

LE TENSIONI INTERNE NEL CORDONE DI SALDATURA TRASVERSALE (*)

(Con cinque figure)

GUIDO GUIDI

SUMMARY. — Auctor breviter exponit conclusiones quas ex antea actis quibusdam studiis deduxit, circa tensionum distributionem in funibus transverse ferruminatis, animadvertens illas conclusiones, praetermissis effectibus plasticitatis metalli, experientia confirmari. Indicat praeterea quomodo possit gradus plasticitatis metalli mensurari; et relationem ex experientiis invenit inter hunc plasticitatis indicem, et coagmenti vim resistendi contra tractionem.

PREMESSE. — I cordoni di saldatura trasversali sono un tipo di collegamento meccanico nel quale le tensioni interne, generate dalle forze applicate agli elementi collegati, si ripartiscono in modo molto complesso.

Si deve innanzi tutto premettere che sulla ripartizione di queste tensioni possono influire le tensioni interne già preesistenti nel giunto, dovute, ad esempio, al ciclo termico che il giunto stesso ha subito durante l'operazione della saldatura; come possono influire le eterogeneità di composizione e di struttura del metallo del cordone di saldatura e delle zone adiacenti, rispetto al metallo base degli elementi collegati, per cui si venga a perdere la perfetta isotropia che deve essere ammessa, come postulato, in ogni ricerca sia teorica che sperimentale.

A questo scopo in tutti i saggi sperimentali si cerca sempre di portarsi quanto più possibile vicino alle condizioni di isotropia del

(*) Nota presentata dall'Accademico Pontificio G. Colonnetti, il 3 dicembre 1939.

materiale, con una opportuna scelta dei metalli, e con una razionale esecuzione della saldatura; nonchè in condizioni di assenza di tensioni interne, con processi di ricottura e bonifica applicati sul giunto dopo che è stato eseguito.

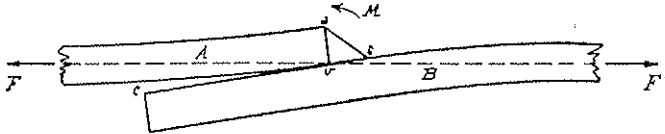


FIG. 1.

Le ricerche sul cordone di saldatura trasversale si possono suddividere in tre grandi categorie:

a) *Ricerche fotoelastiche* eseguite su modelli per lo più in bachelite od in vetro, che ricopiano fedelmente le forme geometriche del giunto, ma che sono in un sol pezzo, e quindi effettivamente senza saldatura.

b) *Ricerche dilatometriche* eseguite su provini metallici, che possono essere in un sol pezzo, come i precedenti, e quindi senza saldatura, oppure formati da due pezzi effettivamente collegati da un cordone di saldatura, ed in questo secondo caso adottando tutti gli accor-

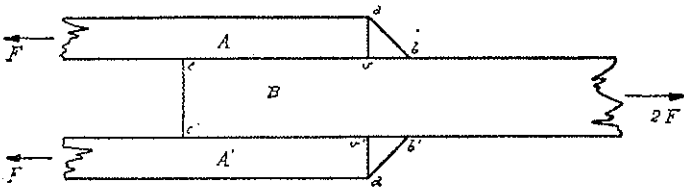


FIG. 2.

gimenti necessari per eliminare, come si è detto, le tensioni interne iniziali, e le eterogeneità di materiale fra cordone e metallo base.

c) *Ricerche analitiche*, le quali, partendo dalla forma geometrica del giunto e dalle forze esterne ad esso applicate, ne studiano la ripar-

tizione in base alle leggi della teoria della elasticità, sulle quali si fonda la scienza delle costruzioni.

Occorre ancora distinguere in pratica due tipi differenti di giunto con cordoni di saldatura trasversale, che corrispondono ai due tipi fondamentali di unione a semplice, ed a doppio coprigiunto, rispettivamente rappresentati schematicamente dalle figure 1 e 2. Nel tipo a semplice coprigiunto il giunto è soggetto ad un momento flettente causato dalla eccentricità della sollecitazione applicata ai due spezzi saldati, motivo per cui esso tende a ruotare nel senso indicato dalla freccia M , ed in conseguenza i due lembi a contatto nel tratto vc tendono ad allontanarsi.

