

## ANALISI STATISTICA DELLE PROPRIETÀ TENSILI DI MATERIALI METALLICI AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

G. Zonfrillo

*Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via di S.Marta, 50139 Firenze, e-mail: giovanni.zonfrillo@unifi.it*

### Sommario

È stata sviluppata una metodologia per determinare possibili andamenti comuni nelle variazioni con la temperatura delle proprietà tensili di leghe diverse. A questo scopo sono stati introdotti vari parametri, combinazioni delle principali variabili ottenute da una prova di trazione, e ne è stata analizzata la loro variazione in funzione della temperatura, interpolandone gli andamenti con leggi di tipo lineare e parabolico in scala sia lineare che logaritmica. I dati utilizzati (provenienti in maggior parte direttamente dalle aziende produttrici) sono relativi a 270 materiali, suddivisi in classi in base al principale elemento in lega. Utilizzando opportuni criteri che consentono di poter stimare l'accuratezza complessiva di molteplici regressioni, sono stati determinati due parametri, dipendenti dal modulo di Young e dai carichi di snervamento e di rottura, i cui andamenti in funzione della temperatura risultano quantitativamente simili per tutti i materiali di una determinata classe.

### Abstract

A methodology was developed to determine a common trend in the variation with temperature of the tensile properties relating to different alloy. For this purpose several parameters, combinations of the main variables obtained from tensile tests, were introduced and analysed as a function of temperature, using both linear and logarithmic scales. The resulting trends were fitted with linear and parabolic regressions. The data used, relating to 270 materials, come mainly from manufacturers; these data were grouped in classes, according to the main element in the alloy. The overall accuracy of the several regressions performed was evaluated by means of suitable variables. Two parameters - depending from Young's modulus, yield strength and UTS values - were determined; their trends with temperature are quantitatively similar for every material of a specific class.

**Parole chiave:** Proprietà tensili, alta temperatura.

### 1. INTRODUZIONE

Per la progettazione di componenti soggetti a valori di temperatura maggiori di quella ambiente sono necessari dati relativi alle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali determinate alla temperatura di esercizio. Come noto, all'aumentare della temperatura si osserva normalmente una riduzione nella resistenza dei materiali metallici, associata ad un aumento di duttilità; non è quindi corretto fare riferimento a risultati di prove condotte a temperatura ambiente. Tuttavia, poiché la variazione delle proprietà in molti casi segue un andamento che è qualitativamente analogo, è possibile valutare approssimativamente il degrado delle caratteristiche meccaniche di una determinata lega facendo riferimento al comportamento di materiali simili.

Il lavoro si propone di indagare la possibilità di determinare delle relazioni statistiche che permettano di stimare l'evoluzione di alcune proprietà tensili con la temperatura, a partire dalla conoscenza di dati a temperatura ambiente. Nella letteratura tecnica sono presenti moltissimi articoli [1-5] che trattano

della variazione delle proprietà meccaniche di un materiale in funzione della temperatura, ma sono generalmente di tipo sperimentale e spesso relativi ad una singola lega. Anche relativamente ai valori più comunemente utilizzati e diffusi quali il carico di rottura ( $\sigma_r$ ) e di snervamento ( $\sigma_y$ ), non si trovano studi che abbiano proposto relazioni valide per intere classi di materiali.

In alcuni articoli sono presenti delle formulazioni analitiche che, sebbene siano relative a determinate leghe e/o a particolari proprietà, è utile considerare per analizzare i parametri presenti e il tipo di funzione considerata per esprimere le variazioni delle caratteristiche con la temperatura.

In [6], per una lega da saldatura viene riscontrato un andamento lineare con la temperatura del carico di rottura e di quello di snervamento, come pure del modulo di elasticità. Kurek e al. [7] analizzano la variabilità di alcune proprietà cicliche e propongono un andamento parabolico con la temperatura per il carico di snervamento ciclico per acciai basso e alto legati, mentre non rilevano variazioni significative per le ghise. In [8] viene osservato un andamento pressoché costante del carico di snervamento, normalizzato rispetto al modulo di elasticità tangenziale, in funzione del reciproco del logaritmo della temperatura. Per un acciaio inossidabile Chirkova e al. [9] propongono alcune relazioni per stimare l'andamento di varie proprietà in funzione della temperatura, tra cui  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$ , il modulo di elasticità, la riduzione di area a rottura. In particolare per le prime due variabili gli autori propongono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sigma_{ya} e^{\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)} \\ \sigma_r &= \sigma_{ra} e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)}\end{aligned}\quad (1)$$

dove  $\sigma_{ya}$  e  $\sigma_{ra}$  sono i valori a temperatura ambiente,  $T$  la temperatura in gradi Kelvin e  $T_a$  quella ambiente,  $\alpha$  e  $\beta$  costanti del materiale determinate sperimentalmente.

In [10] - basandosi su dati tratti da [11] e relativi a 145 prove effettuate su 21 diversi acciai - la variazione del carico di rottura, adimensionalizzato rispetto al valore a temperatura ambiente, viene approssimata con una legge polinomiale del quarto ordine:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_{ra}} = 0,975 + 0,432 \cdot 10^{-3} T - 0,115 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,104 \cdot 10^{-8} T^3 - 0,595 \cdot 10^{-12} T^4 \quad (2)$$

in cui  $T$  deve essere espressa in °F. Analoga relazione viene proposta per il coefficiente  $KT$  che esprime la variazione del limite di fatica con la temperatura.

In [12], utilizzando parametri delle grandezze adimensionalizzati rispetto ai valori a  $T$  ambiente, gli autori propongono per  $KT$  una relazione che correla le proprietà di resistenza con quelle di duttilità.

Nel presente lavoro è stata realizzata una metodologia attraverso la quale è possibile effettuare una stima delle variazioni delle proprietà tensili di acciai e leghe con la temperatura. L'obiettivo è quello di fornire uno strumento per valutare l'affidabilità di relazioni, valide per classi di leghe, che possano stimare quantitativamente l'andamento di alcuni parametri comunemente usati nella progettazione meccanica, a partire dalla conoscenza di dati a temperatura ambiente. A questo scopo è stato creato un database che potesse raccogliere dati sulle caratteristiche meccaniche di leghe metalliche e successivamente permetterne un'analisi. Sono stati quindi definiti vari parametri, combinazione dei valori di proprietà ottenuti da prove di trazione, ed analizzata sistematicamente la loro variazione con la temperatura. Per stimare quale parametro fosse il più indicato per rappresentare il comportamento della totalità dei materiali presenti nel database (o di tutti quelli appartenenti a determinate classi, precisate nel seguito) è stato definito un criterio di valutazione basato su più variabili indicative dell'errore commesso nella previsione.

