

La fragilità nelle strutture metalliche

Si esaminano le cause accertate di rottura fragile degli acciai nelle strutture metalliche.

Alcune disavventure delle costruzioni saldate, in particolare quelle eccezionalmente spettacolari iniziate in Germania nel 1938 con gli incidenti ai ponti del Giardino Zoologico di Berlino e dell'autostrada di Rudersdorf ⁽¹⁾, in Belgio con la rovina del ponte di Hasselt ⁽²⁾ e proseguite in Belgio con gli incidenti dei ponti di Herenthals-Oolen (19 gennaio 1940) e di Kaulille (25 gennaio 1940), sui mari del mondo con 722 gravi incidenti a cargo americani Liberty e Victory (fino a tutto il 1° febbraio 1945) con rottura completa di 23 navi, e perdita totale di 5 ⁽³⁾ hanno richiamato vivamente e a più riprese i costruttori a considerare la fragilità che in alcuni casi presentano i materiali abitualmente duttili, in particolare gli acciai per strutture.

La preoccupazione di scagionarsi da eventuali responsabilità spinse i periti delle parti interessate ad attribuire la ragione degli incidenti a cause indipendenti da esse, così i fautori della saldatura l'attribuirono alla qualità del metallo, i rappresentanti delle acciaierie alla qualità degli elettrodi e ad errori di esecuzione, o di progetto.

Quantunque a tutt'oggi non sia completamente chiaro il comportamento delle strutture soggette a rotture fragili, in tutti i casi pratici, pure i molti studi eseguiti negli ultimi tempi permettono una più serena valutazione delle cause principali di fragilità che veramente possono di volta in volta attribuirsi a qualità del metallo di base, a inopportuna scelta degli elettrodi e cattiva utilizzazione di essi, a imperfetta esecuzione e programmazione delle saldature, ad errori di dettaglio nei progetti esecutivi.

Spesso molte cause concorrono a rendere più facile la rottura fragile.

Può essere interessante riassumere qui i risultati delle indagini finora compiute per additare ai progettisti e ai costruttori alcuni pericoli facilmente evitabili.

Comportamento degli acciai da strutture soggetti a tensioni mono bi e triassiali.

È noto da tempo che materiali abitualmente fragili possono comportarsi come perfettamente duttili se soggetti a compressione nelle tre direzioni principali, per contro materiali abitualmente duttili, possono comportarsi come fragili se soggetti a trazione nelle tre direzioni principali.

È noto altresì che la condizione di rottura di Maxwell-Huber-Mises-Hencky porta ad ammettere

che per i materiali duttili omogeneamente sollecitati il passaggio dal campo elastico a quello plastico avvenga, a parità di materiale, di velocità di applicazione dei carichi, di temperatura, ecc. ad un valore determinato del lavoro specifico di cambiamento di forma per scorrimento

$$\rho_{ss} = \frac{\sigma_1^2}{6G} \left[1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sigma_1 \sigma_1} \right] = \frac{\sigma_1^2}{6G} P_p^2$$

essendo

$$P_p^2 = 1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sigma_1 \sigma_1} =$$

per un sistema triassiale di tensioni e $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, le tensioni principali (σ_1 la massima, σ_2 l'intermedia, σ_3 la minima).

Assunto

$$\rho_{ss} = \text{costante, essendo } P_p \sigma_1 = \sqrt{6G \rho_{ss}}$$

se ρ_{ss} si deve ritenere costante agli stati limiti analoghi, deve esserlo anche $P_p \sigma_1$. La stessa condizione di rottura, secondo l'interpretazione del Ròs, equivale a stabilire

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_e$$

essendo:

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_3 \sigma_1}$$

la tensione tangenziale nelle faccette normali alle diagonali dell'ottaedro le cui faccette sono normali alle tensioni principali, e σ_e la tensione al limite di elasticità del materiale in esame. Ciò rende la condizione di rottura indipendente dalla teoria dell'elasticità e dalle relazioni esistenti fra tensioni e deformazioni e, secondo l'Autore ⁽⁴⁾, applicabile anche al campo plastico fino alla rottura purchè si cambi adeguatamente la costante.

Ma P_p , che alcuni chiamano potere plastificante nel punto considerato ⁽⁵⁾ non è che la sollecitazione ideale di paragone σ_i di Ròs ⁽⁶⁾ divisa per la tensione principale σ_1 .

Tutto ciò autorizza il tentativo di costruire un

⁽⁴⁾ Ros, *Les bases des contraintes admissibles dans les constructions métalliques*. Annales de l'Inst. Tech. du Bat. June 1949, Paris.

⁽⁵⁾ VAN MAANEN, *Nouvelles méthodes d'étude et d'essai des métaux*. Institut belge de la Suture, 1951.

⁽⁶⁾ Opera citata.

⁽¹⁾ SCHAPER, *Stählerne Brücken*. 1 Band 1949 Berlin.

⁽²⁾ Oss. Met. n. 7-8 - 1938.

⁽³⁾ Secondo rapporto provvisorio della Commissione di inchiesta - Maggio 1945.