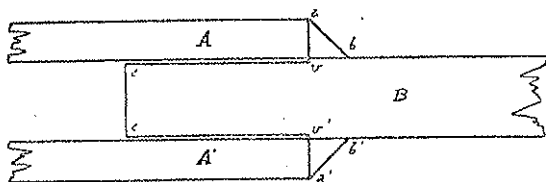


FIG. 3.

Nel collegamento a doppio coprigiunto l'unione, nel suo complesso, non è più soggetta ad un momento, perchè le due trazioni F e la $2F'$ si equilibrano; però ciascuno dei due cordoni, considerato indipendentemente, è ancora soggetto ad un momento flettente, con la condizione che la rotazione è impedita dalla simmetria del collegamento. Ne consegue che i lembi vc e $v'c'$ sono fortemente compressi fra loro, ed una parte notevole dello sforzo creato dalle trazioni applicate al giunto, si trasmette per attrito fra queste superfici. Nelle prove sperimentali, tendenti a studiare il cordone di saldatura, si vuole in generale prescindere da questa azione dell'attrito, ed allora i provini vengono preparati in modo da lasciare una luce di qualche decimo di millimetro fra i lembi affacciati vc e $v'c'$, come schematicamente rappresentato nella figura 3; con questa precauzione la ripartizione delle tensioni interne nel cordone del giunto rappresentato dalla figura 2, si avvicina sensibilmente alla ripartizione nel cordone rappresentato in figura 1.

A sua volta il cordone può avere la sezione di un triangolo scaleno con lato vb più lungo del lato va , oppure può avere la sezione di un triangolo rettangolo isoscele. È in generale sempre a questa seconda forma che si riferiscono la maggior parte degli studi fin qui eseguiti su questo argomento, ed in particolare a questo tipo si riferiscono gli esperimenti di cui si dirà in seguito.

Considero note le ricerche effettuate in precedenza, da vari studiosi, su questi cordoni di saldatura: ed in particolare le ricerche fotoelastiche pubblicate da A. G. SOLAKIAN⁽¹⁾ e le ricerche dilatometriche pubblicate da G. BIERETT e G. GRÜNING⁽²⁾, le prime su modelli in bachelite e semplice coprigiunto, le seconde su provini saldati a doppio coprigiunto del tipo schematicamente rappresentato in figura 3. Come anche considero note le ricerche analitiche sulla ripartizione delle tensioni interne eseguite da vari autori, ed in particolare da R. G. OLSSON⁽³⁾ sul tipo a doppio coprigiunto analogo al precedente.

Mi limito a svolgere delle considerazioni generali sui risultati di queste prove e di queste ricerche analitiche.

Dalle prove fotoelastiche si arriva alla conclusione che nei vertici v e b esistono delle concentrazioni di tensioni pari rispettivamente a 6,92 ed a 4,75 volte la tensione unitaria media esistente negli elementi uniti. Che queste rilevantissime concentrazioni di tensioni esistano realmente, è fuori discussione, perchè è documentato con tutta la evidenza dei sistemi della fotoelasticimetria.

D'altro lato se questi risultati fossero da trasferirsi senz'altro nell'impiego pratico, l'unica conclusione alla quale si potrebbe giungere, sarebbe quella di abolire dalla tecnica costruttiva il cordone di saldatura trasversale, poichè non potrebbe mai essere ritenuto conveniente un sistema di collegamento che raggiungesse il suo carico di rottura sotto una trazione che rappresenta soltanto un settimo circa del carico di rottura degli elementi collegati.

⁽¹⁾ A. G. SOLAKIAN, *Stresses in Transverse Fillet Welds by Photoelastic Methods*, « Journal of the American Welding Society », vol. 13, n. 2, 1934.

⁽²⁾ Dr. ing. G. BIERETT e dr. ing. GRÜNING, *Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen*, « Der Stahlbau », Anno 6°, n. 22, 1933.

⁽³⁾ Dipl. ing. ROLF GRAN OLSSON, *Der ebene Spannungszustand der Schweissnaht*, « Der Bauingenieur », n. 21, 22 maggio 1932, Berlin.

Le prove dilatometriche, negli stessi vertici v e b , avrebbero dimostrato che si raggiungono soltanto tensioni rispettivamente uguali a 3,8 e 3,9 delle tensioni unitarie medie negli elementi uniti. Valori, come si vedono molto inferiori, ma sempre proibitivi ai fini di un impiego pratico di questo genere di collegamento.

