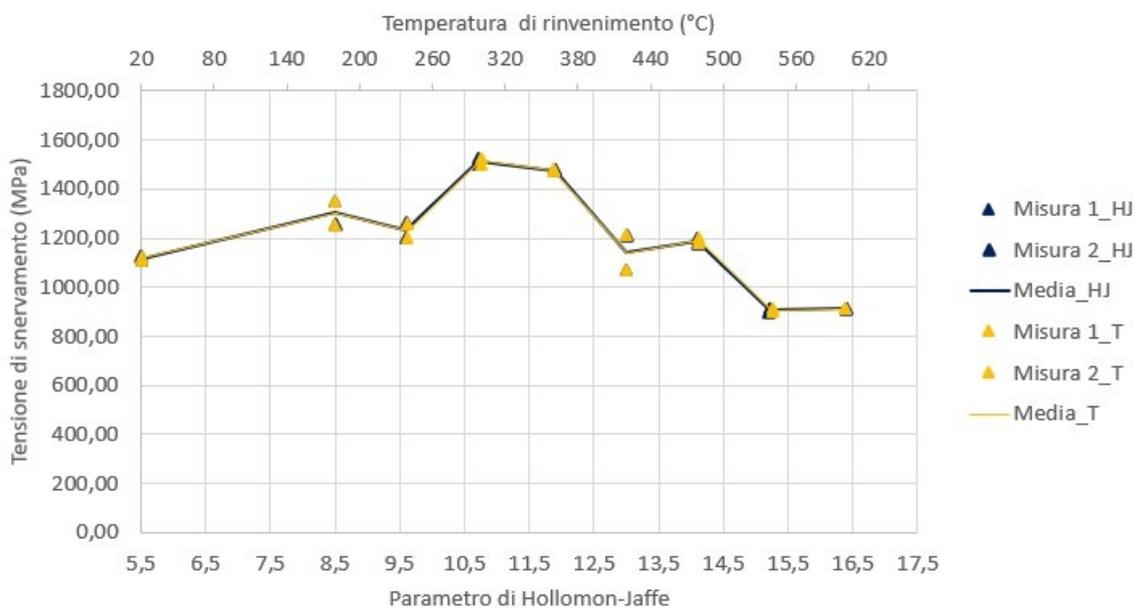


Figura 3.14: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.10: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e corrispondenti valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico.

Parametro di Hollomon-Jaffe	Temp. di Rinv (°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	600	783,33	766,67	755,00
15,2	540	888,89	905,56	897,22
14,1	480	1077,78	1066,67	1072,22
13,0	420	1283,33	1261,11	1272,22
11,9	360	1488,89	1466,67	1477,78
10,7	300	1577,78	1577,78	1577,78
9,6	240	1566,67	1477,78	1522,22
8,5	180	1411,11	1222,22	1316,67
5,5	Tal Quale	1222,22	1305,56	12638,89

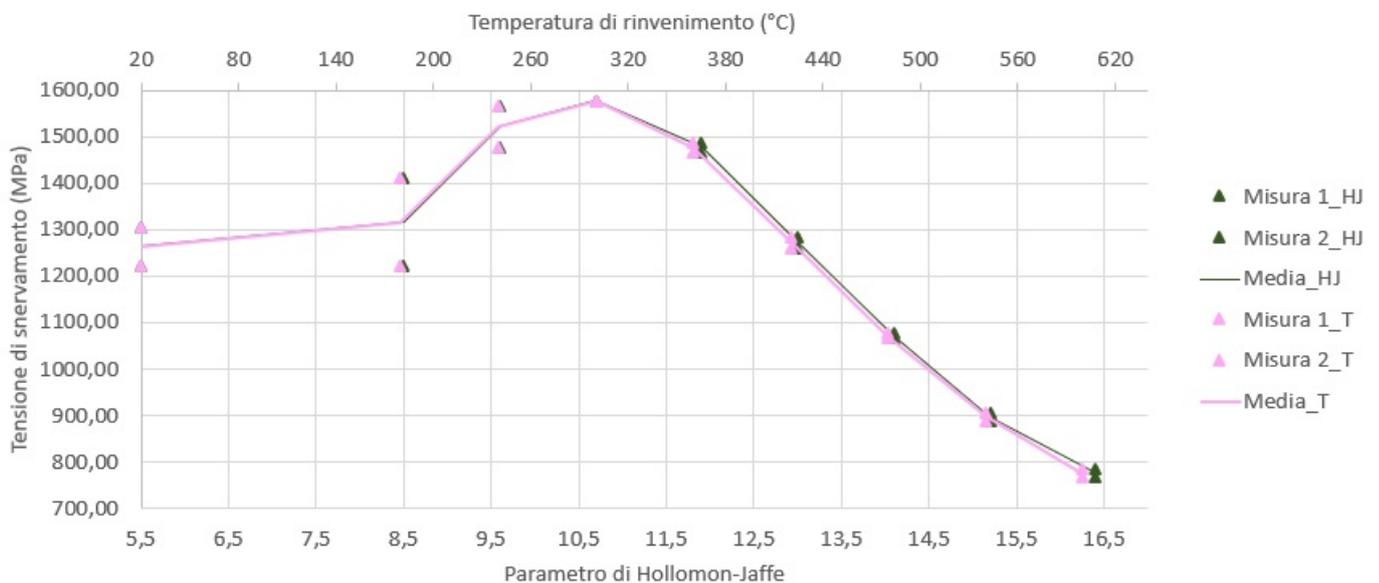


Figura 3.15: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Come è possibile osservare, l'andamento della tensione di snervamento del C45 al variare della temperatura di rinvenimento è quello tipico degli acciai al carbonio bonificati. Nello specifico,  $R_{p0,2}$  aumenta rapidamente, raggiunge il proprio massimo per una temperatura di rinvenimento di 300°C e poi decresce altrettanto rapidamente.

Tabella 3.11: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico.

Parametro di Hollomon-Jaffe	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	719	1155,56	1166,67	1161,11
15,2	651	1238,89	1272,22	1255,56
14,1	583	1461,11	1194,44	1372,78
13,0	515	1411,11	1416,67	1413,89
11,9	447	1216,67	1427,68	1322,22
10,7	378	1229,78	1488,89	1359,33
9,6	310	1183,33	1511,11	1347,22
8,5	242	1266,67	1276,78	1272,22
5,5	Tal Quale	1111,11	1125,00	1118,06

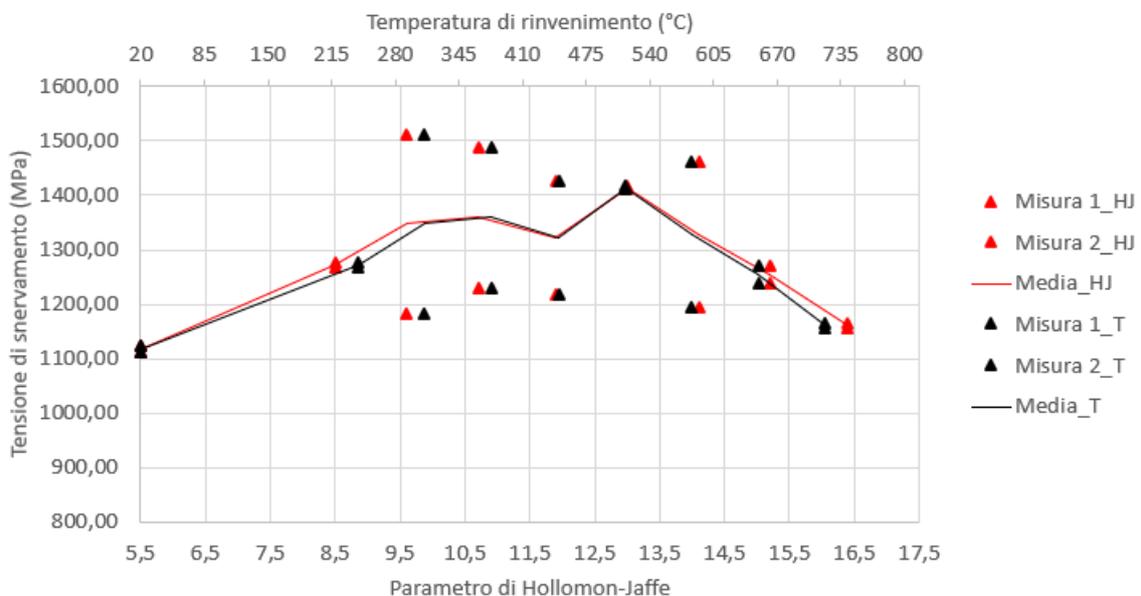


Figura 3.16: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.12: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido e corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e di temperatura di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	719	1100,00	983,33	1041,67
15,2	651	1255,56	1044,44	1150,00
14,1	583	1416,67	1322,22	1369,44
13,0	515	1438,89	1472,22	1455,56
11,9	447	1394,44	1611,11	1502,78
10,7	378	1522,22	1555,56	1538,89
9,6	310	1433,33	1250,00	1341,67
8,5	242	1388,89	1288,89	1338,89
5,5	Tal Quale	1194,44	1355,56	1275,00