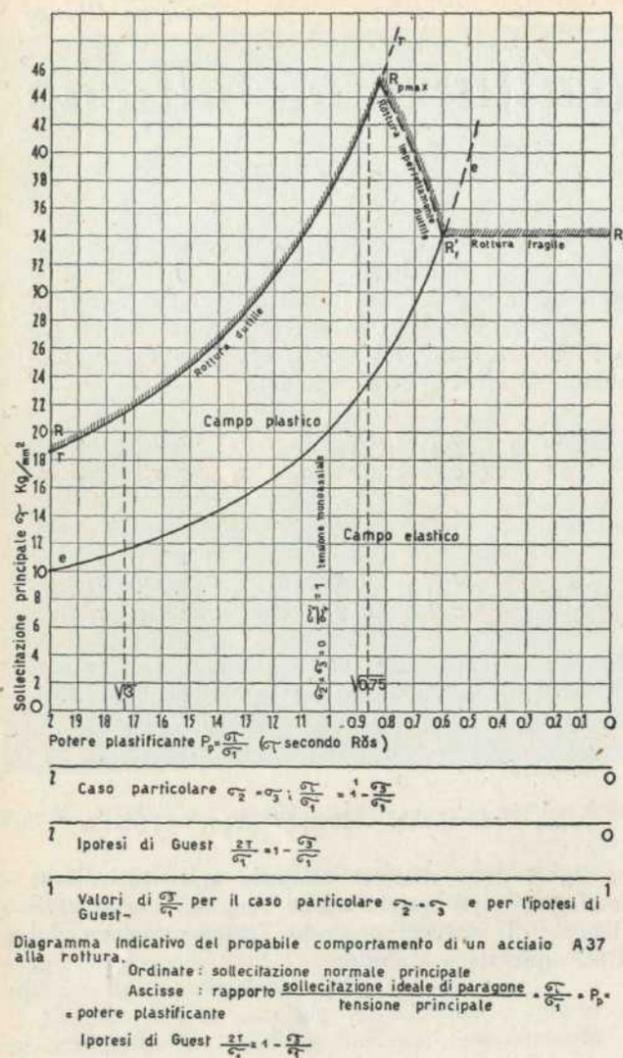


Fig. 1.

diagramma della sollecitazione principale σ_1 in funzione del rapporto

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = P_p \text{ potere plastificante (fig. 1).}$$

La rappresentazione della figura è puramente indicativa di un'ipotesi che richiede molte verifiche sperimentali ma che ha il merito di chiarire il comportamento, altrimenti oscuro, dei corpi duttili soggetti a campi di tensione bi e triassiali e delle conseguenze che ne possono derivare.

Nella figura, l'iperbole e e corrisponde al limite delle deformazioni elastiche per un acciaio A 37, l'iperbole r r corrisponde al limite di rottura per scorrimento dello stesso acciaio, la superficie inferiore alla curva dei limiti elastici rappresenta il campo elastico, quella compresa fra le due curve dei limiti elastici e dei limiti di rottura il campo plastico, la R_f corrisponde alla rottura fragile diretta che avviene senza passaggio in plasticità, la R_{pmax} la sollecitazione massima per rottura duttile in un acciaio A 37 incrudito, ad esempio,

per laminazione, la curva $R_f \cdot R_{pmax}$ copre il campo della rottura imperfettamente duttile o imperfettamente fragile perchè si accompagna ad una sempre minore deformazione plastica, la $R_f R_f$ segna il limite di rottura fragile per materiale duttile incrudito, la $R R_{pmax}$ il campo di rottura duttile con plastificazione completa.

Per $\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 2$ che si verifica, ad esempio, per $\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_3$, i limiti di elasticità e di resistenza per la tensione principale Σ_1 vengono ridotti a metà di quelli afferenti alla trazione monoassiale; per $\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1$, il che avviene, ad esempio, per $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, sussistendo la sola σ_1 valgono i valori abituali, di poi i valori aumentano per particolari sistemi tripli di sollecitazione dei quali abbiamo indizi nelle travi laminare incrudite aventi tensioni residue.

Se $\sigma_3 = 0$ il campo nel quale è possibile la variazione di $\frac{\sigma_1}{\sigma_1}$ si restringe perchè limitato da $\sqrt{3}$ a $\sqrt{0,75}$; invece se $\sigma_2 = \sigma_3$, $\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ e si ha la scala posta sotto alle precedenti che corrisponde ad un caso particolare.

Se invece si accetta l'ipotesi del Guest che, ai fini del comportamento alla rottura dà importanza alle sollecitazioni estreme, o l'opinione del Baes che assegna importanza trascurabile alla intermedia, nel definire i campi di plastificazione, si può scrivere

$$\mathcal{C} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1}{2} \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right) = \text{cost};$$

$$\frac{2\mathcal{C}}{\sigma_1} = 1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

e in tal caso la scala inferiore rappresenta tutto il campo elastoplastico e coincide soltanto apparentemente con la precedente, in quanto, secondo l'ipotesi del Ròs per $\sigma_3 = 0$ il campo verrebbe a restringersi per $\frac{\sigma_1}{\sigma_1}$ fra $\sqrt{3}$ e $\sqrt{0,75}$ e quindi la rottura fragile risulterebbe eccezionale, mentre con l'ipotesi del Guest potrebbe avvenire per l'intero campo valido per lo stato triplo di tensione.

Il merito del diagramma è di mostrare la possibilità per un materiale duttile, in particolari condizioni di sollecitazione, del comportamento imperfettamente duttile o addirittura fragile e come possa aversi la rottura con plastificazione completa analogamente ai casi comuni, o con plastificazione incompleta come ammette il Campus, o con fragilità completa, come ammettono altri.

Il diagramma avverte ancora:

1) che se una delle tensioni principali è di compressione il comportamento duttile è assicurato;

2) che può esservi un campo nel quale, pur essendo le tre tensioni principali positive e non mille, purchè σ_3 sia sufficiente piccola rispetto alle altre due la rottura abituale è ancora possibile;

3) che aumentando il valore di σ_3 rispetto a quello di σ_1 la rottura può avvenire nel campo imperfettamente plastico per finire in quello completamente fragile;

4) l'opinione corrente che la deformazione elastica si accompagni a quella plastica per un valore ben determinato di σ_1 come avviene nelle prove di tensione monoassiale non corrisponde alla realtà, vi sono infiniti punti di transizione dipendenti dal valore relativo di σ_1 , σ_3 e tra essi alcuni implicano il passaggio brusco dal campo elastico alla rottura brutale, fragile, senza adattamento, senza strizione, e talvolta con rapidità così elevata da potersi paragonare ad uno scoppio.

