

INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento organizzata
dall'Associazione Italiana di Metallurgia
in collaborazione con l'Istituto Italiano della Saldatura
e con il patrocinio del Centro Inox

Milano, 23 Novembre 1994

M. BALBI

La metallurgia della saldatura e l'innovazione

A. LAURO - G. CANALE

La saldabilità degli acciai inossidabili austeno-ferritici:
alcuni casi particolari

C. REVERDY

Nuovi sviluppi tecnologici nei procedimenti MIG, TIG, plasma

A. VENDRAMINI

Le tecniche di saldatura laser, esempi applicativi

S. TOSTO

La saldatura al fascio elettronico per unioni omogenee ed eterogenee

G. COSTA - M. SCASSO - G.F. GHIGLIA

Qualità e certificazione nelle costruzioni saldate: in ambito europeo e nazionale



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal **Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali**
dell' **Associazione Italiana di Metallurgia**
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
**Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili**

La metallurgia della saldatura e l'innovazione
M. Balbi

Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

LA METALLURGIA DELLA SALDATURA E L'INNOVAZIONE

Mario Balbi

Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano

1. Introduzione

Dovendo affrontare in termini generali il tema proposto, e cioè "La metallurgia della saldatura e l'innovazione", è necessario premettere che sia gli acciai inossidabili, sia i processi di saldatura sono stati in questi ultimi anni, e sono tuttora oggetto di intensa e vivace attività di ricerca, che ha portato a notevoli progressi nelle prestazioni, nell'affidabilità, nella qualità in un'ampia gamma di casi.

Dovendo scegliere gli argomenti su cui concentrare l'attenzione, una buona esemplificazione può essere fatta prendendo in considerazione, quali rappresentanti degli acciai inossidabili più evoluti, i duplex, i superduplex e i superaustenitici, e tra i processi innovativi quelli ad alta concentrazione di energia quale il processo laser (o meglio le implicazioni sulla metallurgia della saldatura).

2. Acciai duplex e superduplex

Gli acciai inossidabili duplex offrono importanti vantaggi rispetto agli acciai inossidabili austenitici, poiché consentono di combinare la duttilità, la tenacità, la saldabilità la formabilità e la resistenza alla corrosione generalizzata tipica degli austenitici con la resistenza alla corrosione sotto tensione tipica dei ferritici, la resistenza al pitting e alla corrosione interstiziale.

Come famiglia non sono certo un materiale nuovo: infatti la loro origine risale agli anni '30, ma in questi ultimi anni essi hanno subito importanti evoluzioni ed hanno trovato affermazione in numerosi campi di impiego.

Gli acciai duplex sono caratterizzati da una struttura bifasica costituita da circa il 50% di ferrite e il 50% di austenite. I nuovi tipi hanno però tendenza ad aumentare l'austenite a tenori di 55-60%, e ciò è dovuto soprattutto all'incremento, nella composizione chimica del metallo base, degli elementi stabilizzanti l'austenite, per poter controllare più facilmente la microstruttura nella zona termicamente alterata di saldatura. A questo riguardo, tipicamente nei moderni acciai duplex l'azoto è considerato un elemento di lega essenziale sia per incrementare la saldabilità, sia per migliorare la resistenza alla corrosione particolarmente ad attacchi localizzati (pitting e crevice corrosion) (ref.1).

La saldatura degli acciai duplex è un argomento oggetto, negli ultimi anni, di interesse via via crescente: basti ricordare lo spazio ad essa dedicato nei congressi specializzati. L'evento più importante in questo campo è il congresso "Duplex Stainless Steel", che è stato tenuto nel 1986 a L'Aia, nel 1991 a Baume e

nel 1994 a Glasgow: ebbene nel 1986 furono dedicate a questo tema 23 memorie, 33 nel 1991 e 49 nel 1994.

Un aspetto fondamentale della saldatura degli acciai inossidabili bifasici è la grande influenza che il ciclo termico di saldatura ha sulla microstruttura: sia nella zona fusa, sia nella zona termicamente alterata hanno luogo trasformazioni di fase di entità rilevante, che influenzano fortemente le proprietà del giunto saldato, con riferimento soprattutto alla tenacità e alla resistenza alla corrosione. La struttura finale dipende sia dalla composizione chimica, sia dalla storia termica che il giunto subisce.

In seguito al rapido raffreddamento tipico dei processi di saldatura la zona fusa e la porzione di zona termicamente alterata che raggiunge le temperature più elevate hanno un tenore di ferrite più elevato di quanto ha il metallo base: in generale un aumento del rapporto ferrite/austenite provoca una diminuzione della resistenza alla corrosione e della tenacità del giunto saldato.

Un approccio generale per ottenere un rapporto ferrite/austenite favorevole è quello di aumentare l'apporto termico, il preriscaldamento e, nel caso di saldature multipass, aumentare la temperatura di interpass, così da ridurre la velocità di raffreddamento e promuovere una più completa trasformazione da ferrite ad austenite (ref.2,3).

2.1 Zona fusa

Per meglio introdurre i fenomeni che avvengono nella solidificazione di saldatura di questi acciai e le trasformazioni che hanno luogo nel successivo raffreddamento è opportuno seguire il raffreddamento su un diagramma pseudobinario Cr-Ni, cioè una sezione verticale a tenore di ferro costante del diagramma ternario Fe-Cr-Ni.

Per avere un termine di confronto con il comportamento degli acciai austenitici è opportuno vedere ciò che accade per questi; si prenda pertanto in considerazione il diagramma pseudobinario con Fe=70% (fig.1) (ref.4,5).

La struttura iniziale di solidificazione dipende solo dalla composizione nominale del metallo fuso alla temperatura del "liquidus"; tuttavia la segregazione degli elementi di lega durante la solidificazione in condizioni di non-equilibrio fa variare la composizione del liquido rimanente ed altera i prodotti della solidificazione finale. Un aumento della concentrazione di elementi austenitizzanti nel liquido rimanente, o una diminuzione degli elementi ferritizzanti, favorisce la solidificazione come austenite; una situazione opposta promuove la solidificazione come ferrite. Ipotesizzate alcune condizioni al contorno (assenza di diffusione nel solido a causa dei tempi troppo brevi; assenza di rimescolamenti meccanici nel liquido durante l'avanzamento dell'interfaccia solido-liquido, ma riaggiustamenti di composizione per fenomeni di diffusione che nel liquido avvengono più rapidamente che nel solido; presenza di condizioni di equilibrio a scala microscopica all'interfaccia solido liquido), con riferimento alla fig.1 è possibile dividere le leghe in due gruppi in funzione della struttura primaria di

solidificazione: alla destra dell'eutettico Fe-Cr-Ni (zona ricca di cromo) la solidificazione dà origine come struttura primaria alla ferrite; alla sinistra dell'eutettico (zona ricca di nichel) la struttura primaria di solidificazione è austenite.

Nel caso di solidificazione con ferrite primaria, in uno stadio transitorio iniziale si forma quello che, a solidificazione ultimata, sarà il cuore dei cristalli dendritici; questa porzione risulta costituita da ferrite particolarmente ricca di cromo e povera di nichel rispetto alla composizione nominale. Si ha poi uno stadio intermedio, in cui la ferrite che si forma ha la composizione chimica nominale, ed infine, quando l'interfaccia solido-liquido che avanza al procedere della solidificazione va a interferire con un fronte di solidificazione adiacente, inizia lo stadio finale, e la solidificazione si completa con la formazione di un eutettico separato.

Terminata la solidificazione, a seconda della composizione chimica (campo 2, 3 o 4 di fig.1) si hanno, nel successivo raffreddamento, trasformazioni strutturali che portano a diverse morfologie dei costituenti:

- struttura costituita da austenite+ferrite vermiculare (campo 2)
Entrando nel campo delta+gamma solo la ferrite che si è formata nello stadio intermedio e che ha la composizione nominale della lega subisce la trasformazione in austenite mediante un fenomeno di trasformazione massiva; la ferrite al cuore delle dendriti, più ricca in cromo e povera in nichel, risulta stabile e non si trasforma, rimanendo all'interno della matrice austenitica finale con una morfologia vermiculare o scheletrica a maglia semicontinua.
- struttura costituita da austenite+ferrite aciculari (campo 3)
Aumentando il rapporto Cr/Ni la linea delta-solvus si abbassa e la ferrite primaria risulta stabile in un campo di temperature più ampio; la trasformazione ferrite-austenite avviene a più bassa temperatura, senza fenomeni di diffusione, con formazione di placche lungo i primitivi cristalli ferritici e ottenimento di una morfologia aciculare; il rapporto ferrite/austenite è aumentato.
- struttura costituita da austenite (Widmanstaetten)+ferrite (campo 4)
Aumentando ulteriormente il rapporto Cr/Ni, la composizione nominale della lega prevede, anche in condizioni di equilibrio, coesistenza tra ferrite e austenite a temperatura ambiente, e si ha la situazione tipica degli acciai bifasici. La trasformazione da ferrite ad austenite avviene con accrescimento di nuclei formati al bordo dei grani, lungo piani preferenziali all'interno della matrice ferritica secondo una struttura di Widmanstaetten; il rapporto ferrite/austenite aumenta ulteriormente.

Nel caso di solidificazione con austenite primaria, nello stadio transitorio iniziale si forma austenite particolarmente ricca in nichel e povera in cromo (cuore delle dendriti); in uno stadio intermedio le dendriti si accrescono con formazione di austenite

avente composizione nominale; nello stadio finale il gradiente del soluto nel liquido all'interfaccia solido-liquido interferisce con quello di interfacce adiacenti e si origina, nelle ultime porzioni di solidificazione, un eutettico separato costituito da un miscuglio di austenite e ferrite sufficientemente ricca in cromo da rimanere stabile fino a temperatura ambiente.

Data la loro composizione chimica, per una analoga valutazione delle trasformazioni strutturali che avvengono nella saldatura di acciai duplex si fa ricorso a un diagramma pseudobinario avente Fe=60-65% (fig.2) (ref.7).

Con l'aumento del tenore degli elementi di lega, questo diagramma presenta un campo delta+gamma notevolmente allargato così da dare strutture bifasiche a temperatura ambiente anche con raffreddamenti eseguiti secondo condizioni di equilibrio.

Gli acciai inossidabili duplex e superduplex solidificano con formazione di ferrite primaria. Il diagramma di fig.2 mostra che, dopo la solidificazione, la struttura risulta completamente ferritica; nel successivo raffreddamento si raggiunge la curva delta-solvus (punto critico A4 del diagramma di stato), ove ha inizio il fenomeno di trasformazione strutturale da ferrite ad austenite. Tuttavia la velocità di raffreddamento è, di norma, troppo elevata per consentire la trasformazione da ferrite ad austenite secondo condizioni di equilibrio, e quindi tale da permettere un proporzionamento tra le fasi che riproduca la situazione del metallo base.

Nella zona fusa la solidificazione procede con una crescita epitassiale dal metallo base di cristalli dendritico-colonnari orientati secondo il gradiente termico. Le microsegregazioni dovute alla solidificazione sono di entità modesta, per la combinazione della elevata velocità di diffusione nella ferrite e della elevata temperatura, che favoriscono l'omogeneizzazione. Molto più importante è la partizione degli elementi in soluzione nella successiva trasformazione di fase che avviene allo stato solido.

La temperatura (punto A4 o delta-solvus) alla quale l'austenite comincia a formarsi (o, come talvolta si dice, a precipitare) dalla ferrite dipende dalla composizione chimica della zona fusa. La precipitazione avviene in posizione intergranulare, con formazione di austenite avente struttura di Widmanstaetten o secondo placche intragranulari, a seconda delle dimensioni dei cristalli ferritici e della velocità di raffreddamento.

La trasformazione da ferrite ad austenite avviene secondo un meccanismo massivo controllato da fenomeni di diffusione degli elementi interstiziali, ma non di quelli sostituzionali.

L'entità della trasformazione dipende essenzialmente dalla velocità di raffreddamento: con basse velocità di raffreddamento si ha formazione di una maggior quantità di austenite. Dipende però anche dalle dimensioni del grano ferritico: piccole dimensioni di grano favoriscono un elevato contenuto di austenite.

Nella trasformazione da ferrite a ferrite+austenite gli elementi di lega si ripartiscono tra le due fasi. Con elevate velocità di raffreddamento gli elementi sostituzionali (cromo, nichel,

molibdeno, ecc.) rimangono in quantità pressochè uguale nella fase delta e nella fase gamma, mentre gli elementi interstiziali (carbonio e azoto) si concentrano nell'austenite. Con velocità di raffreddamento modeste anche gli elementi sostituzionali si ripartiscono in modo differenziato nelle due fasi.

A causa della bassa solubilità dell'azoto nella ferrite, durante il raffreddamento si possono formare dei precipitati di nitruro di cromo esagonale Cr_2N , o di nitruro di cromo cubico CrN , e ciò in modo tanto più sensibile quanto minore è la trasformazione di ferrite in austenite; all'aumentare del tenore di austenite la precipitazione di nitruri di cromo diviene meno sensibile, sia per la più elevata solubilità dell'azoto nell'austenite, sia per la tendenza dell'azoto a segregare sull'austenite durante il raffreddamento. Questi precipitati influenzano negativamente la resistenza alla corrosione. A più alti tenori di azoto devono corrispondere più alti tenori di cromo per evitare una precipitazione troppo rapida.

Possono verificarsi anche precipitazioni di fasi intermetalliche: sigma, chi, R. Un elevato tenore di cromo e di molibdeno rendono questi acciai più sensibili alla precipitazione, particolarmente nel campo di temperature 800-950°C, mentre l'azoto tende a ritardarne la formazione. Gli effetti sono dannosi sia sulla resistenza alla corrosione, sia sulle proprietà meccaniche.

Il diagramma di fig.3 mostra schematicamente un diagramma tempo-temperatura-precipitazione (ref.8).

Gli acciai superduplex sono più sensibili alla caduta di proprietà, soprattutto resistenza alla corrosione, per precipitazione di fasi intermetalliche. In essi però l'aggiunta di tungsteno aumenta la stabilità della struttura, e un 2% di tungsteno sembra ridurre la cinetica di precipitazione delle fasi intermetalliche (ref.8).

Poichè, come più sopra detto, la trasformazione da ferrite ad austenite non avviene in condizioni di equilibrio, riscaldamenti effettuati successivamente (trattamenti post saldatura, o anche saldature eseguite con tecniche multipass) possono provocare una ulteriore precipitazione di austenite (austenite secondaria o gamma 2) che risulta avere composizione diversa da quella precedentemente formatasi (minori contenuti in cromo, molibdeno e azoto), e quindi una minore resistenza alla corrosione (in particolare suscettibilità all'attacco da pitting in ambienti contenenti ioni cloro).

Tutti questi precipitati influenzano in modo negativo la tenacità e la resistenza alla corrosione: l'impiego di metallo d'apporto più ricco in nichel rispetto al metallo base è in grado, da un lato, di favorire la trasformazione ferrite-austenite, e, dall'altro, di evitare la precipitazione di nitruri e di austenite secondaria. Questa scelta va però accuratamente valutata, per evitare che si verificino situazioni di eccessiva diminuzione della quantità di ferrite (con diminuzione della resistenza meccanica), o che la ferrite si arricchisca eccessivamente in cromo e molibdeno (rendendo più facile la formazione di fasi intermetalliche).

2.2 Zona termicamente alterata

In termini metallurgici i fenomeni più significativi hanno luogo con riscaldamento nella regione del diagramma pseudobinario di fig.2 compresa tra la linea del solidus e la linea delta-solvus. La stretta porzione di zona alterata adiacente alla zona fusa raggiunge, durante il riscaldamento, una temperatura che comporta il superamento della temperatura delta-solvus e quindi la formazione di una struttura completamente ferritica. L'ampiezza di questa zona dipende dalla composizione chimica: all'aumentare del rapporto Cr_{eq}/Ni_{eq} il campo ferritico si allarga, a causa del rapido abbassamento della linea delta-solvus.

Il raggiungimento di una struttura completamente ferritica dipende però dalla dissoluzione dell'austenite e degli eventuali precipitati presenti nel metallo base, e la cinetica di dissoluzione dipende dalla legge di riscaldamento. Un riscaldamento molto rapido (saldature a basso apporto termico) ritarda la dissoluzione dell'austenite e dei precipitati, mentre un riscaldamento piuttosto lento permette tale dissoluzione praticamente alla temperatura solvus d'equilibrio.

La durata del picco di temperatura all'interno della regione ferritica governa poi l'ulteriore evoluzione strutturale, che è costituita dalla crescita del grano ferritico.

Dal diagramma pseudobinario di fig.2 si vede che nel caso di acciai superduplex la struttura completamente ferritica in zona termicamente alterata si raggiunge con picchi di temperatura più elevati che negli acciai duplex convenzionali, pertanto nel giunto saldato l'area interessata è limitata ad una ristretta fascia lungo il bordo di fusione, dell'ampiezza di uno-due diametri di grano.

Durante il raffreddamento avvengono fenomeni del tutto simili a quelli descritti nel caso della zona fusa: riformazione dell'austenite (sia inter- che intra-granulare), precipitazione di fasi intermetalliche. Se la velocità di raffreddamento aumenta la trasformazione ferrite-austenite viene ritardata, e la zona termicamente alterata diviene più ferritica. La precipitazione di nitruri Cr_2N è più sensibile con un alto tenore di ferrite, mentre gli altri precipitati (fase sigma, fase chi) sono favoriti da basse velocità di raffreddamento.

Ovviamente non è possibile operare con interventi sulla composizione chimica, che rimane quella del metallo base, pertanto il controllo della struttura della zona termicamente alterata è unicamente basato sul ciclo termico.

Si può tuttavia ricorrere a un metallo base che abbia una composizione chimica opportunamente bilanciata per tener conto di questi problemi: così l'aggiunta di azoto è in grado di aumentare la stabilità dell'austenite ad alta temperatura, come è mostrato nel diagramma pseudobinario di fig.4 (ref.9)

La suscettibilità alla formazione di cricche per liquazione è modesta, e del tutto paragonabile a quella degli acciai inossidabili austenitici.

Il fenomeno delle cricche per liquazione viene spiegato

ricorrendo a più meccanismi di formazione.

Un meccanismo, detto di penetrazione, è basato sull'interazione tra bordi di grano in movimento a causa di fenomeni di crescita, con particelle (carburi, solfuri, boruri) soggette a fenomeni di liquazione costituzionale. Durante un rapido riscaldamento al di sotto della temperatura del solidus relativa alla matrice, lungo l'interfaccia particella-matrice avvengono fenomeni di liquazione come conseguenza di una rapida dissoluzione della particella stessa. L'entità della formazione di liquido è funzione della velocità di riscaldamento (con riscaldamenti molto rapidi, quali quelli ottenibili con laser o con electron beam, la liquazione costituzionale è praticamente assente; viceversa con riscaldamenti lenti, ad esempio nella saldatura sotto scoria, si ha una dissoluzione che avviene praticamente in condizioni di equilibrio, e quindi senza fenomeni di liquazione; il fenomeno è cioè rilevabile con velocità di riscaldamento intermedie).

Quando il bordo di grano, nel suo moto dovuto alla crescita, incontra una zona in cui si è formato il liquido in seguito alla liquazione, viene bagnato e un film liquido si forma lungo di esso. Si determinano così condizioni di criccabilità a caldo e in presenza delle azioni di sollecitazione meccanica indotte dalle vicende termiche si possono formare delle cricche (fig.5) (ref.10). Un secondo meccanismo, detto di segregazione, giustifica le cricche da liquazione quando siano assenti le particelle di cui sopra. In questo caso si tratta semplicemente di segregazione al bordo di grano di elementi in soluzione o di impurezze aventi elevata attività superficiale e/o bassa solubilità nel metallo base, che riducono il punto di fusione (negli acciai inossidabili tali elementi possono essere zolfo, fosforo, carbonio, antimonio, arsenico, stagno). Oppure la segregazione può avere luogo a causa di una diffusione canalizzata che ha origine nella zona fusa. Infatti, poiché la solidificazione ha luogo tramite un processo di nucleazione epitassiale, i bordi di grano rappresentano una entità continua dalla zona di fusione alla zona termicamente alterata attraverso il confine della zona fusa. Gli elementi che si concentrano nel liquido al contorno del grano che sta solidificando possono essere canalizzati preferenzialmente per diffusione lungo il bordo di grano fin dentro la zona termicamente alterata (fig.6) (ref.10).

Ricerche condotte su questo fenomeno sembrerebbero indicare nei meccanismi di segregazione la causa più probabile di cricche da liquazione in zona termicamente alterata nel caso degli acciai inossidabili austenitici e bifasici (ref.10).

Nella porzione di zona termicamente alterata più lontana dalla zona fusa la temperatura raggiunta non consente la completa ferritizzazione, e la struttura rimane bifasica. Il ciclo termico può però creare la formazione di fasi intermetalliche.

Complessivamente il ciclo termico di saldatura (e quindi i parametri di saldatura) deve essere tale da assicurare condizioni di raffreddamento sufficientemente lente e tali da permettere una adeguata formazione di austenite ad alta temperatura, e sufficientemente veloci e tali da evitare la dannosa formazione di precipitati a bassa temperatura.

Con le più alte velocità di raffreddamento si ha una forte caduta della tenacità, a causa soprattutto del maggior contenuto di ferrite e della densità di precipitati intra-granulari (soprattutto Cr₂N). Con velocità di raffreddamento intermedie si hanno buone condizioni di tenacità (diminuisce la ferrite e la precipitazione intra-granulare è sensibilmente ridotta). Con velocità di raffreddamento lente si ha una nuova caduta di tenacità, nonostante una ulteriore diminuzione della quantità di ferrite, a causa dell'aumento delle sue dimensioni del grano. Gli acciai superduplex mostrano limitate variazioni di tenacità per un ampio range di variazioni di velocità di raffreddamento (ref.7).

3. Acciai superaustenitici

Gli acciai superaustenitici sono stati introdotti sul mercato alla fine degli anni '70 e si sono affermati per le loro eccellenti doti di resistenza alla corrosione in un'ampia gamma di ambienti altamente aggressivi; per migliorare la resistenza alla corrosione localizzata vi è stata una evoluzione verso tipi ad alto tenore di azoto, con elevati contenuti di cromo e di molibdeno (ref.11).

I problemi tipici che possono presentarsi nella saldatura riguardano la microsegregazione, le precipitazioni, la criccabilità a caldo e la formazione di porosità.

La microsegregazione del molibdeno e, in parte, del cromo durante la solidificazione, accompagnata dalla perdita di elementi di lega, soprattutto azoto, possono portare ad una diminuzione della resistenza al pitting nel caso di saldatura autogena.

Interventi per contrastare il problema possono essere l'impiego di azoto nei gas di protezione, il trattamento termico post-saldatura, se applicabile, per l'omogeneizzazione della microsegregazione, l'impiego di metallo d'apporto ad alto tenore di cromo e molibdeno (e con elevati tenori di nichel per mantenere austenitica la struttura).

Nella maggior parte degli acciai superaustenitici la solidificazione avviene con formazione di austenite primaria; sebbene in generale questa situazione si presenti assai meno favorevole, a causa della sensibilità alla formazione di cricche a caldo, rispetto ad una solidificazione con ferrite primaria, tuttavia la tendenza alla criccabilità a caldo è modesta.

La microstruttura della zona fusa risulta costituita da una matrice di austenite con piccole quantità di seconde fasi interdendritiche.

Assai limitato è il pericolo di precipitazione di carburi. L'elevato tenore di azoto riduce la tendenza alla formazione sia di carburi, sia di fasi intermetalliche; una certa precipitazione di composti intermetallici lungo il bordo di grano nella zona termicamente alterata può tuttavia avvenire, senza influenze apprezzabili sulla resistenza al pitting.

La microstruttura della zona termicamente alterata risulta costituita da una matrice di austenite con fini precipitati di fasi intermetalliche al bordo dei grani.

La elevata solubilità dell'azoto nella struttura austenitica (più elevata ancora che nel liquido) evita praticamente il rischio di

formazione di porosità.

Il tungsteno ha effetto stabilizzante sulla struttura, quando aggiunto in combinazione con alti tenori di azoto e in parziale sostituzione del molibdeno.

4. Processi di saldatura ad alta concentrazione di energia

Questi tipi di processi, quali la saldatura laser, sono caratterizzati da apporti termici assai limitati, con raffreddamenti molto veloci che portano a solidificazioni assai rapide.

Con saldatura laser sono stati individuati sei tipi di solidificazione (ref.12):

- tipo 1 : completamente austenitica
- tipo 2 : austenite primaria + ferrite eutettica
- tipo 3 : ferrite primaria + austenite
- tipo 4 : eutettico a bastoncelli
- tipo 5 : austenite + ferrite massive
- tipo 6 : completamente ferritica.

di cui i tipi 4 e 5 non sono riscontrabili con i parametri di raffreddamento tipici dei procedimenti tradizionali quali il TIG. Nella solidificazione tipo 4 l'austenite con forma a bastoncelli presenta relazioni di orientamento con le direzioni $\langle 100 \rangle$ parallele alle direzioni $\langle 100 \rangle$ della matrice ferritica. In tale struttura la distribuzione degli elementi tra ferrite e austenite è più uniforme che nelle strutture ottenibili ad esempio con saldatura TIG.

Si tratta di una struttura caratterizzata da ottima resistenza alla corrosione, in quanto la segregazione di impurezze risulta fortemente ridotta anche in conseguenza dell'elevata area totale di bordo di grano per unità di volume dovuta alla struttura molto fine.

Nella solidificazione tipo 5 si ha come risultato una microstruttura costituita da una matrice austenitica con ferrite massiva, senza differenza di composizione chimica tra austenite e ferrite.

La resistenza alla corrosione per pitting è molto elevata, poiché la solidificazione avviene senza ripartizione degli elementi e la struttura massiva risulta costituita da una struttura duplex molto fine.

In fig.7 sono riportati, sul diagramma di Schaeffler, gli intervalli di composizione a cui corrispondono i diversi tipi di solidificazione: si può notare che la solidificazione tipo 4 conseguente all'uso del laser corrisponde all'area interessata dalla solidificazione con ferrite primaria nel caso di saldatura TIG, e come all'aumentare della velocità di raffreddamento l'intervallo di composizioni prima si allarga e poi si restringe. In conseguenza del cambiamento del modo di solidificazione anche la quantità di ferrite delta a temperatura ambiente cambia: in fig.8 sono riportate le modifiche che subisce il diagramma di Schaeffler con l'aumento della velocità di raffreddamento.

La letteratura tecnica conferma la riduzione nel contenuto di ferrite negli acciai austenitici con l'aumentare della velocità

di solidificazione, fino a situazioni di strutture completamente austenitiche.

Altre esperienze (ref.13) con processi a rapida solidificazione, quale la saldatura a scarica capacitiva, concordano con tali indicazioni. Nel caso di acciai austenitici, ad esempio 304, 316, 308, la struttura risulta completamente austenitica, con solidificazione cellulare o dendritico-cellulare a struttura sempre fine all'aumentare della velocità di raffreddamento. La crescita epitassiale dai grani cristallini lungo la linea di fusione dà luogo a solidificazione con austenite primaria, e la velocità di raffreddamento necessaria ad ottenere tale tipo di solidificazione aumenta all'aumentare del rapporto Cr.eq/Ni.eq. Se nel metallo base sono presenti piccole quantità di ferrite, come nel caso dell'acciaio 308, allora può aver luogo una solidificazione mista, con crescita epitassiale di ferrite primaria dalle isole ferritiche presenti lungo la linea di fusione. Nel successivo raffreddamento, mediante un meccanismo di trasformazione massivo non governato da fenomeni di diffusione, tutta la ferrite diviene austenite.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - D.J.Kotecki, J.L.P.Hilkes
Welding processes for duplex stainless steels.
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 2 - M.Liljas
The welding metallurgy of duplex stainless steels.
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 3 - A.Dhooge, E.Deleu
Weldability and fracture behaviour of duplex and superduplex stainless steels.
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 4 - J.C.Lippold, W.F.Savage
Solidification of austenitic stainless steels weldments.
Part I: A proposed mechanism; Part II: The effect of alloy composition on ferrite morphology.
Welding Journal, 58(1979)362s-374s; 59(1980)48s-53s.
- 5 - M.Balbi
Gli acciai inossidabili e la saldatura: IV/ La microstruttura del cordone di saldatura degli acciai inossidabili austenitici.
L'Acciaio Inossidabile, 52, n.4(1985)19-23
- 6 - J.A.Brooks, A.W.Thompson, J.C.Williams
A fundamental study of beneficial effect of delta ferrite in reducing weld cracking.
Welding Journal, 63(1984)71s-83s

- 7 - J.C.Lippold, W.Lin, S.Brandi, I.Varol, W.A.Baeslack III
Heat-affected zone microstructure and properties in
commercial duplex stainless steels
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 8 - J.Charles
Structure and mechanical properties of duplex stainless steels
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 9 - J.Charles, B.Bonnefois
Super duplex stainless steels: properties and weldability
Applications of stainless steel 92, Stockholm, 9-11 June 1992
- 10 - J.C.Lippold, W.A.Baeslack III, I.Varol
Heat-affected zone liquation cracking in austenitic and
duplex stainless steels.
Welding Journal, 71(1992)1s-14s
- 11 - M.Liljas, P.Stenvall, B.Holmberg, O.Jonsson
Welding of a nitrogen enhanced superaustenitic stainless
steel.
Applications of stainless steel 92, Stockholm, 9-11 June 1992
- 12 - Y.Nakao
Welding and surface modification of advanced stainless
steels.
Duplex Stainless Steels, Glasgow, 13-16 November 1994
- 13 - S.Venkataraman, J.H.Devletian
Rapid solidification of stainless steels by capacitor
discharge welding.
Welding Journal, 67(1988)111s-116s.