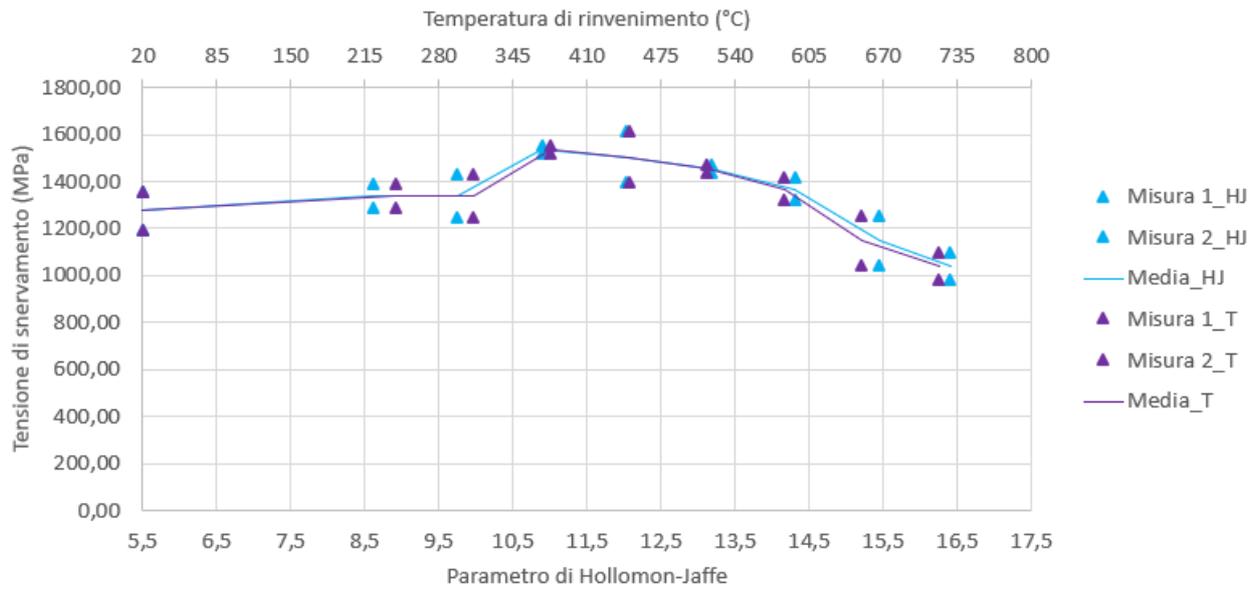


Figura 3.17: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperature di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

A seguire si confrontano le misure di tensione di snervamento in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe per i differenti trattamenti termici di rinvenimento.

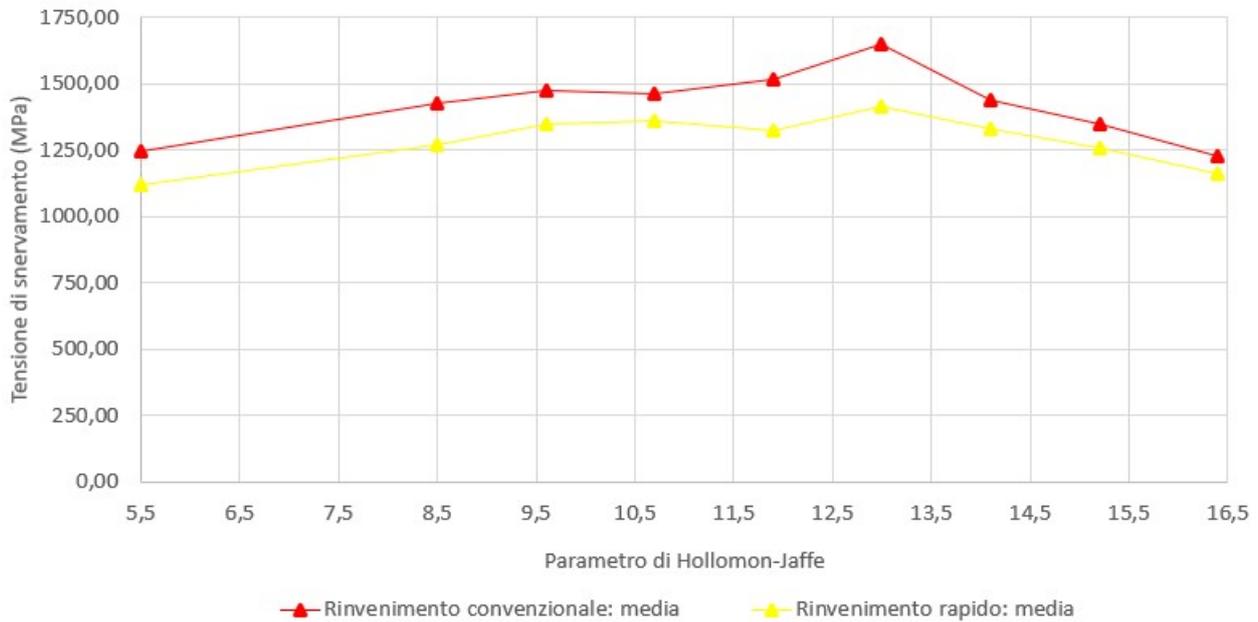


Figura 3.18: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCr-Mo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media

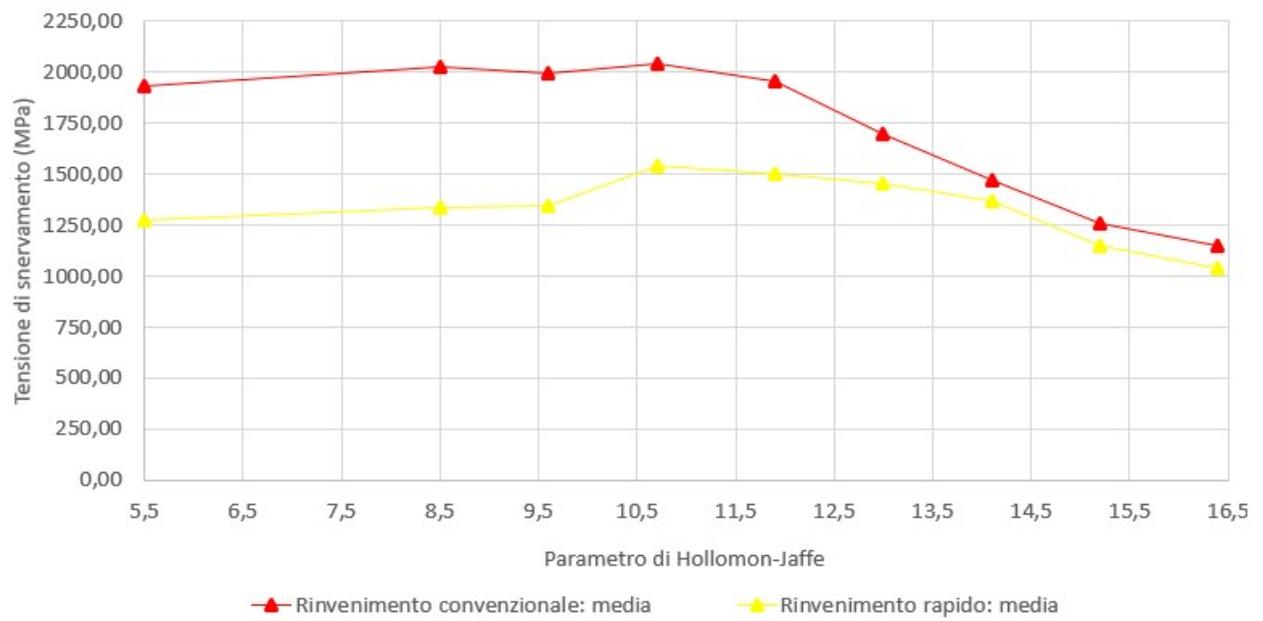


Figura 3.19: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media.

### 3.3.3 Tensione di rottura $R_m$

Tabella 3.13: Tensione di rottura  $R_m$  per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	600	1014,88	1006,13	1010,50
15,2	540	1119,16	984,70	1051,93
14,1	480	1280,33	1275,36	1277,85
13,0	420	1162,07	1453,22	1307,65
11,9	360	1665,58	1659,69	1662,63
10,7	300	1242,78	1689,99	1466,39
9,6	240	1701,43	1370,17	1535,80
8,5	180	1440,54	1546,07	1493,30
5,5	Tal Quale	1170,71	1316,26	1243,49

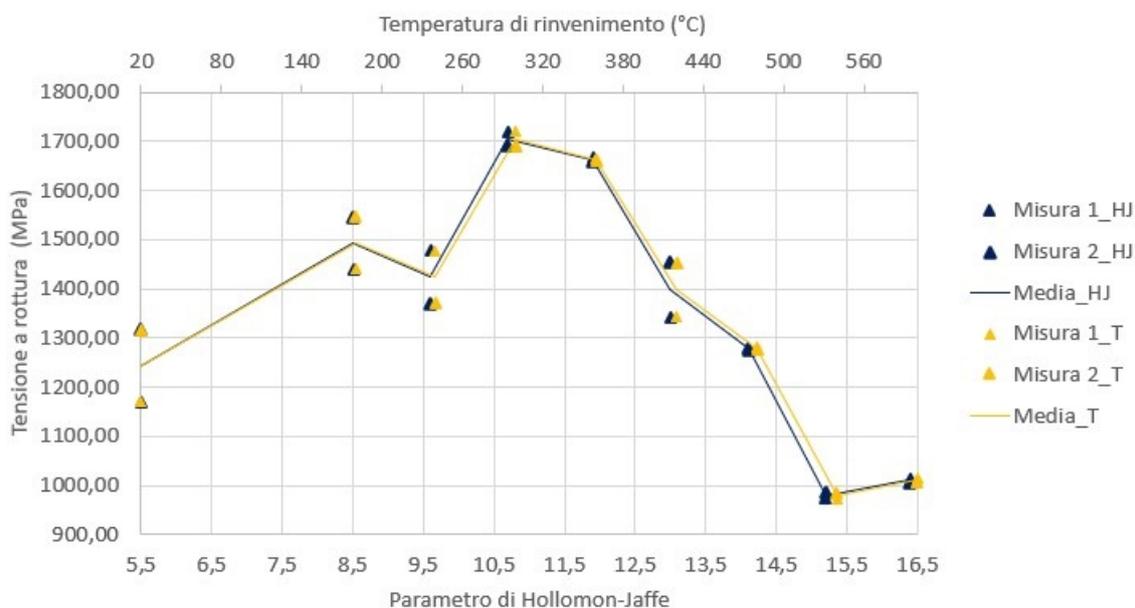


Figura 3.20: Tensione di rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Come si può osservare la tensione di rottura cresce in un primo intervallo di temperatura, decresce nel successivo, aumenta rapidamente e infine si riduce altrettanto rapidamente per temperature maggiori.