## 2. DATABASE LEGHE

Il database realizzato contiene i risultati di prove di trazione condotte a varie temperature. Per la sua costruzione è stato utilizzato il software Microsoft Access, scelto per la sua diffusione, l'intuitività di

utilizzo e la possibilità di adattamento e compatibilità con diverse piattaforme hardware.

Il reperimento dei dati è avvenuto attraverso molteplici fonti, ma la maggior parte delle informazioni proviene direttamente dalle aziende produttrici, in seguito a contatti diretti o alla consultazione dei loro siti web. Sono stati raccolti documenti principalmente sulla produzione di aziende quali Haynes International, IMS Spa, Special Metals e Aubert&Duval. In misura minore sono presenti anche dati recuperati in letteratura su volumi specializzati. Non sono stati inseriti dati provenienti da articoli scientifici, anche se è possibile includerli, per dare maggiore uniformità all'insieme dei valori raccolti.

## 2.1. Struttura del database

Due sono le parti fondamentali che compongono il database: “archivio materiali”, in cui sono censiti tutti i materiali, e “archivio valori”, dove ad ognuno di essi sono associate le proprietà tensili a varie temperature.

I campi principali di cui è composta la prima tabella sono:

- *Identificativo*, numero naturale che individua il materiale.
- *Designazione* del materiale fornita dall'azienda ed eventuale sua equivalenza secondo EN, WN, AISI, UNS. Questa ridondanza nella nomenclatura è necessaria in quanto le varie industrie identificano una lega secondo la normativa che ritengono più opportuna.
- *Composizione*, espressa come percentuale in peso degli elementi presenti nella lega.
- *Produttore*, indica il nome dell'azienda produttrice.
- *Note*, utilizzata per riportare informazioni non comprese nelle altre voci.
- *Allegato*, immagine o archivio in formato pdf associato al record, generalmente contenente il dépliant del materiale. Rappresenta un ottimo strumento per la conoscenza di ulteriori dettagli sulla lega in quanto la documentazione è spesso molto approfondita e le informazioni disponibili, ma non rese visibili direttamente nel database, sono numerose.

L'archivio valori è articolato principalmente nelle seguenti voci:

- *Identificativo*, coincide col campo già presente nell'archivio materiali; indica a quale lega si riferiscono i dati inseriti.
- *Data*, indica quando il dato è stato inserito nel database.
- *Trattamento ed Ambiente*, indicano rispettivamente il trattamento termico che ha subito la lega e le condizioni ambientali in cui sono state effettuate le prove a cui si riferiscono i dati. Sono informazioni essenziali per distinguere valori riferiti a una stessa lega sottoposta a trattamenti termici diversi. Nella successiva elaborazione leghe in diverse condizioni di fornitura sono state considerate come materiali diversi.
- *Temperatura*, valore della temperatura a cui è stata effettuata la prova di trazione e rilevati i valori delle proprietà.
- *Snervamento, Rottura, Allungamento e Modulo*, sono i valori del carico di snervamento (0.2% di deformazione plastica residua), di quello di rottura, dell'allungamento percentuale a rottura e del modulo di elasticità di un dato materiale, nelle condizioni e alla temperatura specificate nei campi precedenti. In alcuni casi sono stati riportati valori che l'azienda produttrice definisce come “minimi”. Questo fatto non comporta nessuna problematica in quanto tali valori sono quelli normalmente utilizzati nella progettazione.
- *Fonte*, identifica la provenienza dei dati.
- *Affidabilità*, è espressa con un numero intero, da 1 a 5, che arbitrariamente il compilatore immette, insieme ai dati, nel database; indica l'attendibilità e la precisione delle informazioni presenti nel record stesso. Le direttive che hanno guidato nella scelta di questo valore sono relative alla completezza delle informazioni e all'accuratezza dei valori delle proprietà meccaniche. Ad esempio, ad un dato fornito dall'azienda produttrice ma in mancanza di specifiche sul trattamento termico utilizzato è attribuito un valore pari a 3; in presenza di queste informazioni ma riscontrando l'uso di un'approssimazione sui valori del carico di snervamento e rottura, questo sale a 4. A valori provenienti da grafici e non da tabelle (attualmente non presenti nel database) è associata un'affidabilità non superiore a 2. A dati trovati in volumi specializzati, riportati senza fornire ulteriori informazioni sul materiale oltre alla composizione, è stato attribuito un valore di affidabilità pari ad 1.

## 2.2. Statistiche sulla popolazione

I materiali considerati sono stati suddivisi in classi secondo quanto riportato in tab. 1. Sono stati raccolti dati per 270 materiali diversi per un totale di 2236 record; sempre nella stessa tabella è mostrata la suddivisione in macroclassi, definite in funzione dell'elemento principale in lega.

Tabella 1. Suddivisione in classi dei materiali

Classe del materiale	n° materiali	macroclasse	n° materiali
Lega di alluminio serie 1	3		
Lega di alluminio serie 2	14		
Lega di alluminio serie 3	6		
Lega di alluminio serie 4	1	Leghe Al	55
Lega di alluminio serie 5	17		
Lega di alluminio serie 6	10		
Lega di alluminio serie 7	4		
Acciaio inox austenitico	10		
Acciaio inox martensitico	14	Leghe Fe	62
Acciaio inox duplex	1		
Superlega di Fe	37		
Superlega di Ni	132	Leghe Ni	135
Superlega di Ni ODS	1		
Superlega di Ni single crystal	2		
Superlega di Co	18	Leghe Co	18
Totale			270

Ogni record contiene i valori relativi ad una prova di trazione effettuata ad una determinata temperatura. Non sempre i record sono completi: nel 10% dei casi circa non sono presenti i valori del carico di rottura e dell'allungamento percentuale, ma in particolare mancano molti dati relativi ai valori del modulo elastico a temperatura maggiore di quella ambiente (circa il 60%).

Per ogni lega i valori di temperatura considerati variano da un minimo di 3 ad un massimo di 15, con una media di 8,28 record per materiale, come mostrato in fig. 1.

La suddivisione dei record e dei materiali secondo le macroclassi è mostrata in fig. 2. La classe più rappresentata è quella delle leghe di Ni, mentre le leghe a base Co sono in numero decisamente inferiore.