Molte di queste conclusioni sono avallate dalla pratica.

Sollecitazione di trazione lungo i tre assi principali.

Da qualche tempo molti degli incidenti inspiegabili o per lo meno non giustificabili nel campo delle strutture si attribuiscono ad un sistema triplo di trazione.

Alcuni pensano che in pratica non sia facile creare una sollecitazione spaziale così complessa, il BAES osserva anzi che « salvo per casi molto speciali come nei pezzi cerchiati, nei cilindri ad alta pressione, e le zone d'applicazione di forti carichi concentrati, alla superficie degli elementi costituenti una struttura, non si hanno che sistemi semplici o eccezionalmente doppi di tensione » (7).

Appunto per verificare i sospetti sul comportamento dei sistemi tripli di tensione denunciati in occasione dei danni osservati sulle Liberty, la Smith Corporation di Milwaukee ha eseguito la ormai classica esperienza (8) (fig. 2) della rottura di una sfera di 2 metri di diametro in acciaio molto duttile soggetto a forte pressione interna.

La sfera si è rotta in piena lamiera cioè fuori dalle saldature con lacerazioni nette senza deformazione apparente e senza strizione, quantunque, a rigore nella sfera soggetta a pressione interna il campo triplo di tensione sia costituito da due trazioni di eguale valore e da una terza di entità molto più modesta.

Rimane quindi dimostrata la possibilità di rottura fragile a causa di una sollecitazione tripla di trazione, in acciaio duttile non invecchiato.

Effetto d'intaglio.

Veramente si sapeva da tempo che era possibile ottenere una rottura senza strizione e con allungamento nullo o trascurabile in piatti intagliati soggetti a trazione lenta, già ne aveva dato notizia il Ludwik nel 1909, se ne occupò a lungo, dopo altri, il Kuntze, nacque anzi così la parola Trennbruch, che i francesi tradussero in *décohésion* d'accordo con gli americani, quando si occuparono

(7) BAES L., *Calcul des ossatures des constructions*. I Voi. Centre B. L. d'U. de l'Acier - Bruxelles, 1952.

(8) NIHOUL, *Les aciers pour construction soudés*. III Congresso Ass. Int. Ponts et Chaussées, 1948. Pubbl. preliminare.

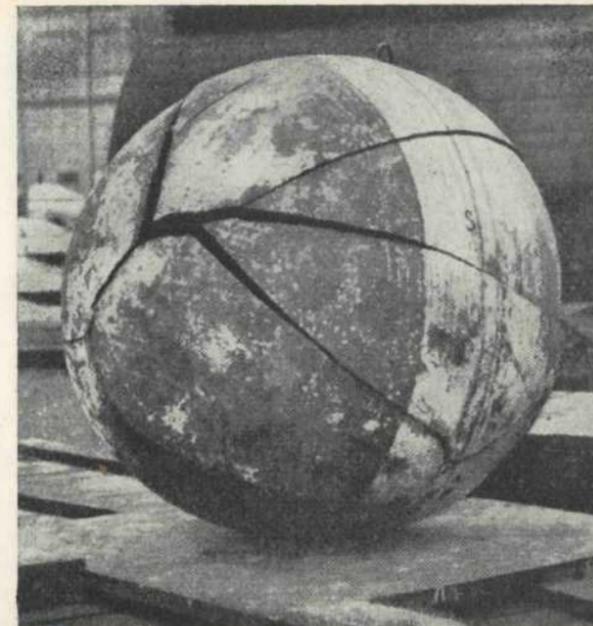


Fig. 2.

delle rotture fragili per sospetto campo triplo di trazione.

Spettò al Campus (9) di chiarire molti dubbi e molte incertezze in questa materia mediante le sue sistematiche esperienze volte a spiegare il comportamento delle strutture saldate, esperienze nelle quali egli ottenne rotture di piatti lievemente intagliati senza strizione, e rotture analoghe in piatti dotati di un tratto di saldatura.

Tensioni interne di origine termica.

Ma un campo triplo di trazione può abbastanza agevolmente crearsi mediante tensioni interne dovute ad azioni termiche particolari.

È noto che molti laminati e profilati sono soggetti a notevoli tensioni interne per effetto della laminazione e contemporaneo ineguale raffreddamento.

Frequenti sono i casi di profilati di grandi dimensioni che sotto uno stimolo anche modesto, ad esempio bassa temperatura invernale ed urto netto durante una manovra di scarico si rompono spontaneamente e rapidamente senza allungamento e senza strizione denunciando con una notevole deformazione delle due parti staccate l'instabilità dell'equilibrio precedente.

Il Dawance (10) ha ottenuto rotture fragili in travi a doppio T sollecitate staticamente con inizio da un foro punzonato, la fessura, che rapidamente si estese a tutta la sezione, ha avuto evidentemente origine dalla zona incrudita e frastagliata dal punzone.

Ma un cordone di saldatura contraendosi du-

(9) CAMPUS F., *Recherches sur les constructions soudées* - Liege 1946.

(10) DAWANCE, *Nouvelles recherches expérimentales sur la plasticité*. Annales de l'Inst. Tech. du Bat. - Mai 1950.

rante il raffreddamento in tutte le direzioni può indubbiamente creare un campo triplo di trazione di notevole intensità se le parti connesse, essendo sufficientemente rigide, si oppongono alla contrazione.

A ragioni del genere i Tecnici Tedeschi attribuirono nel 1938 le rotture osservate nelle grandi travi piene saldate dei ponti di Berlino e Rüdersdorf, accertando che le saldature di unione dei forti piatti formanti briglie coll'anima, realizzate con due cordoni d'angolo avevano appunto creato delle zone soggette a forti tensioni interne nelle tre direzioni principali.