Tabella 3.14: Tensione di rottura  $R_m$  per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv.(°C)	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Valore <sub>medio</sub>
16,4	600	868,09	861,34	864,72
15,2	540	990,52	1002,34	996,43
14,1	480	1162,07	1154,76	1158,41
13,0	420	1364,45	1345,50	1354,97
11,9	360	1621,28	1606,34	1613,81
10,7	300	1831,28	1830,62	1830,95
9,6	240	1825,37	1786,28	1805,83
8,5	180	2119,29	2081,78	2100,54
5,5	Tal Quale	2028,75	1840,55	1934,65

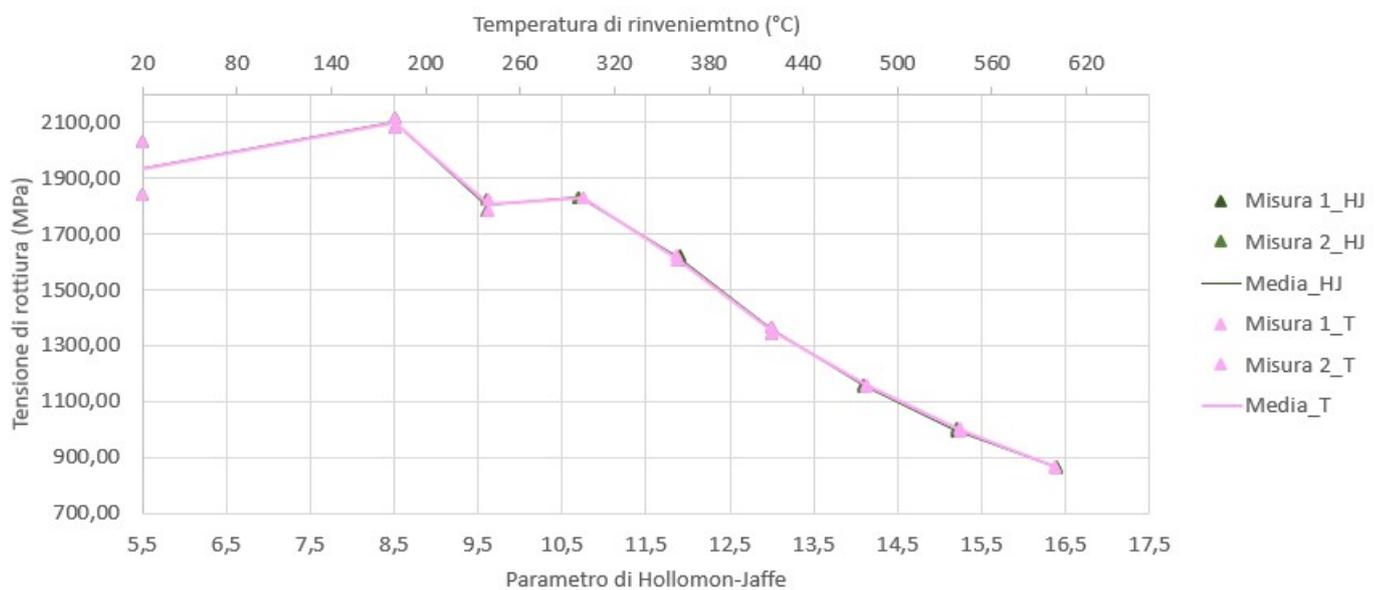


Figura 3.21: Tensione di rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

La tensione di rottura dell'acciaio C45 decresce all'aumentare della temperatura di rinvenimento a eccezione che nell'intervallo 240-300°C in cui aumenta leggermente.

Tabella 3.15: Tensione di rottura  $R_m$  per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperatura di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv.	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	719	1229,54	1229,50	1229,52
15,2	651	1320,18	1377,25	1348,71
14,1	583	1590,03	1286,73	1438,38
13,0	515	685,12	1617,52	1651,32
11,9	447	1477,34	1553,20	1515,23
10,7	378	1229,78	1695,47	1462,62
9,6	310	1269,15	1678,12	1473,64
8,5	242	1262,75	1583,62	1423,18
5,5	Tal Quale	1262,75	1316,26	1243,49

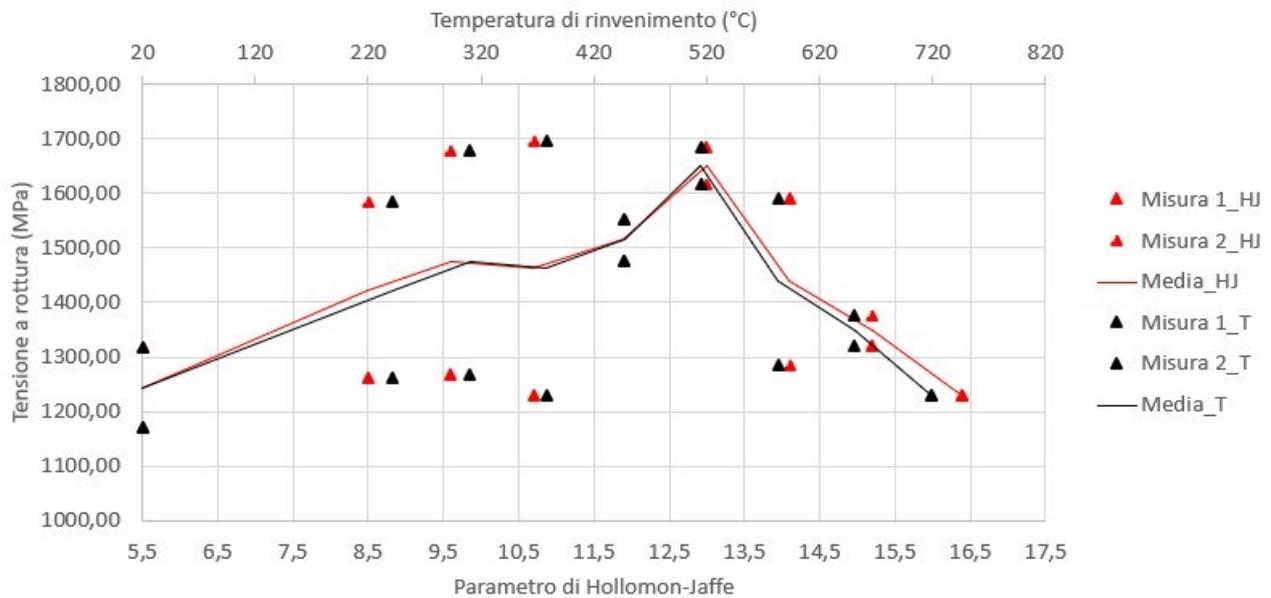


Figura 3.22: Tensione di rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

La tensione di rottura cresce fino ad un massimo che si trova in corrispondenza della temperatura di 515°C e a cui corrisponde il valore di 13,0 del parametro di Hollomon-Jaffe per poi decrescere rapidamente.