Se poi si esperimentano a rottura dei provini effettivamente saldati, o dei modelli metallici aventi la esatta forma del giunto, ma senza saldatura, si vede che il giunto si rompe sotto carichi di rottura che, divisi per la sezione degli elementi collegati, oscillano fra valori abbastanza discosti a seconda delle caratteristiche del metallo impiegato, in genere compresi fra il 0,40 ed il 0,80 del valore della resistenza unitaria a rottura del metallo stesso, il che fa supporre che nei punti maggiormente sollecitati del giunto, esistano delle concentrazioni di tensioni pari rispettivamente a 2,5 fino a 1,25 delle tensioni unitarie medie di rottura del metallo base.

Come si vede risultati che variano sensibilmente al variare delle caratteristiche del metallo impiegato, ma in ogni caso molto discosti da quelli che le indagini fotoelastiche e quelle dilatometriche avrebbero lasciato presumere. E discosti anche dai risultati degli studi analitici, i quali, tra l'altro, porterebbero ad un valore unico, dipendente unicamente dalla forma geometrica del giunto, mentre, come ho accennato, in pratica, e senza uscire dalle leghe siderurgiche di normale impiego, il risultato varia per lo meno nel rapporto da 1 a 2.

In questa discordanza fra ricerche sperimentali ed analitiche, e risultati pratici, la tecnica costruttiva segue una terza via, che non si basa nè sulle prime, nè sui secondi, ed è assolutamente empirica. Si suole in pratica calcolare la resistenza dei cordoni di saldatura, con dei valori unitari costanti in base alla lunghezza dei cordoni stessi, essendo fissata la loro sezione trasversale: questo significa attribuire un valore unitario unico di resistenza al giunto, qualunque sia la qualità del materiale, sempre restando nel campo delle leghe siderurgiche da costruzione. Questo valore unitario di resistenza del giunto a rottura comunemente indicato dai manuali, secondo questo metodo di calcolo, per il cordone di saldatura trasversale, corrisponde a circa metà del carico unitario di rottura di un ordinario ferro omogeneo; e quindi nella pratica costruttiva corrente può essere ritenuto accetta-

bile. Ma con la adozione di metalli a carico unitario sempre più elevato, secondo le tendenze moderne, un simile metodo di calcolo può portare a discordanze anche molto sensibili con la resistenza reale.

CONSIDERAZIONI SULLA PLASTICITÀ DEL MATERIALE. — Da quanto esposto si deve logicamente arrivare alle seguenti conclusioni: quando un giunto costituito da una saldatura trasversale viene sottoposto ad una tensione crescente gradualmente, in un primo tempo le tensioni interne si distribuiscono esattamente con l'andamento rilevato nello

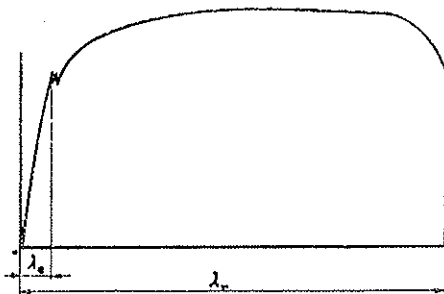


FIG. 4.

prove fotoelastiche, perchè questo evidentemente è il regime di ripartizione delle tensioni in campo elastico. Poichè d'altra parte, con questa ripartizione, rapidamente si raggiungono, nei punti di maggior concentrazione, dei valori delle tensioni unitarie che oltrepassano il limite di elasticità, avvengono, sotto carichi unitari medi ancora bassissimi, delle deformazioni plastiche locali, per effetto delle quali cambia la ripartizione delle tensioni interne, con tendenza ad una diffusione delle tensioni più omogenea. Ammessa questa ipotesi se ne deve anche concludere che maggiore è la plasticità del metallo e maggiore sarà il carico di rottura del giunto, a parità di ogni altra condizione, mentre in via di ipotesi, un metallo che fosse esclusivamente elastico, e niente plastico, dovrebbe dar luogo a giunzioni che si romperebbero a circa 1/7 del carico di rottura del materiale, così come le prove fotoelastiche fanno supporre.

Altra conclusione importante, e confermata dalla pratica, è che la resistenza del giunto non è più esclusivamente funzione delle dimensioni geometriche del giunto, ma anche in certa misura del grado di plasticità del metallo.

