

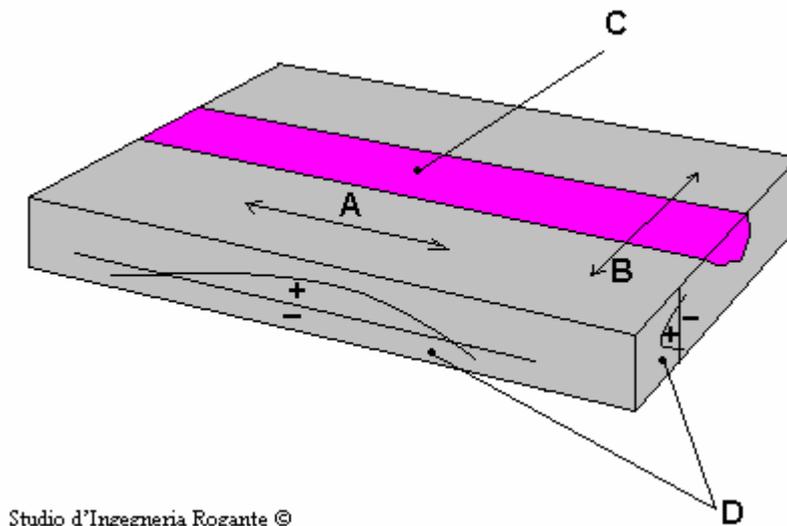


## DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI RESIDUE MEDIANTE DIFFRAZIONE NEUTRONICA

### APPLICAZIONI INDUSTRIALI E CONSULENZA PER L'INDUSTRIA

Le tecniche neutroniche hanno fornito sempre più, negli ultimi anni, un valido contributo per la soluzione di problemi di tipo industriale. La tecnica di diffrazione dei neutroni si è notevolmente sviluppata, ed è impiegabile per ricavare in maniera non distruttiva le tensioni residue in materiali (ad es. acciai, alluminio e sue leghe, superleghe) e componenti (ad es., ingranaggi, giunti saldati, giranti, palette turbina), compresi quelli sottoposti a lavorazioni o a trattamenti termici, meccanici e di superficie.

Le tensioni residue sono definite come quelle interne esistenti in un sistema isolato in equilibrio meccanico, non sottoposto ad alcuna forza o momento dall'esterno. Esse insorgono conseguentemente a processi di produzione e formatura o in seguito a trattamenti, e possono raggiungere livelli assai elevati. Tale è il caso, ad esempio, dei processi di saldatura, i quali coinvolgono elevati gradienti di temperatura da cui possono derivare tensioni residue paragonabili a quelle di snervamento. La contrazione del metallo fuso, durante la solidificazione, è ostacolata dal metallo circostante più freddo; di conseguenza, come schematizzato in figura 1, s'inducono delle tensioni.



Studio d'Ingegneria Rogante ©

Fig. 1. Tensioni indotte dalla saldatura. (A = contrazione longitudinale; B = contrazione trasversale; C = cordone di saldatura; D = tensioni).

Tensioni e deformazioni, ad esempio, possono insorgere in ingranaggi, oppure in dischi di freni successivamente alla produzione e/o all'uso.

Per quanto riguarda le superfici di componenti, è noto che trattamenti superficiali tipo pallinatura o asportazione mediante laser possono facilmente indurre tensioni residue anche a profondità di svariati millimetri. La variazione delle stesse tensioni sale ai massimi livelli entro il primo millimetro sotto la superficie.

Ancora ad esempio, la deposizione di ricoprimenti superficiali ottenuti tramite differenti tecniche produttive dà origine, nel ricoprimento, a forti gradienti di tensioni residue (di trazione o di compressione) che implicano una variazione dei parametri reticolari del materiale costitutivo del ricoprimento. Le tensioni residue nel caso di campioni rivestiti possono manifestarsi con formazione di delaminazione all'interfaccia (nel caso di compressione nel ricoprimento), cricche superficiali (nel caso di trazione nel ricoprimento associata ad un'interfaccia forte) e distacco del ricoprimento (nel caso di trazione nel ricoprimento associata ad un'interfaccia debole).