Tabella 3.16: Tensione di rottura  $R_m$  per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle relative temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv.	Misura <sub>1</sub> (MPa)	Misura <sub>2</sub>	Media
16,4	719	1206,11	1097,47	1151,79
15,2	651	1376,75	1148,50	1262,62
14,1	583	1515,76	1428,06	1471,91
13,0	515	1797,29	1604,79	1701,04
11,9	447	1973,76	1935,00	1954,38
10,7	378	2018,76	2070,28	2044,52
9,6	310	1934,80	2060,08	1997,44
8,5	242	2036,97	2021,05	2029,01
5,5	Tal Quale	2036,97	1840,55	1934,65

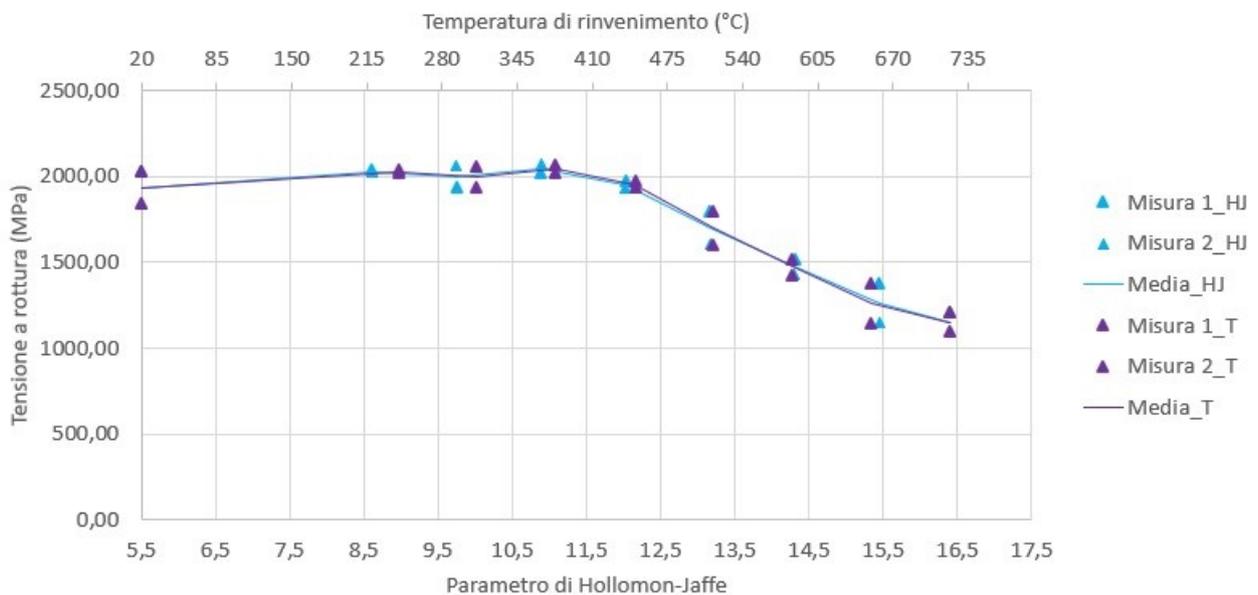


Figura 3.23: Tensione di rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento termico per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

la tensione di rottura in tal caso aumenta in un primo intervallo di temperatura per poi decrescere nel tratto successivo.

A seguire si confrontano le misure di tensione a rottura per i diversi trattamenti termici di rinvenimento.

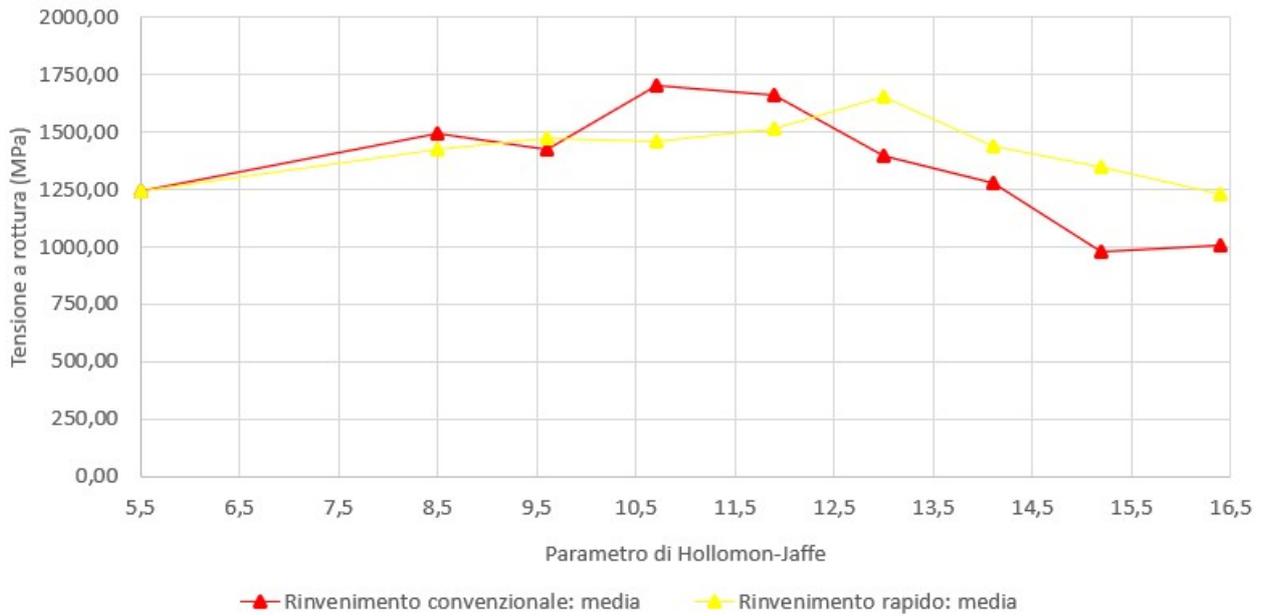


Figura 3.24: Tensione a rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media.

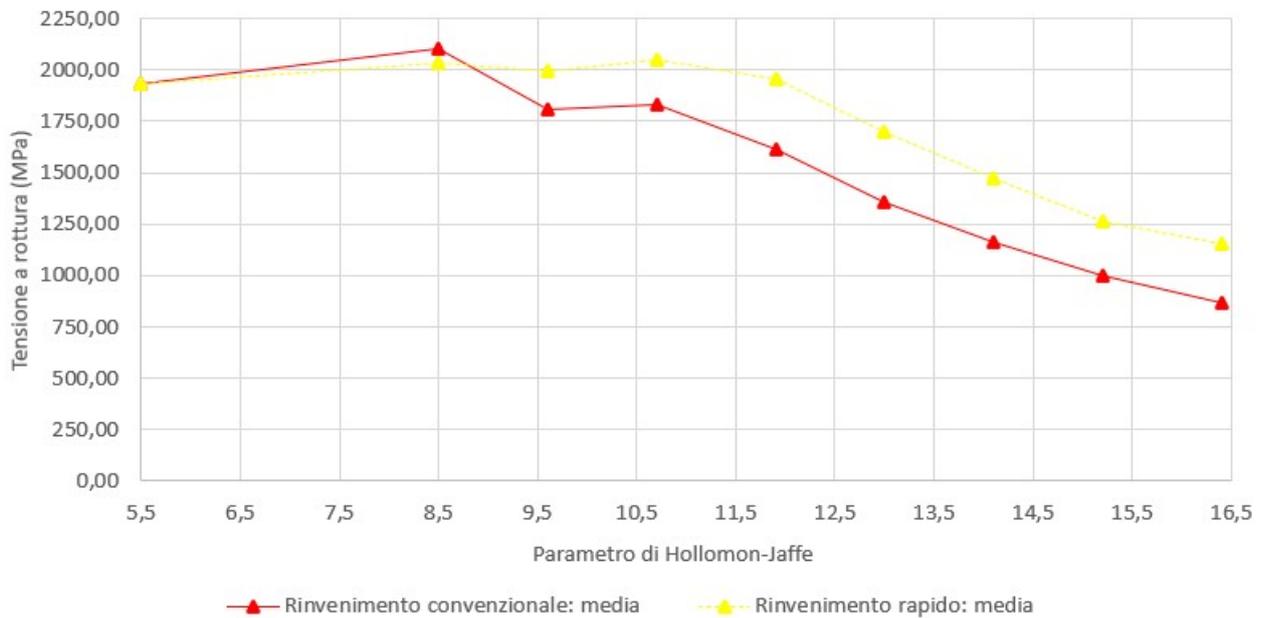


Figura 3.25: Tensione a rottura  $R_m$  vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media.

### 3.3.4 Allungamento uniforme plastico permanente

Tabella 3.17: Misura dell'allungamento uniforme Ag per le coppie di provini in acciaio 39Ni-CrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	600	11,13	10,75	10,94
15,2	540	10,65	11,14	10,89
14,1	480	10,91	10,63	10,77
13,0	420	10,12	10,29	10,21
11,9	360	10,52	10,22	10,37
10,7	300	10,47	10,33	10,40
9,6	240	10,63	10,35	10,49
8,5	180	10,26	10,56	10,41
5,5	Tal Quale	10,16	10,22	10,19

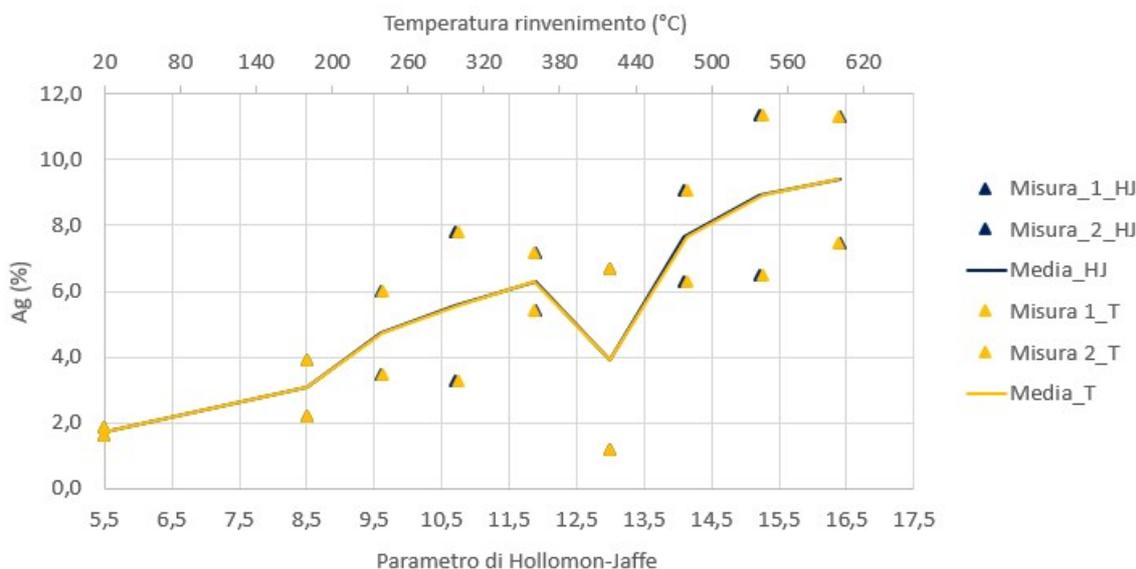


Figura 3.26: Allungamento uniforme vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.18: Misura dell'allungamento uniforme Ag per le coppie di provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti alle varie temperature del trattamento termico e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	600	12,00	11,13	11,56
15,2	540	10,88	11,04	10,96
14,1	480	10,33	10,80	10,57
13,0	420	10,65	10,24	10,44
11,9	360	10,93	10,68	10,80
10,7	300	10,76	10,93	10,85
9,6	240	10,07	10,87	10,47
8,5	180	10,15	10,84	10,50
5,5	Tal Quale	10,10	10,13	10,12