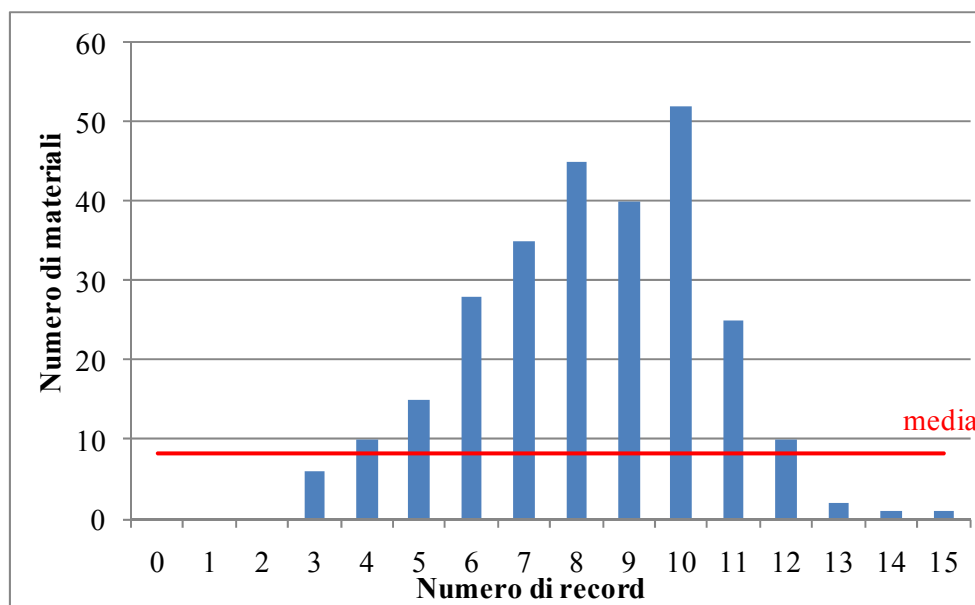


Figura 1. Distribuzione dei materiali in funzione del numero di record

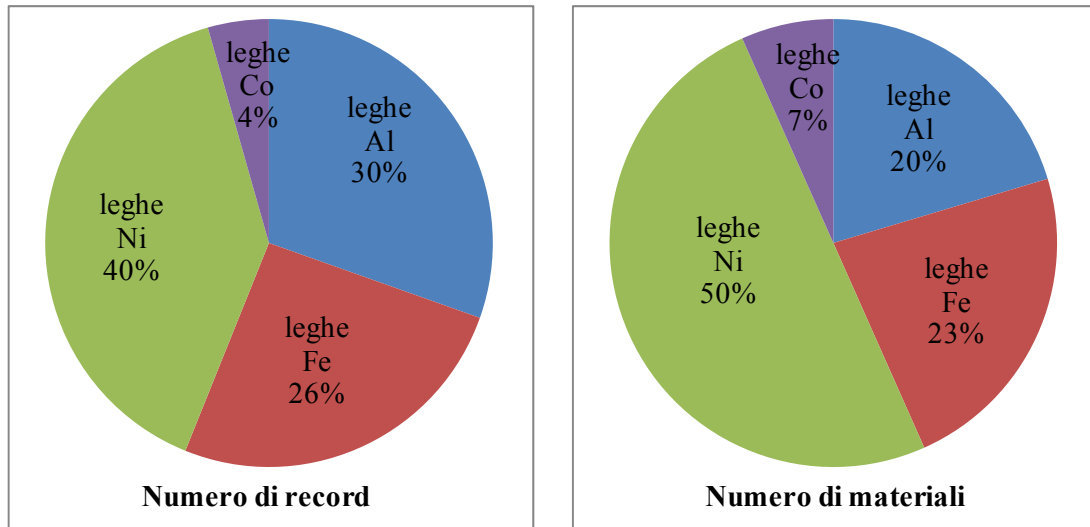


Figura 2. Suddivisione dei record e dei materiali in funzione delle macroclassi

### 2.3. Andamenti comuni

L'analisi dei dati presenti nel database ha permesso di determinare alcuni schemi, seguiti dalla maggior parte delle leghe, dell'andamento qualitativo di  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$  in funzione della temperatura. Come confermato dai dati presenti in letteratura [13,14], queste variabili presentano una diminuzione nei valori al crescere della temperatura. I due comportamenti più frequenti sono mostrati in fig. 3. In un caso si ha inizialmente un calo leggero dei valori, seguito da una drastica riduzione; nell'altro la variazione è più graduale, con un tratto a maggiore pendenza per valori intermedi della temperatura. Ci sono chiaramente delle eccezioni, con andamenti diversi da quelli descritti e anche materiali che presentano un comportamento "non convenzionale", con un andamento non monotono nei valori di resistenza a trazione al variare della temperatura, ma sono in numero ridotto. Non è però intenzione di questo lavoro discutere le ragioni per cui si verifica tale comportamento non tipico di alcune leghe, che molto probabilmente richiede considerazioni di tipo metallurgico.

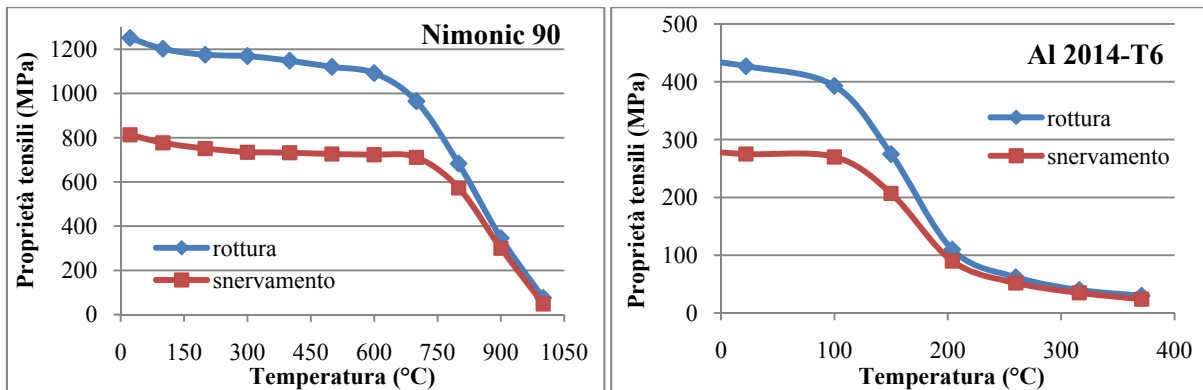


Figura 3. Andamenti tipici delle proprietà di resistenza tensili con la temperatura

## 3. ELABORAZIONE

I dati presenti nel database sono stati sistematicamente elaborati al fine di valutare, sia pure in modo statistico, la variazione dei valori del carico di snervamento e di rottura con la temperatura. In altre parole, è stata esaminata la possibilità di determinare quantitativamente un andamento comune dei dati di resistenza a trazione, opportunamente scalati per confrontare materiali con diverse caratteristiche. A questo scopo inizialmente è stato analizzato l'andamento di  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$ , adimensionalizzati dividendoli per i corrispondenti valori o per il modulo di elasticità ( $Y_a$ ) a temperatura ambiente, senza ottenere risultati significativi.