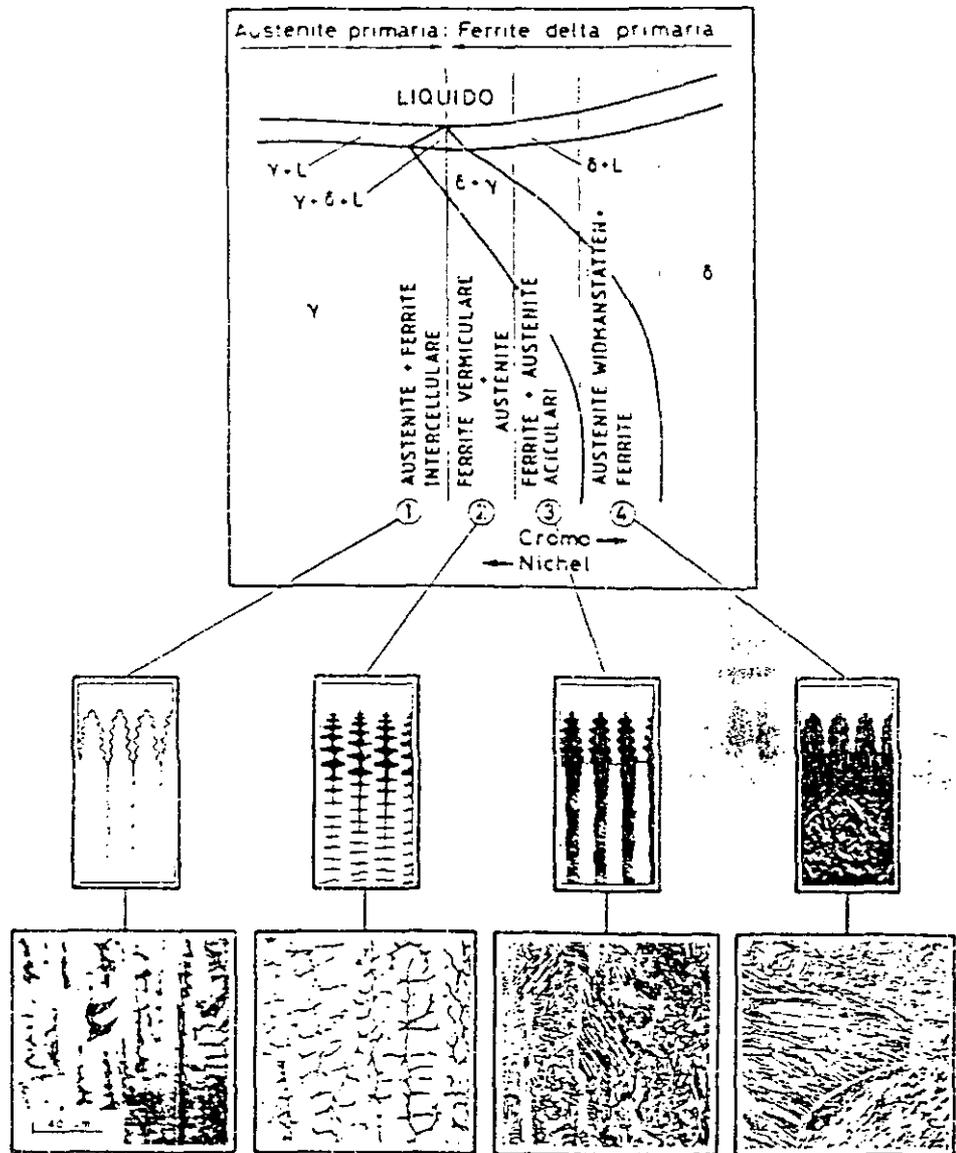


Figura 1 - Diagramma pseudobinario per lo studio della solidificazione e delle trasformazioni strutturali di saldature di acciai inossidabili austenitici (ref.5, elaborazione da ref.4,6)

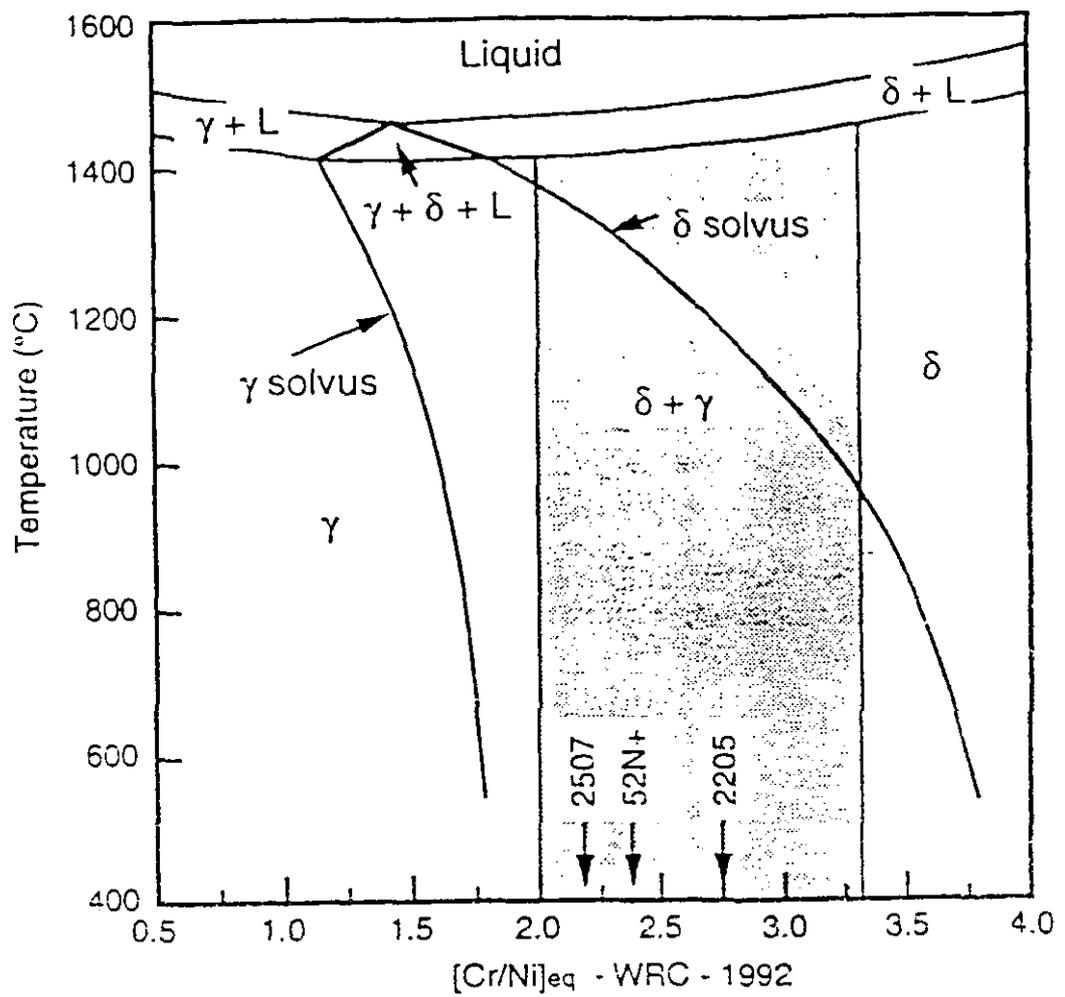


Figura 2 - Diagramma pseudobinario disegnato usando le relazioni di equivalenza WRC 1992 (ref.7)

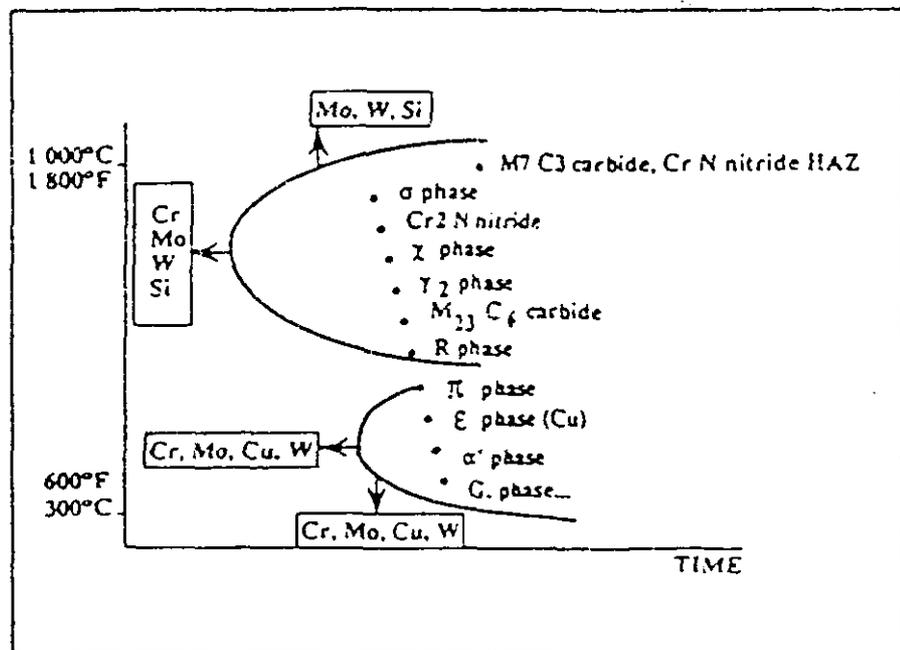


Figura 3 - Tipici fenomeni di precipitazione che avvengono in acciai duplex (ref.8)

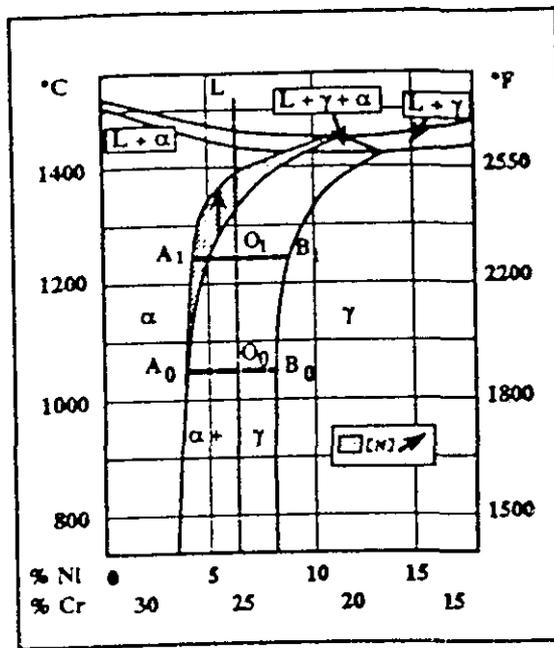


Figura 4 - Effetto schematico dell'aggiunta di azoto sul diagramma pseudobinario Cr-Ni-68Fe (ref.9)

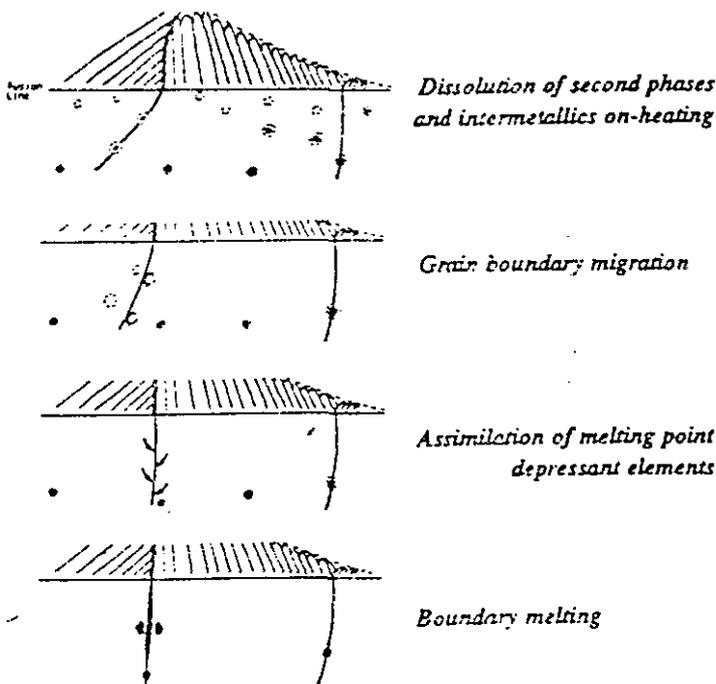


Figura 5

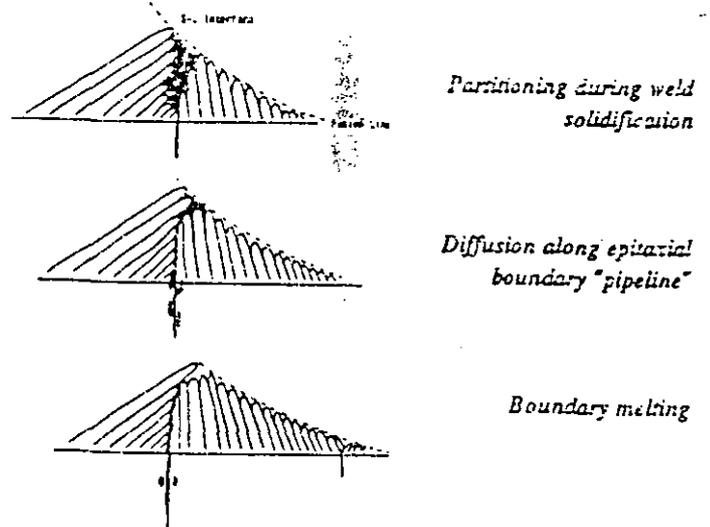
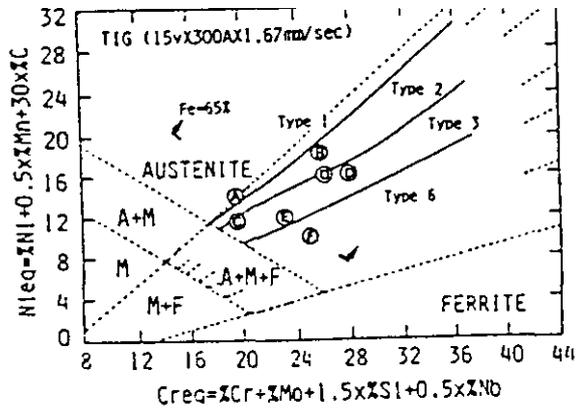


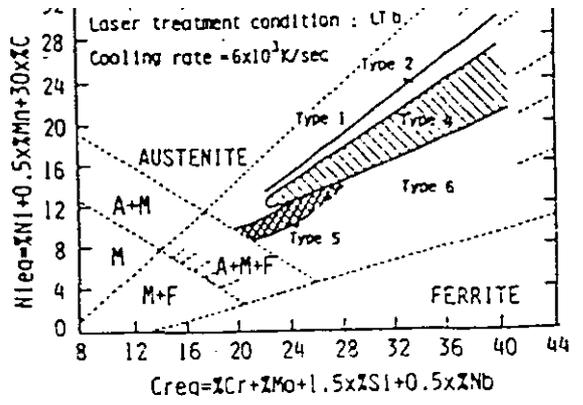
Figura 6

Figura 5 - Meccanismo di penetrazione nella formazione di cricche da liquazione nella zona termicamente alterata (ref.10)

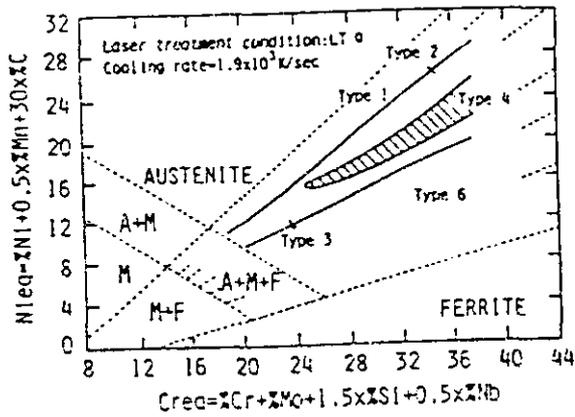
Figura 6 - Meccanismo di segregazione: schema di canale di diffusione nella formazione di cricche da liquazione nella zona termicamente alterata (ref.10)



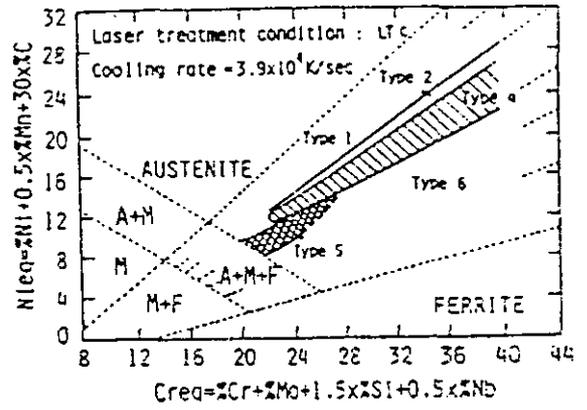
(a)



(c)

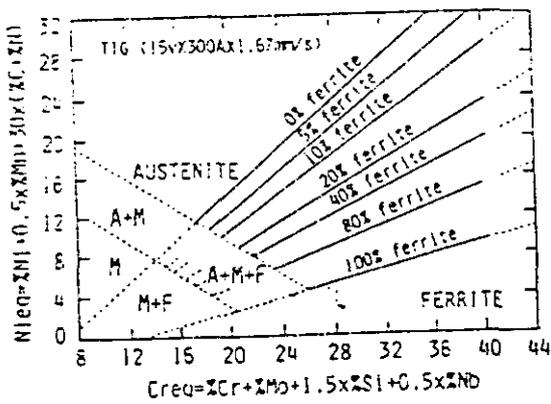


(b)

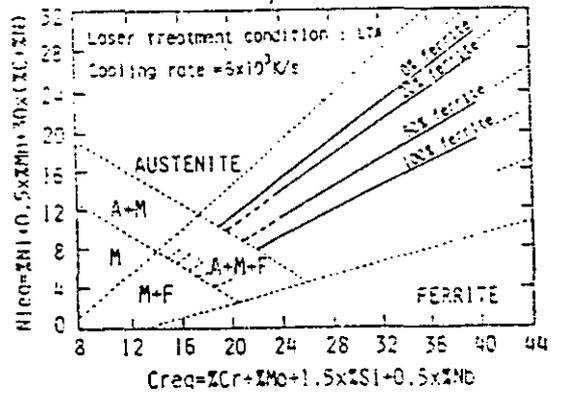


(d)

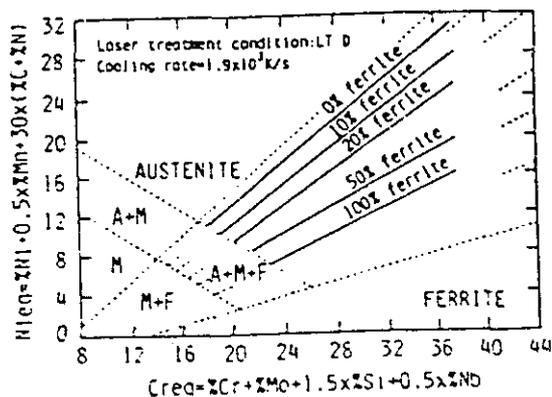
Figura 7 - Intervalli di composizione per ogni tipo di solidificazione e posizione sul diagramma di Schaeffler (ref.12)



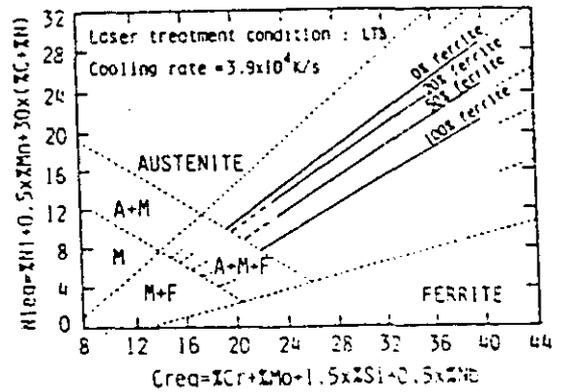
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 8 - Modificazioni del diagramma di Schaeffler con la velocità di raffreddamento (ref.12)



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali
dell' Associazione Italiana di Metallurgia
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili

**La saldabilita' degli acciai inossidabili
austeno-ferritici: alcuni casi particolari**
A. Lauro, G. Canale

Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

Istituto Italiano della Saldatura

La saldabilità degli acciai inossidabili austeno-ferritici: alcuni casi particolari

(A. Lauro, G. Canale)

1. Cenni sulla saldatura degli acciai austeno-ferritici

La morfologia delle strutture che si formano in un deposito di saldatura in acciaio austeno-ferritico è comune, nella sostanza, a quella di altri materiali, risultando strettamente dipendente dai parametri termologici del procedimento di saldatura, con strutture spiccatamente direzionali (dendritiche) sviluppate nella direzione del massimo gradiente termico, nella zona a più elevata velocità di raffreddamento, e maggiormente globulizzate nelle zone che hanno subito un ciclo termico meno severo.

La struttura metallografica che si sviluppa durante la solidificazione, risulta inizialmente ferritica (ferrite δ) e successivamente, al progredire del raffreddamento, ha inizio la nucleazione dei grani austenitici a partire dal bordo dei grani ferritici preesistenti, o attraverso la formazione di strutture del tipo "Widmanstätten" entro il grano ferritico. I diversi meccanismi di solidificazione sono fortemente influenzati dalla velocità di raffreddamento. Poiché la fase ferritica presente a raffreddamento ultimato va considerata, per quanto detto, una struttura residua non trasformata, si comprende come all'aumentare della velocità di raffreddamento, la percentuale di ferrite δ residua nel deposito tenda ad aumentare.

Inoltre non va dimenticata l'influenza dell'analisi chimica della zona fusa, ed in particolare la presenza di elementi fortemente austenitizzanti (C, Ni, N) o ferritizzanti (Cr, Mo) che rivestono anch'essi grande importanza, in quanto sono caratterizzati da effetti di stabilizzazione dell'una o dell'altra fase. In particolare l'azoto, elemento fortemente austenitizzante (con effetto 20 volte superiore a quello del Ni) presente nel materiale di base e nei materiali di apporto omogenei, può trovarsi in percentuali non trascurabili, talvolta attraverso apposite aggiunte, nei gas di protezione utilizzati per la

saldatura, che pertanto, nel caso della saldatura di acciai austeno-ferritici, assumono una funzione di importanza determinante dal punto di vista metallurgico.

Un fattore che viene utilizzato generalmente per la definizione della resistenza al "pitting" è il PRE_n (v. fig.1) dal quale si evidenzia l'influenza degli elementi di lega fondamentali e, in particolare, dell'azoto.

Altrettanto importante, nella saldatura degli acciai austeno-ferritici, è la ripartizione percentuale fra le fasi ferritica ed austenitica che contribuisce alla definizione delle prestazioni in servizio. Generalmente è richiesta una percentuale di ferrite δ in zona fusa compresa fra 30% e 70%, a seconda dei diversi casi. Da quanto sopra esposto risulta fondamentale precisare accuratamente tutti i parametri tecnologici che possono influenzare la distribuzione finale delle fasi presenti nei giunti saldati.

Per quanto concerne la saldabilità di questi materiali, essa può considerarsi senza dubbio eccellente. Il rischio di formazione di cricche da idrogeno, grazie alla presenza di alte percentuali di austenite, è limitato ad alcuni casi particolari; la struttura bifasica della zona fusa offre notevoli garanzie nei confronti del rischio di cricche di solidificazione; problemi di fragilità dei giunti possono intervenire solo nel caso di percentuali di ferrite molto elevate; non è praticamente mai richiesto adottare preriscaldi né effettuare trattamenti termici post-saldatura; possono essere ammesse temperature di interpass più elevate che nel caso degli acciai inossidabili austenitici; la suscettibilità alla precipitazione di carburi è modesta. Viceversa valgono le stesse precauzioni adottate per gli acciai inossidabili austenitici per quanto attiene alle condizioni di pulizia dei materiali di base e di apporto, all'utilizzo di attrezzatura esente da materiali o sostanze contaminanti, al rigoroso controllo dei parametri tecnologici di saldatura (in particolare dell'apporto termico specifico), all'impiego di tecnici saldatori di elevata abilità operativa, al controllo, in produzione, dell'applicazione rigorosa delle procedure di saldatura.

Da un punto di vista generale, infine, si ricorda che gli acciai austeno-ferritici, ed i giunti saldati in particolare, non mostrano elevate caratteristiche di tenacità a bassa temperatura (per l'elevato contenuto di ferrite δ) e risultano suscettibili ai fenomeni di fragilizzazione ad alte temperature (precipitazione di fase σ , di fase χ e "fragilità a 475°C), ciò che determina un campo di applicazione per questi materiali ristretto a temperature comprese fra - 20°C e + 280°C. Inoltre una riduzione delle caratteristiche di resistenza alla corrosione puntiforme si presenta nel caso di precipitazione di nitruri di cromo (Cr_2N).

Nel seguito verranno descritti alcuni aspetti particolari della saldatura di acciai austeno-ferritici, tratti dalle esperienze dell'Istituto Italiano della Saldatura maturate attraverso attività di consulenza, certificazione, assistenza e sorveglianza in fabbricazione e attraverso lo scambio continuo di esperienze con gli altri partners a livello internazionale.

CASO 1. Uso dell'azoto nei gas di protezione

Alle temperature dell'arco elettrico di saldatura l'azoto presente nei gas di protezione si dissocia e può essere attivamente disciolto nel metallo di saldatura.

In pratica si constata che con l'aggiunta di percentuali di azoto fra 2% e 5% al gas di protezione Argon alla torcia si ottengono i migliori risultati nella saldatura TIG di piccoli spessori senza materiale di apporto. Percentuali più elevate di azoto alla torcia possono causare un rapido deterioramento dell'elettrodo infusibile e la formazione di porosità nel bagno.

La presenza di azoto nel gas di protezione al rovescio (in percentuale o al 100%) può contribuire a calibrare correttamente la percentuale di azoto nella prima passata. Ciò vale in particolare nel caso di depositi che richiedano un contenuto di azoto $>0.20\%$ (acciai superduplex) per limitare o annullare le perdite di azoto che, anche per valori dell'ordine di $0.01\% - 0.05\%$, possono influenzare il comportamento in servizio del giunto saldato, con riduzioni del PRE_n dell'ordine di $-0.16 \div -0.80$.

CASO 2. Gas di protezione Argon addizionato con piccole percentuali di SO_2

Prove sperimentali di saldatura di giunzioni circonferenziali di tubazioni in acciaio tipo ASTM A 790 UNS S31803, di diverso diametro e spessore, hanno messo in evidenza l'effetto benefico, nei riguardi della penetrazione della prima passata, eseguita con procedimento di saldatura (TIG), di aggiunte in piccola percentuale di SO_2 nel gas di protezione Argon (v. fig. 2). Tale effetto è da ricondursi all'estrema purezza del materiale base, dovuta al sempre miglior grado di affinamento dei moderni acciai. E' stato dimostrato che elementi microalliganti ed impurezze contenuti nel metallo base e/o introdotti dai materiali di apporto e dai gas e rivestimenti protettivi controllano la profondità di penetrazione, agendo sulla tensione superficiale del bagno di fusione (effetto Marangoni) e sulle dimensioni della macchia anodica; elementi quali S, Co, Si, O_2 , As risultano favorevoli alla penetrazione. Nel caso citato aggiunte di SO_2 in concentrazione 0.075% molare al gas di protezione Argon hanno migliorato notevolmente la penetrazione in prima passata che risultava affatto insufficiente con protezione in Argon 100%.

<i>Materiale base:</i>	<i>tubo ϕ 260 x 20 mm in acciaio tipo ASTM A 790 UNS S31803</i>
<i>Tipo di giunto:</i>	<i>testa a testa circonferenziale</i>
<i>Geometria del cianfrino:</i>	<i>v. fig. 3</i>
<i>Procedimento di saldatura:</i>	<i>1^a passata TIG, riempimento in elettrodo rivestito</i>
<i>Materiali di apporto:</i>	<i>bacchetta ER2209 AWS A 5.9, ϕ 2.4 mm; elettrodi rivestiti E2209 AWS A 5.4, ϕ 3.25-4 mm</i>
<i>Protezione torcia:</i>	<i>Argon + SO_2 0.075% molare, 14 l/min</i>
<i>Protezione al rovescio:</i>	<i>Argon 100% con flussaggio preliminare.</i>

Il giunto così realizzato ha superato la Prova Huey di resistenza alla corrosione intercristallina (secondo ASTM A 262 Pr. C), manifestando una velocità di corrosione, media su 5 cicli, < 0.6 mm/anno ed una penetrazione massima dell'attacco selettivo $< 180 \mu m$, nonostante un certo grado di ossidazione superficiale al rovescio, che in talune condizioni di servizio particolarmente severe, dal punto di vista della corrosione,

possono risultare non accettabili. In questi casi, tenori di SO_2 inferiori ai limiti sopra indicati (300 - 500 ppm) possono garantire comunque una buona penetrazione al rovescio del giunto riducendo sensibilmente i fenomeni di ossidazione.

Attraverso prove proposte dall'Istituto Italiano della Saldatura è stata messa a punto una procedura di accettazione dei materiali di base in acciaio austeno-ferritico, per il settore aerospaziale, che prevede la verifica della composizione chimica, con particolare riguardo agli elementi secondari, e definisce i criteri di accettabilità per quanto riguarda la penetrazione in saldatura, da verificare attraverso prove preliminari di accettazione i cui criteri di esecuzione vengono anch'essi fissati. Tali prove prevedono l'esecuzione di un cordone di rifusione mediante procedimento TIG e la misura, su sezioni macrografiche (a 20 ingrandim.) del fattore di forma del cordone stesso (v. fig.4).

CASO 3. Influenza dell'apporto termico specifico sulla percentuale di ferrite δ in zona fusa

Nella tabella in fig. 5 sono riportati i valori di FN (Ferrite Number) ed EFN (Extended Ferrite Number) ottenuti su due depositi tipo 22Cr-7Ni-3Mo LC e 22Cr-9Ni-3Mo LC con diversi valori di apporto termico specifico e temperatura di preriscaldamento. Per i depositi sono stati utilizzati materiali di apporto della cosiddetta "terza generazione" con tenori in Nichel incrementati fino al 7 - 9% e tenori in Azoto pari a 0.15 - 0.20%. Si nota come tali materiali di apporto diano luogo a depositi in cui la percentuale di ferrite risulta molto meno sensibile ai parametri termologici di saldatura.

Nella fig. 6, tratta dagli studi dell'I.I.W., sono proposti valori raccomandati di apporto termico specifico, per diversi spessori e tempi di raffreddamento nell'intervallo critico 1200-800 °C. Si nota che tempi di raffreddamento inferiori a 6 s possono tradursi in percentuali di ferrite δ non ottimali.

CASO 4. Utilizzo di miscele Argon - H_2

L'utilizzo di miscele Argon - H_2 , comunemente utilizzate nella saldatura degli acciai inossidabili austenitici, può essere estremamente interessante per un migliore controllo della morfologia delle passate, per prevenire fenomeni di ossidazione e per l'ottenimento di bagni di fusione più "caldi", ma risulta altamente rischioso per la formazione di cricche da idrogeno, ove le percentuali di ferrite δ in zona fusa siano elevate (> 60%, \approx 85 FN); è il caso di saldature TIG o Plasma senza aggiunta di materiale d'apporto, caratterizzate da contenuti di ferrite in zona fusa che, talvolta, possono avvicinarsi al 100%.

I casi pratici più frequenti in cui si verificano queste condizioni possono essere:

- a) saldatura testa a testa di piccoli spessori, con preparazione a lembi retti accostati;
- b) rifusione TIG (TIG dressing) allo scopo di migliorare la finitura superficiale dei

cordoni;

- c) prima passata di giunti testa a testa, con preparazioni dei cianfrini a luce zero (es. preparazione a Y).

In questi casi l'aggiunta di H_2 ha generalmente lo scopo di migliorare ulteriormente la finitura dei cordoni (caso b), migliorare la penetrazione in prima passata e contenere i tenori massimi di ferrite δ (casi a,b,c). Tuttavia, per quanto sopra detto, l'introduzione di H_2 nel gas di protezione deve essere assolutamente evitata.

CASO 5. Saldatura TIG di tubazioni in acciaio tipo 22 Cr-5Ni - Qualificazione del procedimento

In allegato 1 è riportato una PQR (secondo il codice ASME Sez. IX) relativa all'esecuzione di un saggio per la qualificazione di una procedura di saldatura relativa alla giunzione circonferenziale di tubazioni in acciaio ASTM A 790 UNS S31803, mediante procedimento di saldatura TIG manuale. Oltre ai parametri tecnologici di saldatura sono riportati i risultati delle prove meccaniche eseguite e le immagini metallografiche del deposito (v. figg. 7 e 8), sul quale sono state effettuate misure della percentuale di ferrite sulla media di 50 campi.