Caratteristiche degli acciai di base.

È stato notato che alcuni acciai sono più soggetti a rotture fragili. Si tratta di acciai sensibili alle basse temperature, aventi bassa resilienza e tendenza all'invecchiamento.

Se la struttura è saldata, alle suddette caratteristiche generali si aggiungono quelle relative alla saldabilità, acciai inadatti alla saldatura danno, più degli altri, pericoli di rottura fragile.

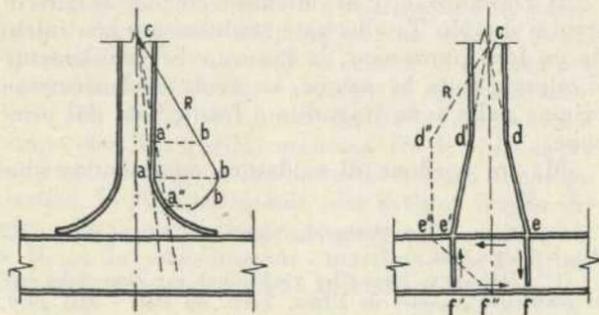
Si sa già che conviene limitare il carbonio e il manganese, ridurre il silicio, eliminare quasi completamente lo zolfo e il fosforo, ma si è imparato da non molto che l'acciaio calmato, per la sua minore tendenza all'invecchiamento si presta molto meglio a queste applicazioni.

Poiché gli acciai usati nei ponti tedeschi e belgi che subirono incidenti erano del tipo A52 (analoghi) alcuni Tecnici ritennero che a questo tipo d'acciaio, allora non ancora prodotto in vista della saldatura, si dovesse in buona parte imputare la colpa di quanto avvenuto.

È noto che l'invecchiamento è considerato da molti come la precipitazione intercrystallina di corpi disciolti in particelle ultramicroscopiche che, ostacolando lo scorrimento dei cristalli, favoriscono la rottura per distacco o per decoesione sostituendo al comportamento duttile quello fragile. È noto ancora che in certi acciai non calmati l'invecchiamento può essere rapido se dopo un incrudimento, dovuto ad esempio ad una lavorazione meccanica, si sottopone il pezzo ad una temperatura di circa 250 centigradi per qualche minuto.

Ora la preparazione dei biselli si faceva spesso mediante operazioni meccaniche violente, ad esempio mediante cesoie circolari, capaci di provocare l'incrudimento, una successiva forte passata di

Fig. 3.



elettrodo poteva portare la zona incrudita a temperatura d'invecchiamento artificiale favorendo con ciò la formazione di fessure microscopiche da considerarsi poi come inizio delle rotture fragili.

Velocità di propagazione della rottura fragile. Scoppio.

È noto che rottura fragile si propaga spesso con velocità elevatissima. Hudson e Greenfield hanno denunciato velocità dell'ordine di 1000 m/sec⁽¹⁾. Nei più importanti casi di rottura fragile i testimoni hanno affermato di aver sentito dei rumori violentissimi simili a detonazioni⁽²⁾, ciò vuol dire che la rottura era stata così rapida da potersi assimilare ad uno scoppio.

Ciò si può spiegare considerando che la propagazione rapida della rottura partendo dalla fessura iniziale ha luogo quando il complesso che cede possiede un'energia potenziale elastica sufficiente per consentire la propagazione stessa; nei pezzi singoli che si rompono per tensioni interne esaltate da cause concomitanti, il pericolo è tanto maggiore quanto più aumentano gli spessori, nei complessi le rotture più violente si sono verificate nei ponti e negli scafi cioè in travate di eccezionali dimensioni.

D'altro lato è bene ricordare che l'energia potenziale elastica è proporzionale al quadrato della sollecitazione cosicché utilizzando degli acciai ad alta resistenza, che consentono sollecitazioni specifiche elevate, si aumenta, a parità di altre condizioni, la probabilità di rottura violenta.

Temperatura ambiente.

Tutti i casi di rottura violenta spettacolare sono avvenuti con temperatura esterna piuttosto bassa.

Gli incidenti ai ponti del canale Alberto avvennero tutti verso le prime ore del mattino in inverno e dopo periodi di freddi molto forti, le rotture degli scafi in navigazione avvennero tutte, o quasi, durante tempo cattivo, in acque fredde, e con temperatura bassa.

Ciò indica che gli acciai soggetti a rotture fragili si dimostrano particolarmente sensibili alle basse temperature, o quanto meno che il complesso delle tensioni interne ed esterne viene sostanzialmente peggiorato dalle basse temperature.

Fragilità di forma.

Dopo la caduta del ponte di Hasselt A. De Marnette⁽³⁾ richiamò l'attenzione dei costruttori sopra l'effetto possibile di una fragilità di forma insita nel progetto delle strutture.

Nel caso particolare da lui esaminato, e cioè il raccordo dei montanti verticali della trave Vierendeel colla briglia inferiore, punto nel quale avvenne la fessurazione iniziale che dette luogo alla rot-

⁽¹⁾ HUDSON e GREENFIELD, *The speed of propagation of brittle cracks in steel*. Journal of Applied Physics n. 4, aprile 1947.

⁽²⁾ Oss. Mèt. Accidents des Ponts du Canal Albert n. 2 del 1940.

⁽³⁾ Oss. Mèt. Fragilité de forme, n. 6 del 1938.

tura, egli fece osservare (fig. 3) che nei montanti delle travi a telaio il momento flettente è nullo all'incirca in mezzeria, e il diagramma dei momenti può ritenersi triangolare dalla mezzeria in giù, con valore massimo all'innesto con la briglia. Se la sollecitazione esterna aumenta, la retta inclinata che definisce il diagramma ruota attorno al punto nel quale il momento è nullo.