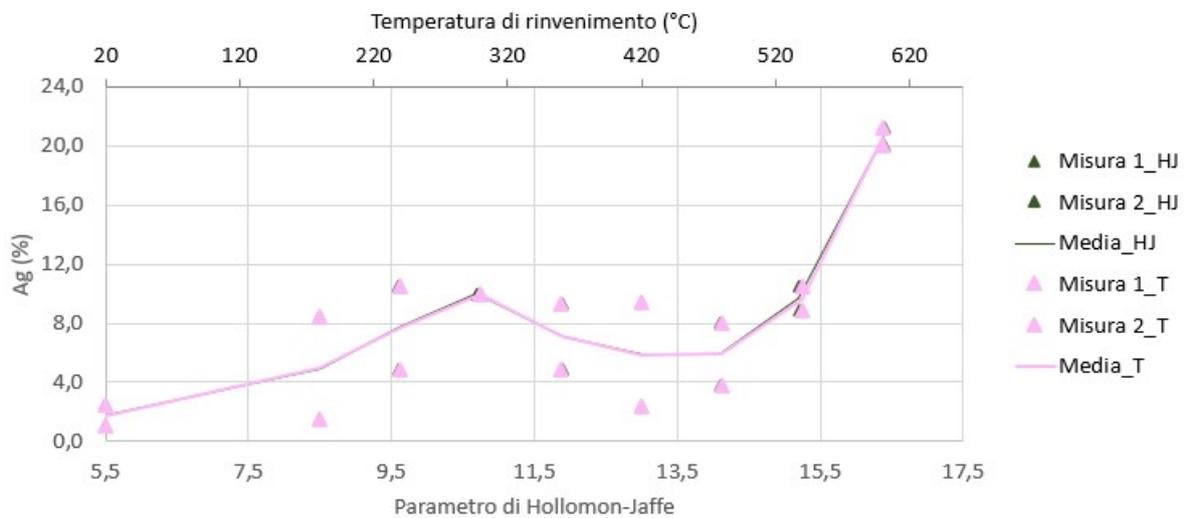


Figura 3.27: Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e media.

Tabella 3.19: Allungamento uniforme Ag per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	719	10,71	10,71	10,71
15,2	651	11,09	11,11	11,10
14,1	583	10,74	10,74	10,74
13,0	515	10,43	10,42	10,42
11,9	447	10,29	10,29	10,29
10,7	378	10,22	10,25	10,23
9,6	310	10,31	10,34	10,32
8,5	242	10,13	10,16	10,14
5,5	Tal Quale	10,06	10,06	10,06

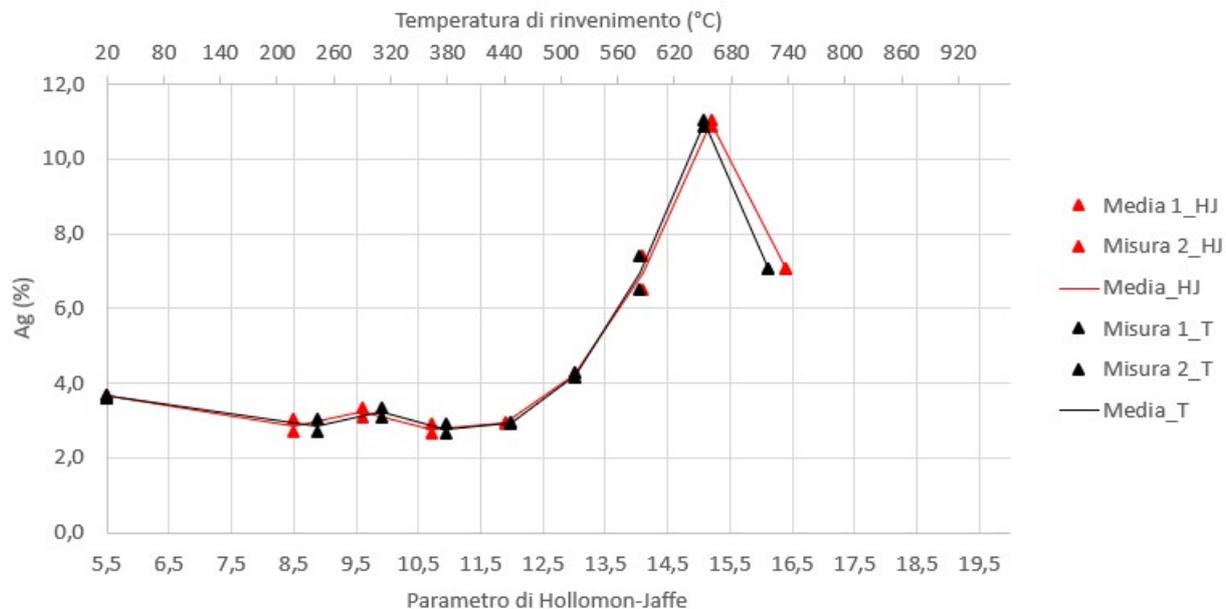


Figura 3.28: Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di trattamento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.20: Allungamento uniforme Ag per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori individuati del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	719	10,51	10,59	10,55
15,2	651	10,56	10,55	10,56
14,1	583	10,24	10,28	10,26
13,0	515	10,14	10,17	10,16
11,9	447	10,19	10,22	10,21
10,7	378	10,19	10,19	10,19
9,6	310	10,36	10,37	10,37
8,5	242	10,34	10,40	10,37
5,5	Tal Quale	10,10	10,09	10,10

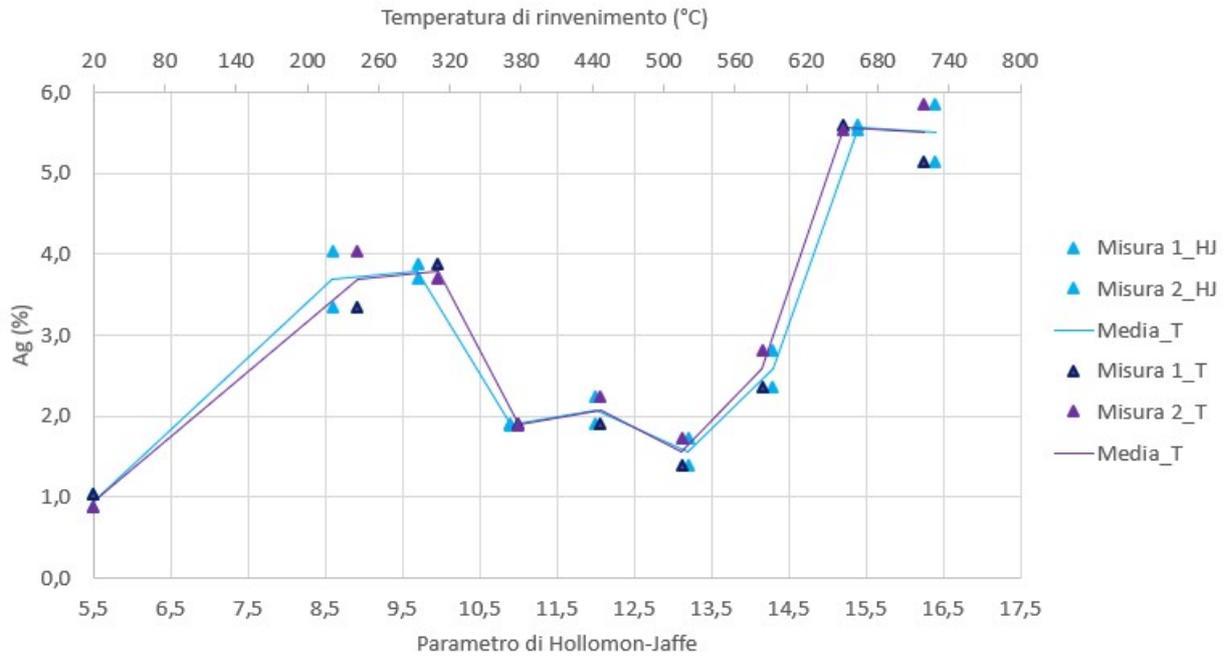


Figura 3.29: Allungamento uniforme percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub> e Misura<sub>2</sub>.

A seguire si confrontano le misure di allungamento uniforme percentuale in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe per i differenti trattamenti termici di rinvenimento.