Le informazioni sulle tensioni residue sia in fase di progetto, sia in quella di manutenzione, possono rivelarsi utili per ottimizzare le prestazioni e l'affidabilità di componenti, macchine ed impianti.

La conoscenza delle tensioni residue, oltre a svolgere un ruolo di primario rilievo nello studio della microstruttura, contribuisce alla soluzione di importanti problematiche riguardanti materiali e ricoprimenti, fornendo dati di considerevole importanza per: pianificare i processi di produzione, migliorare le caratteristiche di qualità e di sicurezza nei materiali e componenti ingegneristici, analizzare le condizioni d'esercizio e controllare le fasi di manutenzione.

La Diffrazione Neutronica consente di determinare le deformazioni e tensioni residue fino a diversi centimetri di profondità dalla superficie esterna (circa 2-3 cm riguardo agli acciai, circa 5-6 cm riguardo all'alluminio e le sue leghe). Una mappa tridimensionale delle deformazioni e tensioni può essere ottenuta per materiali e componenti delle tipologie sopra descritte. La determinazione delle tensioni residue mediante Diffrazione Neutronica fornisce informazioni fondamentali, inoltre, nelle seguenti operazioni:

- analisi degli esiti della concentrazione di tensioni in corrispondenza di intagli o di cricche, in condizioni di carico;
- controllo dell'efficacia di trattamenti distensivi successivi alla saldatura;
- determinazione della frazione di rilassamento delle tensioni, alle temperature operative, in componenti quali giunti laminati e tubi curvi.

Tecniche convenzionali quali la diffrazione dei raggi X, consentono di misurare le deformazioni residue soltanto fino alla profondità di alcuni micron dalla superficie esterna; la Diffrazione Neutronica, pertanto, è l'unico strumento valido per poter realmente conoscere lo stato delle deformazioni e tensioni residue interne.

La conoscenza della distribuzione spaziale delle tensioni residue, ottenibile tramite diffrazione dei neutroni, può consentire una più corretta valutazione di come il componente sia stato influenzato dai precedenti trattamenti, e fornire utili informazioni sia per la progettazione, sia per la realizzazione di componenti per l'industria.

Lo STUDIO D'INGEGNERIA ROGANTE:

- rappresenta un punto di riferimento per l'Industria in Italia ed all'estero per le Applicazioni Industriali delle Tecniche Neutroniche®, ed è fornitore qualificato di note Aziende in campo nazionale;
- grazie al suo network applicativo all'avanguardia, ha sviluppato, per tali applicazioni, apposite procedure di trattamento dati, sempre aggiornate in accordo con eventuali normative esistenti;
- è in grado d'offrire consulenza ed assistenza riguardo ad applicazioni industriali, che comprendono studi definitivi e di fattibilità, e corsi dedicati;
- per quanto concerne il presente argomento, organizza seminari-mini corsi dedicati espressamente all'Industria, che si svolgono direttamente in sede delle aziende interessate; si trasmette, in tal modo, un contributo fondamentale alle medie e grandi industrie italiane - che rappresentano una parte vitale dell'economia nazionale - le quali, per quanto riguarda la tecnica considerata, sono impossibilitate a completare le proprie strutture di ricerca;
- è oggi l'unica struttura privata esistente in Italia in grado di conciliare il mondo innovativo della Ricerca mediante le Tecniche Neutroniche con le esigenze concrete (reali) dell'Industria.

L'utilizzo dei risultati delle investigazioni compiute finora ha fornito un contributo concreto per migliorare le prestazioni del prodotto finito dando, perciò, una spinta nell'avanzamento dell'Industria coinvolta.

Per maggiori informazioni, si prega di [contattarci](#).