Nel tipo di montante raccordato circolarmente usato in quel ponte, il modulo del montante per la resistenza a flessione, può ritenersi con buona approssimazione rappresentato dalla larghezza del montante, data la presenza di un grosso piatto di bordo e la relativa modesta importanza dell'anima nella formazione del modulo resistente a flessione. Ne segue che la retta inclinata rappresentativa delle sollecitazioni, rotando, interseca la curva rappresentativa dei moduli resistenti in un punto, quando vi è tangente, in due punti quando la supera, e nella zona a' a'' debbono avvenire concentrazioni

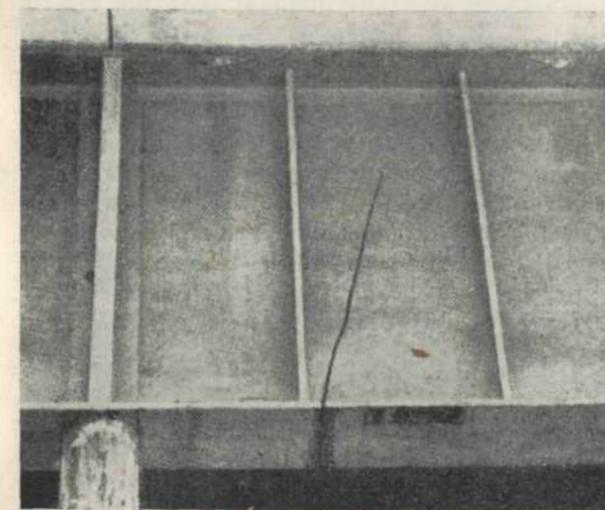


Fig. 4.

di sforzi sfavorevoli alla resistenza. Il ragionamento non è esente da critiche, alcune ne espresse il Campus nei suoi studi sperimentali sui nodi rigidi⁽⁴⁾ basandosi sui risultati delle sue esperienze, nei riguardi delle quali però può osservarsi che essendo eseguite su elementi piarli a spessore costante, non possono ritenersi probatorie per raccordi nei quali la parte di gran lunga più importante è costituita dal notevole ingrossamento perimetrale dovuto al piatto di briglia.

Sta però di fatto che la forma delle strutture ha spesso influenza notevole sulla fragilità del complesso, i costruttori meccanici conoscono la grande importanza dei raccordi sul modo di resistere a fatica e agli urti dei loro elementi, i costruttori in acciaio sanno quante disavventure abbiano provocato nelle strutture i punti singolari nei quali concentrazioni eccezionali di sforzi forniscono a cause esterne impreviste, come scosse sismiche, raffiche

⁽⁴⁾ Oss. Mèt. Nouveaux essais sur modèles de nœuds rigides, n. 4 del 1940.



Fig. 5.

ritmiche di vento, vento di fondo con effetto Magnus, l'occasione di un cedimento prima localizzato e poi generale.

Diagnosi.

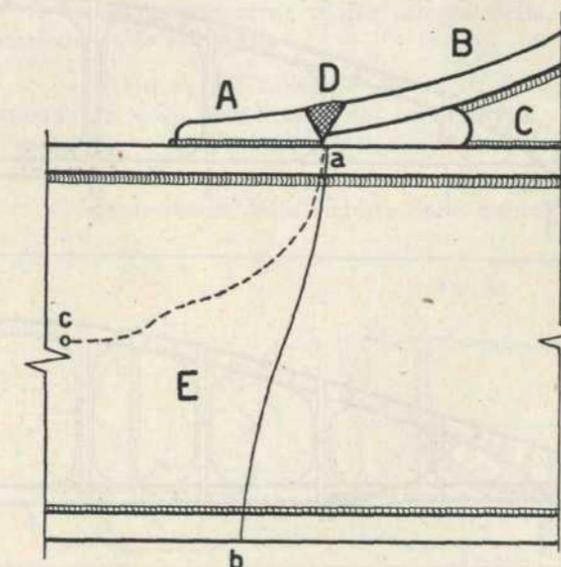
È ora possibile trarre qualche conclusione sufficientemente motivata dagli esempi disponibili, dagli studi compiuti e dalle molte ipotesi presentate.

La rottura fondamentale nella travata principale del ponte di Rüdersdorf si presentò come mostra la fig. 4, avvenne a temperatura attorno a -12°, interessò la piattabanda inferiore di mm 39 x 640 e buona parte dell'anima alta 3 metri. L'acciaio utilizzato era lo St 52 della produzione corrente dal 1936 al 1937, in Germania.

La Commissione di studio attribuì la rottura ad una formazione di tensioni interne nelle tre direzioni principali favorevoli alla rottura fragile, dovute alla saldatura dei cordoni di collegamento della briglia all'anima, furono però riscontrate anche fessurazioni microscopiche nei pressi della saldatura del tipo di quelle della fig. 5.

Quali rimedi contro nuovi possibili incidenti

Fig. 6.



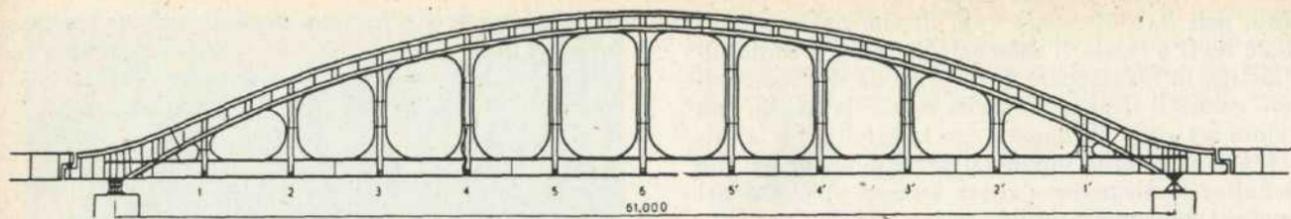


Fig. 7.