CASO 6. Saldatura TIG di tubazioni in acciaio tipo 25 Cr-7 Ni - Qualificazione del procedimento

In allegato 2 è riportata una PQR (secondo il codice ASME Sez. IX) relativa all'esecuzione di un saggio per la qualificazione di una procedura di saldatura relativa alla giunzione circonferenziale di tubazioni in acciaio ASTM A 790 UNS S32750, mediante procedimento di saldatura TIG manuale. Oltre ai parametri tecnologici di saldatura sono riportati i risultati delle prove meccaniche eseguite e le immagini metallografiche del deposito (v. figg. 9 e 10), sul quale sono state effettuate misure della percentuale di ferrite sulla media di 50 campi.

CASO 7. Saldatura Plasma di lamiere in acciaio tipo 23 Cr-4 Ni - Qualificazione del procedimento

In allegato 3 sono riportati i risultati delle prove di qualifica del procedimento di saldatura ad arco plasma, sotto protezione di gas, con materiale d'apporto ER2209 AWS A 5.9 ϕ 1.2 mm, secondo la Raccolta S ex ANCC, per la realizzazione di giunti testa a testa senza ripresa a rovescio fra lamiere in acciaio ASTM A 240 UNS S 32304, in posizione frontale. Oltre ai parametri tecnologici di saldatura vengono riportati i risultati delle prove meccaniche eseguite, le immagini macrografiche del deposito ottenuto e i risultati della determinazione metallografica del contenuto di ferrite δ del giunto.

$$PRE_n = \% Cr + 3.3 \% Mo + 16 \% N_2$$

Figura 1

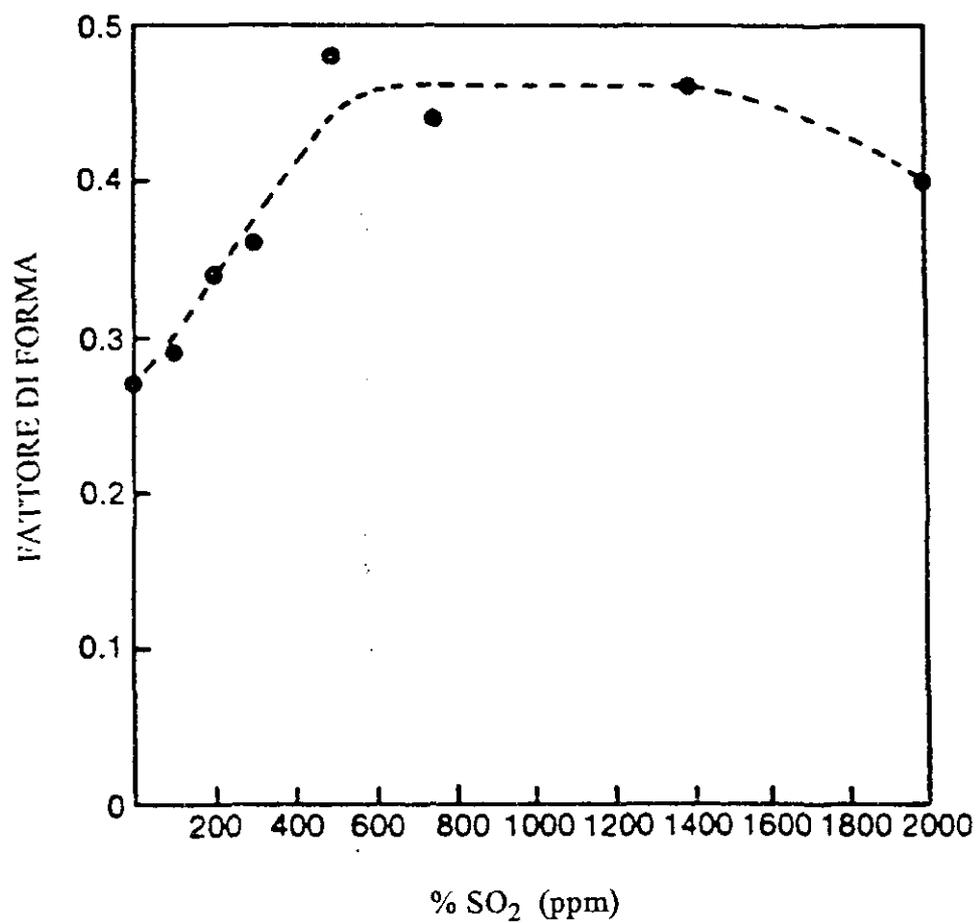


Figura 2: Effetto della percentuale di SO_2 nel gas di protezione alla torcia sul fattore di forma di saldature TIG

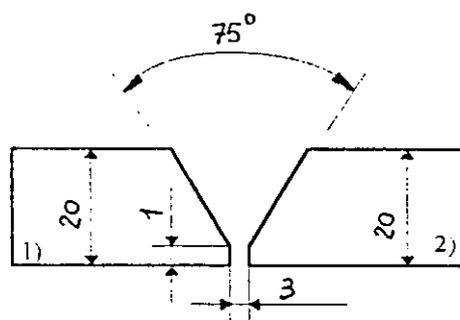
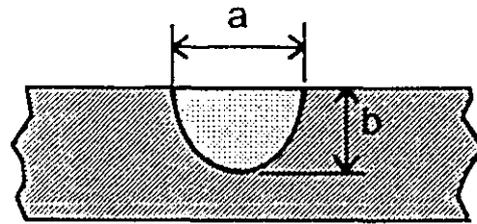


Figura 3

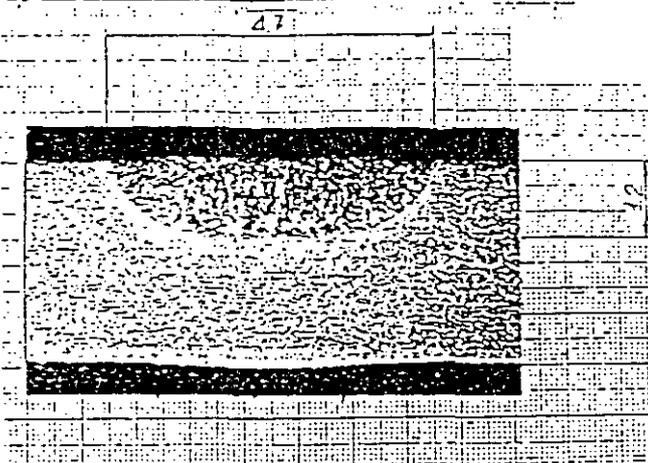
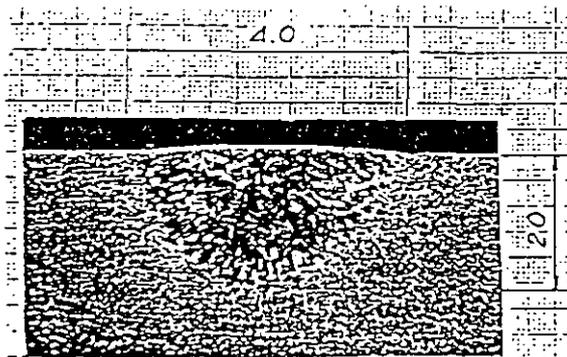
Il fattore di forma "P" deve essere:

$$P = \frac{b}{a} = 0.5 \div 0.6$$

$$a \leq 4 \text{ mm}$$



ACCETTABILE



INACCETTABILE

VALORI RACCOMANDATI DEGLI ELEMENTI SECONDARI: (%)

Zolfo	0.0060÷0.010	Tungsteno	0.010÷0.060
Fosforo	0.025 max	Ossigeno	0.003÷0.015
Alluminio	0.010÷0.020	Rame	0.10÷0.30
Cerio	0.0010 max	Vanadio	0.10 max
Cobalto	0.040÷0.20	Calcio	0.0010÷0.0015
Niobio	0.030 max	Ferro	resto

Figura 4

Composizione nominale del deposito	Apporto termico specifico (KJ/mm)	Temperatura di preriscaldamento (°C)	Velocità di raffreddamento		EFN	FN
			Δt 12/9 (s)	Δt 8/5 (s)		
22 Cr, 7 Ni, 3 Mo, N	0.8	20	3.9	8.1	63	42
	0.9	150	4.2	10.2	67	45
	2.5	20	9.6	30.0	70	47
	2.5	150	13.8	31	67	45
22 Cr, 9 Ni, 3 Mo, N	0.8	20	3.6	8.1	49	33
	0.9	150	4.2	10.7	48	32
	2.5	20	8.7	21.0	54	36
	2.5	150	14	31	50	33

(From Lincoln Electric Europe)

Figura 5

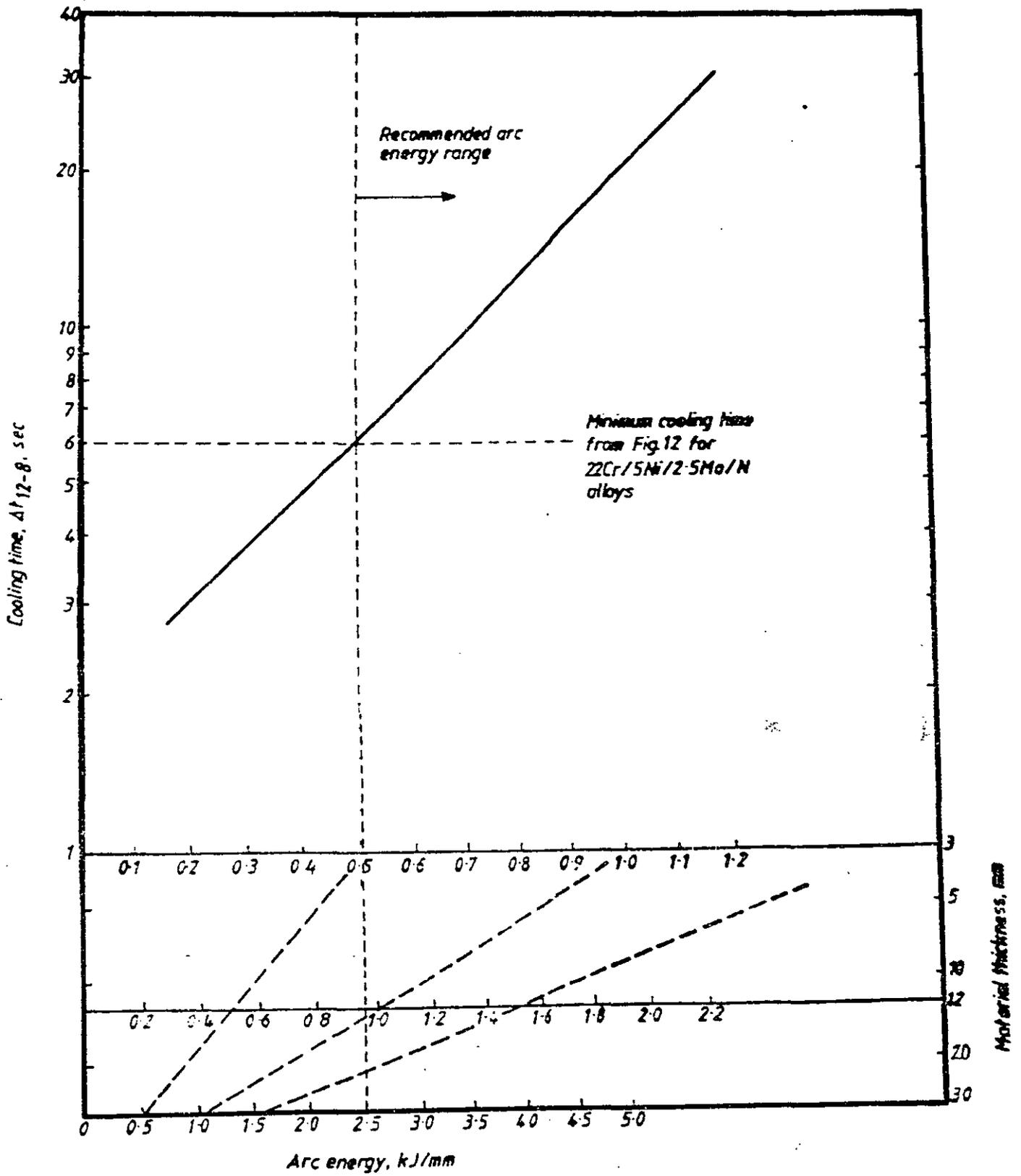
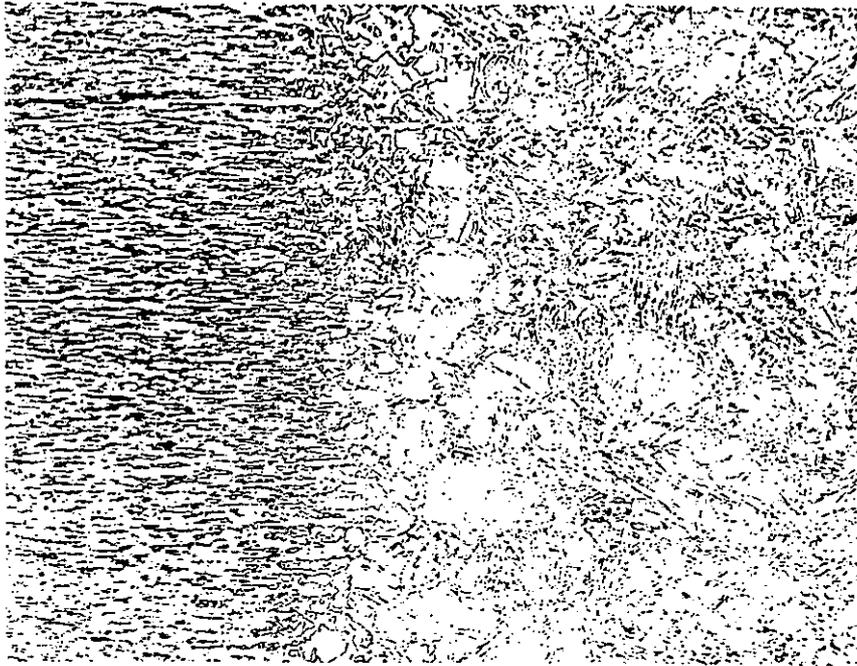
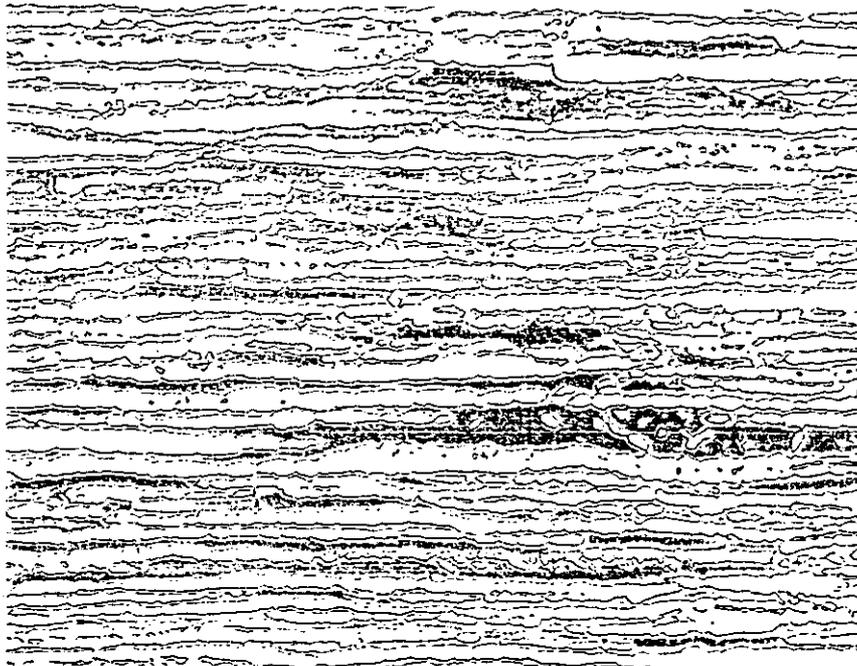


Figura 6



(a) Vista di insieme della zona di giunzione.
Ingrandimento: 40x



(b) Particolare materiale base.
Ingrandimento: 500x
Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 43,8%

Figura 7:
Micrografie relative a una saldatura testa a testa di tubi ($\phi = 33,4\text{mm}$, $s = 3\text{ mm}$) in acciaio
ASTM A790 UNS S31803 (SAF 2205)
Procedimento: GTAW manuale.
Materiale d'apporto: Sandvik 22.8.3.L

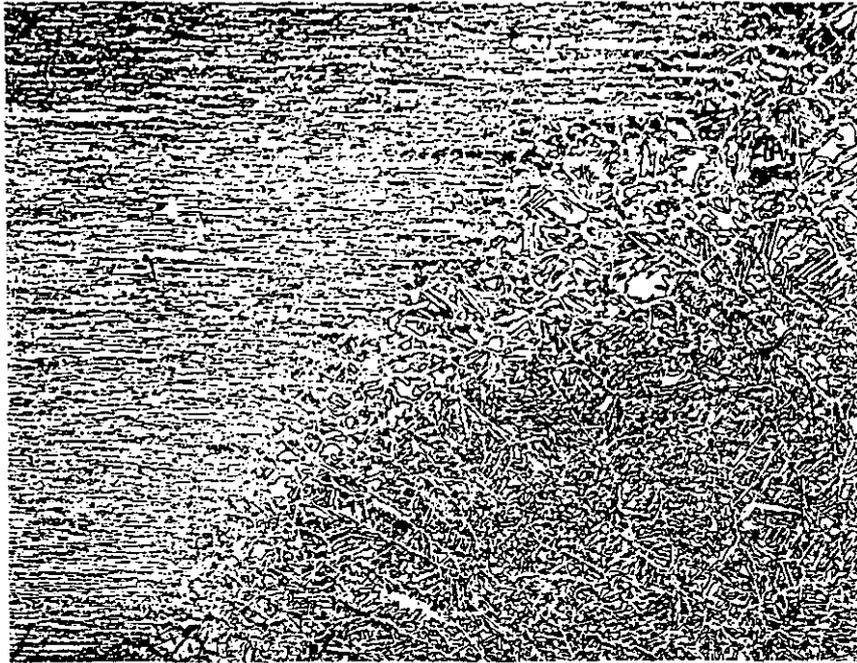


- (a) Particolare zona fusa.
Ingrandimento: 500x
Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 49,7%

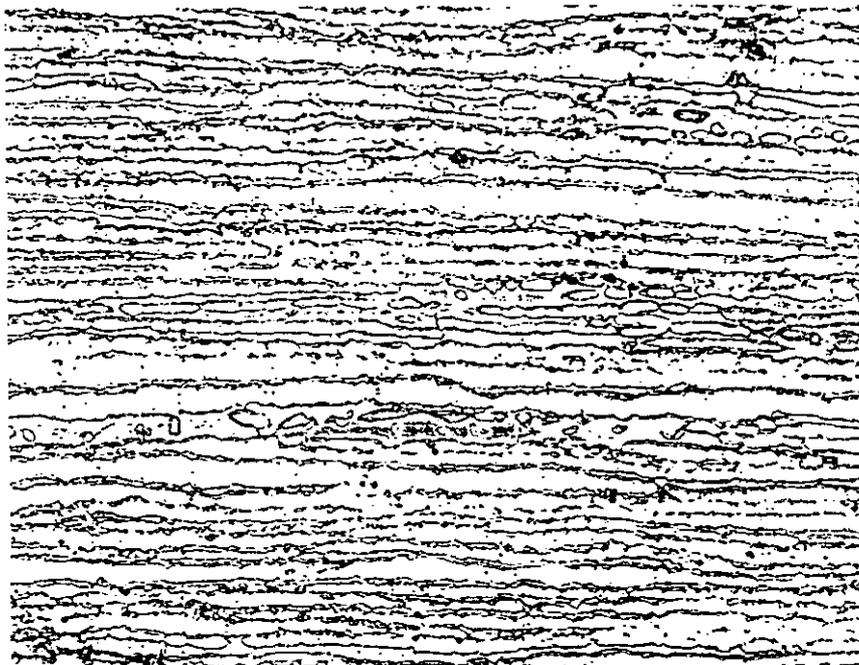


- (b) Particolare zona termicamente alterata.
Ingrandimento: 500x
Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 56,8%

Figura 8:
Micrografie relative a una saldatura testa a testa di tubi ($\phi = 33,4\text{mm}$, $s = 3\text{ mm}$) in acciaio
ASTM A790 UNS S31803 (SAF 2205)
Procedimento: GTAW manuale.
Materiale d'apporto: Sandvik 22.8.3.L



(a) Vista di insieme della zona di giunzione.
Ingrandimento: 40x



(b) Particolare materiale base.
Ingrandimento: 500x
Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 44,4%

Figura 9:
Micrografie relative a una saldatura testa a testa di tubi ($\phi = 33,4\text{mm}$, $s = 3\text{ mm}$) in acciaio
ASTM A790 UNS S32750 (SAF 2507)
Procedimento: GTAW manuale.
Materiale d'apporto: Sandvik 25.10.4.L



(a) Particolare zona fusa.
 Ingrandimento: 500x
 Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 54,1%



(b) Particolare zona termicamente alterata.
 Ingrandimento: 500x
 Percentuale ferrite δ (media su 50 campi): 48,8%

Figura 10:
 Micrografie relative a una saldatura testa a testa di tubi ($\phi = 33,4\text{mm}$, $s = 3\text{ mm}$) in acciaio
 ASTM A790 UNS S32750 (SAF 2507)
 Procedimento: GTAW manuale.
 Materiale d'apporto: Sandvik 25.10.4.L

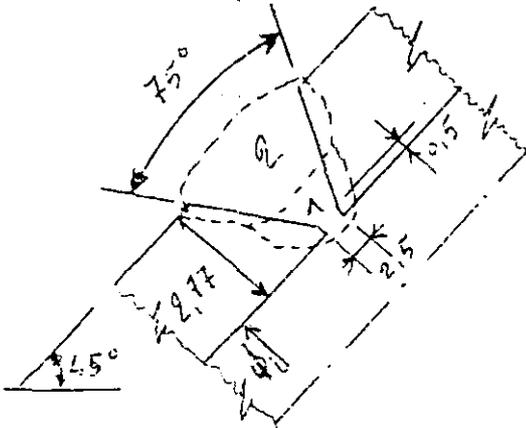
PROCEDURE QUALIFICATION
RECORD
P Q R

PQR N. 3783
I.I.S. Job N. 1909
sheet 1/2 *HLW*

Company Name _____
Procedure Qualification Record No. 3783 Date 1 December 1993
MPS No. 01-93 Rev. 0 Date 29 November 1993 Rev. _____ Date _____
Welding Process(es) a) GTAW b) _____ c) _____
Types (Man., Aut., Semi-Aut.) a) MANUAL b) _____ c) _____

JOINTS (QW-402)

Joint design BUTT, SINGLE V GROOVE



Passes or layers	Proc.	Filler Metal size mm.		Amp.		Volt		Travel speed mm/min
		1E	2E	1E	2E	1E	2E	
1-2	GTAW	1,6	-	75	-	10	-	70

Groove Design of Test Coupon

(For combination qualifications the deposited weld metal shall be recorded for each filler metal or process used)

BASE METAL (QW-403)

Spec. Type & Grade SA-790 S31803 *
to Spec. Type & Grade SA-790 S31803 *
P-No. 10H Gr.No. 1 to P-No. 10H Gr.No. 1
Thickness of Test Coupon 2.77mm to 2.77mm
Diameter of Test Coupon 33.4mm O.D. to 33.4mm O.D.
Other * SANDVIK SAF 2205

POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)

Temperature NONE
Time NONE
Other NONE

FILLER METALS (QW-404)

	a)	b)	c)
SFA Specification	N.A.		
AWS Classification	N.A.		
Filler Metal F-No.	N.A.		
Weld Metal An. A-No.	N.A.		
Size of filler m.	$\phi=1,6mm$		
F. m. trade name	<u>22.8.3.L</u>		
Manufacturer	<u>SANDVIK</u>		
Flux Trade Name	N.A.		
Manufacturer	N.A.		
Electr.-Flux (Class)	N.A.		
Dep. Weld Metal	<u>2.77mm</u>		
Other	<u>NONE</u>		

GAS (QW-408)

	Percent Composition			
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	
Plasma	<u>N.A.</u>			<u> </u> l/min
Shielding	<u>ARGON</u>	<u>99,9</u>	<u>9</u>	<u> </u> l/min
Trailing	<u>NONE</u>			<u> </u> l/min
Backing	<u>ARGON</u>	<u>99,9</u>	<u>4</u>	<u> </u> l/min

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Current DC
Polarity EN
Amps. see table above Volts see table above
Tungsten Electrode Type & Size SFA 5.12 EWTH-2 $\phi=2,4mm$
Mode of Metal Transfer for GTAW N.A.
Other NONE

POSITIONS (QW-405)

Position(s) of groove or fillet 6G
Welding Progression (uphill, downhill) UPHILL
Other NONE

TECHNIQUE (QW-410)

Travel speed see table above
String or Weave Bead STRING
Oscillation: Amplitude N.A.
Frequency N.A.
Multipass or single pass (per side) MULTIPLE
Single or Multiple Electrodes SINGLE
Other NONE

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp. 20°C
Interpass Temp. ≤ 150°C
Other NONE

	PROCEDURE QUALIFICATION RECORD P Q R	POR N. <u>3784</u> I.I.S. Job N. <u>1909</u> sheet <u>1/2</u>
--	---	---

Company Name _____

Procedure Qualification Record No. 3784 Date 1 December 1993

WPS No. 12-93 Rev. 0 Date 29 November 1993 Rev. _____ Date _____

Welding Process(es) a) GTAW b) _____ c) _____

Types (Man., Aut., Semi-Aut.) a) MANUAL b) _____ c) _____

JOINTS (QW-402)
 Joint design BUTT, SINGLE V GROOVE

Passes or layers	Proc.	Filler Metal size mm.		Amp.		Volt		Travel speed mm/min
		1E	2E	1E	2E	1E	2E	
1-2	GTAW	1,6	-	70	-	9	-	70

Groove Design of Test Coupon
 (For combination qualifications the deposited weld metal shall be recorded for each filler metal or process used)

BASE METAL (QW-403)
 Spec. Type & Grade ASTM A 790 UNS N. S32750 *
 to Spec. Type & Grade ASTM A 790 UNS N. S32750 *
 P-No. N.A. Gr.No. N.A. to P-No. N.A. Gr.No. N.A.
 Thickness of Test Coupon 2,77mm to 2,77mm
 Diameter of Test Coupon 33,4mm O.D. to 33,4mm O.D.
 Other * SANDVIK SAF 2507

POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)
 Temperature NONE
 Time NONE
 Other NONE

FILLER METALS (QW-404)	Percent Composition		
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
SFA Specification	N.A.		
AWS Classification	N.A.		
Filler Metal F-No.	N.A.		
Weld Metal An. A-No.	N.A.		
Size of filler m.	$\phi=1,6mm$		
F. m. trade name	<u>25,10,4,L</u>		
Manufacturer	<u>SANDVIK</u>		
Flux Trade Name	N.A.		
Manufacturer	N.A.		
Electr.-Flux (Class)	N.A.		
Dep. Weld Metal	<u>2,77mm</u>		
Other	<u>NONE</u>		

GAS (QW-408)	Percent Composition			Flow Rate
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	
Plasma	N.A.			l/min
Shielding	<u>ARGON</u>	<u>99,9</u>	<u>10</u>	l/min
Trailing	<u>HCHE</u>			l/min
Backing	<u>ARGON</u>	<u>99,9</u>	<u>4</u>	l/min

POSITIONS (QW-405)
 Position(s) of groove or fillet 6G
 Welding Progression (uphill, downhill) UPHILL
 Other NONE

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)
 Current DC
 Polarity EN
 Amps. see table above Volts see table above
 Tungsten Electrode Type & Size SFA 5.12 EWT-2 $\phi=2,4mm$
 Mode of Metal Transfer for GMAW N.A.
 Other NONE

PREHEAT (QW-406)
 Preheat Temp. 20°C
 Interpass Temp. ≤ 150°C
 Other NONE

TECHNIQUE (QW-410)
 Travel speed see table above
 String or Weave Bead STRING
 Oscillation: Amplitude N.A.
 Frequency N.A.
 Multipass or single pass (per side) MULTIPLE
 Single or Multiple Electrodes SINGLE
 Other NONE

	PROCEDURE QUALIFICATION RECORD P Q R	POR N. <u>3783</u> sheet <u>2/2</u>
--	---	--

TENSILE TEST (QW - 150)

Specimen Type & Figure	Dimensions (mm)		Area (mm ²)	Ultimate Total Load (KN)	Ultimate Unit Stress N/mm ²	Type of failure & Location
	Width	Thickness				
TRANSVERSE REDUCED QW 462.1(b)	12.60	2.60	32.76	27.136	828.33	DUCTILE, WELD METAL
TRANSVERSE REDUCED QW 462.1(b)	12.60	2.60	32.76	26.991	823.90	DUCTILE, WELD METAL

GUIDED BEND TEST (QW - 160)

Type and Figure No.	Result
TRANSVERSE FACE QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE ROOT QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE FACE QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE ROOT QW 462.3 (a)	SATISFACTORY

TOUGHNESS TEST (QW - 170)

Specimen Dimensions (mm)	Notch Locations	Notch Type	Test Temper. °C	Impact Values/Average (Joule)	Lateral expansions		Drop Weight	
					% shear	Mils	Break	No break

FILLET WELD TEST (QW - 180)

Result - Satisfactory : Yes _____ No _____ Penetration into Parent Metal: Yes _____ No _____
 Macro-Results: _____

OTHER TEST

Type of Test VISUAL, DAY PENETRANT, X-RAY AND MACRO EXAMINATION : SATISFACTORY
 Deposit Analysis : _____
 Other HARDNESS HV5 B.M.:239(MAX.)-229(MIN.);H.A.Z.:260(MAX.)-228(MIN.);W.M.:247(MAX.)-216(MIN.)
STATISTICALLY ESTIMATING OF FERRITE δ (ASTM E 562) B.M.:43.8; H.A.Z.:56.8-52;W.M.:59.4-49.7 %

Welder's Name _____ Stamp No. 1
 Welding Test conducted by: _____
 Mechanical test conducted by: IIS-GENOVA (GE)
 Laboratory Test No. 34529,34449,34498,34456,34595 AND 34531(DAY PEN.)-34530(X-Ray)

We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of the Section IX of the ASME Code BPV. and SPC.WL.ES.331 Rev.1 clauses 3.1.1. b)-c)

CERTIFICATION POINT
 Responsible _____ Manufacturer _____
 (R. Giuseppe Traverso)
 Date 17 January 1994 By _____

Test Supervised by the
 Italian Institute of Welding
 IL SEGRETAIO GENERALE
 (Dott. Ing. SAO/GENOVA)

[Handwritten Signature]

DIVISIONE CRL
 Il Direttore
 (Dott. Ing. in furo Scasso)
[Handwritten Signature]

	PROCEDURE QUALIFICATION RECORD P Q R	PUR N. 3784 sheet 2/2
--	---	--------------------------

TENSILE TEST (QW - 150)