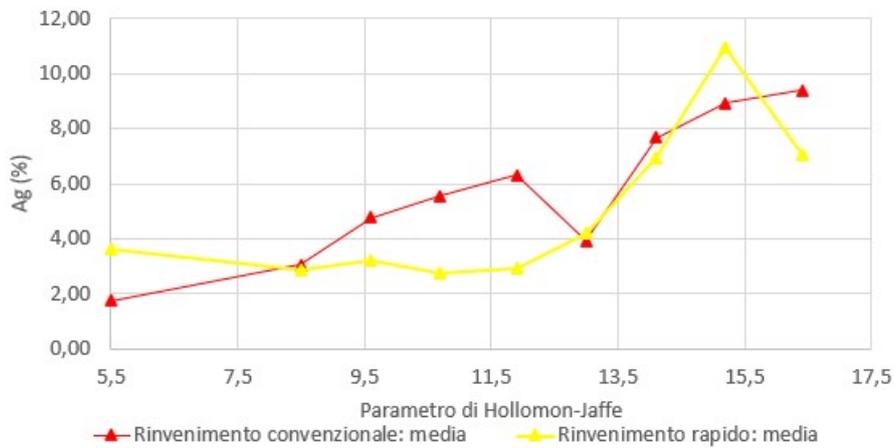


Figura 3.30: Allungamento uniforme Ag vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media.

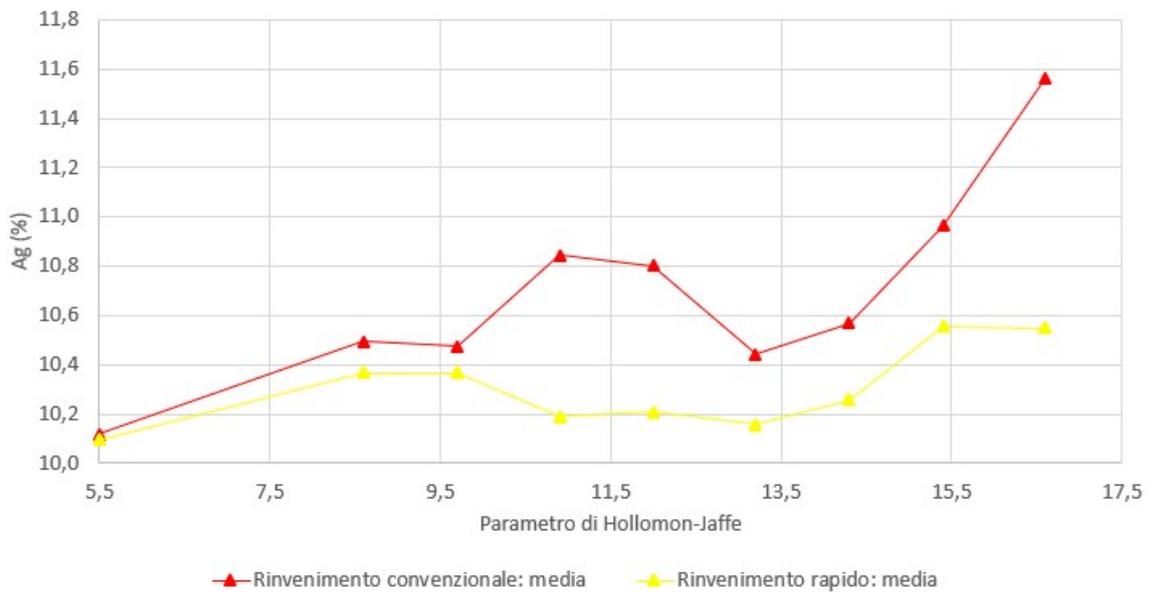


Figura 3.31: Allungamneto uniforme Ag vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: media.

### 3.3.5 Allungamento a rottura

Tabella 3.21: Allungamento a rottura A(%) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv.	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	600	7,03	6,22	6,63
15,2	540	5,36	5,58	5,47
14,1	480	4,73	4,29	4,51
13,0	420	4,25	4,08	4,17
11,9	360	3,44	3,95	3,69
10,7	300	2,51	2,51	2,51
9,6	240	1,63	2,00	1,81
8,5	180	1,47	2,00	1,74
5,5	Tal Quale	1,24	1,31	1,27

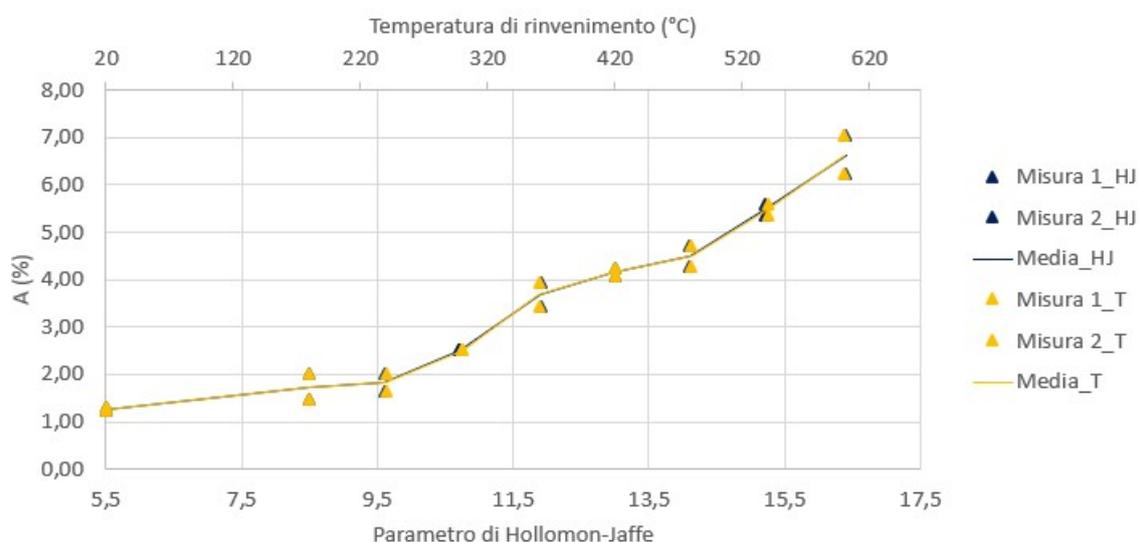


Figura 3.32: Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura di rinvenimento per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Media.

Tabella 3.22: Allungamento a rottura A(%) per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di Rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Valore <sub>medio</sub> (%)
16,4	600	9,80	9,12	9,46
15,2	540	8,17	7,37	7,77
14,1	480	5,56	5,73	5,64
13,0	420	3,98	4,34	4,16
11,9	360	4,24	3,92	4,08
10,7	300	4,41	4,34	4,37
9,6	240	3,97	3,66	3,81
8,5	180	3,53	3,92	3,72
5,5	Tal Quale	2,97	2,14	2,55

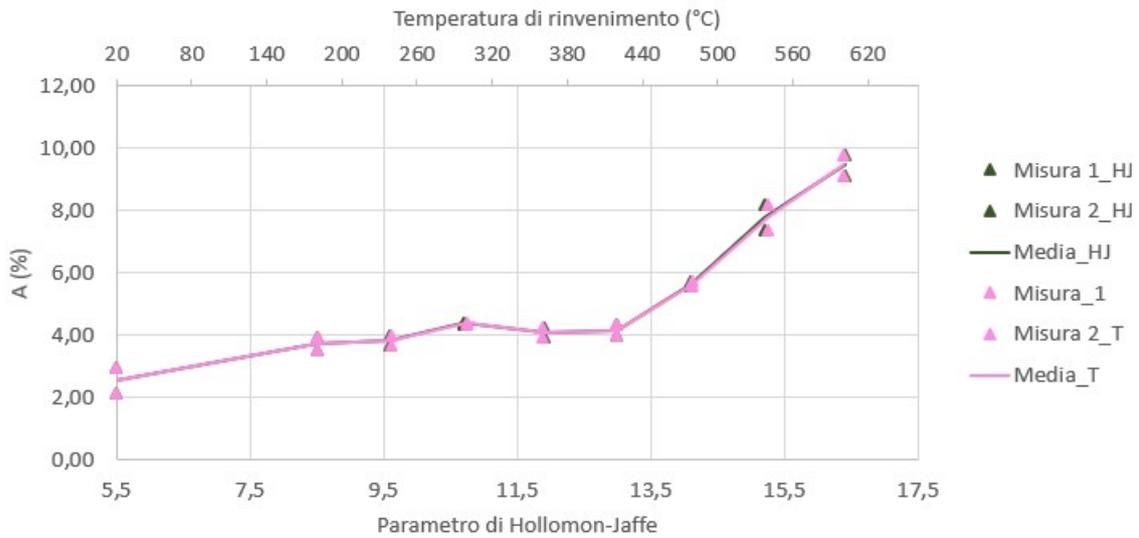


Figura 3.33: Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe vs temperatura del trattamento (°C) per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.23: Allungamento a rottura A(%) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	719	7,84	7,86	7,85
15,2	651	8,04	8,10	8,07
14,1	583	5,76	5,69	5,73
13,0	515	3,55	4,08	3,81
11,9	447	2,18	1,80	1,99
10,7	378	1,57	2,16	1,86
9,6	310	1,65	2,18	1,91
8,5	242	1,35	2,16	1,75
5,5	Tal Quale	1,43	1,51	1,47