Sono stati quindi introdotti 30 diversi parametri (riportati nella tab. A1 in appendice), combinazioni delle principali variabili ottenute da una prova di trazione, e ne è stata analizzata sistematicamente la loro variazione in funzione della temperatura: ogni parametro (sia in scala lineare che logaritmica) è stato riportato in funzione della temperatura (come pure del suo logaritmo) e l'andamento approssimato con una regressione lineare e con una di tipo parabolico, per un totale di 8 regressioni per ciascun parametro. Tali operazioni sono state effettuate sia su ciascun materiale, sia sull'insieme di tutti i materiali appartenenti ad una macroclasse, mentre non sono stati esaminati raggruppamenti dei materiali secondo le classi.

Nell'effettuare le regressioni paraboliche, le leghe per le quali erano disponibili dati solo a tre valori della temperatura non sono state considerate nell'analisi. Similmente, nel caso in cui nel database fosse mancante il valore di una variabile necessaria per l'indagine il materiale in questione è stato escluso.

### 3.1. Metodo di valutazione

Per esaminare la mole di dati provenienti dall'elaborazione è necessario definire delle variabili che permettano di stabilire il grado di approssimazione delle regressioni effettuate e quindi l'utilità di un determinato parametro a rappresentare il comportamento dei vari materiali. Questo risulta fondamentale in quanto la procedura utilizzata nell'analisi è fondamentalmente di tipo fenomenologico e quindi necessita di un sistema di valutazione che determini quantitativamente la corrispondenza delle relazioni esaminate con i dati sperimentali.

In prima analisi, per ciascuna regressione è stato calcolato il valore del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ). Per una valutazione più accurata, per ciascun dato è stato calcolato sia il valore assoluto dell'errore relativo commesso nell'interpolazione ( $E_{rel}$ ), che il rapporto tra il valore calcolato ed il corrispondente valore sperimentale ( $R_p$ ), ottenendo due diverse popolazioni che sono state analizzate statisticamente. In particolare, per quanto riguarda l'errore relativo sono stati calcolati la media ( $\bar{E}_{rel}$ ) ed i quartili della distribuzione in frequenza, mentre per il rapporto, oltre al valore medio ( $\bar{R}_p$ ), è stato calcolata la percentuale di materiali per i quali questo è compreso in bande, ottenute moltiplicando e dividendo i valori sperimentali per dei fattori definiti.

Un motivo per cui sono state prese in considerazione più variabili indicative dell'errore è dovuto alla necessità di dover confrontare tra loro regressioni effettuate su insiemi di dati diversi. Infatti lo scopo è trovare la miglior combinazione dei dati sperimentali che possa essere approssimata con una semplice legge in funzione della temperatura e non la miglior regressione di un insieme determinato di valori.

Inoltre, si possono presentare dei casi in cui un unico stimatore non dà risultati significativi. Ad esempio, se il valore sperimentale considerato è prossimo a zero, l'errore relativo assume valori molto elevati, anche in presenza di previsioni abbastanza accurate; il confronto con una regressione meno precisa, ma con valori sperimentali lontani dal valore nullo darebbe come migliore quest'ultima. Il rapporto  $R_p$  potrebbe assumere valori negativi (il che sarebbe indicativo un errore notevole), rendendo inaffidabile il valore di  $\bar{R}_p$ . Inoltre valori di  $R_p$  molto piccoli non necessariamente sono indicativi di una predizione accurata; come mostrato ad esempio in fig. 4, l'andamento del rapporto tra  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$  in funzione della temperatura è malamente interpolato da una regressione lineare ( $R^2=0,003$ ), ma il valore di  $R_p$  è inferiore a 1.5 per il 90% dei dati (o a 2 per il 98% dei dati).

Poiché oltre alla bontà di una singola regressione, si deve valutare anche l'errore globale commesso nello stimare il comportamento di un numero rilevante di materiali (e quindi di un corrispondente numero rilevante di regressioni), è necessario definire delle opportune variabili che permettano di soddisfare questa necessità.

Per i motivi illustrati è stato deciso di utilizzare la procedura esposta in [15]. Considerando i materiali di una generica macroclasse  $j$  viene calcolata la frazione di dati ( $E_f$ ) <sub>$j$</sub>  per i quali il valori di  $R_p$  è inferiore a 1,4:

$$(E_f)_j = \frac{\text{numero di dati per cui: } 1/1,4 < R_p < 1,4}{\text{numero totale di dati considerati}} \quad (3)$$

Per ovviare ai problemi mostrati in fig. 4, per ogni generica lega viene effettuata un'ulteriore regressione lineare tra i valori sperimentali  $y_i$  e quelli calcolati  $y_i^*$ :

$$y_i^* = \alpha \cdot y_i + \beta \quad i = 1, 2, \dots, \text{numero di valori presenti in un generico materiale} \quad (4)$$

Chiaramente, più i valori della pendenza  $\alpha$  e dell'intercetta  $\beta$  sono vicini rispettivamente a 1 e 0, più  $y^*$  rappresenta una stima accurata di  $y$ . Inoltre, nel caso in cui  $\beta$  sia considerevolmente maggiore di zero, un valore di  $\alpha$  minore di 1 comporta predizioni migliori rispetto al caso in cui  $\alpha$  sia maggiore dell'unità. Viceversa, nel caso in cui  $\beta$  sia minore di zero è preferibile un valore di  $\alpha$  maggiore dell'unità. I valori di  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $(\alpha + \beta)$  possono perciò essere utilizzati come criteri addizionali per valutare l'accordo tra dati sperimentali e calcolati. A questi si può aggiungere anche il valore del coefficiente di determinazione ( $R^{2*}$ ) della regressione tra  $y_i$  e  $y_i^*$ . In base a queste considerazioni si può definire per un generico materiale  $k$  un ulteriore parametro rappresentativo dell'errore:

$$(E_a)_k = \frac{1}{4} \left[ (1 - |\beta_k|) + (1 - |1 - \alpha_k|) + (1 - |1 - \alpha_k - \beta_k|) + (1 - |1 - R_k^{2*}|) \right] \quad (5)$$

Per un approfondimento dei motivi che portano a questa definizione si rimanda all'articolo citato [15]. Si calcola quindi sia la media  $(\overline{E_a})_j$  dei valori di  $(E_a)_k$  per i materiali appartenenti alla macroclasse  $j$ , sia il valore di  $E_a$ , indicato come  $(E_a)_j$ , ottenuto considerando tutti i dati di questi materiali come un unico insieme. Infine si valuta la media  $(E_m)_j$  delle tre variabili che sono state definite sulla macroclasse  $j$ :  $(E_f)_j$ ,  $(\overline{E_a})_j$ ,  $(E_a)_j$ . Più il valore di queste variabili si avvicina ad 1 e migliore è l'accuratezza della predizione.