Specimen Type & Figure	Dimensions (mm)		Area (mm ²)	Ultimate Total Load (KN)	Ultimate Unit Stress N/mm ²	Type of Failure & Location
	Width	Thickness				
TRANSVERSE REDUCED QW 462.1(b)	12.60	2.50	31.50	26.011	825.75	DUCTILE, WELD METAL
TRANSVERSE REDUCED QW 462.1(b)	12.60	2.50	31.50	25.882	821.64	DUCTILE, WELD METAL

GUIDED BEND TEST (QW - 160)

Type and Figure No.	Result
TRANSVERSE FACE QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE ROOT QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE FACE QW 462.3 (a)	SATISFACTORY
TRANSVERSE ROOT QW 462.3 (a)	SATISFACTORY

TOUGHNESS TEST (QW - 170)

Specimen Dimensions (mm)	Notch Locations	Notch Type	Test Temper. °C	Impact Values/Average (Joule)	Lateral expansions		Drop Weight	
					% shear	Mils	Break	No break

FILLET WELD TEST (QW - 180)

Result - Satisfactory : Yes No Penetration into Parent Metal: Yes No

Macro-Results: _____

OTHER TEST

Type of Test VISUAL, DAY PENETRANT, X-RAY AND MACRO EXAMINATION: SATISFACTORY
 Deposit Analysis -
 Other HARDNESS HV5 B.M.:255(MAX.)-233(MIN.);H.A.Z.:280(MAX.)-232(MIN.);W.M.:272(MAX.)-247(MIN.)
STATISTICALLY ESTIMATING OF FERRITE δ (ASIM E 562) B.M.:44.4;H.A.Z.:59.7-48.8;W.M.:52.5-54.1 %

Welder's Name _____ Stamp No. 2
 Welding Test conducted by: _____
 Mechanical test conducted by: IIS-GENOVA (GE)
 Laboratory Test No. 34529,34499,34498,34456,34595 AND 34531(DAY PEN.)-34530(X-Ray)

We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of the Section IX of the ASME Code BPV. and SPC.WL.ES.331 Rev.1 clauses 3.1.1. b)-c)

Manufacturer _____

Date 17 January 1994 By (R) Giuseppe Inverso

Test Supervised by the Italian Institute of Welding
 IL SEGRETOARIO GENERALE
 (Dott. Ing. MAURO SCASSO)

DIVISIONE ORL
 Il Direttore
 (Dott. Ing. MAURO SCASSO)
Mauro Scasso

ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA

ENTE MORALE

LUNGOBISAGNO ISTRIA 15A - 16141 GENOVA
Tel. 010/853111 - 853049

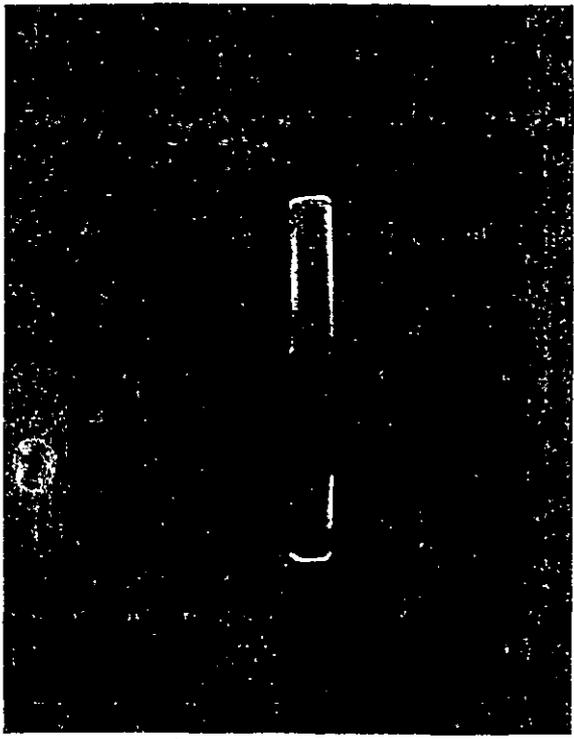
Laboratorio autorizzato: Ministero Lavori Pubblici
(art. 20 legge 5/11/71 n. 1086)
Ministero Ricerca Scientifica
(art. 4 legge 17/2/92 n. 46)
ISPESL

ESAME MACRO

SAGGIO/SAMPLE	COLLAUDO/INSPECTION	DATA/DATE	CERTIFICATO/CERTIFICATE
P3	T15	06/04/89	N 17942
COMMISSION/JOB	CUSTOMER		MODALITA' DI PROVAT/TESTING PROCEDURE
N. 169.40			==

MATERIALE/MATERIAL

SAP 2304 S = 5 mm



M1 = fusione accettabile

M2 = fusione accettabile

ESAME RX: NESSUN BIFETTO VISIBILE

L'Esecutore/ The Examiner

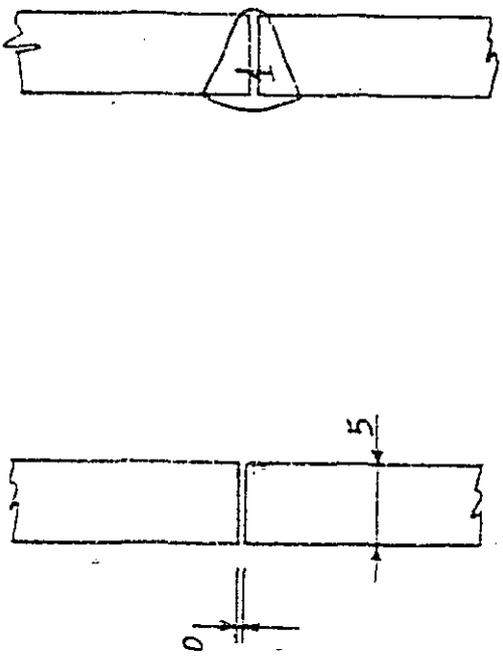
[Signature]

Il Capo Settore LAB & PND/ LAB & NDT Responsible

[Signature] Ing Massimo Dindo

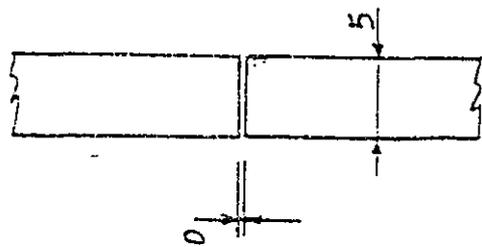
Il Collaudatore/ The Inspector

VERBALE DI QUALIFICA N.



Passole	PARAMETRI ESECUTIVI						NOTE		
	A	V	Portata gas Plasma Cm/min.	Portata gas Plasma Pressione gas Plasma	Portata gas prot. al diritto * 18+30 l/min	Portata gas prot. al rovescio 20 l/min		veloc. avanz. filo	
1	197	29.5	29	5 l/min Argon 99.99%	4 bar	Argon 99.99%	Argon 99.99%	1.2 m/s	18 l/min alla torcia + 30 l/min scarpetta di protezione Ø4.0mm elettrodo infusibile di tungste no tipo EWTh 2 (AWS 5.12) caratteristiche elettriche: costante continua; polarità diretta filo: Ø1.2mm N. SCOPITAZIONE: SERIEPA18 Dott. Ing. Carlo Corradini preriscaldamento: NO

VERBALE DI QUALIFICA N.



Possole	PARAMETRI ESECUTIVI							NOTE	
	A	V	Cm/min.	Portata gas Plasma	Pressione gas Plasma	Portata gas prot. al diritto	Portata gas prot. al rovescio		veloc. avanz. filo
1	197	29.5	29	5 l/min Argon 99.99%	4 bar	18+30 l/min Argon 99.99%	20 l/min Argon 99.99%	1.2 m/s	18 l/min alla torcia + 30 l/min scarpetta di protezione Ø4.0mm elettrodo infusibile di tungsteno no tipo ENTh 2 (AMS 5.12) caratteristiche elettriche: corrente continua; polarità diretta filo: Ø1.2mm preiscaldamento: NO

R. SEVITIANI
Doc. Ing. Conf. Corradini

ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA - Uff. Ufficiale Morale

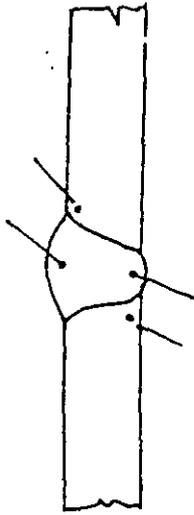
Verbale di qualifica

Materiale base SAF 2304 SANDVIK

Spessore del saggio 5mm

Procedimento di saldatura automatico al plasma

Trattamento termico No



Tipo di prova	Area della sezione mm ² a x b	Smerigliatura (mm ² /mm ²)	Rottura (Unitario Rm N/mm ²)	Allungam. A %	Stirazione Z %	Diametro mandrino mm 4 x a	Angolo di piega α°	Resilienza J T = -10 °C singolo / media	H.V. (media)			Osservazioni ed esito
									Z. F. (MND)	Z. T. A. (EP)	M. H. (VQ)	
Macrografia	M1											
Pieg. D	5 x 30					20	180					Fusione accettabile (Cert. N° 17942) bene
Pieg. R	5 x 30					20	180					(Cert. N° 17951) bene
Pieg. lat.												(Cert. N° 17951)
Pieg. lat.												
Tras. Trasv.	4.8x25.0		640									
Kv	8 x 5							107; 109; 109; 109				
Kv	8 x 5							95; 93; 89; 92				
Kv												
raz. Long.												
Pieg. D	5 x 30					20	180					bene (Cert. N° 17951)
Pieg. R	5 x 30					20	180					bene (Cert. N° 17951)
Pieg. lat.												
Pieg. lat.												
Tras. Trasv.	5.1x25.0		645									
Macrografia	M2											
Fe	1ZF 6											rottura in Z.F. (certificato N°17944)
Fe	1ZTA 6											Fusione accettabile (certificato N°17942)
Fe	2ZF 6											
Fe	2ZTA 6											
Fe												49% (Ved. verb. N° 18051)
Fe												47% (Ved. verb. N° 18051)
Fe												48% (Ved. verb. N° 18051)
Fe												39.2% (Ved. verb. N° 18051)

A. S. VITALE
 DIRETTORE GENERALE
 (Firma)

ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA
ENTE MORALE



LUNGOBISAGNO ISTRIA 15A. 16141 GENOVA
Tel. 010/853111-853049

Laboratorio autorizzato: Ministero Lavori Pubblici (art. 20 legge 5/11/71 n. 1086)
- Ministero Ricerca Scientifica (art. 4 legge 172/82 n. 46)
- ISPESL

DETERMINAZIONE STATISTICA DEL CONTENUTO DI FERRITE DELTA MEDIANTE PROCEDURA "POINT COUNT"

SAGGIO/SAMPLE	COLLAUDING/SECTION	DATA/DATE	CERTIFICATO/CERTIFICATE
P3	I.I.S.	5/5/1989	N. 18051
COMMESSA/JOB	CLIENTE/CUSTOMER		MODALITÀ DI PROVA/TESTING PROCEDURE
N. 169.40			ASTM E562-83

SAF 2304 - SALDATURA PLASMA

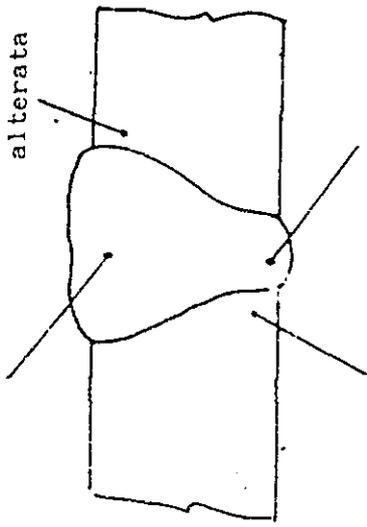
DATI DI PROVA

- Numero del campione metallografico, posizione e orientazione : 5544, trasversale alla saldatura
- Attacco e procedura : soluzione al 10% di acido ossalico n° 13 ASTM E 407
- Descrizione della griglia : quadrata da 25 punti
- Ingrandimento al microscopio: 200 X

ESITO ESAME

	Posizione n° 1		Posizione n° 2	
	ZF	ZTA	ZF	ZTA
Pp - Percentage on field *	49%	47%	48,4%	39,2%
S - Standard deviation	11,74	11,74	8,50	8,47
CI - 95% confidence interval	5,48	5,48	3,97	3,95
Vv % - Volume fraction	49 ± 5,48	47 ± 5,48	48,4 ± 3,97	39,2 ± 3,95
% Error - Statistical precision	11,19	11,67	8,20	10,02
Number of field	30	20	30	20
Array description	15by 2	5by 4	15by 2	5by 4
Spacing	0,2 mm	0,1mm	0,2mm	0,1mm

Pos. N.2
Zona fusa
Zona termicamente alterata



Pos. N.1
Zona termicamente alterata
Pos. N.2
Zona fusa
Zona termicamente alterata

L'Esecutore/ The Examiner

P. C. Lucio Mannino

Il Capo Salloro LAB & PND/LAB & NDT Responsabile

M. Massimo Dinale

Il Collaudatore/ The Inspector



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali
dell' Associazione Italiana di Metallurgia
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili

Nuovi sviluppi tecnologici nei procedimenti
MIG, TIG, plasma
C. Reverdy

Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

NUOVI SVILUPPI TECNOLOGICI NEI PROCEDIMENTI MIG, TIG, PLASMA

CLAUDIO REVERDY, FRO SALDATURA VERONA

La saldatura e' tra i procedimenti tecnologici quello ove l'innovazione e l'apporto di nuove tecnologie stenta a farsi strada in modo consistente. Spesso la risposta degli utilizzatori alla proposta di macchine piu' sofisticate e costose e' quella di spendere il meno possibile. "Tanto fa lo stesso lavoro dell'impianto tecnologicamente piu' evoluto" e' quanto ci si sente spesso dire !.

Eppure le nuove tecnologie hanno in questi ultimi anni portato consistenti miglioramenti ai procedimenti ed alle macchine ed hanno reso la saldatura sempre meno dipendente dall'abilita' di un operatore manuale, con una migliore qualita' del prodotto finito e di conseguenza con un indiretto ritorno positivo sui costi.

Aderendo quindi al tema di questo incontro ho pensato, quale contributo di un costruttore di macchine, di presentare cosa oggi, le nuove tecnologie presenti sul mercato, offrono all'utilizzatore che puo' trovarsi a volte disorientato nelle scelte corrette e quindi non scegliere per niente e continuare con i vecchi sistemi.

Parlare di innovazione oggi significa parlare soprattutto del contributo che l'elettronica e l'informatica hanno dato ai procedimenti ed alle macchine di saldatura.

Dovendo schematizzare questo sviluppo possiamo dire che:

- l'elettronica ha consentito la costruzione di nuovi generatori di corrente ed ha permesso di controllarli e comandarli con tempi di reazione ,brevissimi
- l'informatica ha permesso di introdurre il "savoir faire" del saldatore nelle macchine
- la robotica e l'automazione hanno messo a disposizione la mano di un saldatore instancabile

I GENERATORI ELETTRONICI

L'avvento dell'elettronica nella costruzione dei generatori di corrente e' stata la soluzione ai numerosi problemi che presentava il controllo di un arco elettrico di saldatura.

La caratteristica principale dei generatori elettronici e' infatti la loro possibilità di controllare i parametri operativi in tempi molto brevi. L'esperienza ha mostrato che i tempi di risposta necessari per poter controllare la potenza fornita, nella scala delle variazioni elettriche che si producono in un arco di saldatura, sono almeno dell'ordine del millesimo di secondo, cosa che era impossibile ottenere con i generatori classici a trasformatore piu' raddrizzatori a tiristori.

I generatori elettronici hanno permesso inoltre di integrare la potenza con un sistema di comando e programmazione a microprocessore per poter controllare durante la saldatura e con precisione i parametri di corrente e tensione di saldatura in concomitanza con le variazioni richieste dalle condizioni di fusione dei fili, dei gas utilizzati e dal sistema di movimentazione.

Un'altra differenza fondamentale con i sistemi tradizionali risiede nelle caratteristiche elettriche che si ottengono; queste permettono di modificare il funzionamento dell'arco ed in tal modo di migliorare le condizioni operative di un procedimento ed i risultati ottenibili in saldatura.

I generatori elettronici sono macchine realizzate secondo gli schemi della fig 1 e 2 e fondamentalmente riconducibili a due tipi e precisamente:

- Inverter
- Chopper

Gli inverter sono caratterizzati da compattezza e peso ridotti e sono quindi interessanti per tutte le applicazioni in cui si richiede una macchina facilmente portatile.

I chopper, o inverter al secondario, sono piu' voluminosi dagli inverter, ma in compenso sono piu' semplici costruttivamente e sono quindi utilizzati per le potenze piu' elevate.

L'INFLUENZA SUI PROCEDIMENTI

L'argomento che tuttavia riguarda piu' da vicino gli utilizzatori sono le possibilita' offerte da queste soluzioni per i procedimenti di saldatura ed in particolare per gli acciai inossidabili.

Saldatura MIG

Ricordiamo che la saldatura MIG e' caratterizzata da tre condizioni di trasferimento del metallo nell'arco:

- short arc - spray arc - pulsed arc

nella saldatura degli acciai inossidabili per le caratteristiche elettriche dei fili si utilizza normalmente la condizione spray-arc per spessori medio alti e per saldature in piano. Dovendo operare invece con spessori sottili o medi, inferiori ai 5 mm circa o in posizione, si deve ricorrere alla condizione di pulsed-arc o arco pulsato.

Per ottenere un trasferimento pulsed arc si sovrappone ad una corrente di base di 30-50 A una serie di impulsi di valore piu' elevato e di frequenza variabile ottenendo un valore medio di corrente piu' basso di quello che sarebbe necessario senza pulsazioni. Immaginando al rallentatore quanto avviene nell'arco si vede che ad ogni impulso di corrente si stacca una goccia di filo che viene a formare il bagno di fusione. Questo sistema e' utilizzato correntemente per saldare gli acciai inossidabili con positivi risultati. Con i generatori tradizionali tuttavia si e' vincolati ad una frequenza di pulsazioni multipla o sottomultipla della frequenza di rete 25-50-75-100 Hz e non sempre e' quella ottimale per le condizioni di saldatura richieste. Inoltre se si considerano i parametri di regolazione si passa da due parametri degli impianti tradizionali a oltre 5 valori per regolare una condizione di pulsazione ottimale.

Il ricorso all'elettronica e' stata quindi la piu' rilevante innovazione degli ultimi anni, in quanto ha permesso di:

- controllare meglio il trasferimento delle gocce arrivando alla condizione ottimale di una goccia ad ogni impulso di corrente.

Questo sembra estremamente facile a dirsi ma per realizzarlo bisogna tenere conto che si devono combinare numerose variabili quali: il diametro e la velocità del filo, la frequenza ed il tipo di pulsazione, il gas di protezione e le condizioni d'arco. Per via teorica e con verifica sperimentale si e' arrivati a definire tutte le variabili ed a memorizzare delle curve di fusione e trasferimento ottimali per ogni materiale. Grazie poi ai microprocessori si sono memorizzate queste curve che possono essere richiamate secondo le necessita'.

- semplificare il lavoro dell'operatore che non deve piu' gestire numerosi parametri. Si sono infatti scritte delle leggi di sinergia ovvero che al variare di un parametro, normalmente la velocità del filo, gli altri valori si adattano di conseguenza.

Sono nati così gli impianti chiamati sinergici. Questi come già detto sono caratterizzati da un generatore elettronico e da un controllo-comando con un microprocessore che svolge il compito di fornire le corrette regolazioni di forma e frequenza di pulsazioni al variare ad esempio della velocità del filo. Si semplifica quindi enormemente il lavoro dell'operatore che non deve piu' essere condizionato dalla ricerca di tutti i parametri di pulsazione necessari ad una buona saldatura.

Questi impianti sono raccomandati soprattutto per la saldatura degli acciai inossidabili, in quanto consentono:

- possibilita' di controllare l'apporto d'energia in rapporto al lavoro
- accresciuta stabilita' d'arco in tutte le condizioni
- migliorata facilita' operativa e riduzione delle proiezioni
- estensione del campo di impiego dei regimi di saldatura pulsata
- semplificazione delle regolazioni e operazioni in sinergia
- riduzione delle emissioni nocive operando in condizione arco pulsato

SALDATURA TIG

Passando ora a esaminare il procedimento TIG (TIG saldatura in gas inerte con elettrodo di tungsteno), l'impiego di un generatore elettronico, permette ad esempio di produrre delle pulsazioni di corrente di forma complessa regolabili in una vasta gamma di frequenze, condizione che si dimostra l'ideale per migliorare la qualita' delle saldature.

Ricordiamo infatti come molti generatori per saldatura TIG sono dotati di un circuito aggiuntivo per corrente pulsata. Il principio e' quello di fare variare la corrente di saldatura da un valore minimo preimpostato ad un valore massimo per un tempo regolabile (frequenza). Se la frequenza e' bassa 10 Hz l'effetto e' quello di ottenere un bagno di fusione piu' pastoso che non ha tempo di colare ne di solidificare, la saldatura diviene quindi una successione di punti che si ricoprono. La corrente di base viene tenuta ad un valore minimo che non spegne l'arco. Queste pulsazioni sono dette termiche e vengono usate per migliorare l'esecuzione dei giunti in condizioni difficili: in presenza di preparazioni non uniformi, in saldatura in posizione, su particolari ove si richiedono correnti elevate, ma che rischiano di subire deformazioni dovute all'eccessivo apporto di calore.

Verso gli anni 80 con l'avvento dei generatori ad inverter e quindi con la possibilita' di funzionare e pulsare a piu' Kilohertz si approfondiscono gli effetti favorevoli che queste pulsazioni possono dare. Le pulsazioni ad alta frequenza hanno per effetto sull'arco TIG di generare delle linee di forza parallele e dirette verso il centro dell'arco proporzionali al prodotto della corrente minima per la massima della pulsazione. Si puo' osservare che che queste forze provocano una strizione dell'arco, questa strizione e' legata al valore efficace della corrente di saldatura, questo valore e' aumentato dal tasso di ondulazione della corrente. L'arco diviene quindi piu' rigido ed il suo cono piu' ristretto.

Le pulsazioni alta frequenza dell'arco si traducono quindi in saldatura con una migliore penetrazione.

Alcuni studi mostrano inoltre che le pulsazioni migliorano anche la struttura del bagno di fusione.

La rigidita' dell'arco aumenta fino a 5-10 KHz. L'interesse di pulsare oltre questo limite e' di uscire dalla zona di rumore udibile, e quindi di diminuire l'inquinamento sonoro.

Tra i campi di applicazione piu' interessanti del TIG pulsato citiamo ad esempio la saldatura di lamiere sottili o di tubi in continuo che puo' essere facilitata; quando la frequenza delle pulsazioni e' elevata provoca infatti un effetto di irrigidimento dell'arco, messo in evidenza da una migliorata stabilita' a seguire il giunto e tanto piu' evidente quanto piu' la corrente media e' bassa.

Le realizzazioni pratiche

Vediamo ora dopo avere presentato i principi su cui si e' basata la recente evoluzione alcune applicazioni pratiche.

L'impianto MIG Sinergico. Fig.3

E' un impianto che fa parte della ormai numerosa famiglia delle macchine elettroniche presenti sul mercato.

E' un impianto per saldatura MIG manuale o automatizzata, costituito da un generatore elettronico, la parte di potenza e' costituita da un generatore a transistori tipo chopper, controllato e comandato da un microprocessore 16 bit.

Il micro svolge numerose funzioni, tra cui porta memorizzate le curve di fusione ottimali per numerosi accoppiamenti:

- .materiale da saldare
- .diametro del filo elettrodo
- .gas di protezione
- .modalita' di trasferimento nell'arco

Assicura poi la gestione del ciclo di saldatura: corrente e condizioni di innesco dell'arco, pre gas, corrente di presaldatura, corrente di saldatura, ciclo di spegnimento dell'arco, riempimento cratere e post gas.

Oltre 100 programmi sono disponibili in memoria, di cui 35 per gli acciai inossidabili.

La condizione prescelta viene programmata e selezionata prima della saldatura. Si imposta in tal modo la curva di sinergia in base alla quale regolando la velocita' di avanzamento del filo, che determina la corrente di saldatura, il microprocessore calcolera' gli altri parametri ottimali.

Succede spesso con gli inossidabili o leghe Cr-Ni di trovarsi di fronte a materiali nuovi per i quali le curve impostate non sono perfettamente adatte, in questo caso puo' essere richiesto al fabbricante che, mediante opportune verifiche, provveda ad aggiornare la memoria del micro con i parametri ottimali.

Altra particolarità interessante di questo impianto è la costruzione e memorizzazione di una curva su misura mediante 6 punti di funzionamento ricorrenti e richiamabili da comando a distanza.

L'elettronica permette infine di fare generatori multiprocedimento l'impianto può saldare tutti i metalli e lavorare con altri procedimenti quali il TIG in corrente continua e gli elettrodi rivestiti.

Le migliorate condizioni di stabilità d'arco, la fusione controllata del filo hanno dimostrato che in condizioni pulsed-arc si possono ridurre le emissioni di fumi e la loro nocività rispetto alle normali condizioni d'arco.

SALDATURA AUTOMATICA AD ARCO PLASMA IN PREFABBRICAZIONE DI TUBI. Fig 4

La prefabbricazione di tubi e sottoassiemi ha lo scopo di predisporre in officina nelle condizioni più economiche sottogruppi di tubazioni dimensionatamente più grandi possibile da essere poi montati in cantiere. Interessa in genere numerose attività dalla petrolchimica alla cantieristica ed in particolare riguarda spesso volte gli acciai inossidabili.

I diametri dei tubi possono andare da 30 mm a circa 600 mm con spessori da 6 a 15 mm.

Normalmente la prefabbricazione per ragioni di esigenze di qualità delle saldature viene eseguita da operatori altamente qualificati a mano con elettrodi rivestiti o con passata di fondo in TIG e riempimento in MIG. L'automatizzazione del procedimento TIG e MIG permette di migliorare sensibilmente la produttività controllando accuratamente il procedimento con una buona qualità.

Con il procedimento ad arco plasma poi si può andare oltre e grazie alle sue caratteristiche originali è possibile:

- sopprimere la preparazione dei lembi (cianfrinatura) per spessori fino a 8 mm
- sopprimere la distanza tra i lembi nel giunto da saldare, necessaria in saldatura manuale (distanza che risulta difficile da calibrare ed a conservare durante la saldatura)
- eliminazione di incollature o mancanze di fusione all'inizio della saldatura
- penetrazione garantita senza sostegno solido a rovescio, con la tecnica Key-hole
- finitura accurata delle saldature con passate di riempimento plasma deconfinato (senza Key-hole)

L'applicazione di un generatore di corrente elettronica, vedi Fig. 5, per l'arco plasma in grado di erogare corrente con pulsazioni fino a 500 Hz ha consentito di ottimizzare queste caratteristiche del procedimento garantendo una stabilita' ed una rigidita' dell'arco migliorata rispetto alle soluzioni classiche.

In particolare per questa applicazione e' stato messo a punto un impianto specifico, vedi Fig. 6, 7, 8, le cui caratteristiche sono:

1) Impiego dell'informatica con la costruzione di un computer con programma dedicato. Nella Fig. 9 e rappresentato un ciclo di lavoro tipico per la saldatura dei tubi, dal quale si puo' evidenziare le numerose variabili da controllare. Nel computer vengono quindi memorizzati differenti programmi per un diametro, uno spessore ed un tipo di acciaio. Il richiamo del programma con tutti i dati della saldatura si effettua istantaneamente dall'operatore, e se necessario per ogni cordone di saldatura. Ricordiamo che nella saldatura di tubi e' spesso richiesto di effettuare varie passate:

- . la prima passata di penetrazione con corrente pulsata e Key-Hole
- . passate di riempimento o di finitura con corrente pulsata e plasma deconfinato ed oscillazione d'arco

In questo caso il computer che gestisce l'impianto assicura l'esecuzione dell'intero programma di 2 o piu' passate ridefinendo ad ogni passata, quando necessario:

- . la corrente di saldatura e le pulsazioni
- . la tensione d'arco che controlla la posizione verticale della torcia
- . la portata del gas plasma che agisce direttamente sull'arco plasma
- . la velocita' del filo di apporto
- . la velocita' di rotazione del posizionatore che viene interamente gestita dal computer

2) Torcia arco plasma, e' l'utensile di saldatura in grado di mantenere correnti di 300 A in regime continuo. Importante e' la qualita' della protezione gassosa ottenuta anche grazie al raffreddamento integrato. Sugli acciai inossidabili potrebbe anche essere richiesta in rapporto alle condizioni di lavoro una protezione aggiuntiva di gas nella zona di raffreddamento del cordone dietro la torcia. La precisione delle regolazioni meccaniche garantisce poi la ripetitivita' delle saldature.

3) Sistema di rotazione e controllo del movimento dei tubi. Le sue caratteristiche sono in funzione dei diametri, dei pesi e lunghezze dei tubi. Importante che la velocita' di rotazione sia costante, precisa e controllata dal computer centrale.

L'esecuzione della passata di fondo con procedimento plasma Key-Hole pone infine il problema di chiudere il foro che si genera con l'arco plasma e che garantisce la penetrazione. Sempre grazie al computer e' possibile programmare la variazione dei parametri di corrente, portata gas plasma e velocita' di rotazione in modo tale che il foro venga chiuso senza dare luogo a difetti di saldatura e questo per ogni spessore di tubo.

Un esempio di condizioni di lavoro sono fornite nella tabella Fig.10.

Trattandosi di saldatura automatica e' bene sempre precisare che il risultato di saldatura e' direttamente dipendente dalle condizioni di preparazione dei pezzi e dalla loro precisione.

Sistemi di controllo della qualita

La richiesta sempre crescente di controllo e certificazione della qualita' impone di poter documentare le condizioni di esecuzione delle operazioni di saldatura.

Gli impianti che abbiamo presentato permettono di interfacciarsi direttamente al microprocessore, senza la necessita' di sensori esterni, e inviare su una stampante i parametri utilizzati nell'esecuzione dei differenti condoni di saldatura.

Un sistema a codice di errore segnala e puo' registrare a stampa le interruzioni avvenute nel ciclo di lavoro e le loro cause.

Per le applicazioni piu' evolute gli impianti sono anche programmabili da un personal computer con un programma semplice ed a menu colloquiale con l'operatore.

La programmazione per l'impianto MIG puo' essere sia a sinergia aperta che chiusa in rapporto alle condizioni di lavoro ed all'esperienza dell'operatore. Un solo computer puo' programmare piu' impianti.

CONCLUSIONI

Gli acciai inossidabili materiali pregiati e la cui saldatura non sempre e' di facile esecuzione possono oggi beneficiare di quanto l'innovazione tecnologica mette a disposizione.

Gli impianti ed i sistemi di controllo e programmazione possono fornire soluzioni globali per operazioni in condizioni di controllo di qualita' totale.

Questo l'invito dei costruttori di macchine ad investire con fiducia in tecnologia e qualita' e non fermarsi solamente a spendere il meno possibile!