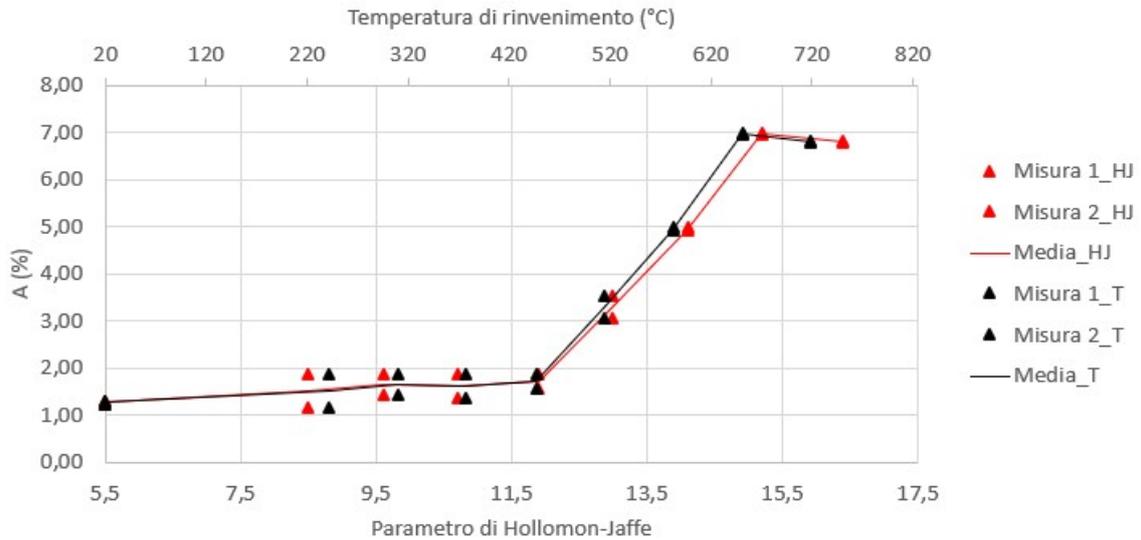


Figura 3.34: Allungamento a rottura percentuale vs temperatura del trattamento (°C) per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

Tabella 3.24: Allungamento a rottura A(%) per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento rapido, corrispondenti ai valori del parametro di Hollomon-Jaffe e alle temperature di trattamento termico.

Parametro di H-J	Temp. di rinv. (°C)	Misura <sub>1</sub> (%)	Misura <sub>2</sub> (%)	Media (%)
16,4	719	7,76	8,78	8,27
15,2	651	5,24	7,92	6,58
14,1	583	5,49	5,59	5,34
13,0	515	3,03	5,46	4,25
11,9	447	2,53	2,32	2,42
10,7	378	3,10	4,98	4,04
9,6	310	2,44	3,32	2,88
8,5	242	2,83	2,97	2,90
5,5	Tal Quale	2,97	2,14	2,55

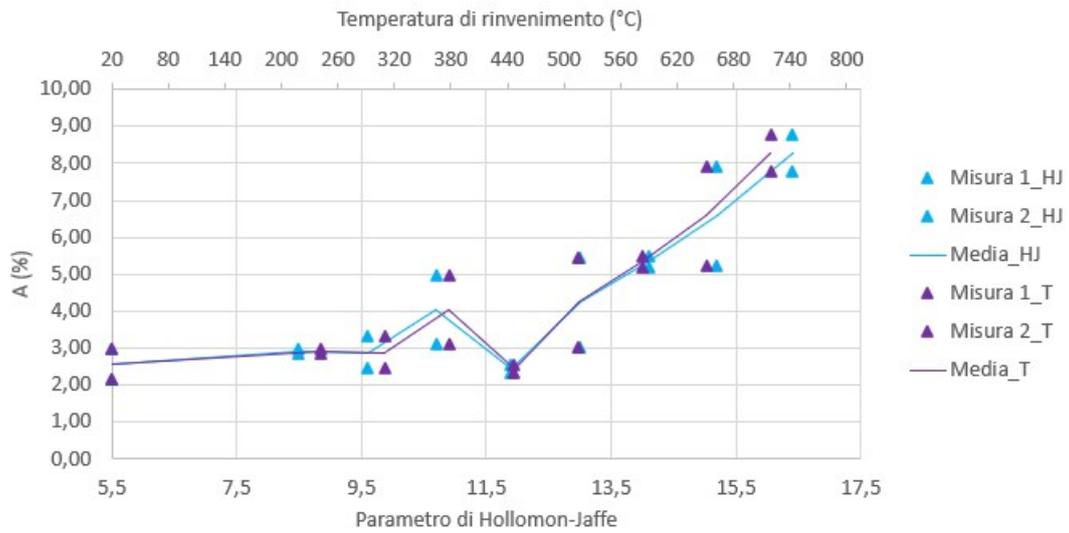


Figura 3.35: Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Misura<sub>1</sub>, Misura<sub>2</sub> e Media.

A seguire si confrontano le misure di allungamento a rottura percentuale in funzione del parametro di Hollomon-Jaffe per i differenti trattamenti termici di rinvenimento.

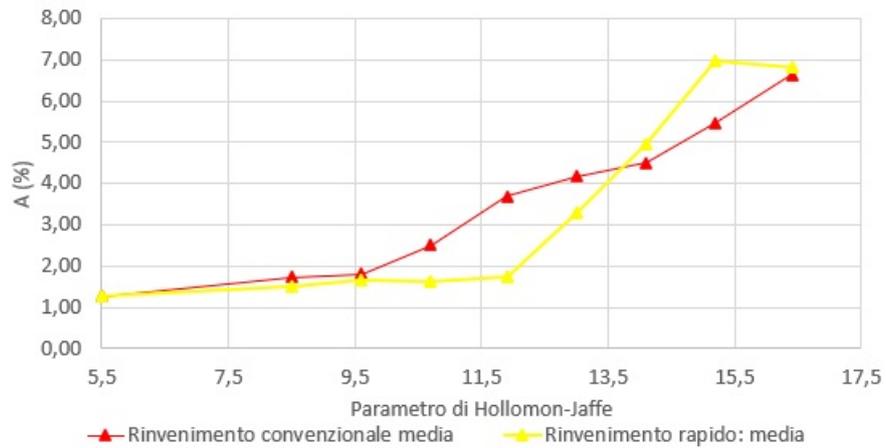


Figura 3.36: Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media.

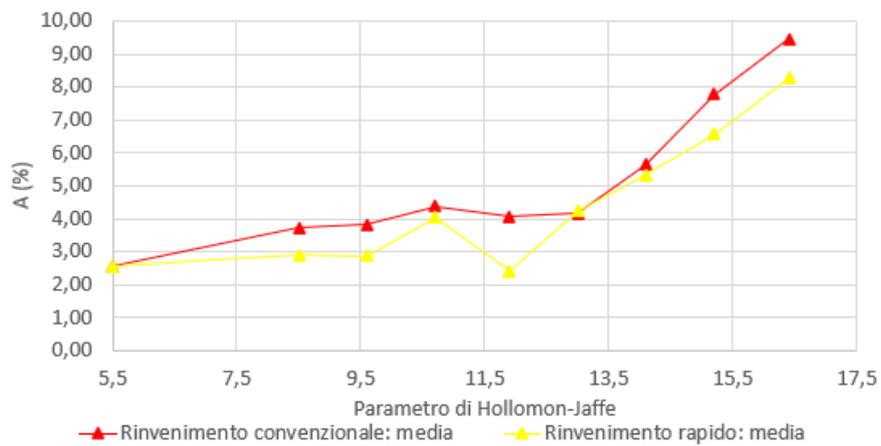


Figura 3.37: Allungamento a rottura percentuale vs parametro di Hollomon-Jaffe per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rapido: Media.

## 4 Conclusioni

A seguire si riportano, per uguale parametro di Hollomon-Jaffe, i risultati in termini di tensione di snervamento e allungamento uniforme permanente per i diversi trattamenti termici di rinvenimento, convenzionale e rapido.

Tabella 4.1: Coppie di punti tensione di snervamento (MPa) - allungamento uniforme (%) per i provini in 39NiCrMo3.

Parametro H-J	Rinvenimento convenzionale		Rinvenimento rapido	
	R <sub>p0,2</sub>	Au	R <sub>p0,2</sub>	Au
16,4	913,89	9,39	1161,11	7,06
15,2	905,56	8,92	1255,56	10,97
14,1	1188,89	7,68	1327,78	6,96
13,0	1188,89	3,92	1413,89	4,22
11,9	1476,39	6,30	1322,22	2,93
10,7	1513,89	5,54	1359,33	2,78
9,6	1230,56	4,76	1347,22	3,22
8,5	1302,78	3,06	1272,22	2,87