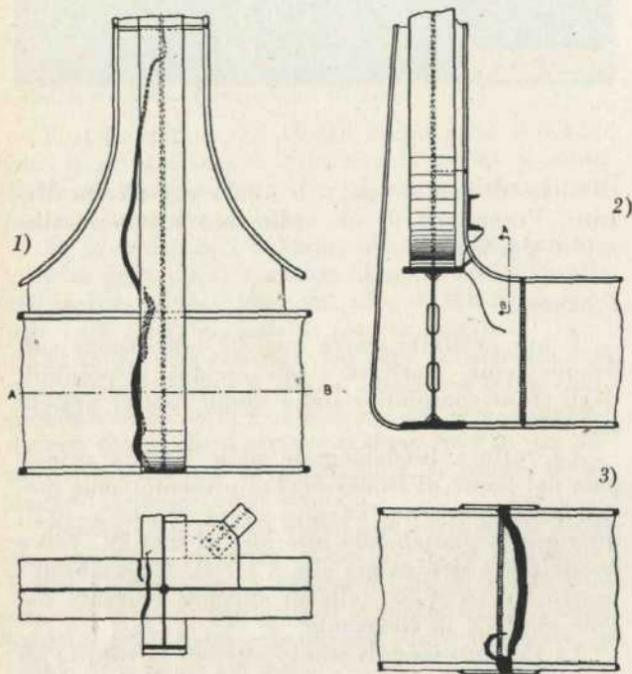


Fig. 8.

del genere venne proposto di usare o acciai dolci o acciai a maggiore resistenza ma appositamente studiati per la saldatura, insensibili all'invecchiamento artificiale, trattati al forno MS, a basso tenore di C.; di limitare lo spessore delle tavole saldate di-

rettamente sull'anima, di limitare lo spessore delle passate, di controllare i cordoni con indagini radiografiche.

La caduta del ponte di Hasselt ebbe origine dalla rottura della briglia inferiore di una travata (fig. 6). A sua volta tale rottura si iniziò in una saldatura D collegante il raccordo del montante alla briglia e venne seguita immediatamente dalla fessura *ab* formatasi con grande rapidità (scoppio) e interessante l'intera briglia a doppio T saldata all'arco elettrico. L'esame di altri nodi simili del ponte caduto e di altri 5 ponti pure del Canale Alberto in Belgio, dimostrò che esistevano fortissime tensioni interne nella zona AB, in 4 ponti si constatarono anche delle fessure sia in D sia anche, nei casi più gravi, nella briglia, di andamento simile alla *ac*. Le tensioni interne si poterono ridurre notevolmente segnando il piatto di raccordo fra D e B, le deformazioni osservate nei due pezzi staccati hanno dimostrato che le tensioni in quel punto superavano il limite di elasticità del metallo di base.

La ragione di tali notevoli tensioni interne appare chiara quando si pensi che il raccordo in esame venne eseguito saldando, prima il pezzo A sulla robustissima trave E, poi il montante col suo raccordo C sulla stessa trave e finalmente in D i due tronchi del piatto di raccordo AB. Data la grande rigidità delle due parti da unire costituite da un largo piatto di forte spessore rigidamente connesso ad una grande trave, la voluminosa saldatura D dovette esercitare, raffreddandosi, una forte azione

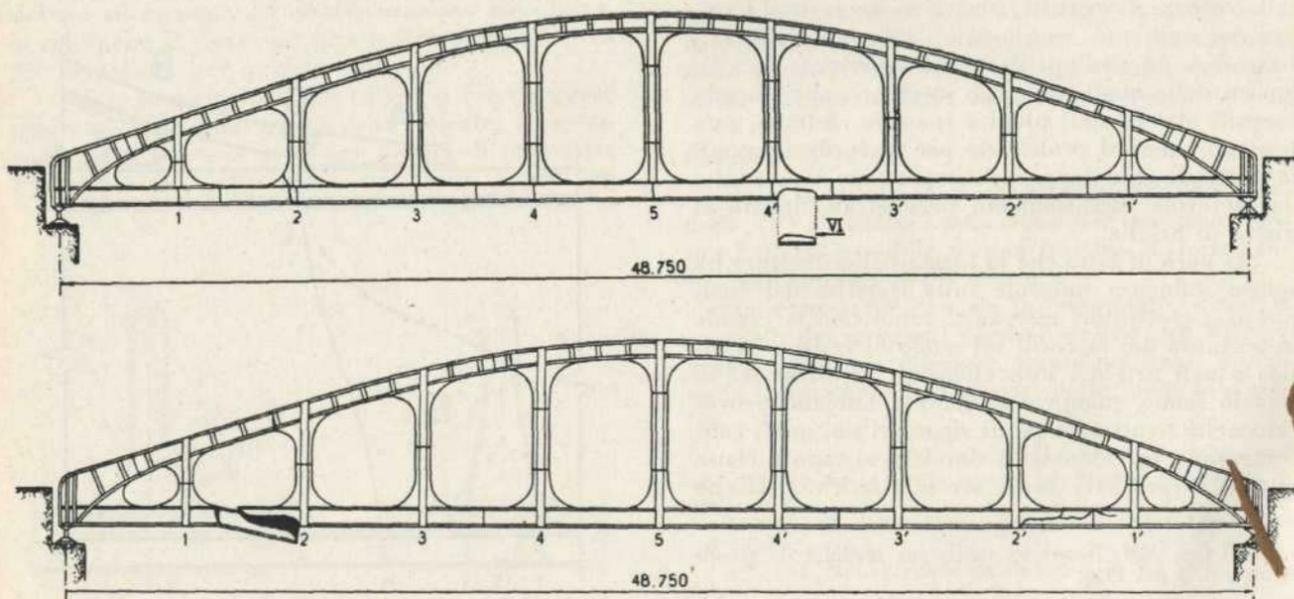


Fig. 10.