Orientato per questa via, ho cercato di definire in primo luogo un numero, che potesse costituire un indice della plasticità del metallo; ed in secondo luogo quale eventuale relazione passa fra questo indice e la resistenza del giunto.

Nel diagramma allungamenti-tensioni di un metallo ferroso, schematicamente rappresentato in figura 4, un primo tratto della curva, praticamente rettilineo, corrisponde al comportamento elastico, fino ad un determinato limite, più o meno demarcato, oltre il quale il comportamento è quasi esclusivamente plastico, contraddistinto da grandi deformazioni permanenti. L'area del diagramma, fino alla ascissa corrispondente al limite di elasticità, rappresenta il lavoro assorbito dal materiale in campo elastico: l'area rimanente rappresenta il lavoro assorbito in campo plastico. Nel caso del ferro omogeneo e degli acciai dolci con una approssimazione abbastanza grande, il diagramma in campo elastico può essere considerato triangolare, e quello in campo plastico rettangolare, e di uguale ordinata.

Ne consegue che le due aree dei due campi possono essere considerate proporzionali alla metà della ascissa per il primo, ed alla intera ascissa per il secondo. Ma l'ascissa del primo è l'allungamento al limite di elasticità λ_e e l'ascissa del secondo è l'allungamento totale di rottura λ_r , meno λ_e . Un indice del grado di plasticità del metallo potrà dunque essere costituito dal rapporto.

$$\frac{\frac{1}{2} \lambda_e}{\lambda_r - \lambda_e}$$

Nel caso di acciai dolci e di ferro omogeneo, data la piccolezza di λ_e rispetto a λ_r , si può anche assumere come indice di plasticità, addirittura lo stesso rapporto λ_e/λ_r .

Supponiamo di dividere il carico totale di rottura del giunto per la sezione dell'elemento unito, ed in particolare per la sezione in corrispondenza del lato *va* del cordone di saldatura: ne otterremo un

carico unitario ideale σ_i di rottura del giunto, che sarà tanto minore del carico di rottura del metallo σ_m quanto minore sarà la plasticità del metallo, se la ipotesi fatta in precedenza è esatta. Si tratterà quindi di rilevare se esiste, e quale sia, la funzione che lega queste quantità, sotto la forma:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_i} = \varphi \left(\frac{\lambda_e}{2(\lambda_r - \lambda_e)} \right) = \sim \psi \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_r} \right)$$

RICERCHE SPERIMENTALI. — Furono eseguite su una ventina di provini saldati con tutte le dovute precauzioni per avere la maggiore omogeneità ed isotropia nel metallo, e successivamente trattati termicamente per distruggere, per quanto possibile, le tensioni interne iniziali. Questi provini sono stati preparati con sei qualità differenti di metalli, comprese fra il ferro dolceissimo di Svezia, il ferro Armco, il ferro comune, il ferro omogeneo, l'acciaio dolce e l'acciaio semi-dolce, entrambi al carbonio. Naturalmente ogni singolo provino era costituito, nei due elementi uniti e nella saldatura, da una sola qualità di metallo; e per ogni qualità di metallo ho preso la media dei risultati dei singoli provini, generalmente in numero di tre. Per ogni qualità di metallo impiegato avevo, a parte, determinato il valore del rapporto λ_e/λ_r .

Ottenuti tutti questi valori, riassunti nella tabella unita, ho costruito un diagramma avente per ordinate i rapporti λ_e/λ_r e per ascisse

| Gruppi di Provette (valori medi) | λ_e % | λ_r % | λ_e/λ_r | σ_i Kg/mm ² | σ_m Kg/mm ² | σ_m/σ_i |
|---|------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 | 0,0906 | 28,99 | 1/320 | 21,48 | 32,00 | 1,49 |
| 2 | 0,1123 | 27,51 | 1/245 | 24,42 | 38,35 | 1,57 |
| 3 | 0,1155 | 25,98 | 1/225 | 25,33 | 40,78 | 1,61 |
| 4 | 0,1355 | 22,36 | 1/165 | 24,20 | 41,87 | 1,73 |
| 5 | 0,1324 | 20,97 | 1/115 | 24,36 | 46,05 | 1,89 |
| 6 | 0,2270 | 15,89 | 1/70 | 24,22 | 55,22 | 2,28 |

i rapporti σ_m/σ_i . Riportati come punti su questo diagramma, i valori sperimentali suddetti, si osserva che essi occupano una zona relativamente molto limitata rispetto alla superficie totale del grafico, e quindi