Per valutare l'errore commesso globalmente su tutte le macroclassi si considera la media pesata sul numero di materiali di ciascuna delle tre variabili appena definite  $(E_f)_j$ ,  $(\overline{E_a})_j$ ,  $(E_a)_j$ , ottenendo altre tre variabili indicate rispettivamente con  $(E_f)_{tot}$ ,  $(\overline{E_a})_{tot}$ ,  $(E_a)_{tot}$ :

$$(E_f)_{tot} = \frac{\sum_j (E_f)_j \cdot n_j}{\sum_j n_j}; \quad (\overline{E_a})_{tot} = \frac{\sum_j (\overline{E_a})_j \cdot n_j}{\sum_j n_j}; \quad (E_a)_{tot} = \frac{\sum_j (E_a)_j \cdot n_j}{\sum_j n_j}; \quad (6)$$

Dove  $n_j$  è il numero di materiali appartenenti alla macroclasse  $j$ . Infine si può determinare la media aritmetica  $(E_m)_{tot}$  delle tre variabili definite dalla (6).

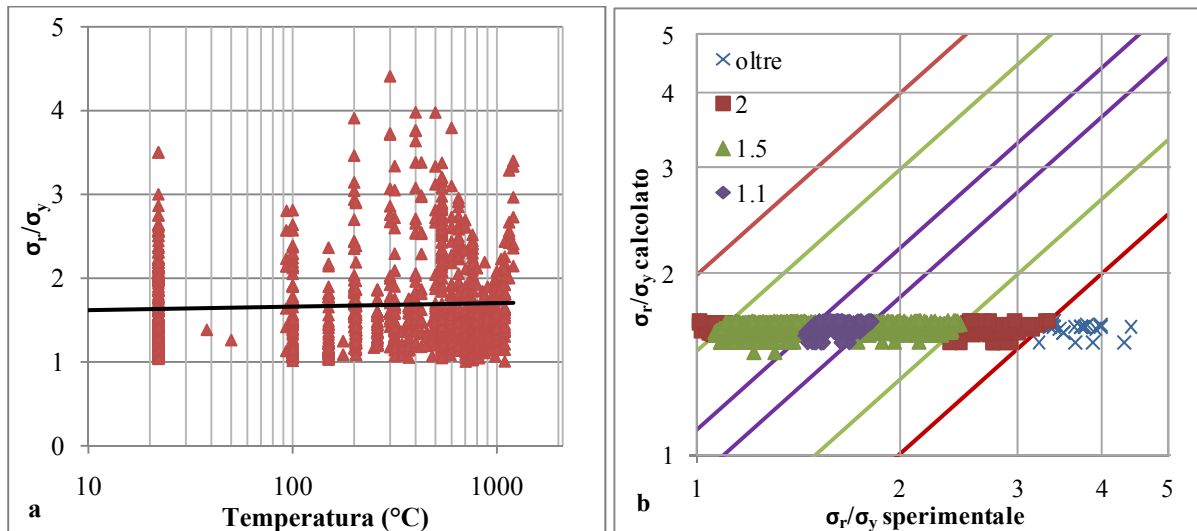


Figura 4. Rapporto  $\sigma_r/\sigma_y$  in funzione della temperatura (a) e confronto tra valori sperimentali e calcolati (b) per tutti i materiali

### 3. RISULTATI

Come già detto in precedenza il lavoro consiste nello studio dell'andamento in funzione della temperatura di diversi parametri, ottenuti combinando opportunamente i dati provenienti da prove di

trazione; i risultati ottenuti possono essere esaminati analizzando i valori delle variabili rappresentative degli errori commessi nelle varie regressioni.

Dato il numeroso numero di regressioni, il quadro totale dei risultati è ampio e non è stato ritenuto utile riportarlo per intero; la sua analisi, indipendentemente dal parametro considerato, consente di affermare che:

- tranne poche eccezioni un'interpolazione dei dati con una legge di tipo parabolico dà risultati migliori rispetto a quelli ottenuti con una regressione lineare;
- la rappresentazione più opportuna è quella in cui la temperatura è in scala lineare, mentre non si ha un'analogia indicazione sulla scala da utilizzare sull'asse delle ordinate, che a seconda dei casi può essere lineare o logaritmica.

In base a queste considerazioni, in tab. 2 sono mostrati i risultati relativi ai cinque migliori parametri, con rappresentazioni in scala lineare e semilogaritmica e interpolati con un polinomio di secondo grado. È interessante notare che il migliore accordo (in grassetto in tab. 2) è ottenuto da parametri diversi a seconda del criterio di errore scelto.

Considerando  $(\overline{E_a})_j$ , che è indice della bontà delle regressioni effettuate separatamente su ciascun materiale appartenente ad una macroclasse, nella maggior parte dei casi i dati sono interpolati con più accuratezza se riportati in scala lineare, mentre il parametro migliore cambia a seconda della macroclasse considerata.

Anche considerando  $(E_f)_j$  i parametri migliori sono diversi al variare macroclasse e presentano valori molto elevati. Ad esempio in fig. 5 è mostrato il confronto tra i valori calcolati (in una rappresentazione semilogaritmica) del parametro (e) in funzione di quelli sperimentali. Poiché con tutti i parametri è possibile ottenere un'approssimazione molto elevata (almeno per il 95% dei dati risulta  $1/1,4 < R_p < 1,4$ ),  $(E_f)_j$  non è discriminante per la scelta del parametro da utilizzare.

Dall'esame dell'errore delle regressioni effettuate sull'insieme di tutti i dati relativi ai materiali di una determinata macroclasse  $(E_a)_j$ , risulta che la rappresentazione più opportuna è quella semilogaritmica e i parametri più indicati sono (d) ed (e). Questi parametri risultano sempre i migliori anche se si considera la media  $(E_m)_j$ .