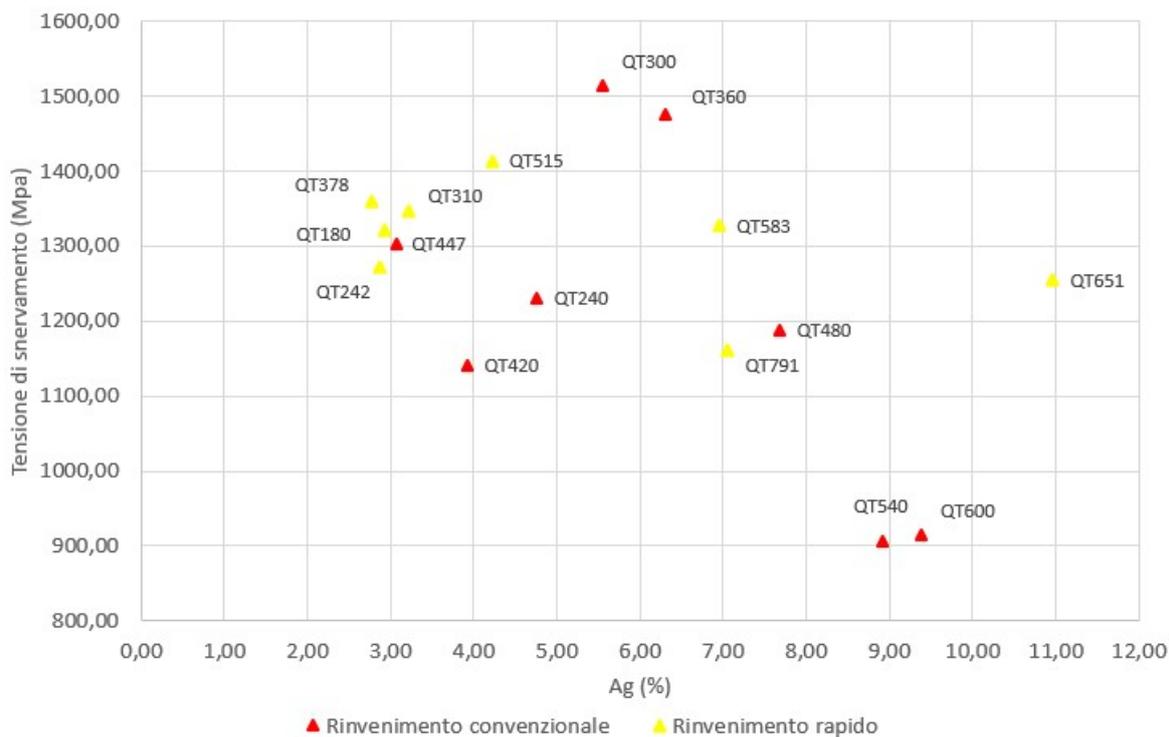


Figura 4.1: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs allungamento uniforme per i provini in acciaio 39NiCrMo3 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rinvenimento rapido.

Nel caso dell'acciaio 39NiCrMo3, i risultati non permettono di individuare una chiara discriminante in relazione alla quale stabilire la convenienza di realizzare il trattamento termico di rinvenimento rapido piuttosto che convenzionale. Nel dettaglio:

- risulta sconveniente, sia in termini di allungamento uniforme plastico permanente che di tensione di snervamento, realizzare un rinvenimento rapido per valori del parametro di Hollomon-Jaffe pari a 8,5, 10,7 e 11,9;
- realizzare il trattamento termico di rinvenimento rapido assicura migliori risultati in termini di allungamento uniforme plastico permanente e di tensione di snervamento per valori del parametro di Hollomon-Jaffe pari a 15,2 e 13,0;
- per valori del parametro di Hollomon-Jaffe pari a 16,4 e 14,1 il trattamento termico di rinvenimento rapido assicura maggior valori di tensione di snervamento a scapito però dell'allungamento uniforme plastico permanente.

Tabella 4.2: Coppie di punti tensione di snervamento (MPa) - allungamento uniforme (%) per i provini in C45.

Parametro H-J	Rinvenimento convenzionale		Rinvenimento rapido	
	R <sub>p0,2</sub>	Au	R <sub>p0,2</sub>	Au
16,4	755,56	9,39	1041,67	7,06
15,2	897,22	8,97	1150,00	10,97
14,1	1072,22	7,68	1369,44	6,96
13,0	1272,22	3,92	1455,56	4,22
11,9	1477,78	6,30	1502,78	2,93
10,7	1577,78	5,54	1538,89	2,78
9,6	1522,22	4,76	1341,67	3,22
8,5	1316,67	3,06	1338,89	2,87

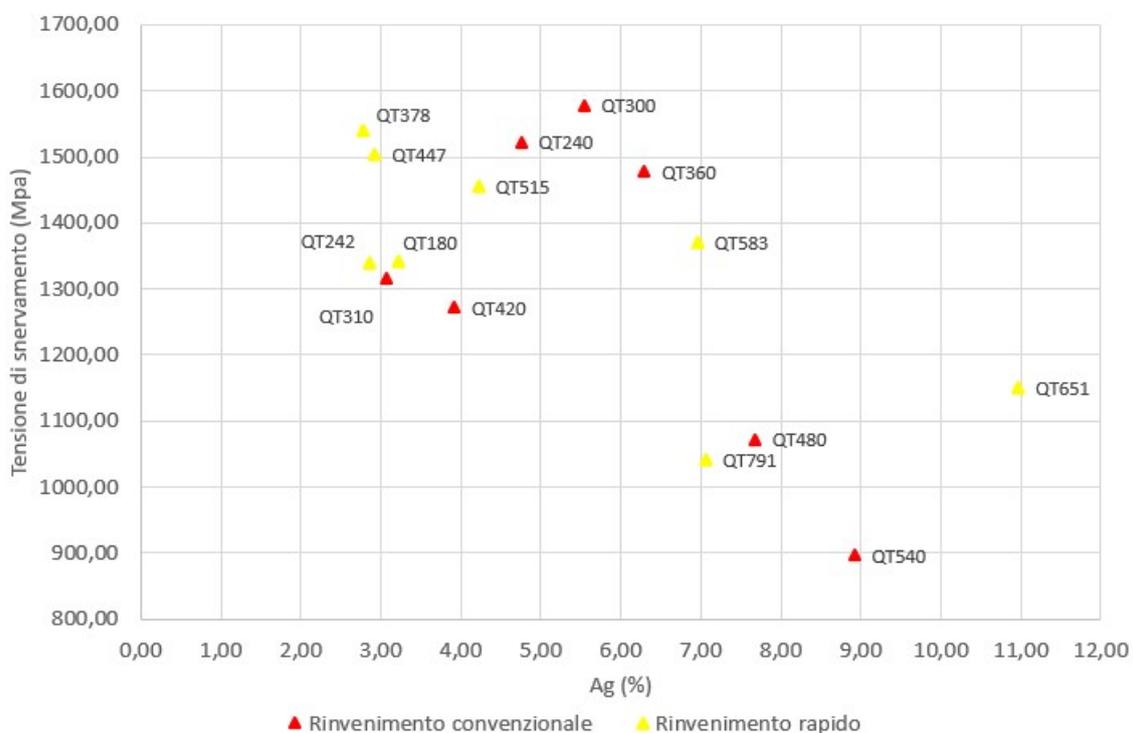


Figura 4.2: Tensione di snervamento  $R_{p0,2}$  vs allungamento uniforme per i provini in acciaio C45 sottoposti a rinvenimento convenzionale e rinvenimento rapido.

Nel caso dell'acciaio C45 è invece possibile evincere dai risultati indicazioni più precise:

- il trattamento termico di rinvenimento convenzionale è da preferire a quello rapido per valori del parametro di Hollomon-Jaffe pari a 8,5, 9,6, 10,7 e 11,9 oltre che per 14,1;
- è conveniente, in termini di allungamento uniforme plastico permanente, realizzare un trattamento termico di rinvenimento rapido piuttosto che convenzionale per valori del parametro di Hollomon-Jaffe pari a 16,4, 15,2 e 13,0.

# Bibliografia

- [1] Krauss, G., *Steels: Processing, Structure, and Performance*, ASM International, 2005.
- [2] Lement, B.S., Averbach, B.L. and Cohen, M. *Microstructural Changes on Tempering Iron-Carbon Alloys*. Transactions of the ASM 46, pp. 851–877 (1954).
- [3] Werner, F., Averbach, B. and Cohen, M. *The Tempering of Iron-Carbon Martensite Crystals*. Transactions of the ASM 49, pp. 823–841 (1957).
- [4] M.A. Grossmann and E.C. Bain *Principles of Heat Treatment*, 5th ed., American Society for Metals, 1964.
- [5] J.H. Hollomon and L.D. Jaffe *Time-Temperature Relations in Tempering Steel*, Trans. AIME, 1945, 162, pp. 223–49.
- [6] Horn, R.M. and Ritchie, R.O. *Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloy Steels*. Metallurgical Transactions A9, pp. 1039–1053 (1978).
- [7] Bhadeshia, H.K.D.H. and Edmonds, D.V. *Tempered Martensite Embrittlement: Role of Retained Austenite and Cementite*. Metal Science (1979).
- [8] Peters, J.A., Bee, J.V., Kolk, B. and Garrett, G.G. *On the Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement*. Acta Materialia 37, pp. 675–686 (1989).
- [9] V.K. Euser, D.L. Williamson, K.D. Clarke, K.O. Findley, J.G. Speer, and A.J. Clarke, *Effects of Short-Time Tempering on Impact Toughness, Strength, and Phase Evolution of 4340 Steel Within the Tempered Martensite Embrittlement Regime*, Metall. Mater. Trans. A, 2019, 50(August), pp 3654–62.
- [10] V.K. Judge, J.G. Speer, K.D. Clarke, K.O. Findley, and A.J. Clarke, *Rapid Thermal Processing to Enhance Steel Toughness*, Sci. Rep., 2018, 8(January), pp. 1–6.
- [11] S. Sturiale, *Rinvenimento rapido e convenzionale su acciaio a medio carbonio legato e non legato: analisi e confronti*. Marzo, 2021.
- [12] EN ISO 6507-1, 2018.
- [13] UNI ISO 10002, 2019.