## BASI TEORICHE

Le tensioni residue sono determinate impiegando appositi diffrattometri, in cui il fascio di neutroni è monocromatizzato mediante selettori di velocità o tramite cristalli monocromatori orientati; questi ultimi impiegano riflessioni da determinati piani ( $hkl$ ), onde selezionare la lunghezza d'onda desiderata.

Con riferimento alla figura 2, il fascio neutronico proveniente dalla sorgente è monocromatizzato mediante un cristallo che seleziona i neutroni aventi una data lunghezza d'onda (vale a dire, una determinata energia). Il fascio (detto incidente) attraversa, quindi, un collimatore, ed è diffratto dal campione in esame. Il fascio neutronico diffuso (uscente dal campione) attraversa un secondo collimatore, che insieme al primo definisce il volume di misura, usualmente compreso tra il sub-mm<sup>3</sup> ed il cm<sup>3</sup>.

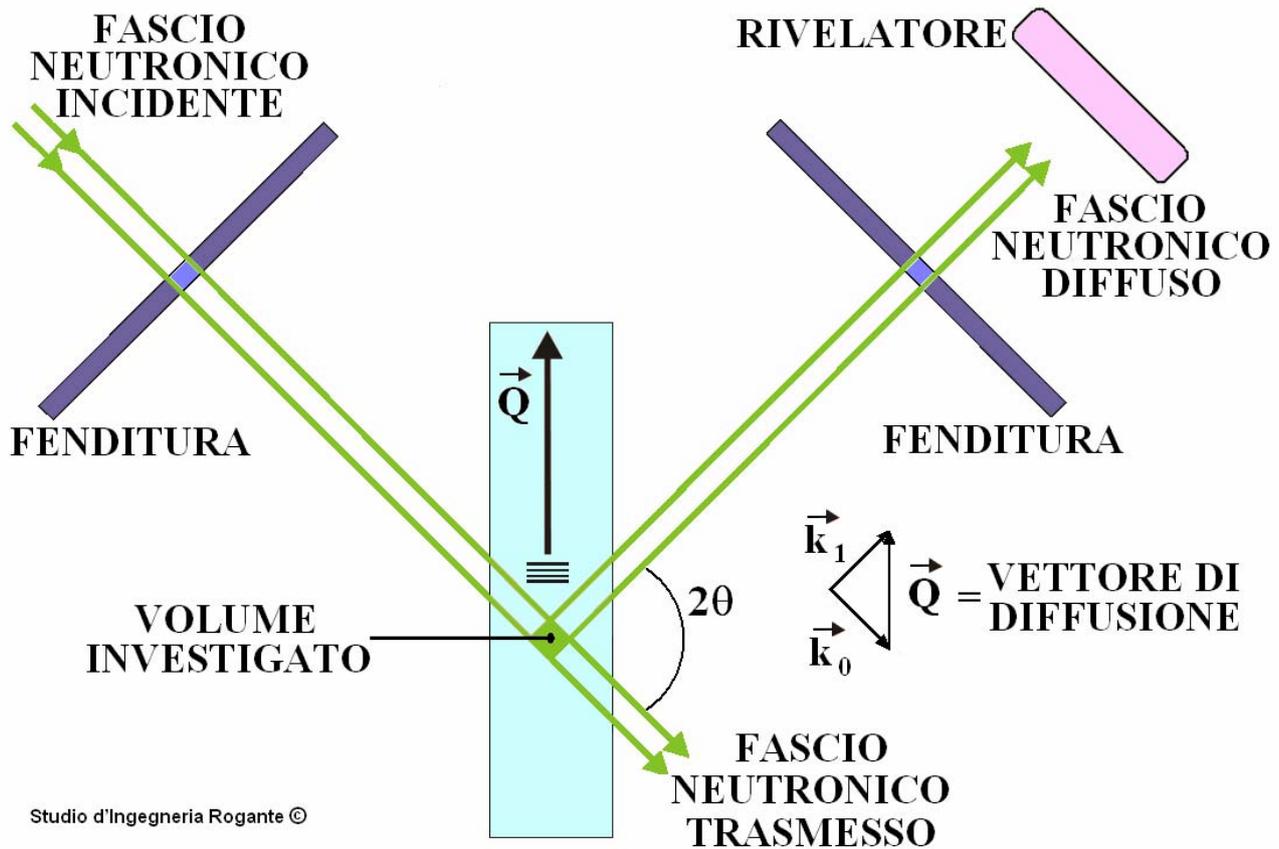


Fig. 2. Rappresentazione schematica della tecnica di misurazione della deformazione tramite diffrazione dei neutroni.

Al fascio incidente ed a quello diffuso sono associati i vettori d'onda rispettivamente denominati  $\underline{k}_0$  e  $\underline{k}_1$ , i cui valori sono:

$$|\underline{k}_0| = |\underline{k}_1| = 2\pi/\lambda \quad (1)$$

Con riferimento alla stessa figura 2,  $\underline{Q}$  rappresenta il vettore di diffusione, il quale definisce la direzione lungo la quale si misura la deformazione, e risulta:

$$\underline{Q} = \underline{k}_1 - \underline{k}_0 = 4\pi\sin\theta/\lambda \quad (2)$$

I valori di  $Q$  corrispondenti ad un picco di diffrazione consentono di misurare il parametro reticolare. Conoscendo  $\lambda$  e misurando l'angolo  $2\theta$  corrispondente al valore massimo del picco di diffrazione (vale a dire, l'angolo in corrispondenza del quale i neutroni sono deflessi con alta intensità), infatti, può essere

valutata la distanza interplanare  $d_{hkl}$  del campione (associata ai piani cristallografici di diffrazione caratterizzati dagli indici di Miller  $hkl$ ), tramite la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (3)$$

in cui  $n$  (numero intero) è l'ordine di diffrazione, e  $2\theta$  è l'angolo del fascio incidente di neutroni rispetto alla superficie dei piani, denominato "angolo di Bragg".