Tabella 2. Valori delle variabili indicative dell'errore per alcuni parametri

classe	parametro (sigla identificativa)	rappresentazione x-y				rappresentazione x-log(y)			
		$(E_f)_j$	$(\overline{E_a})_j$	$(E_a)_j$	$(E_m)_j$	$(E_f)_j$	$(\overline{E_a})_j$	$(E_a)_j$	$(E_m)_j$
leghe Al	$(\sigma_r - \sigma_y)/Y_a$ (a)	0.79	0.87	0.61	0.76	0.87	0.85	0.56	0.76
	$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$ (b)	0.82	0.95	0.53	0.77	0.94	0.96	0.53	0.81
	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$ (c)	0.68	0.95	0.93	0.85	0.73	0.92	0.92	0.85
	$\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra}$ (d)	0.84	0.94	0.91	0.90	<b>0.97</b>	0.95	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
	$(\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra})/Y_a$ (e)	0.85	0.96	0.92	0.91	0.97	<b>0.96</b>	0.94	0.95
leghe Fe	$(\sigma_r - \sigma_y)/Y_a$ (a)	0.79	0.89	0.52	0.74	0.91	0.90	0.54	0.78
	$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$ (b)	0.98	0.96	0.61	0.85	<b>0.98</b>	<b>0.96</b>	0.58	0.84
	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$ (c)	0.79	0.95	0.75	0.83	0.84	0.91	0.66	0.80
	$\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra}$ (d)	0.96	0.94	0.70	0.87	0.96	0.93	0.70	0.86
	$(\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra})/Y_a$ (e)	0.96	0.95	<b>0.77</b>	<b>0.89</b>	0.96	0.94	0.75	0.88
leghe Ni	$(\sigma_r - \sigma_y)/Y_a$ (a)	0.84	0.91	0.74	0.83	<b>0.96</b>	0.92	0.80	0.89
	$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$ (b)	0.92	0.94	0.72	0.86	0.90	0.95	0.73	0.86
	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$ (c)	0.82	<b>0.97</b>	0.86	0.88	0.71	0.90	0.85	0.82
	$\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra}$ (d)	0.93	0.95	0.84	0.91	0.92	0.95	0.90	0.92
	$(\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra})/Y_a$ (e)	0.93	0.96	0.90	<b>0.93</b>	0.91	0.94	<b>0.91</b>	0.92
leghe Co	$(\sigma_r - \sigma_y)/Y_a$ (a)	0.84	0.93	0.88	0.89	0.96	0.95	0.93	0.95
	$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$ (b)	<b>1.00</b>	0.95	0.82	0.92	0.95	0.96	0.79	0.90
	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$ (c)	0.82	<b>0.98</b>	0.95	0.92	0.92	0.95	0.92	0.93
	$\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra}$ (d)	0.98	0.97	0.96	0.97	<b>1.00</b>	0.96	<b>0.96</b>	<b>0.97</b>
	$(\sigma_y/\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra})/Y_a$ (e)	0.98	0.98	0.87	0.94	<b>1.00</b>	0.97	0.87	0.95



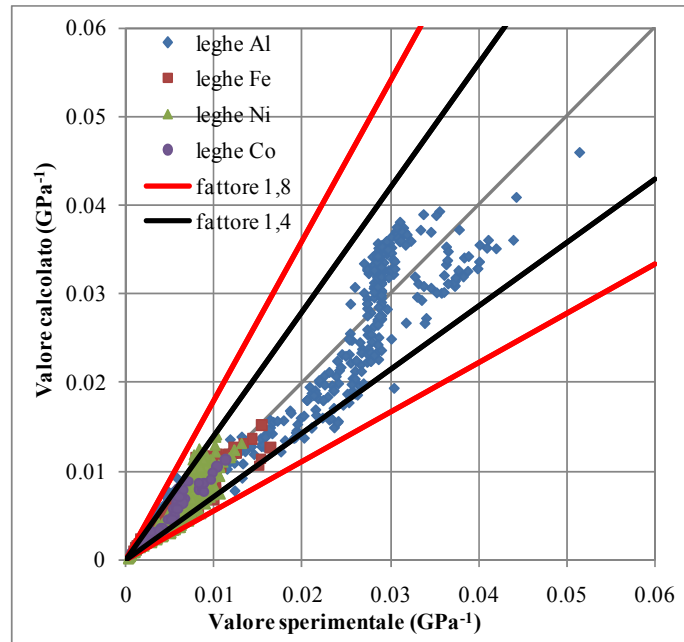


Figura 5. Confronto tra valori sperimentali e calcolati (regressioni paraboliche in scala semilogaritmica) del parametro (e)

In fig. 6 è riportato l'andamento del parametro (e) in funzione della temperatura; tutti i dati relativi ad una determinata macroclasse sono stati interpolati con un'unica regressione. L'accordo è molto buono, fatta eccezione per le leghe di Al, per le quali i valori sperimentali si dispongono in una fascia non proprio ristretta.

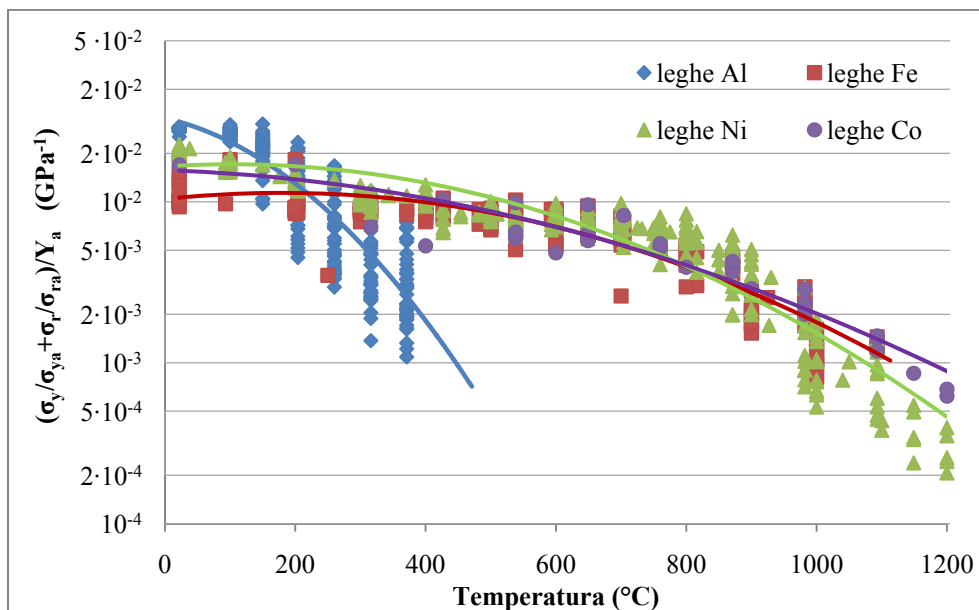


Figura 6. Rappresentazione del parametro (e) in scala semilogaritmica e regressioni sul totale dei dati appartenenti ad una macroclasse

I valori degli errori ottenuti considerando non le singole macroclassi, ma l'insieme di tutti i dati sono riportati in tab. 3 e in linea di massima confermano quanto già detto.