Fig 1 Schema a blocchi di un generatore inverter

- Leggenda:- la tensione di rete viene trasformata in corrente continua
- l'inverter trasforma la tensione raddrizzata in una tensione alternata quadra di frequenza elevata
 - il trasformatore trasforma la tensione in una tensione più bassa ma di eguale frequenza
 - il raddrizzatore trasforma la tensione alternata in corrente continua e la applica ai morsetti di saldatura
 - il circuito di controllo mantiene il valore impostato costante

Fig 2 Schema a blocchi di un generatore chopper

- Leggenda:- la tensione di rete viene direttamente trasformata in una tensione di valore più basso (valore di saldatura)
- il raddrizzatore la trasforma in corrente continua
 - il blocco elettronico la trasforma in corrente pulsante di elevata frequenza
 - un blocco self filtra la corrente in uscita all'arco di saldatura
 - il circuito di controllo e comando mantiene il valore impostato costante

SCHEMA DI UN GENERATORE INVERTER

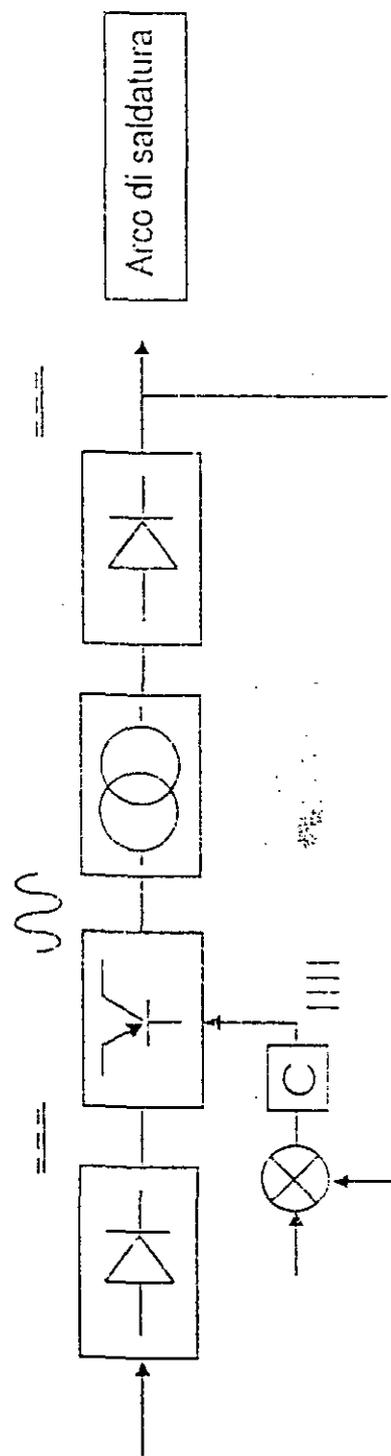
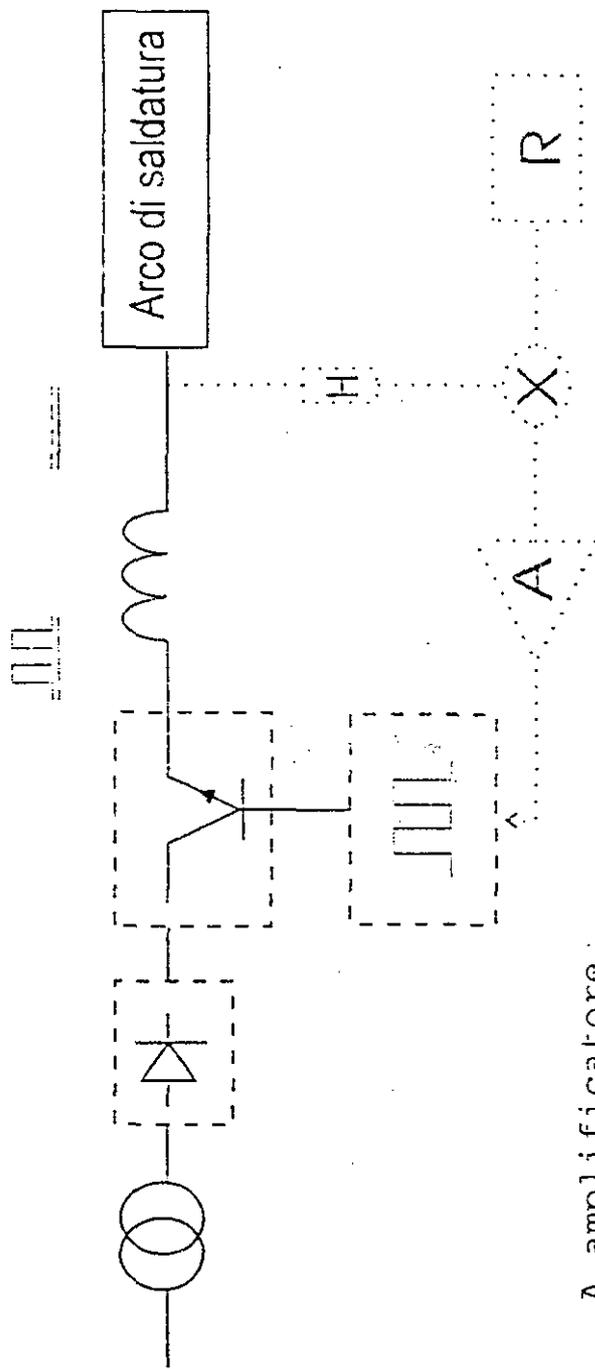


Fig. 1

SCHEMA DI UN GENERATORE CHOPPER -inverter secondario



- A amplificatore
- R segnale di riferimento
- H segnale d'arco
- X comparatore

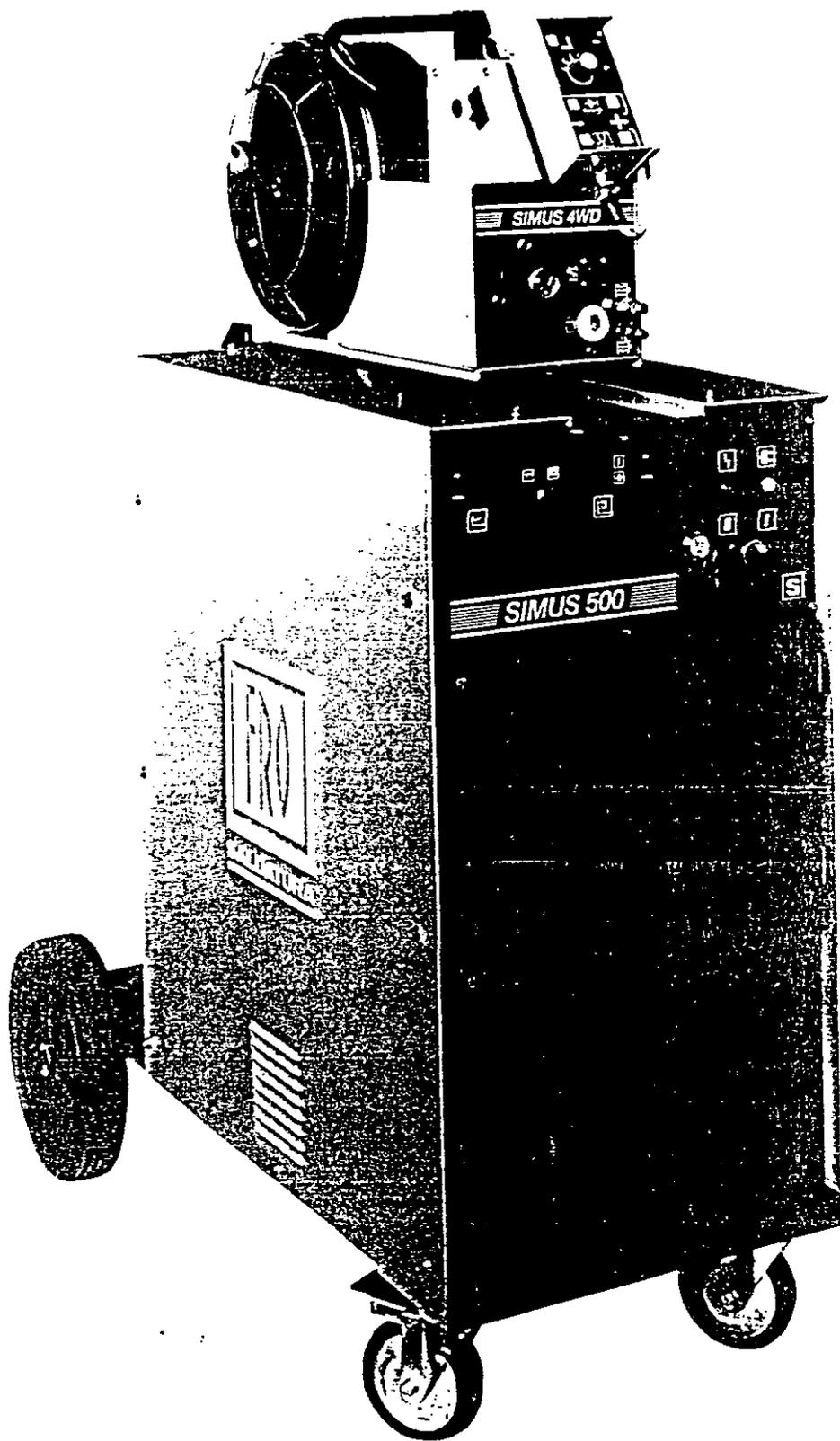


Fig. 3 Impianto Mig sinergico SIMUS 500
(Foto FRO SALDATURA)

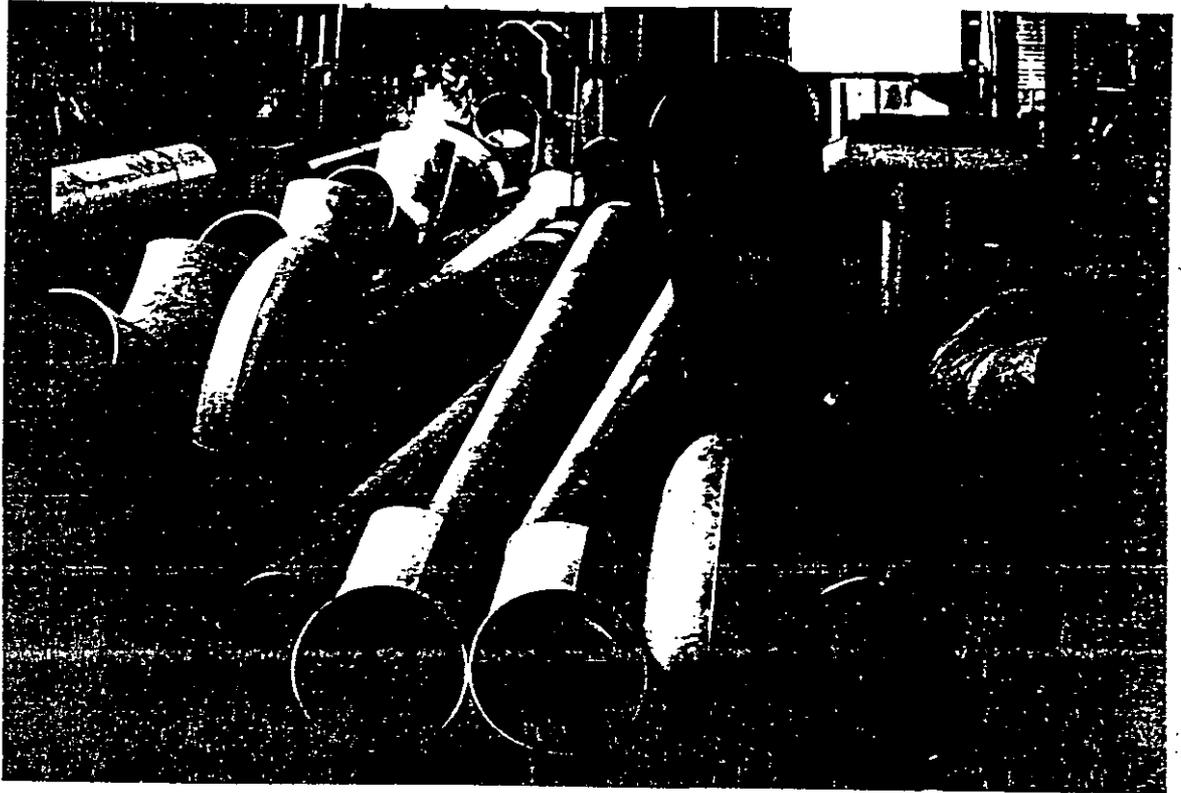


Fig. 4 Saldatura di tubazioni in prefabbricazione

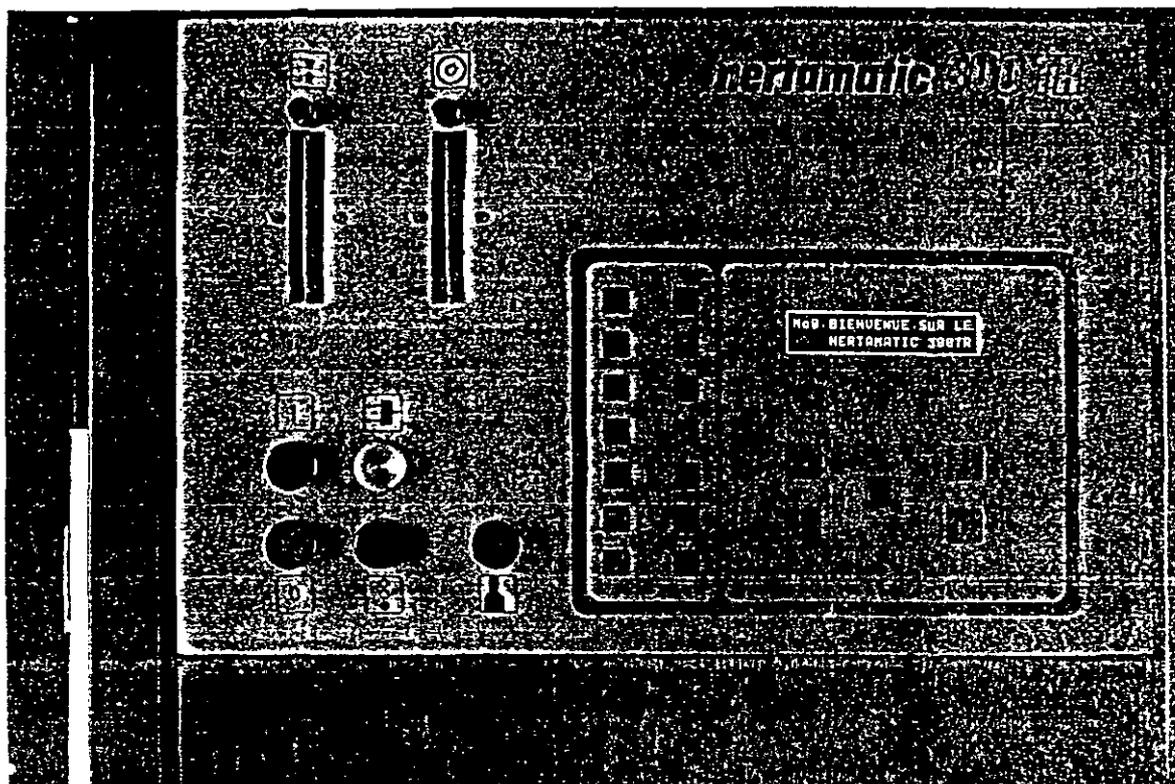


Fig. 5 Frontale di un generatore TIG/PLASMA pulsato, controllato e comandato da microprocessore. (Foto FRO SALDATURA)

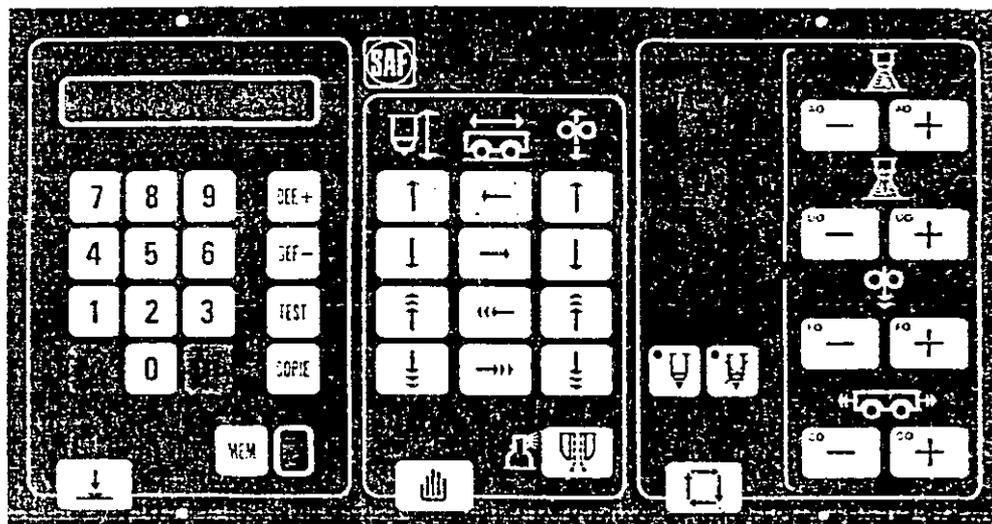


Fig. 7 Computer dedicato per impianto TIG/PLASMA automatico, possono essere memorizzati fino a 99 programmi.
(Foto FRO SALDATURA)

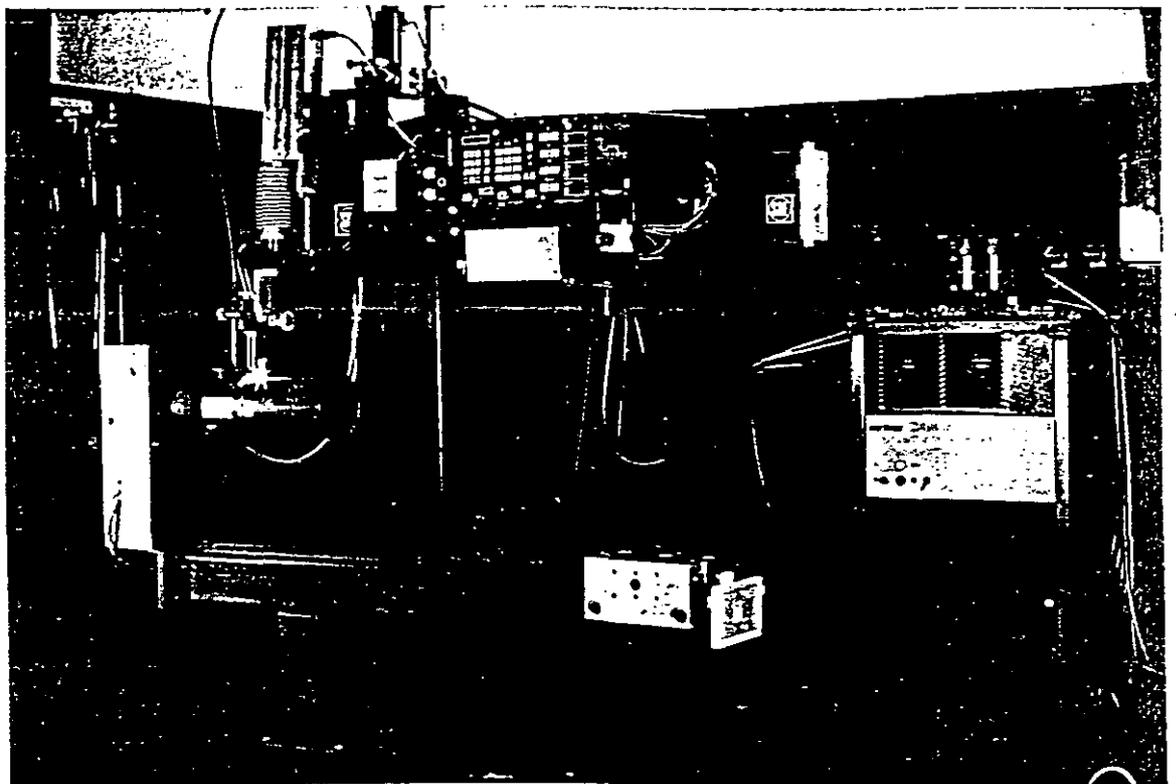
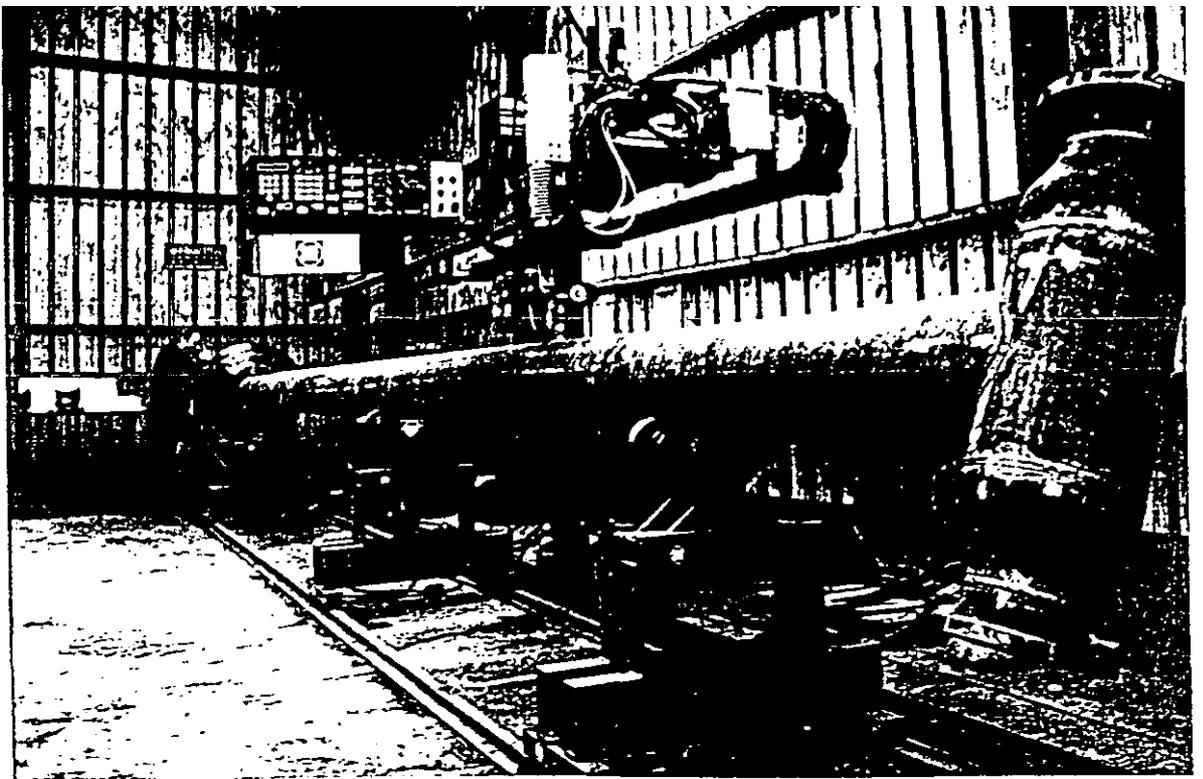


Fig. 7,8 Impianti automatici Plasma computerizzati per la saldatura circonferenziale di tubazioni in prefabbricazione.
(Foto FRO SALDATURA)

Fig. 9 Esempio di un ciclo di lavoro per saldatura PLASMA circonferenziale di tubazioni.

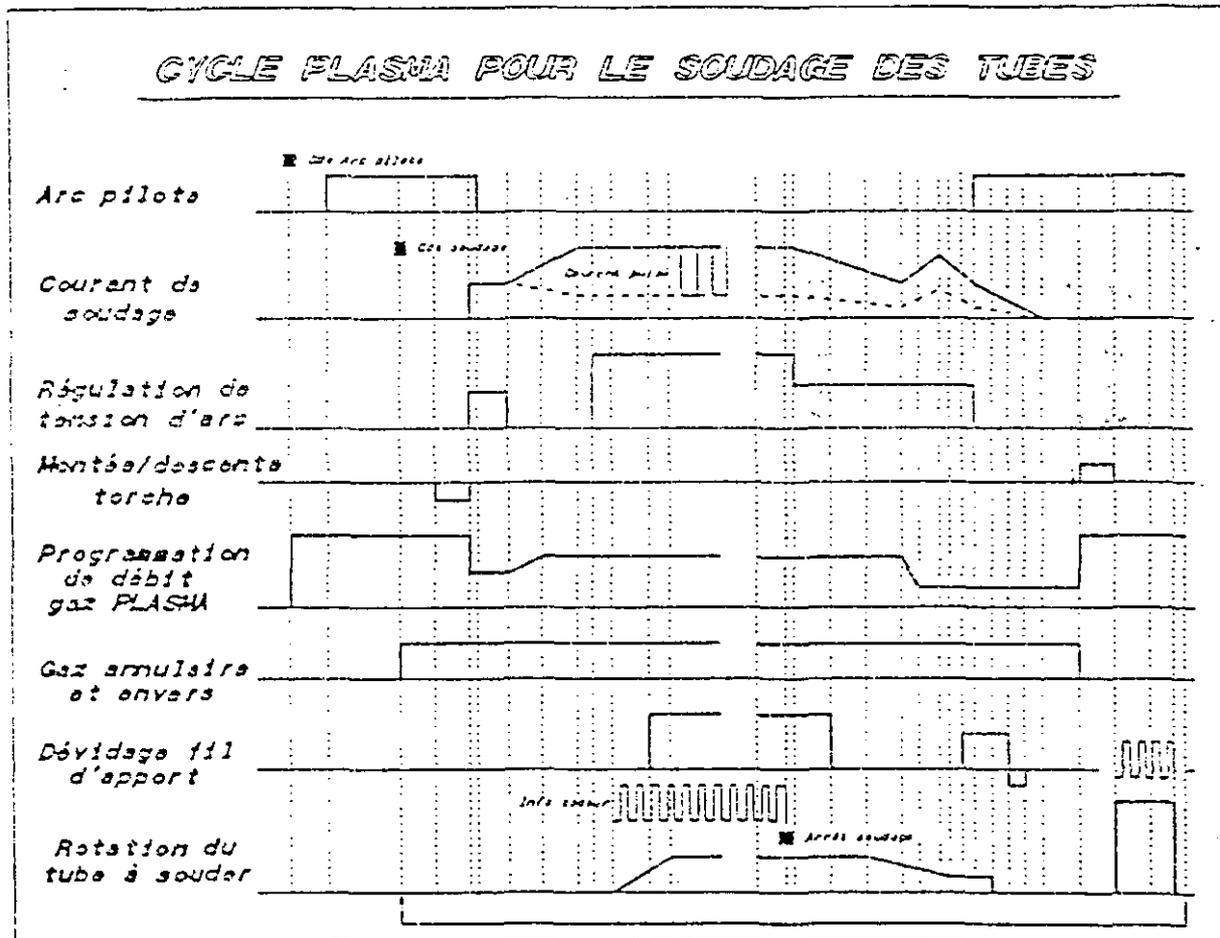
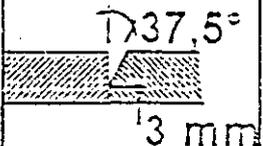
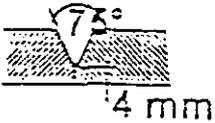


Fig. 10 Esempio di risultati ottenibili in saldatura circonferenziale ad arco PLASMA di tubazioni

Tube Ø extérieur (mm)	Epaisseur de paroi (mm)	Nuance Acier	Préparation	Temps d'exécution de soudure *
60	2,9	Acier Carbone		2 minutes 20 se 2 passes
133	3,8	Acier Carbone		4 minutes 2 passes
406	9,52	Acier carbone		14 minutes 2 passes
114	8	AISI 304		4 minutes 10 se 2 passes
170	3,2	AISI 304		2 minutes 1 passes

* l'assemblage étant monté sur machine prêt à souder



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal **Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali**
dell' **Associazione Italiana di Metallurgia**
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
**Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili**

**Le tecniche di saldatura laser
esempi applicativi**
A. Vendramini

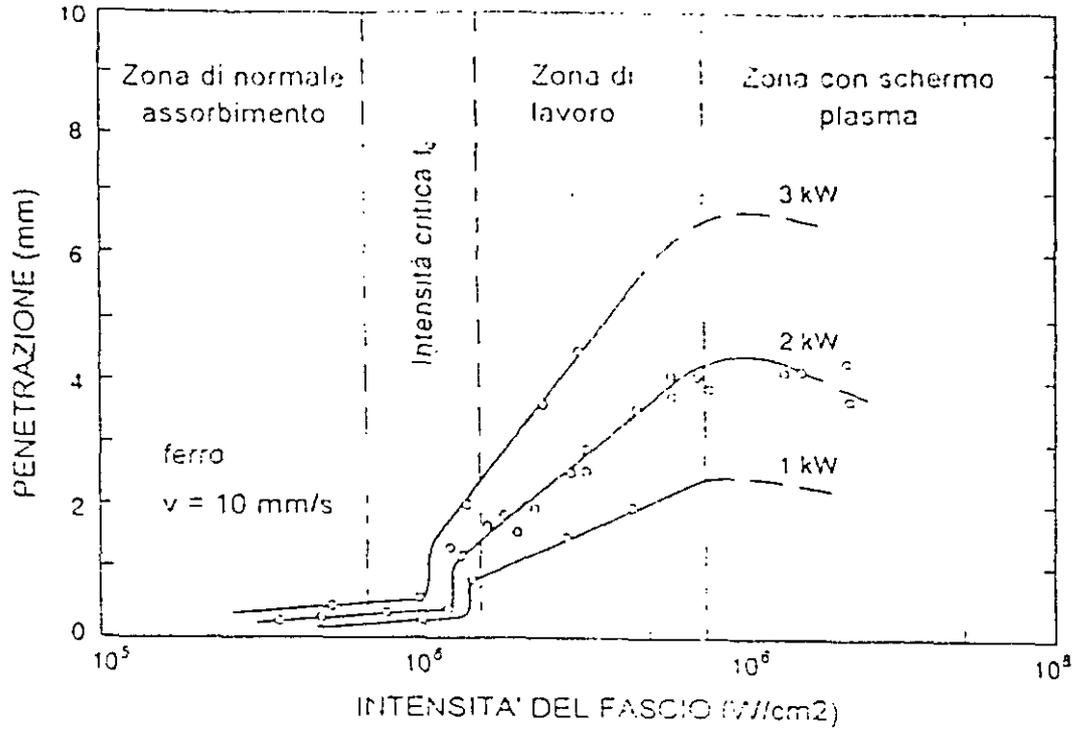
Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

PROGRAMMA

1. GENERALITA' SULLA SALDATURA LASER
2. CONFRONTO CON LE TECNICHE CONVENZIONALI
3. PRESTAZIONI CON LE SORGENTI LASER A CO₂ E ND:YAG
4. ESEMPI DI SALDATURE SU ACCIAI AUSTENITICI, FERRITICI, MARTENSITICI E DUPLEX
5. ESEMPI DI APPLICAZIONI: RASOI, TUBI E STRUTTURE LEGGERE
6. CENTRI DI LAVORAZIONE LASER
7. CONCLUSIONI

VANTAGGI DEL LASER

- RIDUZIONE DEL COSTO DEI MATERIALI
- RIDUZIONE DEL COSTO DI LAVORAZIONE
- RIDUZIONE NELL'IMPIEGO DI MANO D'OPERA
- RIDUZIONE DEI COSTI DI MANUTENZIONE
- RIDUZIONE DEGLI SCARTI
- SEMPLIFICAZIONE DELLA PROGETTAZIONE
- LAVORAZIONE IN LINEA