La relazione:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_0}{d_0} \quad (4)$$

consente, successivamente, di calcolare la deformazione elastica corrispondente, sempre riferita ai piani in esame.

Nella stessa formula,  $d_0$  rappresenta la distanza interplanare riferita al materiale in assenza di sforzo. La base fondamentale della valutazione della  $d_0$  è costituita dal reperimento di un campione del materiale considerato il quale possa ritenersi assolutamente privo di deformazioni; una scelta non appropriata del campione può comportare, infatti, degli errori sistematici che dipendono principalmente dai seguenti fattori:

- stato di stress residuo;
- variazioni di composizione chimica o strutturale;
- variazioni della temperatura ambiente durante le misurazioni.

Il valore della  $d_0$  dipende anche dalla densità delle dislocazioni nel campione.

Conoscendo le costanti elastiche del materiale è infine possibile ottenere il valore degli sforzi.

In un modello elasticamente isotropo (avente modulo di Young  $E$  e coefficiente di Poisson  $\nu$ ), le tensioni principali sono in relazione con le deformazioni come segue:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_{zz} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}) \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \right] \\ \sigma_{xx} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Tali equazioni rappresentano le leggi di Hooke nel caso macroscopico, vale a dire quando parecchi grani cristallini sono coinvolti da un unico valore di tensione. Le tensioni residue, infatti, sono classificabili in tre categorie:

Tensioni residue di 1° ordine (tensioni macroscopiche o "macrotensioni"), allorché coinvolgono parecchi grani cristallini. Le stesse rivestono un'importanza cruciale per compiere valutazioni strutturali e progettare componenti meccanici.

Tensioni residue di 2° ordine (microscopiche omogenee o "intergranulari"), quando variano tra grano e grano. Le stesse sono attribuibili alle differenti proprietà termo-meccaniche di grani adiacenti diversamente orientati, e sono correlabili al grado d'incrudimento.