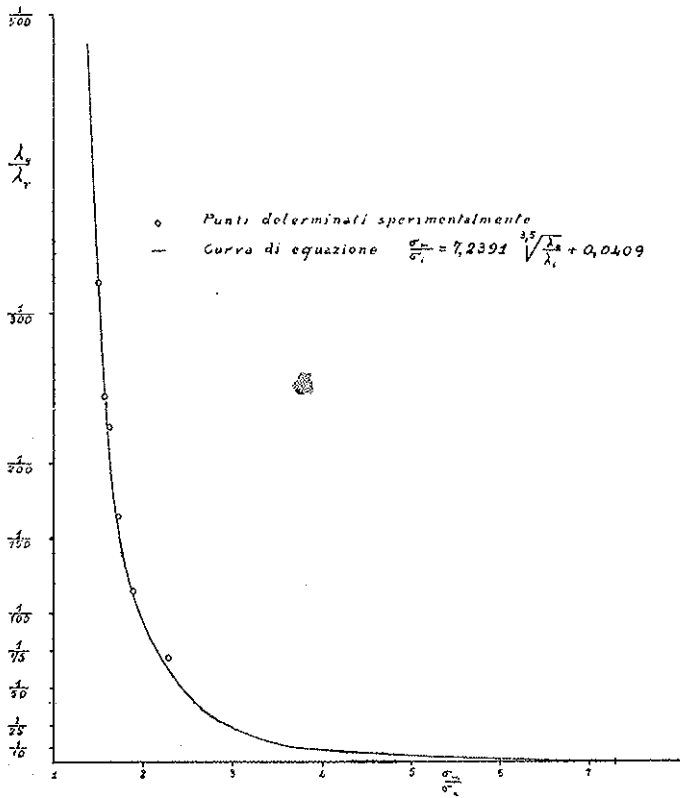


FIG. 5.

debbono considerarsi alquanto audaci le estrapolazioni dal campo sperimentale. Tuttavia questi valori vengono a trovarsi con buona approssimazione su di una curva esponenziale rappresentata in figura 5, la cui equazione è la seguente

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_i} = 7,2391 \sqrt[3,5]{\frac{\lambda_0}{\lambda_r}} + 0,0409$$

da cui si ricava

$$\sigma_m = \sigma_i \left(7,2391 \sqrt[3,5]{\frac{\lambda_e}{\lambda_r}} + 0,0409 \right)$$

È notevole il fatto che valori limiti di questa espressione, per un materiale di elevatissima plasticità, e per un materiale assolutamente privo di plasticità, sono rispettivamente i seguenti

$$\sigma_m = \sim 1,1 \sigma_i ; \quad \sigma_m = 7,28 \sigma_i$$

i quali valori, come si vede sono molto concordanti con la logica e con l'esperienza.

In particolare il secondo valore è alquanto superiore a quello ricavato nelle prove fotoelastiche, il che fa supporre che nelle stesse prove fotoelastiche, per quanto effettuate con carichi bassissimi, si sarebbe già raggiunto un certo piccolissimo grado di deformazione plastica. Anche questo risultato non è affatto contrario alla logica, in quanto le prove fotoelastiche alle quali mi riferisco furono eseguite su provini in bachelite. Se fossero state eseguite su vetro forse i risultati sarebbero stati anche più coincidenti.

Ad ogni modo le esperienze da me eseguite sono ancora troppo scarse per poterne ricavare conclusioni e leggi generali: quindi la stessa espressione algebrica sopra indicata, non sarà, con tutta probabilità, definitiva.

Tuttavia è notevole, e degno di segnalazione, il fatto che esiste e sembra ben definita, una corrispondenza univoca fra il grado di malleabilità del metallo, e la resistenza alla rottura del giunto; il che porta senz'altro a concludere che questo tipo di unione è sconsigliabile su metalli ad alta resistenza a trazione, e bassa plasticità.

In questi casi val meglio eseguire un collegamento eterogeneo, formato con un cordone composto con materiale di apporto a carico di rottura più basso, ma con elevata plasticità.