Da quanto mostrato i parametri che meglio rappresentano il comportamento al variare della temperatura sono (d) ed (e). In fig. 7 è riportato l'andamento dei percentili dell'errore relativo ottenuto con il parametro (d) effettuando regressioni sul totale dei valori appartenenti ad una data macroclasse (in una rappresentazione semilogaritmica). Il valore delle mediane si attesta intorno al 15%, mentre un errore del 100% si raggiunge non prima del percentile 95.

Tabella 3. Valori delle variabili rappresentative degli errori mediate sulle macroclassi

parametro (sigla identificativa)	rappresentazione x-y				rappresentazione x-log(y)			
	$(E_f)_{tot}$	$(E_a)_{tot}$	$(E_a)_{tot}$	$(E_m)_{tot}$	$(E_f)_{tot}$	$(E_a)_{tot}$	$(E_a)_{tot}$	$(E_m)_{tot}$
$(\sigma_r - \sigma_y)/Y_a$ (a)	0.81	0.89	0.66	0.79	0.92	0.89	0.67	0.83
$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$ (b)	0.91	0.95	0.64	0.83	0.93	0.96	0.64	0.84
$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$ (c)	0.76	<b>0.96</b>	0.87	0.86	0.75	0.91	0.84	0.84
$\sigma_y/(\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra})$ (d)	0.91	0.95	0.85	0.90	<b>0.95</b>	0.95	0.88	0.93
$(\sigma_y/(\sigma_{ya} + \sigma_r/\sigma_{ra}))/Y_a$ (e)	0.91	0.96	0.88	0.92	0.95	0.95	<b>0.89</b>	<b>0.93</b>

In fig. 8 viene mostrato il numero di valori (in percentuale sul totale) per i quali si ottiene un determinato errore relativo. Tali errori sono quelli ottenuti utilizzando il parametro (e) in scala lineare ed effettuando regressioni su tutti i valori di una macroclasse.

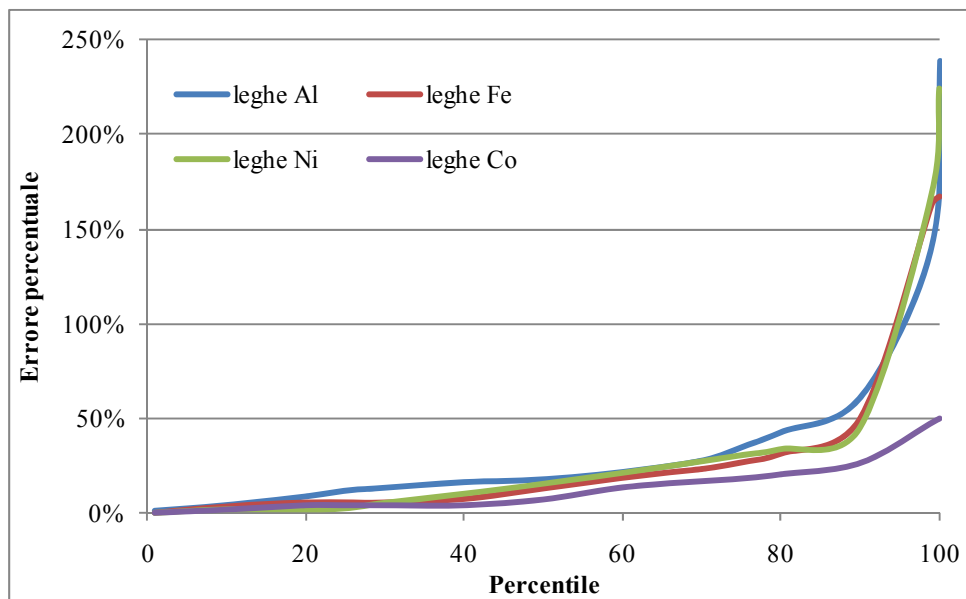


Figura 7. Percentili dell'errore relativo del parametro (d). Regressioni sul totale dei valori appartenenti ad una macroclasse in rappresentazione semilogaritmica.

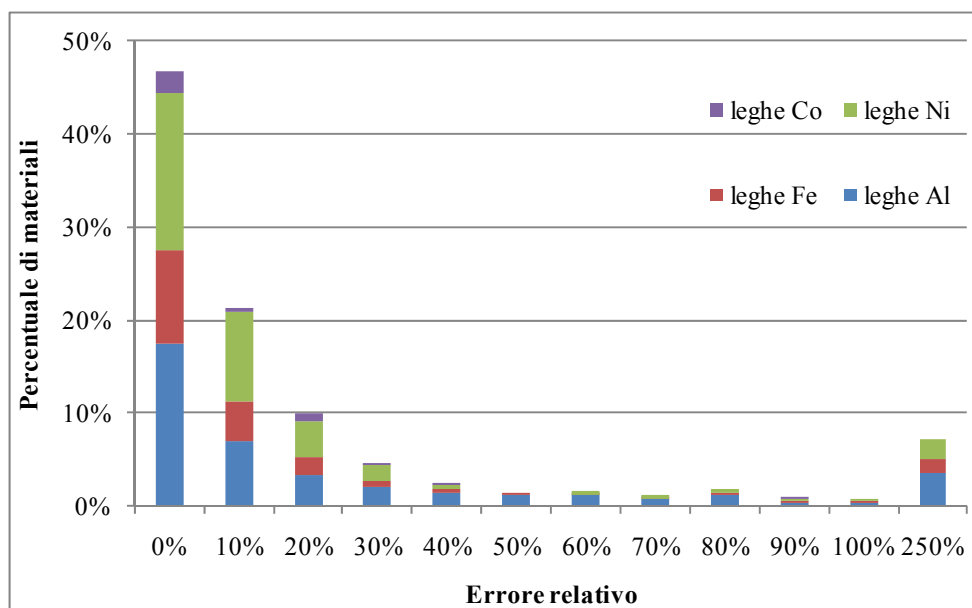


Figura 8. Distribuzione degli errori relativi ottenuti utilizzando il parametro (e). Regressioni sul totale dei valori appartenenti ad una macroclasse in rappresentazione lineare.

## CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo studio consiste nel creare una metodologia attraverso la quale sia possibile fare una stima della variazione dei carichi di snervamento e di rottura al variare della temperatura, fornendo uno strumento per valutare statisticamente l'andamento di tali variabili.

Il database realizzato rappresenta uno strumento pratico per reperire in modo rapido le proprietà tensili di vari materiali e più in generale informazioni utili ai fini della progettazione meccanica.

Il criterio di determinazione degli errori utilizzato permette di poter stimare l'accuratezza complessiva di molteplici regressioni, superando i casi in cui l'utilizzo del rapporto o dell'errore relativo non risulta idoneo.