Saldatura per conduzione



Macrografia di un giunto ottenuto per saldatura laser per conduzione

Saldatura per penetrazione profonda



Macrografia tipica di una saldatura laser ottenuta per penetrazione profonda

Vantaggi della saldatura laser

elevati rapporti di forma

- nelle saldature ad una sola passata, la profondità di penetrazione è unicamente limitata dalla potenza laser disponibile. Questo può eliminare la preparazione del cianfrino e l'aggiunta di materiale d'apporto,

minimo apporto termico

- si hanno per questo ridotte distorsioni termiche dei materiali da congiungere, cosa che consente la saldatura di parti meccaniche lavorate, senza richiedere successive operazioni di finitura,
- si possono eseguire saldature vicino ad elementi sensibili al calore (ad es. circuiti elettronici, o giunti vetro-metallo),
- riduzione di danni metallurgici, come ingrossamenti del grano o estese zone termicamente alterate,

elevata caratteristiche del giunto

- integrità: il processo di rimescolamento del materiale fuso, dovuto alla presenza del keyhole, permette la fuoriuscita dei gas, dando in generale una saldatura con porosità minime,
- resistenza: l'elevata temperatura all'interno del keyhole favorisce la diminuzione del contenuto di impurezze (che hanno una temperatura di vaporizzazione generalmente inferiore a quella del materiale base) e per questo il cordone di saldatura presenta, in genere, una resistenza a trazione almeno uguale a quella del materiale base,
- la saldatura può essere posizionata esattamente in corrispondenza al giunto, migliorando così le caratteristiche di resistenza a fatica ed a trazione rispetto a quanto ottenibile con le usuali saldature d'angolo,

facile accessibilità del giunto

- il fascio laser garantisce la possibilità di operare con una grande tipologia di giunti diversi, nei quali è richiesta la accessibilità da un solo lato,
- riduzione nella corrispondente larghezza delle flange,
- lavorazione non a contatto, per cui non si ha nessuna contaminazione del cordone da parte degli elettrodi,
- il processo avviene in atmosfera ambiente;

elevate velocità di processo e flessibilità di lavoro

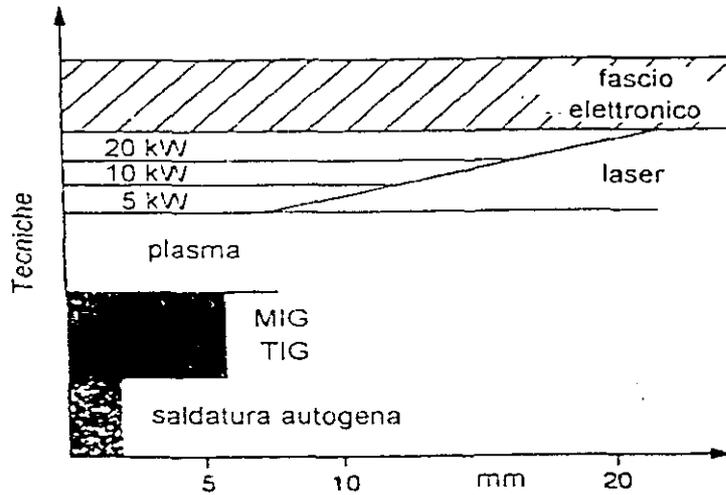
- la produttività è, in genere, superiore a quanto ottenibile con i metodi tradizionali,

vengono accresciute le opportunità di progettazione dei componenti

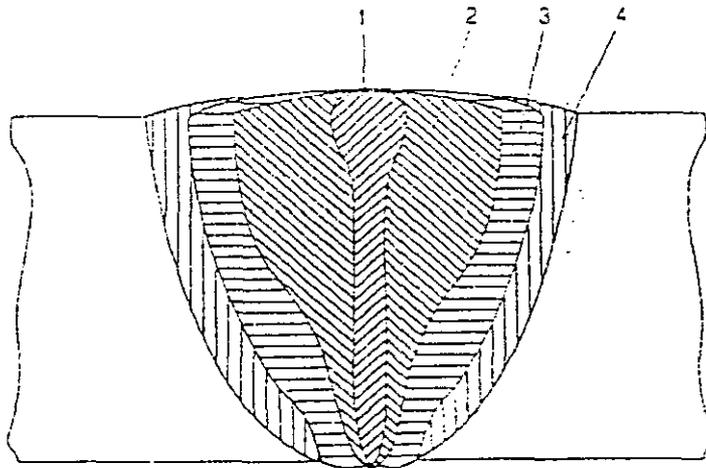
- il pezzo finale può essere realizzato saldando tra loro componenti semplici che possono avere impieghi diversi, ottenibili con operazioni automatiche e veloci (stampaggio, tranciatura, lavorazioni su esterni, ecc).

Infine, occorre citare un'altra caratteristica significativa della saldatura laser: l'efficienza di fusione.

Confronto con le tecniche convenzionali

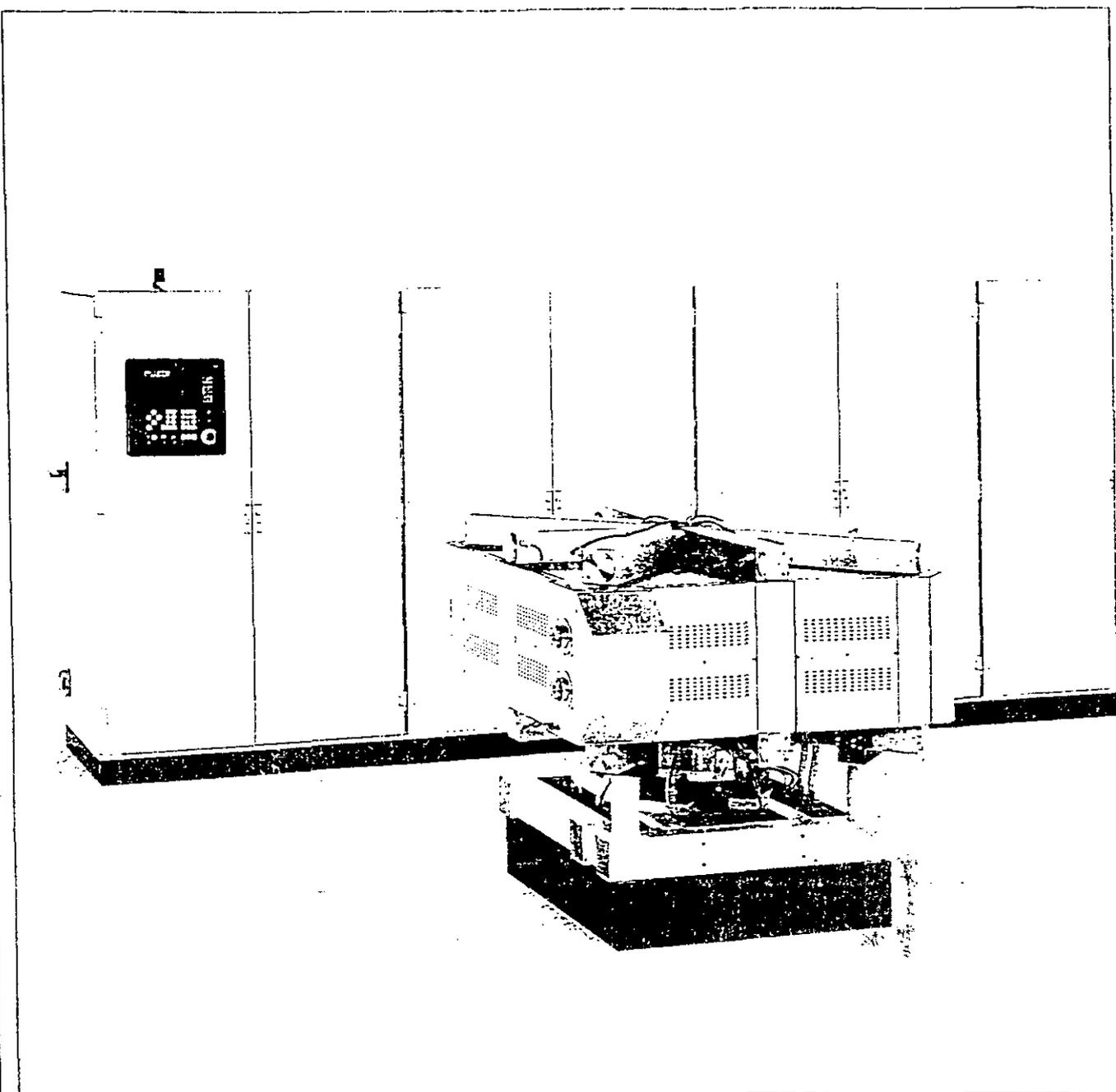


Indicazione degli spessori massimi saldabili con varie tecniche



Indicazione della forma dei cordoni di saldatura saldabili con le diverse tecniche: 1) laser e fascio elettronico, 2) plasma, 3) MIG, 4) TIG

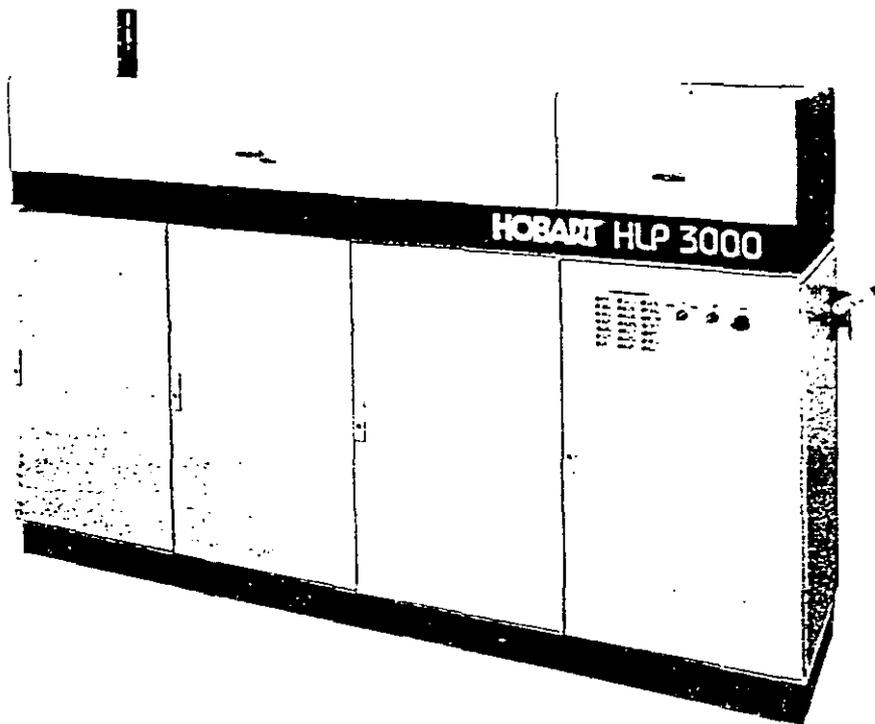
	laser	fascio elettronico	resistenza	arco plasma
generazione di calore	bassa	modesta	modesta	molto alta
qualità	eccellente	eccellente	buona	eccellente
velocità	buona	alta	modesta	alta
costo investimento	alto	elevato	basso	basso
costo funzionamento	modesto	basso	basso	basso
costo attrezzaggio	basso	alto	alto	modesto
controllabilità	molto buona	buona	bassa	discreta
possibilità automazione	eccellente	buona	discreta	discreta
gamma materiali dissimili	molto ampia	ampia	limitata	limitata



TRUMPF Laser
TLF 12000 turbo

The most compact 12 kilowatt
industrial CO₂ laser in the world

HLP3000 AND HLP2250 CONTINUOUS WAVE Nd:YAG LASERS.



HOBART's HLP3000 is the highest power, continuous wave Nd:YAG laser commercially available in the world. With its modular, solid state construction, the HLP3000 is a powerful, high speed, low operating cost, materials processing tool.

The HLP3000 utilizes four pump chambers each with an Nd:YAG rod and two arc lamps, while the HLP2250 draws on three pump chambers of same configuration. Combined with Hobart's robust fiber optic beam delivery system and integrated with "moving part - fixed laser" or "fixed part - moving laser" motion systems the HLP 3000 and the HLP2250 are highly flexible tools.

Key Features

Modular Construction

- 99% component commonality throughout the HLP family
- Rack mounted, slide out power supplies
- Internal isolation of functional subsystems
- HLP2250 upgradeable to HLP3000

Flexible Beam Delivery

- 600 micron core fiber optic cable available in lengths of 10-150 meters
- Plug compatible with near zero adjustment
- Four port Multiplexing option with one second switch time
- Direct beam delivery also available
- Standard and custom optical end effectors

Robust And Industrialized

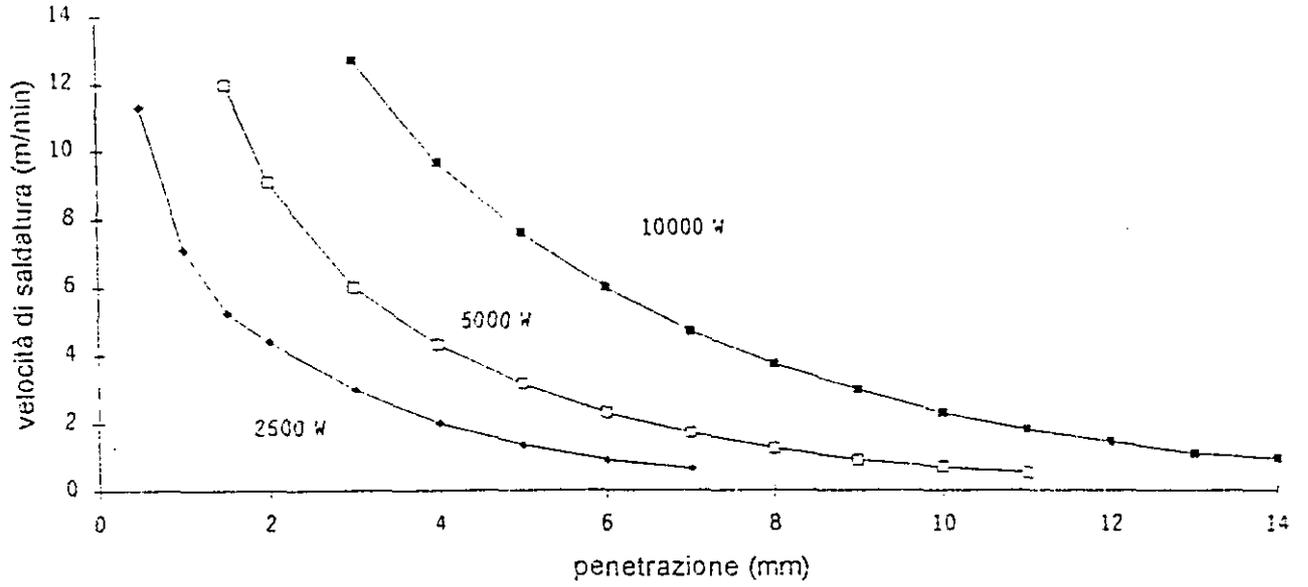
- Completely sealed, purged and cooled cabinet and laser head
- Protected from electrical line noise and surges
- Vibration isolated

Easy Installation

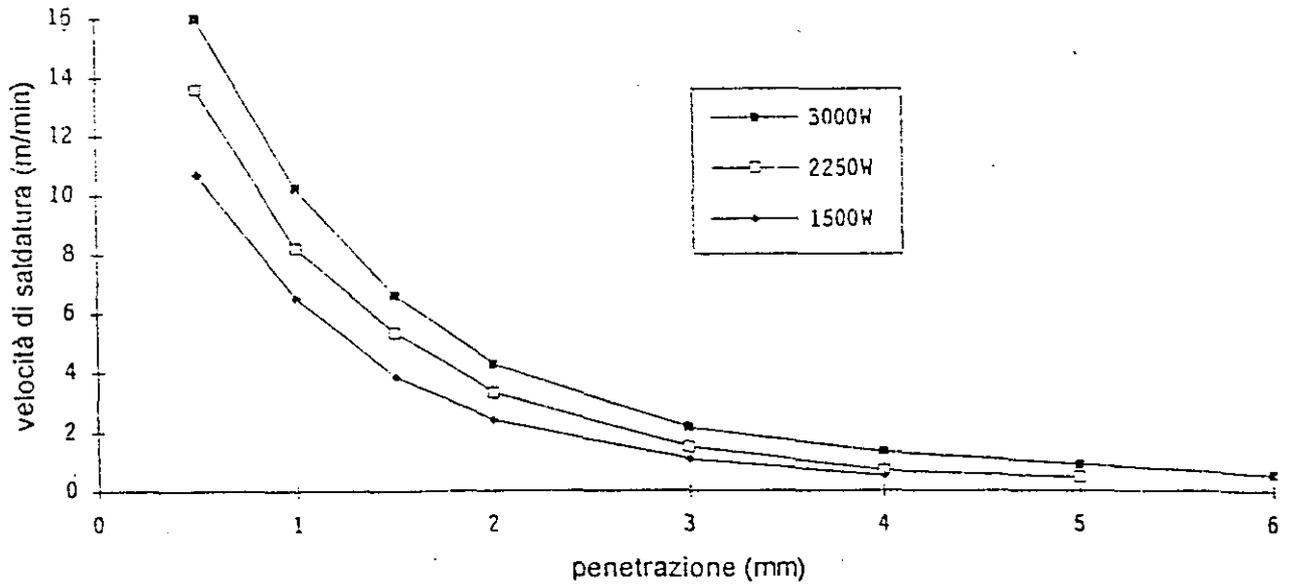
- Accommodates most control interfaces
- Compatible with stand alone closed loop chillers and plant water cooling systems

HOBART
LASERS & ADVANCED SYSTEMS

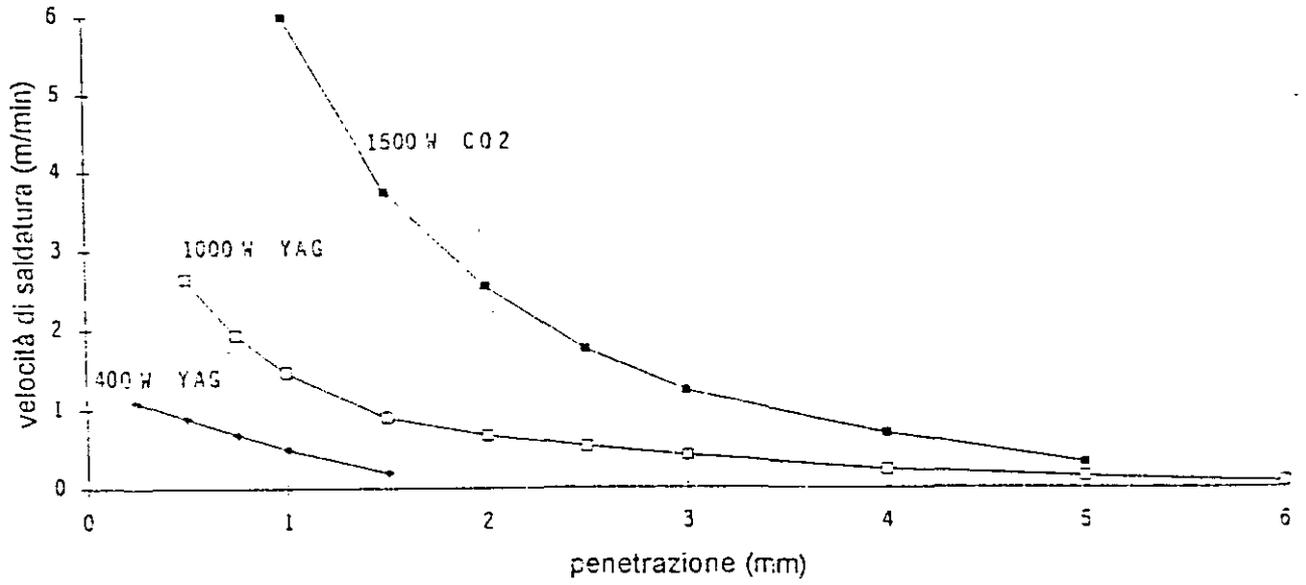
Saldatura AISI 304 con laser a CO2



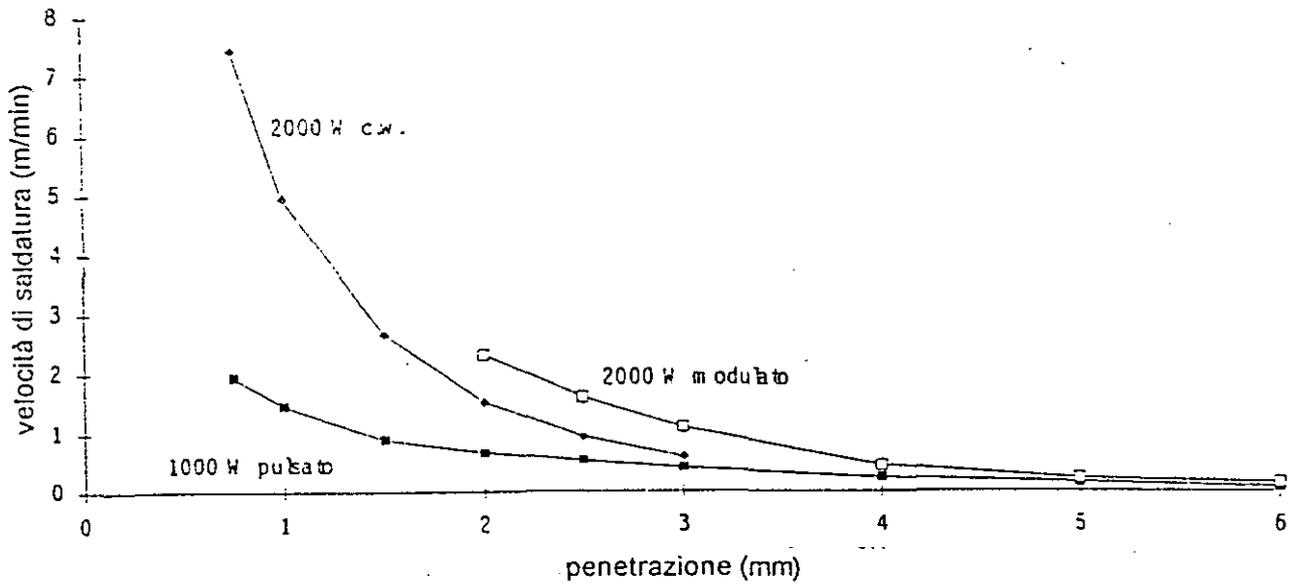
Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG continuo



Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG impulsato

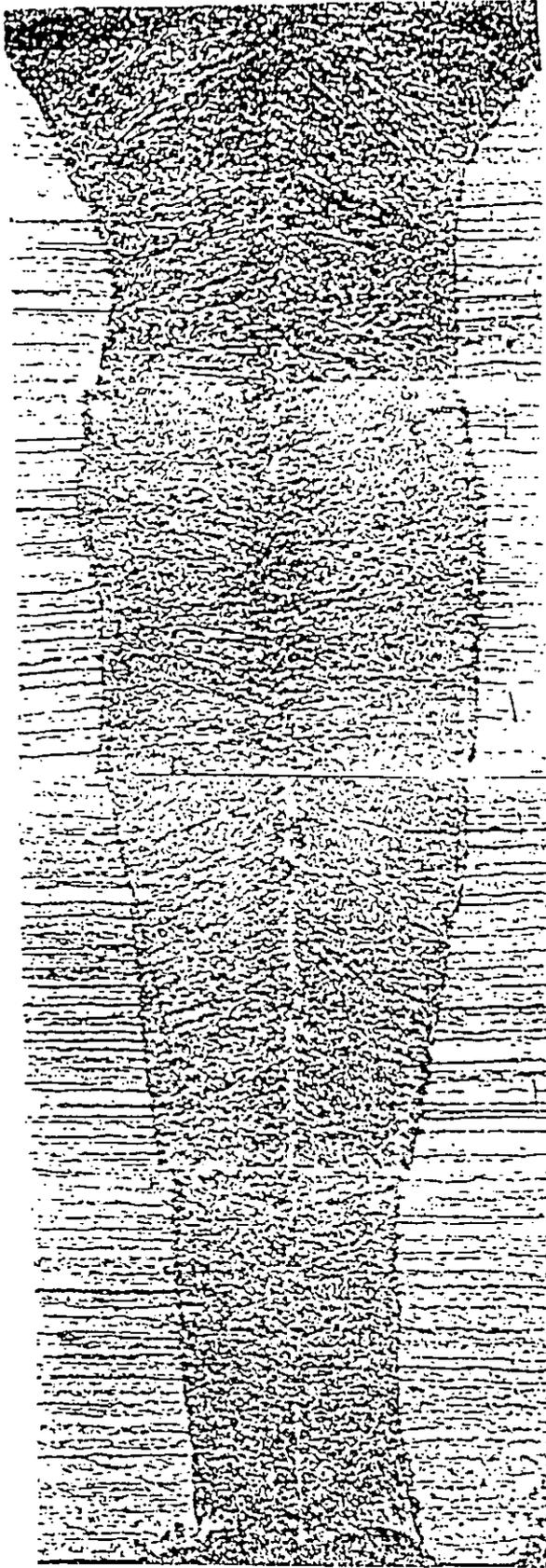


Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG quasi continuo

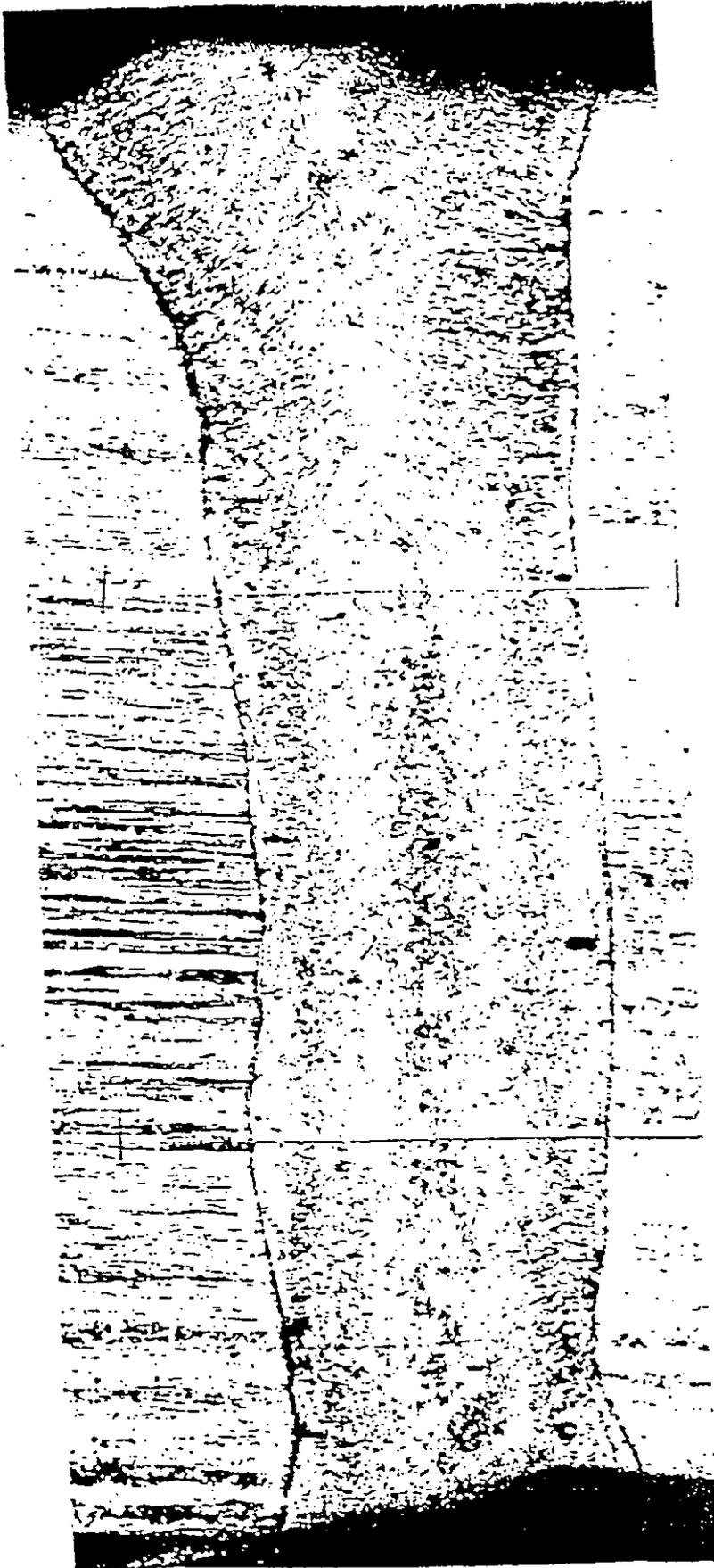


Confronto tra laser Nd:YAG da 1 kW con trasmissione in fibra e laser a CO₂

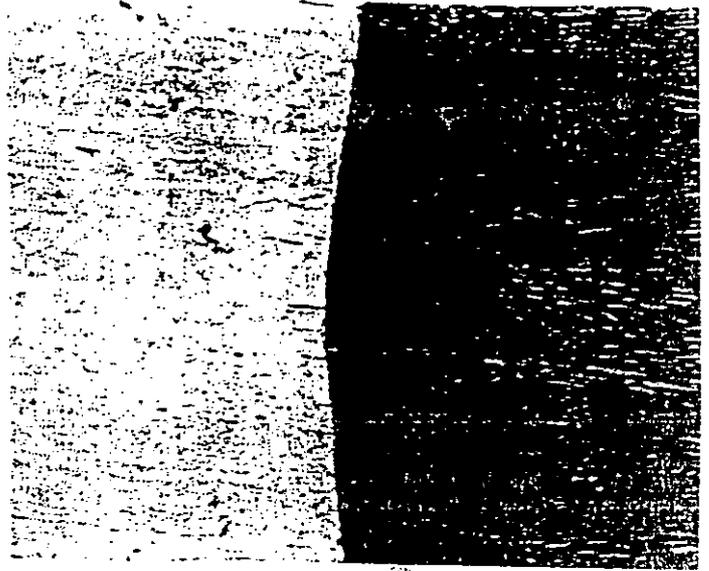
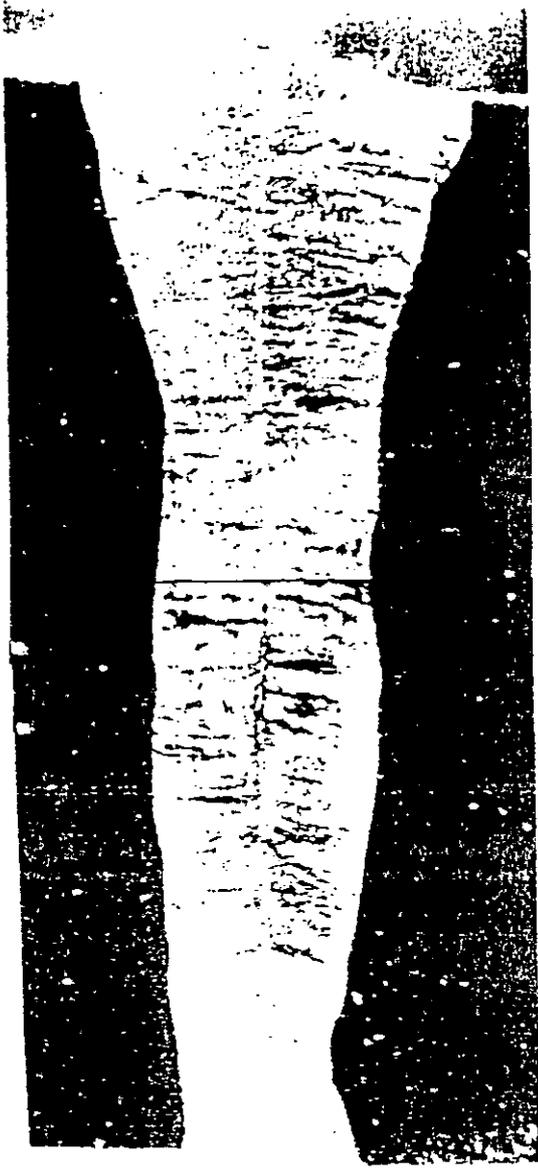
Elementi	Considerazioni	Conseguenze
Risonatore	<ul style="list-style-type: none"> • sistema a molte barrette • bassa vita media delle lampade • scarsa efficienza 	<ul style="list-style-type: none"> • alti costi di investimento • alti costi di funzionamento
Trasmissione fascio in fibra	<ul style="list-style-type: none"> • maneggiamento flessibile del fascio • suddivisione temporale del fascio • suddivisione in energia del fascio 	<ul style="list-style-type: none"> • minori investimenti per lavorazioni 3D • nessuna necessità di riallineamento • operatività con molte stazioni • bassi costi di manutenzione
Testa di focalizzazione	<ul style="list-style-type: none"> • lenti in vetro 	<ul style="list-style-type: none"> • minor costo delle lenti
Processo	<ul style="list-style-type: none"> • ad elevato assorbimento (sui materiali metallici) • trascurabile formazione di plasma • molteplici variabili 	<ul style="list-style-type: none"> • alta efficienza di lavoro sui materiali metallici • difficile ottimizzazione
Stazione di lavoro	<ul style="list-style-type: none"> • problemi di sicurezza 	<ul style="list-style-type: none"> • lavorazioni in ambiente chiuso