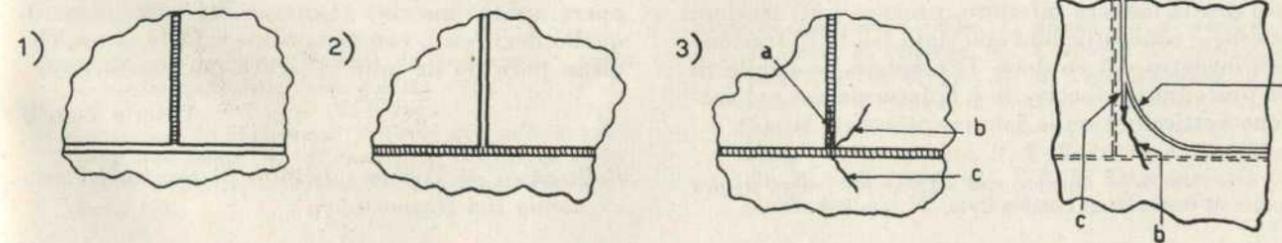


Fig. 11.

su A e su B, ma senza riuscire a deformarne il supporto, troppo rigido per cedere. Il volume notevole del cordone in rapporto alla sua lunghezza fa prevedere come effetto della contrazione al raffreddamento il sorgere di un sistema triplo di tensioni positive tutte di notevole valore. Tali tensioni, trovate superiori al limite di elasticità dell'acciaio di base, avranno probabilmente provocato delle fessurazioni microscopiche nella zona di transizione che per l'uso dei grossi elettrodi si sarà certamente trovata alla temperatura critica detta di fragilità al bleu.

Su questo complesso di minor resistenza agli agenti esterni, più dei carichi accidentali pesarono, probabilmente, l'invecchiamento rapido, la fragilità maggiore connessa alla bassa temperatura e le tensioni interne nei nodi rigidi della Vierendeel suscitate dalle escursioni termiche. Ciò sembra provato dal fatto che il ponte resistè vittoriosamente a severi collaudi e a notevoli sovraccarichi di traffico mentre cadde dopo pochi mesi dal collaudo, essendo praticamente scarico, in un mattino particolarmente rigido.

L'incidente al ponte di Hérenthals-Oolen ebbe luogo alle 2 e ½ del mattino il 19 gennaio 1940 e venne segnalato alle sentinelle di guardia al ponte da tre violente detonazioni. La rottura iniziale sembra sia quella segnata nella fig. 7 col numero 1.

Essa parte dalla tavola inferiore della briglia inferiore della travata nel punto in cui vi si innesta mediante saldatura la piattabanda irrigidente del montante.

La rottura 2 interessa la traversa che collega le due travate in corrispondenza della rottura 1, la rottura 3, che ha sezionato completamente la briglia inferiore della travata opposta, è avvenuta in posizione quasi antisimmetrica della 1 in corrispondenza del secondo giunto di dilatazione. Si noti che tutte le rotture sono prossime al giunto di dilatazione realizzato con una discontinuità delle longarine e con una sezione dell'impalcata in cemento armato. Si ha quindi, da un lato una concentrazione di tensioni interne nel punto iniziale di rottura a causa delle saldature che ivi si incrociano, di più una discontinuità notevole del flusso di forze nel complesso, per la variazione brusca del momento d'inerzia totale in corrispondenza del giunto di dilatazione.

La mattina del 25 gennaio 1940 alle ore 7 e ½ sopravveniva l'incidente al ponte di Kauille. La rottura iniziale sembra la 1d, essa parte come quella del ponte precedente dall'innesto del montante alla

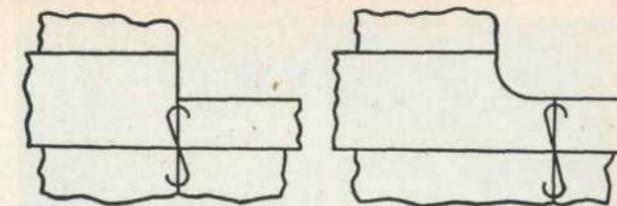


Fig. 9.

briglia inferiore che in questo caso, anziché essere una trave a doppio T saldata come nei casi precedenti, era una trave Grey (fig. 8).

La fessura III è situata in corrispondenza di un raccordo del montante colla briglia superiore, le fessure 4 e 5 hanno ancora inizio all'innesto dei montanti con la briglia inferiore, del pari che la fessura 6 la quale però ha provocato il distacco netto di un tratto di ala, indizio probabile di tensioni interne di laminazione e di saldatura sommate. La temperatura esterna, al momento dell'incidente, era di circa -20° come per il ponte precedente.

Gli incidenti avvenuti agli scafi dei cargo saldati non sono sempre perfettamente noti per ragioni ovvie, il numero delle fessurazioni è però così grande che consente di trarre con mezzi statistici delle conclusioni abbastanza sicure e certo interessanti.

Il secondo rapporto della Commissione di studio nominata in seguito agli incidenti suddetti conclude affermando che tutte le rotture studiate dettagliatamente hanno, come origine, delle discontinuità strutturali di progetto o dei difetti di esecuzione delle saldature, agenti come intagli.