Risultati significativi sono stati raggiunti solo con parametri che combinano opportunamente i valori di  $\sigma_y$  e di  $\sigma_r$ . Questo non permette una valutazione quantitativa dell'andamento di tali variabili con la temperatura a partire dai soli dati a temperatura ambiente, ma fornisce comunque informazioni utili sul comportamento dei materiali. Un'interessante indicazione consiste anche nella maggiore utilità di rappresentare i dati in funzione della temperatura e non del suo logaritmo.

L'indagine sviluppata è di tipo preliminare e sicuramente suscettibile di miglioramenti.

Una normalizzazione dei valori della temperatura (ad esempio rispetto alla temperatura di fusione) porterebbe senza dubbio ad un miglioramento dei risultati. La difficoltà di reperire dati attendibili sui valori limite della temperatura non ha al momento permesso di perseguire questa strada.

Anche una diversa suddivisione delle leghe in base a specifiche particolarità metallurgiche - come una separazione rispetto al tipo di rafforzamento della lega utilizzato (ad esempio invecchiamento o incrudimento per quanto riguarda le leghe di Al) - potrà guidare le considerazioni puramente fenomenologiche finora effettuate.

Al di là degli specifici risultati raggiunti, la metodologia sviluppata si è comunque rivelata idonea per determinare possibili andamenti comuni nelle variazioni con la temperatura delle proprietà tensili di leghe diverse.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Niitsu, K. Ikegami, "Effect of temperature variation on plastic behaviour of SUS 304 stainless steel", *Bulletin of JSME*, 28(246), 2853-2858 (1985).
- [2] A. Jahn, A. Kovalev, A. Weiß, S. Wolf, L. Krüger, P.R. Scheller, "Temperature depending influence of the martensite formation on the mechanical properties of high-alloyed Cr-Mn-Ni as-cast steels", *Steel Research Int.*, 82(1), 39-44 (2011), doi: 10.1002/srin.201000228.
- [3] S. Nemat-Nasser, W.G. Guo, J.Y. Cheng, "Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium", *Acta Materialia*, 47(13), 3705-3720 (1999).
- [4] C.-W. Tsai, M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, C.-C. Yang, "Effect of temperature on mechanical properties of Al0.5CoCrCuFeNi wrought alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 490, 160-165 (2010), doi: 10.1016/j.jallcom.2009.10.088.
- [5] J. Brnic, M. Canadija, G. Turkalj, D. Lanc, "50CrMo4 steel-determination of mechanical properties at lowered and elevated temperatures, creep behavior, and fracture toughness calculation", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 132(2), 021004 1-6 (2010), doi: 10.1115/1.4000669.
- [6] X.O. Shi, W. Zhou, H.L.J. Pang, Z.P. Wang, "Effect of temperature and strain rate on mechanical properties of 63Sn/37Pb solder alloy", *Journal of Electronic Packaging*, 121, 179-185 (1999), doi: 10.1115/1.2792681.
- [7] M. Kurek, T. Lagoda, K. Walat, "Variations of selected cyclic properties depending on testing temperature", *Materials Science*, 50(4), 555-563 (2015), doi: 10.1007/s11003-015-9753-8.
- [8] I. Nikulin, R. Kaibyshev, V. Skorobogatykh, "High temperature properties of an austenitic stainless steel", *Journal of Physics Conference Series*, 240 (1), (2010), doi: 10.1088/1742-6596/240/1/012071.
- [9] A.G. Chirkova, N.A. Makhutov, M.M. Gadenin, M.I. Kuzeev, V.V. Farkhutdinov, "A computational and experimental method for estimating degradation of mechanical characteristics

of steels under the conditions of high-temperature pyrolysis”, *Inorganic Materials*, 46(15), 1688–1691 (2010), doi: 10.1134/s002016851015015X.

[10] R. Budynas, J.K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, 8<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill (2006).

[11] E. A. Brandes (ed.), *Smithells Metal Reference Book*, 6<sup>th</sup> ed., Butterworth (1983).

[12] N. Costa, F.S. Silva, “On a new temperature factor to predict the fatigue limit at different temperatures”, *Int. Journal of Fatigue*, 33, 624–631 (2011), doi: 10.1016/j.ijfatigue.2010.11.004.

[13] ASM handbook, *Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*, 10<sup>th</sup> ed., 1, ASM International (1990).

[14] J.R. Davis (ed.), *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, ASM International (1997).

[15] J.H. Park, J.H. Song, “Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties”, *Int. J. of Fatigue*, 17(5), 365-373 (1995), doi: 10.1016/0142-1123(95)99737-U.

**APPENDICE**

Tabella A1. Parametri utilizzati nell'analisi

$\sigma_r/\sigma_{ra}$	$\sigma_r/Y_a$	$\sigma_r/\sigma_{ya}$	$\sigma_{ra}-\sigma_r$	$(\sigma_{ra}-\sigma_r)/Y_a$
$\sigma_y/\sigma_{ra}$	$\sigma_y/Y_a$	$\sigma_y/\sigma_{ya}$	$\sigma_{ya}-\sigma_y$	$(\sigma_{ya}-\sigma_y)/Y_a$
$\sigma_r/\sigma_y$	$\sigma_r-\sigma_y$	$(\sigma_r-\sigma_y)/Y_a$	$\sigma_r^2-\sigma_y^2$	$(\sigma_r^2-\sigma_y^2)/Y_a$
$\sigma_y^{1/\sigma_r}$	$\sigma_r^{1/\sigma_y}$	$\sigma_r \sigma_{ya}/\sigma_{ra}$	$\sigma_y \sigma_{ya}/\sigma_{ra}$	$\sigma_y/(\sigma_{ya} \cdot \sigma_{ra})$
$\sigma_y/\sigma_{ya}+\sigma_{ra}/\sigma_r$	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_{ra}/\sigma_r)$	$\sigma_y/\sigma_{ya}-\sigma_r/\sigma_{ra}$	$(\sigma_y/\sigma_{ya})/(\sigma_r/\sigma_{ra})$	$(\sigma_r/\sigma_y)^2 \cdot (\sigma_{ya}/\sigma_{ra})$
$\sigma_{ra}-\sigma_r-\sigma_{ya}+\sigma_y$	$(\sigma_{ra}-\sigma_r-\sigma_{ya}+\sigma_y)/Y_a$	$\sigma_y/\sigma_{ya}+\sigma_r/\sigma_{ra}$	$(\sigma_y/\sigma_{ya}+\sigma_r/\sigma_{ra})/Y_a$	$(\sigma_r/\sigma_y)^2/(\sigma_{ya}/\sigma_{ra})$