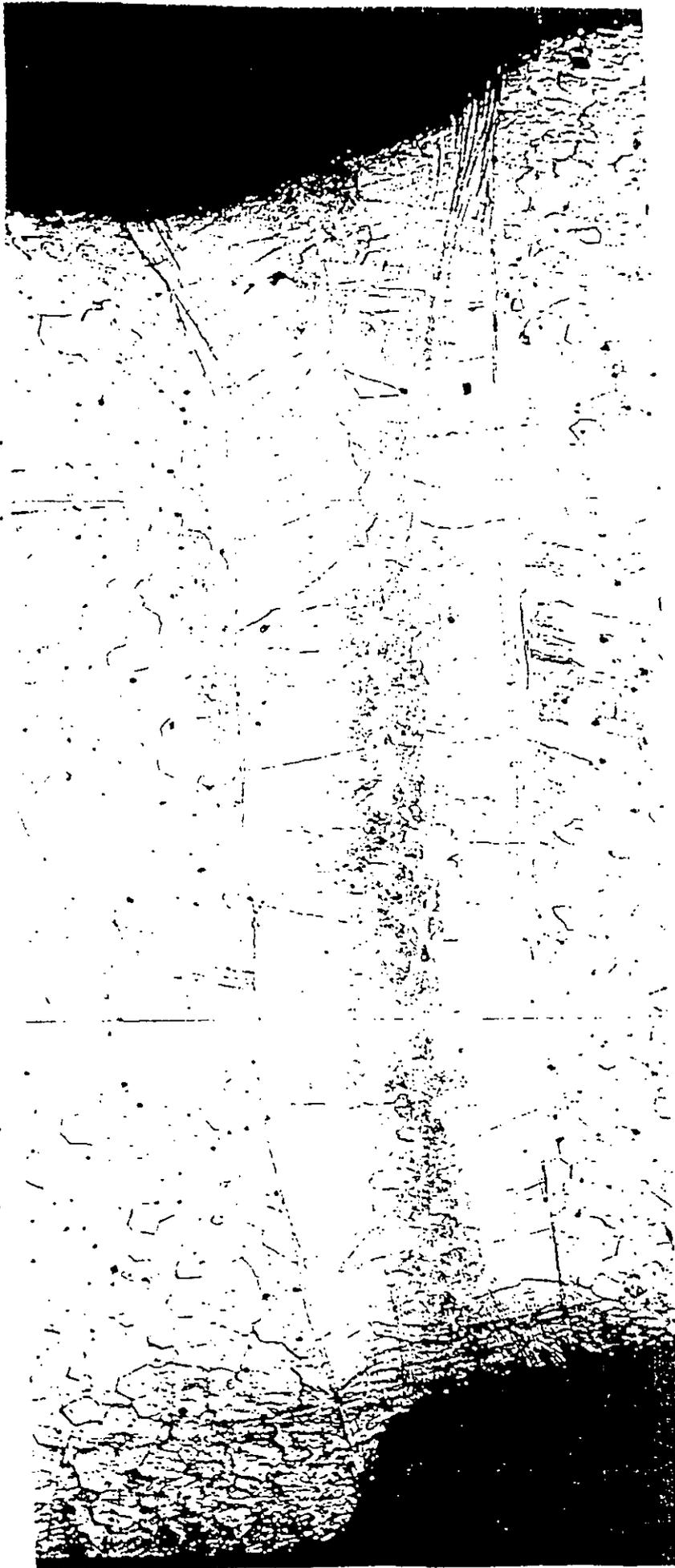
Saldatura con laser a CO₂ da 5 kW
AISI 304: spessore 4 mm, velocità 7 m/mi:



Saldatura con laser a CO₂ da 5 kW
AISI 321: spessore 2 mm, velocità 10 m/mi



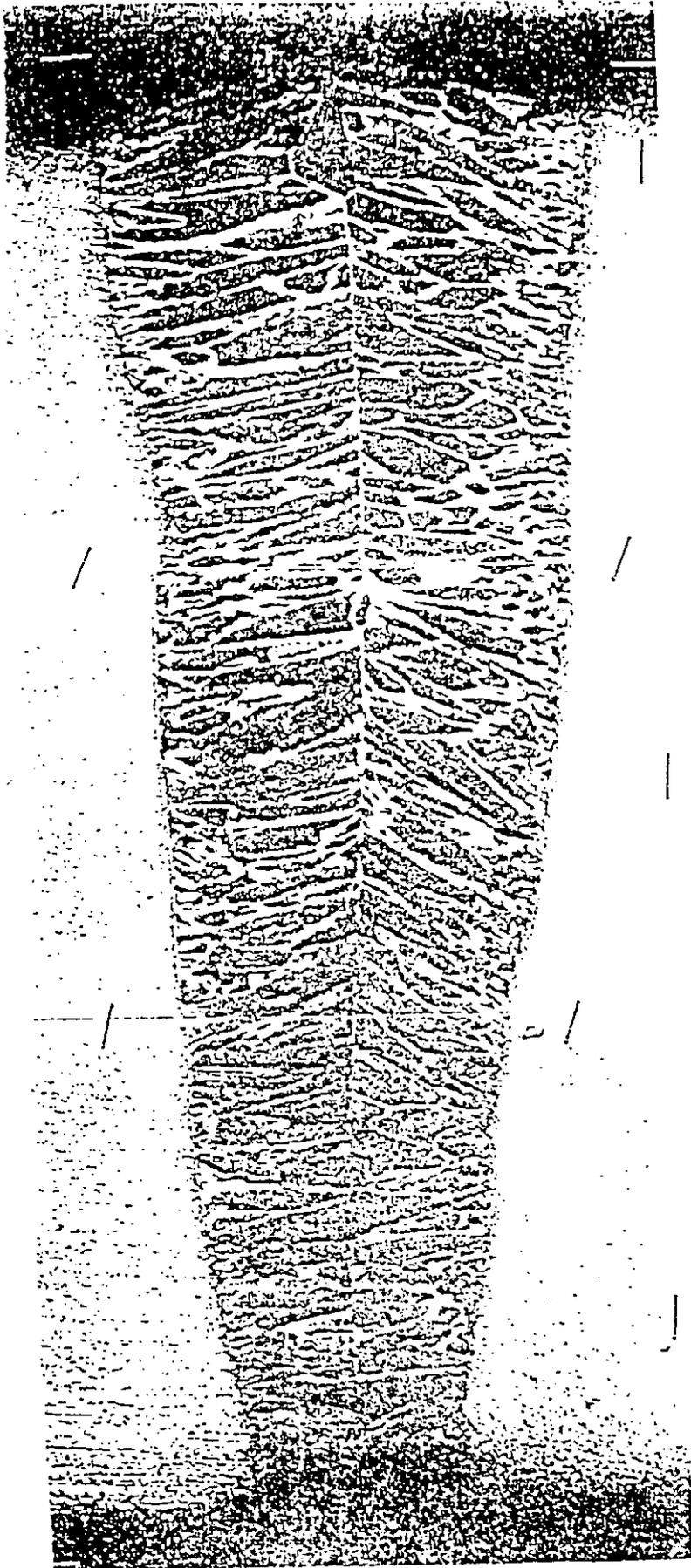
Saldatura con laser a CO₂ da 10 kW
AISI 316 L: spessore 10 mm, velocità 1,2 m/min



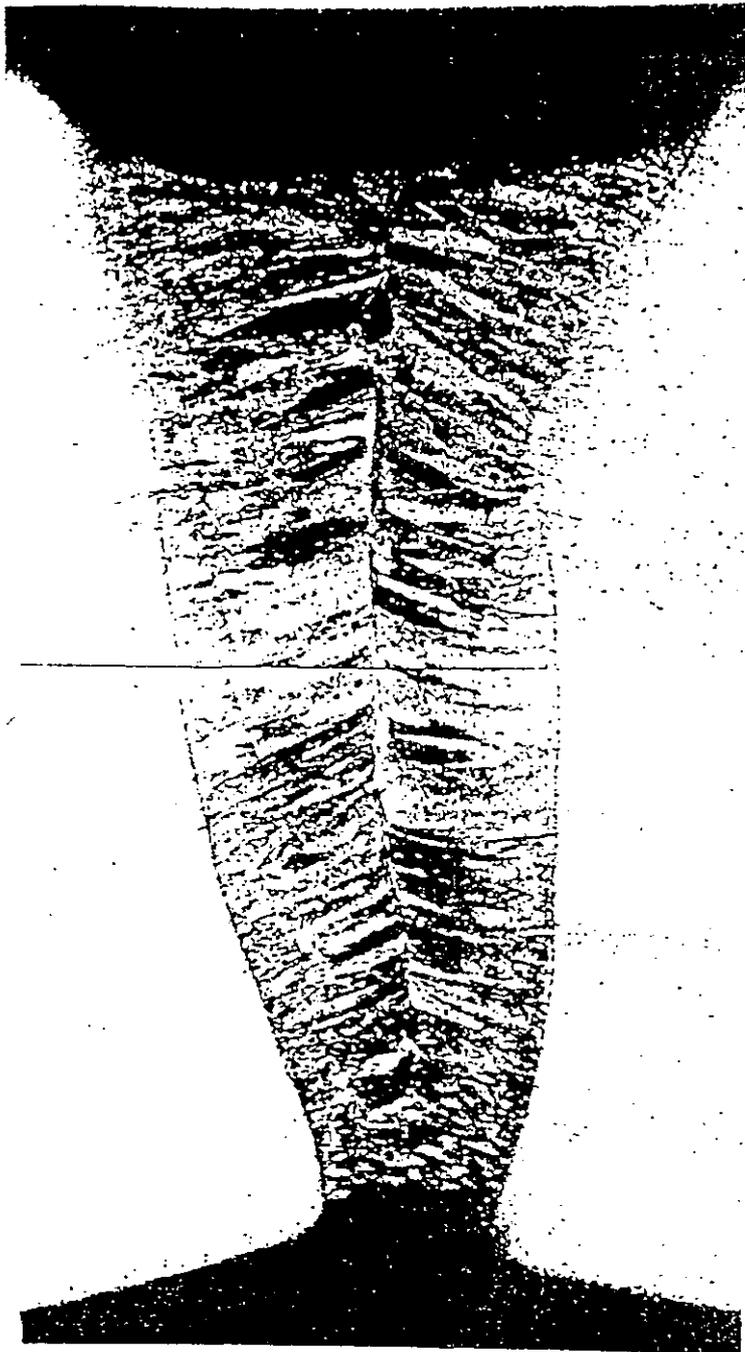
Saldatura con laser a CO₂ da 5 kW
18Cr-Ti: spessore 2,4 mm, velocità 7 m/m:



Saldatura con laser a CO₂ da 5 kW
29Cr 4Mo: spessore 1 mm, velocità 8 m/min



Saldatura con laser a CO₂ TF da 5 kW
22 Cr: spessore 2 mm, velocità 11 m/min



Saldatura con laser a CO₂ FAF da 5 kW
22 Cr: spessore 1,7 mm, velocità 16 m/min
ferrite cordone 33%; ferrite mat. base 24%

LASER WELD PENETRATION

1.7 MM DUPLEX SS
12.0 kW
50% CO₂: 50% He Shield Gas*
15 m/min

0.45 Meters Focal Length; Dual Spot Focus Optics

In Line Spot Separation: 2.5 mm

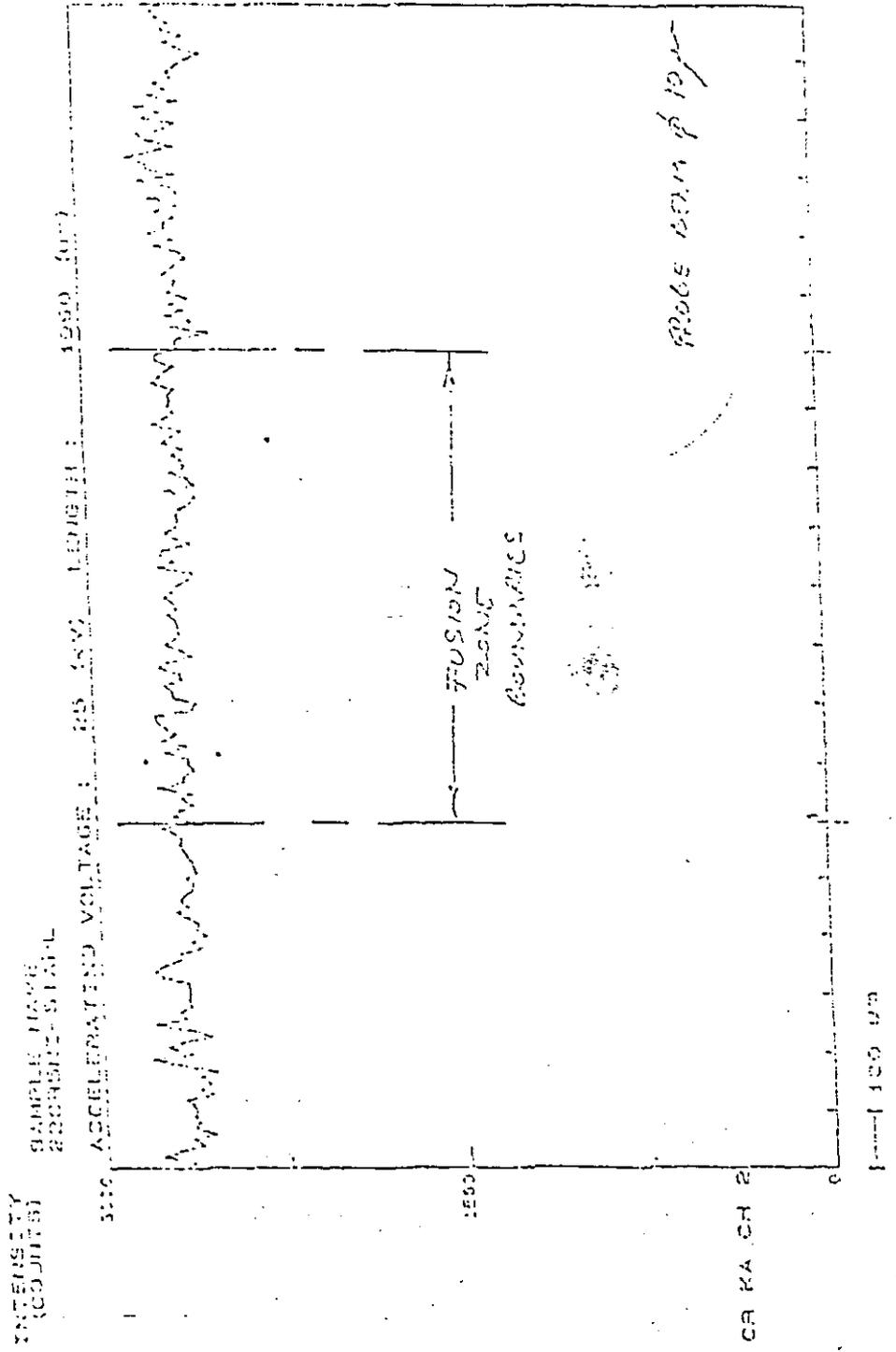


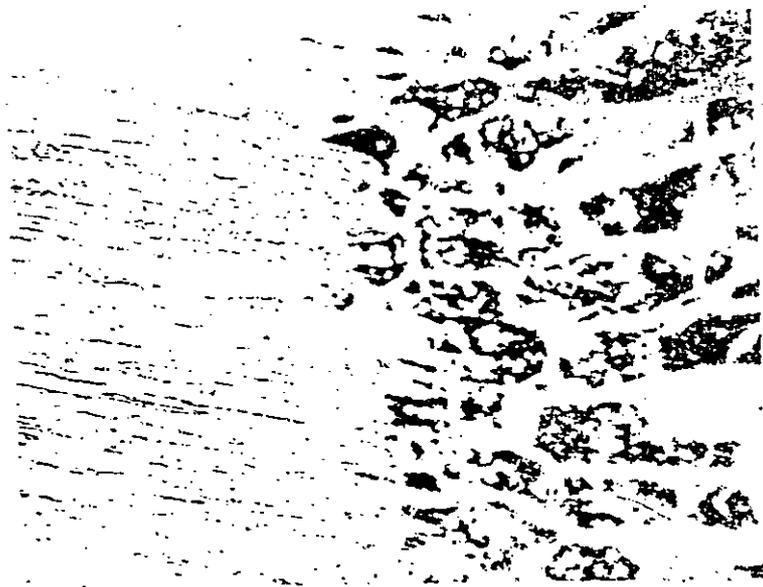
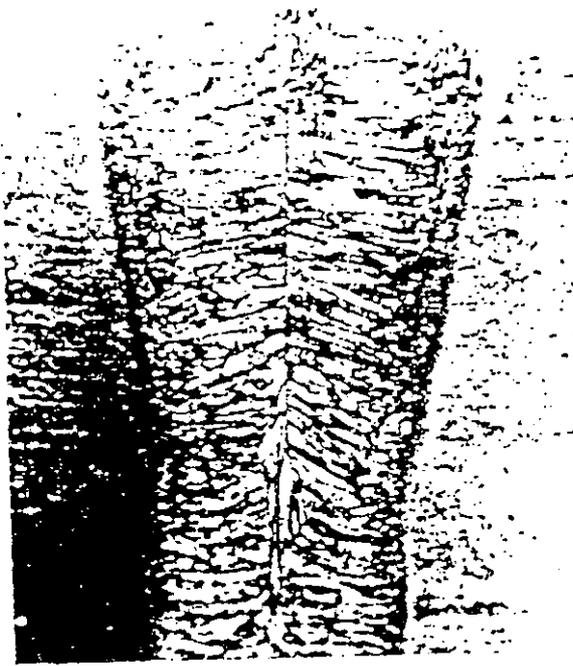
50X Cross Section of Weld

*Total Flow: 25 l/sec

Result of chromium line scan using wavelength
 dispersive analysis taken across weld produced
 with dual focus optics at 12 kW / 15.7 μ/min
 (see attachment)

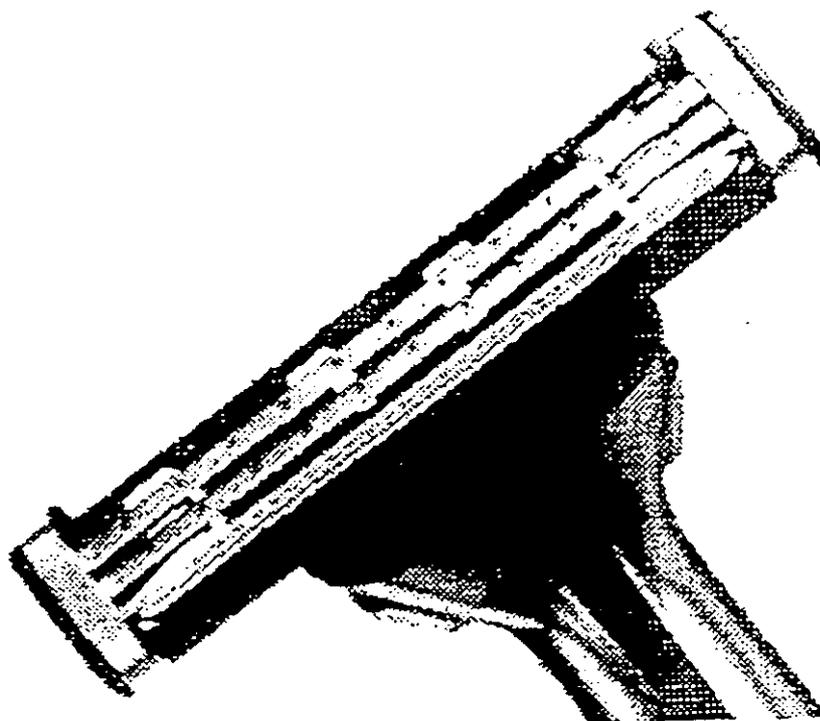
MAX 2760 MIN 2585 AVE 2673





Saldatura con laser a CO₂ da 10 kW
SAF 2205: spessore 10 mm, velocità 1,3 m/min

SALDATURA CON LASER ND:YAG DI LAME PER RASOI

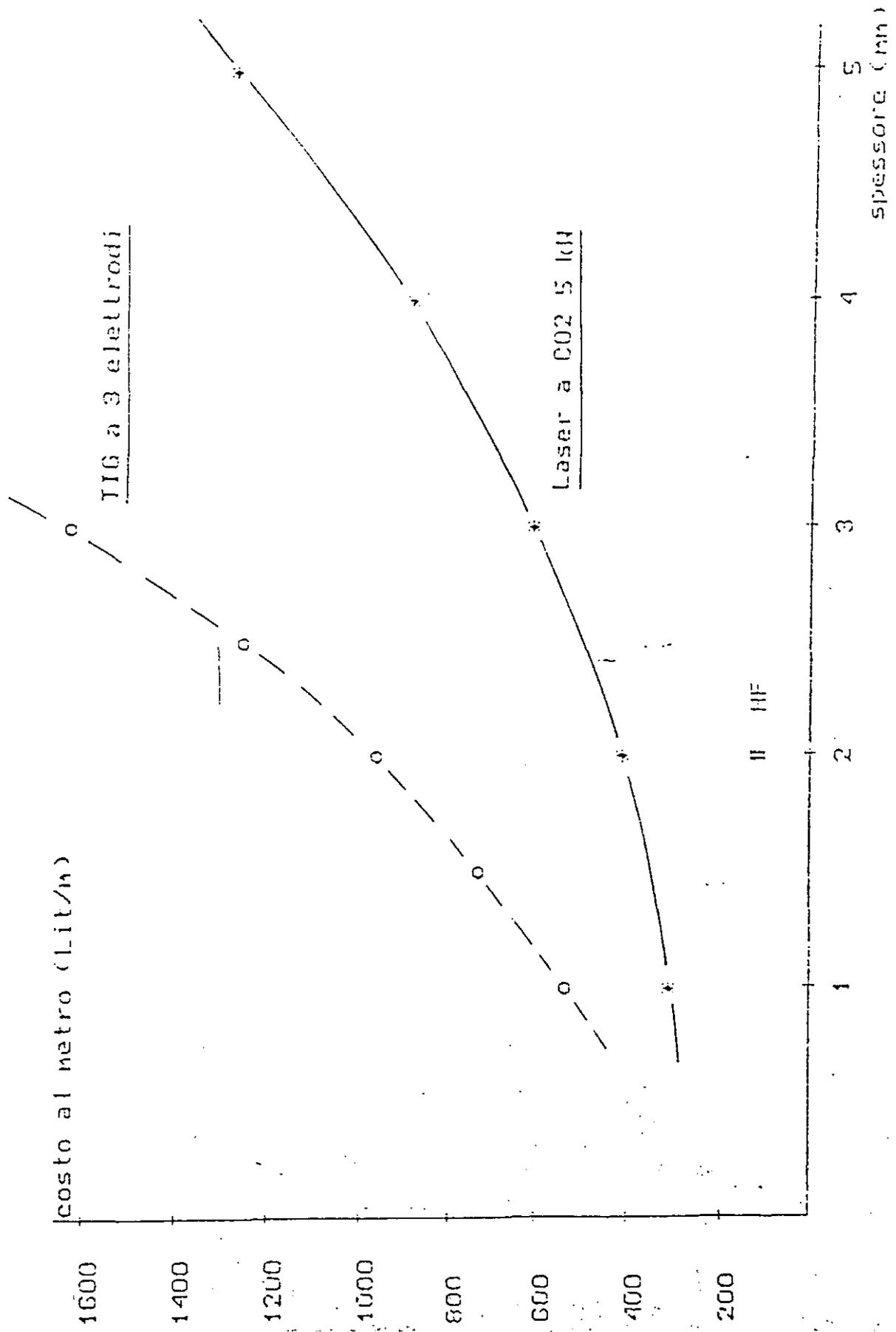


Saldatura eseguita con laser Nd:YAG da 300 W medi

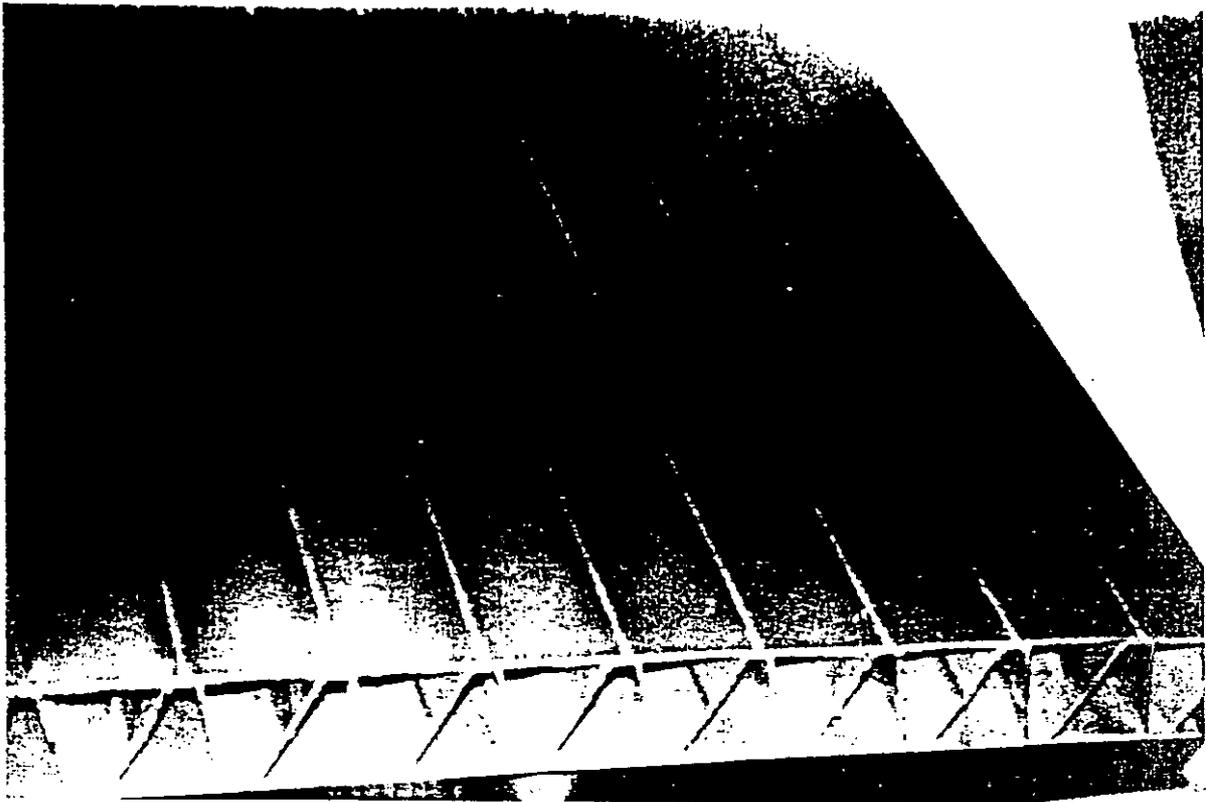
1560 punti di saldatura/min, equivalenti a 60 rasoi/min

30 laser in produzione, ciascuno dei quali alimenta in fibra ottica 4 stazioni

SALDATURA LONGITUDINALE DI TUBO IN AISI 304



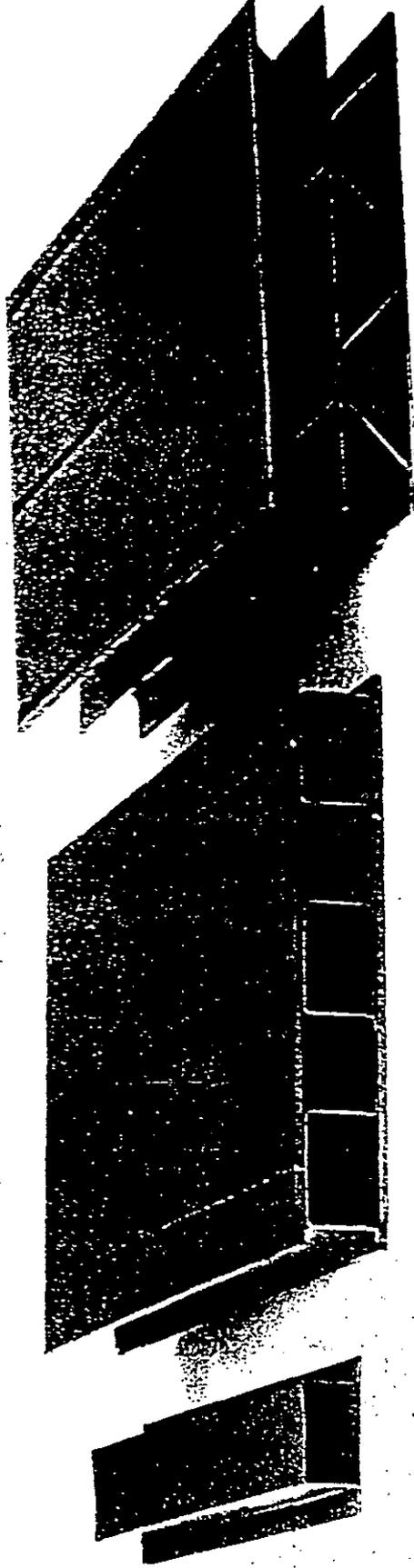
SALDATURA DI ELEMENTI LEGGERI STRUTTURALI



Saldatura con laser Nd:YAG di piattaforme per fregate LCC19 CRUISE

Spessore lastre 1,35 mm, spessore greca 0,35 mm

La saldatura ($P = 2,4$ kW cw con fascio in fibra per 75 m, diametro della fibra 0,6 mm) avviene su un impianto a portale di dimensioni 7 x 4 m, con una velocità di 1,7 m/min