Tensioni residue di 3° ordine, (microscopiche non omogenee o "microtensioni"), allorché variano internamente al grano cristallino auto-equilibrandosi nello stesso. Le stesse sono attribuibili a difetti reticolari (ad es., dislocazioni, soluzioni interstiziali e sostituzionali).

Le tensioni residue sono riconducibili al ciclo produttivo del pezzo e possono insorgere conseguentemente a processi di produzione e formatura, raggiungendo livelli assai elevati. Le stesse possono essere: d'origine meccanica, vale a dire in seguito a lavorazioni meccaniche (ad esempio, fresatura rettifica, tornitura), deformazione plastica (ad es., laminazione, stampaggio, trafilatura) trattamenti meccanici (ad es., martellatura, pallinatura, rullatura); d'origine termica/metallurgica, vale a dire in seguito a trattamenti termici (ad es., cementazione, nitrurazione, tempra), applicazione di ricoprimenti, e saldatura. Quest'ultima coinvolge elevati gradienti di temperatura, da cui possono derivare tensioni residue paragonabili a quelle di

snervamento. Tensioni e deformazioni possono insorgere, ancora ad esempio, in ingranaggi oppure in dischi di freni in seguito alla produzione e/o all'uso.

Lo STUDIO D'INGEGNERIA ROGANTE ha sviluppato, per le Applicazioni Industriali delle Tecniche Neutroniche®, apposite procedure di misurazione e di trattamento dati, ed è fornitore d'importanti industrie ed Enti a livello internazionale.

## I NEUTRONI

I neutroni sono particelle elementari praticamente prive di cariche elettriche, costituenti - assieme ai protoni - il nucleo atomico. La caratteristica di non interagire elettricamente con gli elettroni ed i nuclei nella materia presenta il gran vantaggio di poter penetrare la stessa materia in profondità. Infatti, mentre i raggi x offrono un'eccellente risoluzione ma sono assorbiti facilmente dai materiali (riuscendo a penetrarne soltanto strati superficiali), i neutroni, possedendo un coefficiente d'assorbimento lineare circa 1000 volte più debole rispetto ai primi, penetrano la materia fino a diversi centimetri (circa 2-3 cm riguardo agli acciai, circa 5-6 cm riguardo all'alluminio e le sue leghe).

I neutroni sono prodotti da sorgenti continue (reattori nucleari) oppure da sorgenti pulsate (acceleratori). Nelle sorgenti continue, i neutroni sono prodotti dalla reazione di fissione di nuclei pesanti quali  $^{235}\text{U}$  oppure  $^{239}\text{Pu}$ , ed inizialmente sono caratterizzati da un'energia assai elevata; gli stessi neutroni sono successivamente rallentati ad energie termiche tramite dei moderatori, quindi sono sottoposti a collisioni che li rallentano ulteriormente per condurli in equilibrio termico col mezzo che li circonda. Lo stesso equilibrio termico consente di impiegare il teorema di equipartizione dell'energia come segue:

$$1/2 mv^2 = 3/2 kT \quad (6)$$

ed anche:

$$\lambda^2 = h^2/3mkT \quad (7)$$

in cui  $k$  è la costante di Boltzmann,  $m$ ,  $v$ ,  $\lambda$  sono rispettivamente la massa, la velocità e la lunghezza d'onda del neutrone,  $T$  è la temperatura.

La conseguente distribuzione dei neutroni in funzione delle velocità appartiene al tipo Maxwelliano, ed è tale che la relativa  $\lambda$  sia compresa tra 1.55 e 1.33 Å per  $T$  compresa tra 0°C e 100°C.

Speciali tubi-guida hanno il compito di trasferire i neutroni prodotti dall'interno del nocciolo ai diversi strumenti (ad es., diffrattometri e spettrometri).