I miglioramenti proposti dal primo rapporto consistevano principalmente:

- nel miglioramento dei dettagli del progetto ai fini di eliminare pericolosi concentramenti di sforzi e azioni d'intaglio,
- unificazione degli elettrodi, del loro controllo e della loro utilizzazione,
- programmazione molto minuta della esecuzione delle saldature,
- rinforzo del fasciame dei ponti in corrispondenza degli angoli retti dei boccaporti e altri passaggi e raccordo degli stessi mediante archi di cerchio,
- diminuzione della rigidità delle unioni sal-

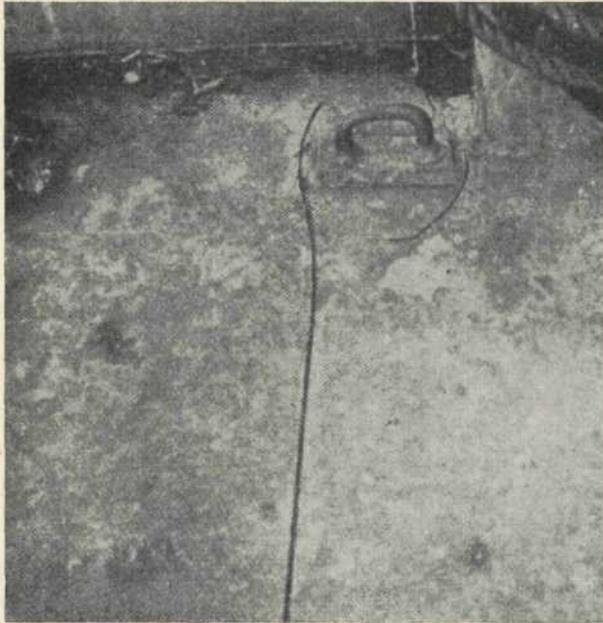


Fig. 12.

date delle chiglie di rullio alla carena sostituendo la saldatura continua con tratti separati da alleggerimenti semicircolari dell'anima della chiglia di rullio,

— introduzione nel fasciame dei ponti, in quello delle murate e particolarmente nei raccordi dei ponti alla carena, di giunti longitudinali chiodati atti ad arrestare l'eventuale propagazione di fessure trasversali, che, come si è visto precedentemente, una volta iniziate, nelle lamiere in un sol pezzo si propagano rapidamente fino alla fine della lamiera stessa se l'energia potenziale elastica disponibile è sufficiente.

Il secondo rapporto constata che hanno avuto esito positivo.

Come esempi istruttivi di particolarità costruttive sedi accertate di inizio di rotture con lunghe fessurazioni potranno valere le seguenti:

Fig. 9: Angolo retto in corrispondenza di una apertura, peggiorato dall'azione di intaglio del cordone di saldatura che fa capo allo spigolo. Perfezionamento: raccordo circolare in piena lamiera, cordone verticale spostato oltre il raccordo.

Fig. 10: Unione di tre lamiere del fasciame. Si deve saldare prima il cordone che non prosegue (1) se invece si salda prima il cordone passante (2) le due lamiere superiori risultano già rigidamente collegate alla lamiera inferiore e le tensioni dovute alla contrazione del cordone verticale che non può avvenire liberamente perché contrastata dall'incastro con la lamiera inferiore, provoca forti tensioni interne e concentrazioni con stato triplo di trazione nell'incontro dei cordoni. Il risultato probabile di un procedimento scorretto è la fessurazione nel cordone verticale e nelle lamiere illustrato in (3).

⁽¹⁵⁾ Report on hogging and sagging test on all-welded tanker M/V Neverita, London 1944.

Fig. 11: Taglio di un tratto del fasciame per allogarvi un quadro di rinforzo di una apertura. Errore nel taglio ossiacetilenico che invece di essere curvo ha un regresso in corrispondenza di un raccordo circolare. Intaglio pericoloso anche se riempito con saldatura.

Fig. 12: Fessura in un ponte di una nave Liberty che ha origine da una zona nella quale varie saldature in elementi vicini di notevole spessore hanno creato, probabilmente anche a causa della sequenza scorretta di formazione dei cordoni, una forte concentrazione di tensioni interne nelle tre direzioni e un effetto d'intaglio.

Completano questi interessanti dati sul comportamento di quelle grandi travi saldate a guscio che sono gli scafi, le esperienze condotte con molta diligenza sulla petroliera saldata Neverita, a cura dell'Admiralty Ship Welding Committee ⁽¹⁵⁾.

Si tratta di una nave varata nel 1944 del dislocamento di 18.793 Tonn. nel cui progetto e nella cui costruzione si fece tesoro degli insegnamenti della guerra sui cargo saldati.

I risultati più interessanti sono:

— la distribuzione delle sollecitazioni nelle murate a struttura prevalentemente trasversale e nelle paratie longitudinali dello stesso tipo, risulta meno in accordo con la teoria e col calcolo preliminare di quanto non avvenga nel ponte e nel fondo che sono a struttura longitudinale.

— si sono verificate sollecitazioni trasversali dell'ordine del 20% di quelle longitudinali, dotate di considerevoli fluttuazioni finora inspiegate;

— gli effetti dovuti alle azioni locali per pressione idrostatica e preesistenti deformazioni del fasciame, sono risultati molto più considerevoli di quelli agenti nella fibra mediana delle lamiere per effetto delle azioni generali di inarcamento e insellamento;

— le lamiere che presentavano deformazioni proprie iniziali per imperfetta foggatura o per pressione idrostatica, caricate assialmente, non seguivano più la legge della sovrapposizione degli effetti;

— la discontinuità strutturale dei fianchi nei quali il sistema longitudinale è sostituito da un sistema trasversale, si traduce in un peggioramento delle condizioni di resistenza degli stessi e in una imperfetta armonia delle sollecitazioni, corrispondente alla incompleta armonia strutturale.

Le conclusioni che si possono trarre da quanto esposto sono ovvie.

Basandosi su di esse da qualche anno i costruttori hanno imparato a progettare ed eseguire grandi opere arditissime sia nel campo dei ponti come in quello degli scafi, completamente saldate, senza che alcun pericolo ne mini il sicuro funzionamento.

Vittorio Zignoli

Politecnico di Torino - Istituto di tecnica ed economia dei trasporti.