Material: Stahl

Leistung: $P_L = 10 \text{ kW}$

Blechdicke: Gurte: $5 \text{ mm} < s < 8 \text{ mm}$

Geschwindigkeit: $2 \text{ m/min} < v_s < 5 \text{ m/min}$

Stege: $2 \text{ mm} < s < 4 \text{ mm}$

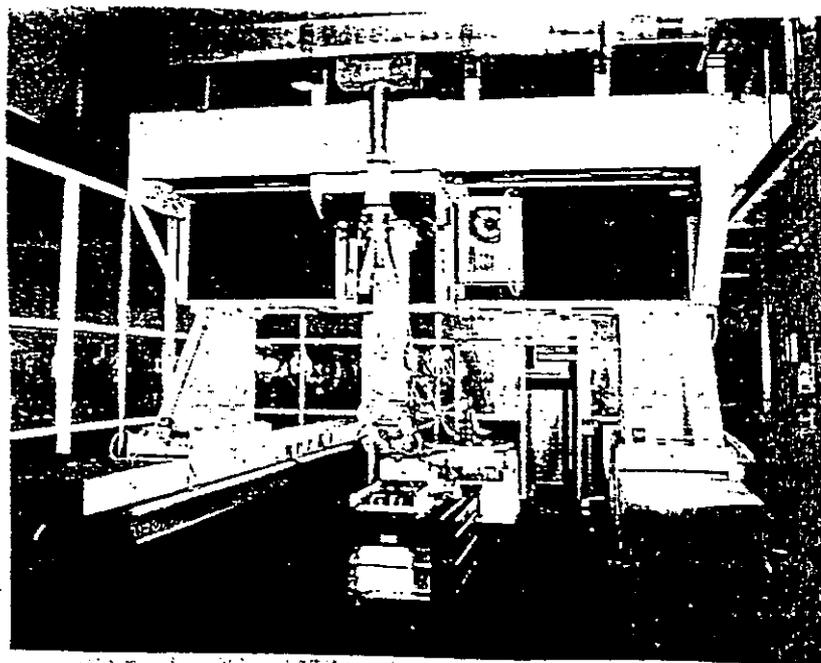
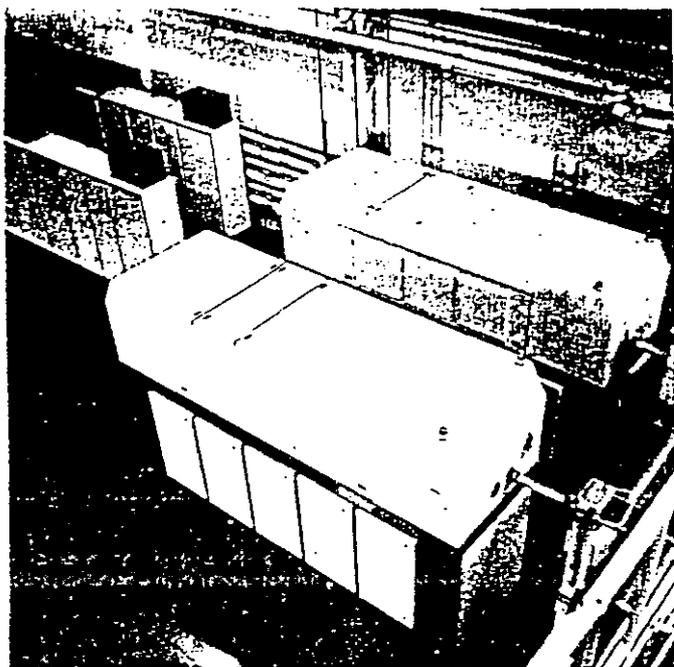
249.0244

Laserstrahlschweißen von Leichtbau-Strukturelementen

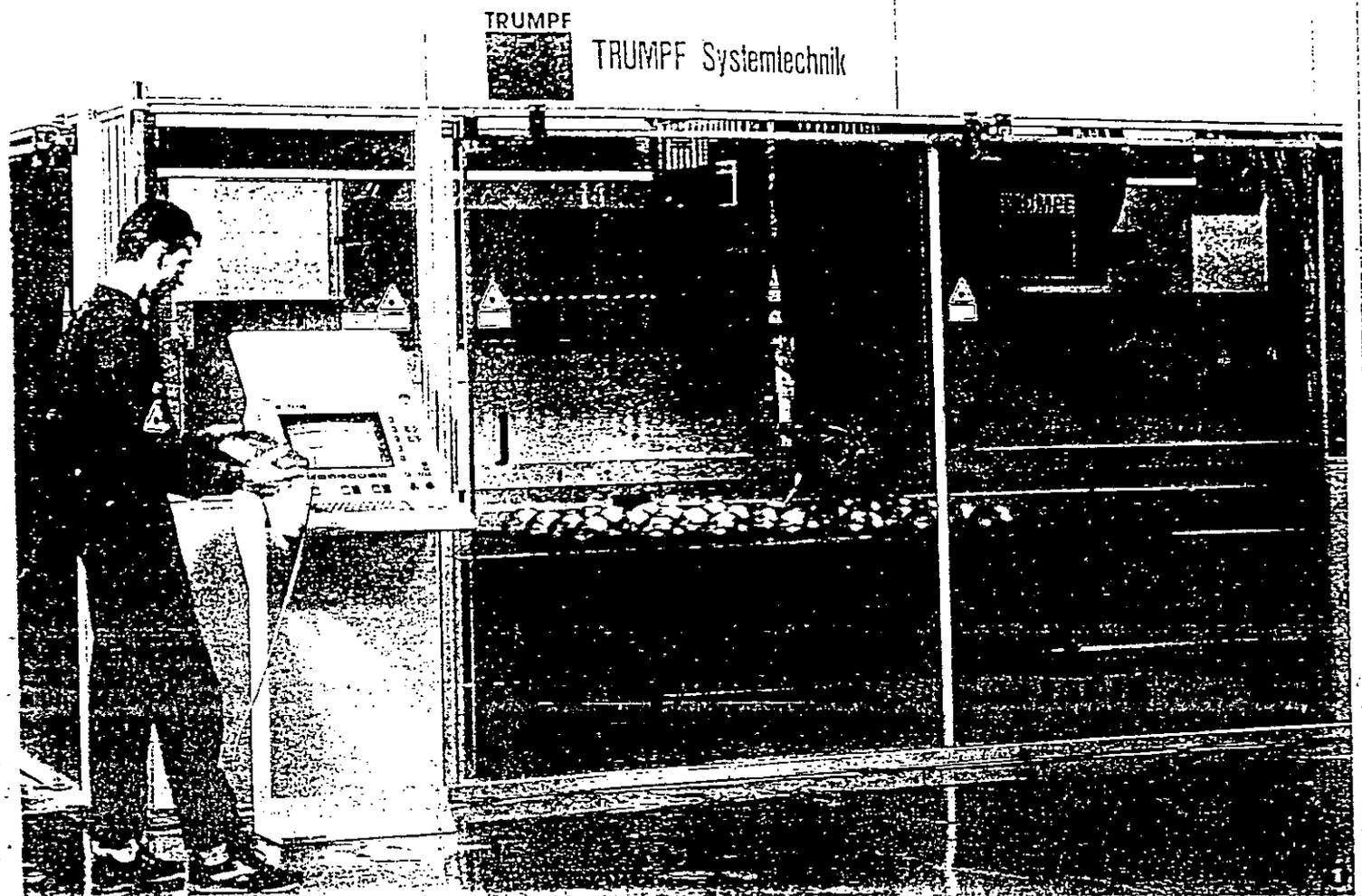
CENTRI DI LAVORAZIONI LASER

Società	Sorgenti utilizzate	Campo di lavoro
Laser Metalworking	RS 1700 da 1700 W	500 x 500 mm
Laser Tech	TLF 2200 da 2200 W	2500 x 1250 x 400 mm
Riva Techint	RS UR 10000 da 10 kW RS SR 17000 da 17 kW	3500 x 2000 x 500 mm

CENTRO LASER RIVA TECHINT



TAGLIARE E SALDARE INOX CON UN LASER-ROBOT



Il "laser" è un raggio energetico che può essere utilizzato come pura sorgente energetica per tagliare (chi non ricorda la celebre sequenza di 007 in mano a Goldfinger?) e per saldare un gran numero di materiali metallici e non. Senza entrare nel merito delle tecniche "laser", per notizie sulle quali rimandiamo ad altra sede specifica, desideriamo illustrare qui una cella laser (fig. 1) Trumf Systemtechnik utilizzata per il taglio e la saldatura di particolari di casalinghi di acciai inossidabili austenitici.

La cella laser, che è mantenuta in atmosfera protetta di argon o di azoto a seconda del materiale lavorato, contiene la testa laser vera e propria che è montata su un sistema che la rende mobile comunque nello spazio, permettendole qualunque movimento sia in fase di saldatura, sia in fase di taglio.

In figura 2 viene illustrata la saldatura di un tubo inox su una flangia. La saldatura risulta di elevata qualità dato che la zona riscaldata dal raggio laser è di dimensioni molto piccole e conseguentemente il cordone di saldatura risulta ben penetrato e le zone termicamente alterate sono ridotte al minimo, ne segue che anche le deformazioni degli elementi saldati sono molto ridotte.

Per quanto concerne il taglio, esso si presenta assolutamente privo di bavé e senza incrudimento alcuno in quanto il materiale non viene deformato dall'azione degli utensili da taglio.

Inoltre il taglio (fig. 3) può seguire percorsi comunque

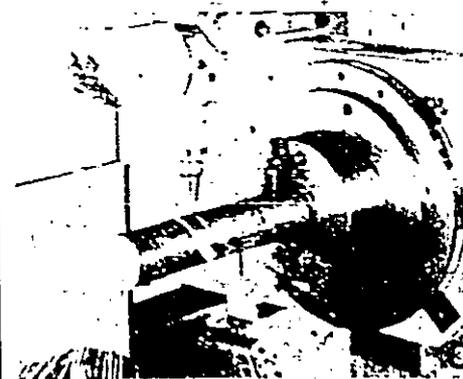
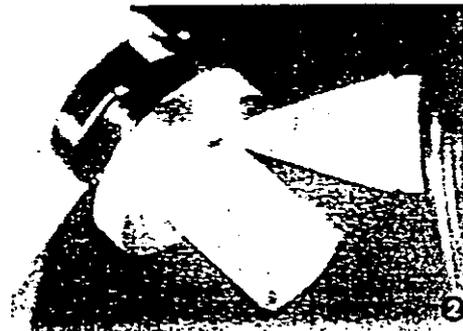


Fig. 1 - Vista della cella laser per il taglio e la saldatura di particolari di casalinghi inox. La cella è munita di una sorgente laser di 2,2 kW di potenza. La testa robotizzata può raggiungere qualunque posizione nello spazio consentendo al raggio laser di compiere qualunque percorso tridimensionale.

Fig. 2 - Saldatura di un tubo inox a una flangia pure inox. La saldatura avviene in atmosfera protetta e le sue limitate dimensioni riducono al minimo le deformazioni degli elementi saldati.

Fig. 3 - Taglio di una finestrella rettangolare su un tubo inox. Il taglio è praticato secondo le tre direzioni dello spazio e non incrudisce i materiali.

disposti nello spazio, per esempio sulla superficie di un tubo o di qualsiasi lamiera imbutita, anche a doppia curvatura. In questo modo si possono praticare tagli anche dopo operazioni di formatura a freddo.

Il laser utilizzato, della potenza di 2,2 kW, è del tipo CO_2 , eccitato in alta frequenza in modo da ottenere una scarica "tranquilla", senza fluttuazioni. Questa potenza permette di operare correntemente su acciaio inox da un minimo di 0,20 mm (limite inferiore per evitare la deformazione dell'elemento) a un massimo di 7 mm di spessore.

Installazione presso Laser Tech, 25066 Lumezzane BS, via Garibaldi 65/f, tel. 030/89.70.937.

INTRODUZIONE ALLA SALDATURA LASER

Vendramini Antonio

INDICE

1. Generalità	
- saldatura per conduzione	4
- saldatura per penetrazione profonda	4
2. Vantaggi della saldatura laser	8
3. Materiali che sono convenientemente saldabili con il laser	
- acciaio al carbonio	10
- acciai inossidabili	13
- ghisa	14
- alluminio e sue leghe	14
- rame e sue leghe	14
- nichel e sue leghe	15
- titanio e sue leghe	15
4. Effetti dei trattamenti superficiali sulla saldabilità degli acciai	
- rivestimenti superficiali	15
- trattamenti superficiali	15
5. Tipo di sorgente laser da utilizzare nella saldatura laser	
- Nd:vetro	18
- Nd:YAG continuo	18
- Nd:YAG impulsato	19
- Nd:YAG quasi continuo	21
- CO ₂ flusso assiale	22
- CO ₂ flusso trasverso	22
6. Caratteristiche di un laser per applicazioni di saldatura	
- potenza	23
- modo	26
- polarizzazione	29
7. Variabili di processo nella saldatura laser	
- focalizzazione	30
- posizione focale	33
- gas di copertura	34
- velocità di lavoro	37
8. Condizioni di accostamento dei materiali necessarie per la saldatura laser	
- giunto di sovrapposizione	38
- giunto di testa	39
- giunti a flangia	40
- giunti a T	40
9. Preparazione dei giunti necessaria per la saldatura laser	40
10. Saldatura con filo d'apporto	41

11. Componenti principali di un sistema di saldatura laser	44
12. Campi di utilizzo della saldatura laser	47
13. Considerazioni economiche	50
14. Confronto con le tecniche convenzionali	
- brasatura	53
- saldatura ad arco	53
- saldatura a resistenza	54
- saldatura a fascio elettronico	54
15. Sicurezza	
- pericoli derivanti dalla luce laser stessa	55
- pericoli elettrici	57
- pericoli da fumi e vapori	57
- precauzioni per la protezione dal fascio laser	57
16. Glossario	59

INTRODUZIONE ALLA SALDATURA LASER

Vendramini Antonio

INDICE

1. Generalità	
- saldatura per conduzione	4
- saldatura per penetrazione profonda	4
2. Vantaggi della saldatura laser	8
3. Materiali che sono convenientemente saldabili con il laser	
- acciaio al carbonio	10
- acciai inossidabili	13
- ghisa	14
- alluminio e sue leghe	14
- rame e sue leghe	14
- nichel e sue leghe	15
- titanio e sue leghe	15
4. Effetti dei trattamenti superficiali sulla saldabilità degli acciai	
- rivestimenti superficiali	15
- trattamenti superficiali I	15
5. Tipo di sorgente laser da utilizzare nella saldatura laser	
- Nd:vetro	18
- Nd:YAG continuo	18
- Nd:YAG impulsato	19
- Nd:YAG quasi continuo	21
- CO ₂ flusso assiale	22
- CO ₂ flusso trasverso	22
6. Caratteristiche di un laser per applicazioni di saldatura	
- potenza	23
- modo	26
- polarizzazione	29
7. Variabili di processo nella saldatura laser	
- focalizzazione	30
- posizione focale	33
- gas di copertura	34
- velocità di lavoro	37
8. Condizioni di accostamento dei materiali necessarie per la saldatura laser	
- giunto di sovrapposizione	38
- giunto di testa	39
- giunti a flangia	40
- giunti a T	40
9. Preparazione dei giunti necessaria per la saldatura laser	40
10. Saldatura con filo d'apporto	41

11. Componenti principali di un sistema di saldatura laser	44
12. Campi di utilizzo della saldatura laser	47
13. Considerazioni economiche	50
14. Confronto con le tecniche convenzionali	
- brasatura	53
- saldatura ad arco	53
- saldatura a resistenza	54
- saldatura a fascio elettronico	54
15. Sicurezza	
- pericoli derivanti dalla luce laser stessa	55
- pericoli elettrici	57
- pericoli da fumi e vapori	57
- precauzioni per la protezione dal fascio laser	57
16. Glossario	59

1. - Generalità

La saldatura con fasci laser risulta essere un processo ad elevata densità di energia (un fascio proveniente da una sorgente laser a CO₂, con potenza di 6 kW, focalizzato con una focale da 200 mm, dà luogo ad una densità di potenza di 10 MW/cm²) e quindi, a differenza delle altre tecniche convenzionali di saldatura ad arco, non risulta essere dipendente solamente dalle condizioni di conduzione del calore del materiale, ma è regolato anche dalle caratteristiche del fascio laser impiegato. Utilizzando un fascio laser di potenza si possono infatti avere due modi diversi di saldatura, che esaminiamo nel seguito.

Saldatura per conduzione

La luce laser focalizzata sulla superficie metallica, viene da questa in parte riflessa ed in parte assorbita. La luce assorbita riscalda la superficie nel punto di incidenza ed il calore generato penetra nel materiale per diffusione termica. Se sufficiente potenza viene trasferita nel materiale (con densità di potenza, in genere, inferiori a 5x10⁵ W/cm²), questa fa fondere la zona circostante al punto di interazione formando il cordone di saldatura che si presenta così di forma emisferica, con rapporto di forma (definito come profondità del cordone/larghezza media del cordone stesso) di circa 1.

Si parla in questo caso di saldatura per conduzione, poichè è la conducibilità termica del materiale a regolare interamente le caratteristiche del processo. Nella figura seguente si ha una tipica macrografia di una saldatura ottenuta in queste condizioni.



*Macrografia di un giunto
ottenuto per saldatura
laser per conduzione*

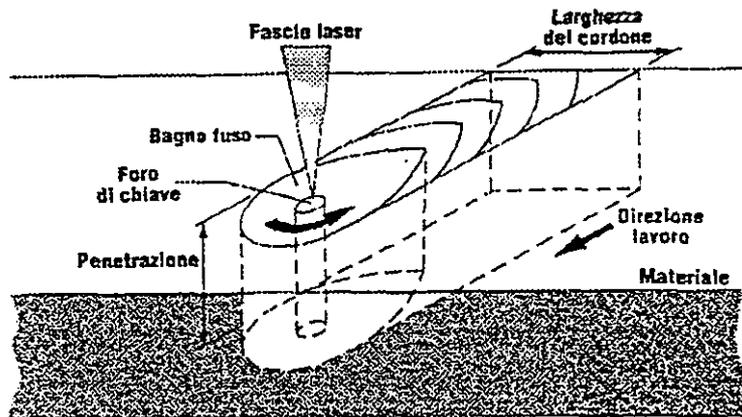
Si tratta di un processo di saldatura non molto efficiente, limitato per evidenti problemi di trasferimento di calore, a spessori saldabili di 1 - 1.5 mm, ottenibile con sorgenti laser a CO₂ in funzionamento continuo con potenze fino a circa 1 kW e con laser Nd:YAG pulsate con energie per impulso fino a circa 8 J.

Si deve considerare che quando viene utilizzato questo tipo di saldatura è necessario evitare di vaporizzare, anche parzialmente, la superficie del pezzo, per non indebolire meccanicamente il giunto per perdita di materiale.

Saldatura per penetrazione profonda

Con potenze di sorgenti laser a CO₂ superiori a circa 1.2 kW, o con energie per impulso superiori a circa 10 J per quanto riguarda quelle Nd:YAG pulsate, è possibile sfruttare una diversa tecnica di saldatura che fa emergere il laser rispetto alle altre tecniche di lavorazione (con l'esclusione del fascio elettronico che presenta un comportamento analogo a quello del laser). In questo caso si possono infatti ottenere saldature di penetrazione con rapporti di forma che possono raggiungere valori di 4 - 4.5, impiegando le attuali sorgenti laser di utilizzo

industriale. In questo caso il fascio laser fa raggiungere nel punto di focalizzazione una elevata densità di potenza (maggiore di 10^6 W/cm²) con cui è possibile far evaporare una parte del materiale nella zona di incidenza, formandovi una cavità attraverso la quale l'energia del fascio laser riesce a penetrare profondamente nel materiale stesso. Questa cavità, piena di vapori metallici ionizzati (gli elettroni del vapore metallico vengono infatti accelerati dalla radiazione elettromagnetica del fascio e questo fa aumentare il numero di ioni e quindi l'assorbimento), diventa così un effettivo assorbitore locale della potenza laser, entro un volumetto cilindrico detto "keyhole" (foro della chiave), come indicato schematicamente nella figura seguente. Si deve notare che all'interno di questa cavità vengono raggiunte temperature fino a circa 20.000 °C.



Schematizzazione della formazione del "keyhole" nella saldatura laser per penetrazione profonda

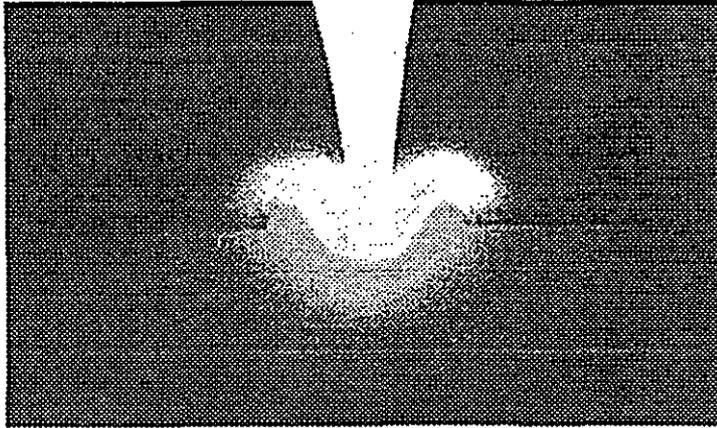
In questo modo, il calore viene trasferito direttamente dalle pareti del foro verso l'esterno, piuttosto che dalla superficie verso il basso, formando così una regione fusa attorno al vapore. Il keyhole risulta quindi circondato da una pozza di materiale fuso che, a causa della sua tensione superficiale, tende a richiudere il keyhole stesso. A questa forza si oppone la pressione del vapore continuamente prodotto nella cavità. Esiste perciò un flusso continuo di materiale che fuoriesce dal keyhole sotto forma di vapore; si avrà allora un comportamento stazionario solo ponendo il fascio laser ed il pezzo da saldare in moto relativo, ad una velocità sufficientemente elevata, tale da permettere che si produca sufficiente vapore per il sostentamento del keyhole stesso. La fusione avviene quindi nella parte anteriore del keyhole, con il materiale fuso che fluisce attorno ad esso, andando a raccogliersi nella parte posteriore dove, risolidificandosi, costituisce il cordone di saldatura. Nella figura seguente si ha una macrografia tipica della saldatura per penetrazione profonda ottenibile con il fascio laser.



Macrografia tipica di una saldatura laser ottenuta per penetrazione profonda

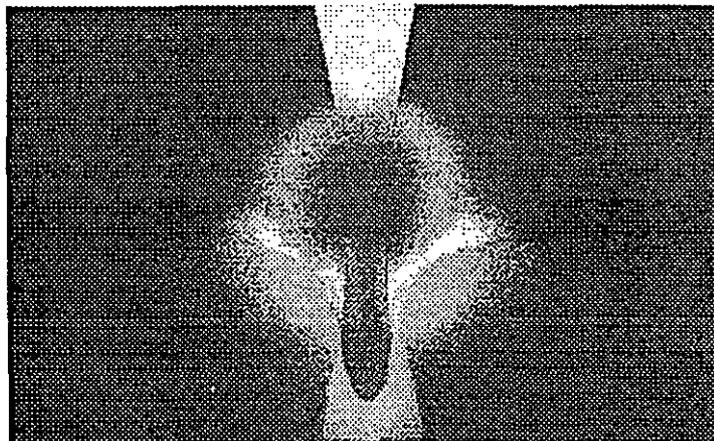
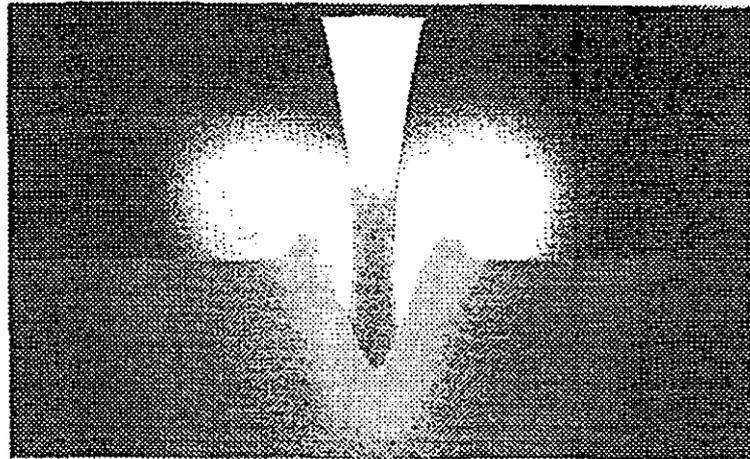
In queste condizioni di lavoro occorre distinguere tra il vapore ionizzato (o plasma) che si trova all'interno del keyhole e quello che si stacca dal pezzo al di sopra della superficie. Il

plasma all'interno della cavità contribuisce al sostentamento del keyhole e costituisce il mezzo per il trasferimento di energia dal fascio laser al materiale. Il plasma che si innalza dalla superficie invece assorbe e sfocalizza il fascio laser provocando una riduzione della penetrazione, mentre il reirraggiamento isotropo dell'energia laser provoca un allargamento della zona fusa in prossimità della superficie (tipica in questo caso la forma della "testa di chiodo" del cordone di saldatura, come indicato nella figura precedente). Nelle figure seguenti si ha una schematizzazione di quanto detto.



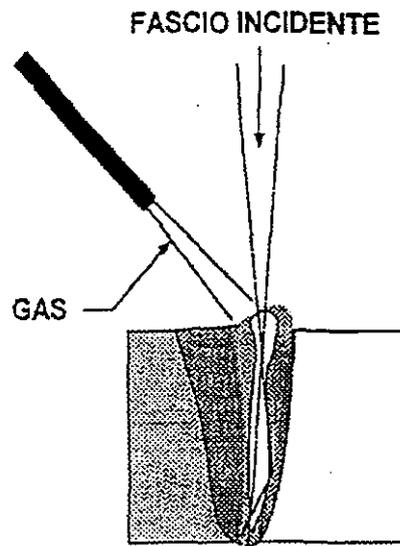
Processo di formazione della saldatura in penetrazione profonda: vaporizzazione della superficie

inizio del "foro guida"

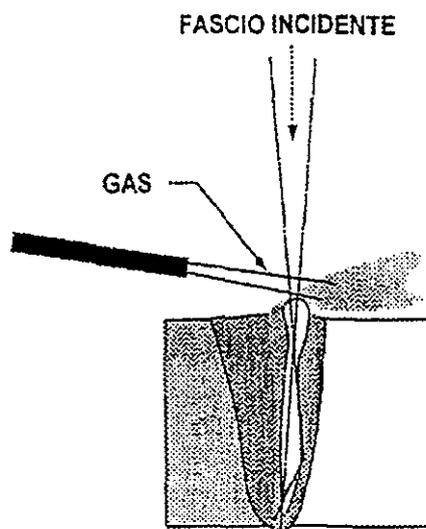


assorbimento dell'energia laser da parte del plasma

Per ovviare a questi effetti negativi viene utilizzato un flusso di gas inerte (normalmente elio oppure argon) diretto verso il keyhole (vedasi la figura seguente). L'entità di questo flusso è tale da rimuovere il plasma in eccesso, senza peraltro turbare la stabilità della zona fusa e del keyhole. Questo importante argomento verrà più ampiamente discusso nel seguito.



Controllo del plasma con un getto di gas inerte di assistenza



Dispersione del plasma con un getto di gas inerte di assistenza

Si deve notare che questo plasma impiega un tempo relativamente lungo per formarsi, mentre, in assenza di una sorgente esterna di energia, si dissolve in tempi brevi. Da questo si può derivare che la saldatura laser in condizioni impulsive genera una minore quantità di plasma, rispetto a quella eseguita con fasci continui. Per effetto inoltre della dipendenza dalla lunghezza d'onda dei processi di assorbimento della luce laser, le sorgenti laser Nd:YAG (operanti a $1.06 \mu\text{m}$) sono meno sensibili a questo effetto rispetto a quanto accade per quelle a CO_2 , operanti a $10.6 \mu\text{m}$. Nella maggior parte dei casi questo flusso si aggiunge a quello proveniente coassialmente al fascio laser che ha funzione principalmente di proteggere i componenti ottici di focalizzazione.

Tutto questo riguarda naturalmente la saldatura laser autogena, in cui il fascio laser fonde direttamente i lembi dei materiali da congiungere. Si deve notare che in casi particolari è possibile impiegare del materiale d'apporto. Questa possibilità verrà ampiamente trattata nel seguito.

2. - Vantaggi della saldatura laser

In generale la saldatura laser permette di ottenere maggiori velocità e migliori qualità del giunto rispetto a quanto è possibile ottenere con le tecniche convenzionali. Si deve considerare che, per quanto detto, quando nel seguito parleremo di "saldatura" si dovrà intendere "saldatura per penetrazione profonda".

Entrando in maggiori dettagli, possiamo dire che i vantaggi presentati dalla saldatura laser sono:

elevati rapporti di forma

- nelle saldature ad una sola passata, la profondità di penetrazione è unicamente limitata dalla potenza laser disponibile. Questo può eliminare la preparazione del cianfrino e l'aggiunta di materiale d'apporto,

minimo apporto termico

- si hanno per questo ridotte distorsioni termiche dei materiali da congiungere, cosa che consente la saldatura di parti meccaniche lavorate, senza richiedere successive operazioni di finitura,
- si possono eseguire saldature vicino ad elementi sensibili al calore (ad es. circuiti elettronici, o giunti vetro-metallo),
- riduzione di danni metallurgici, come ingrossamenti del grano o estese zone termicamente alterate,

elevate caratteristiche del giunto

- integrità: il processo di rimescolamento del materiale fuso, dovuto alla presenza del keyhole, permette la fuoriuscita dei gas, dando in generale una saldatura con porosità minime,
- resistenza: l'elevata temperatura all'interno del keyhole favorisce la diminuzione del contenuto di impurezze (che hanno una temperatura di vaporizzazione generalmente inferiore a quella del materiale base) e per questo il cordone di saldatura presenta, in genere, una resistenza a trazione almeno uguale a quella del materiale base,
- la saldatura può essere posizionata esattamente in corrispondenza al giunto, migliorando così le caratteristiche di resistenza a fatica ed a trazione rispetto a quanto ottenibile con le usuali saldature d'angolo,

facile accessibilità del giunto

- il fascio laser garantisce la possibilità di operare con una grande tipologia di giunti diversi, nei quali è richiesta la accessibilità da un solo lato,
- riduzione nella corrispondente larghezza delle flange,
- lavorazione non a contatto, per cui non si ha nessuna contaminazione del cordone da parte degli elettrodi;
- il processo avviene in atmosfera ambiente;

elevate velocità di processo e flessibilità di lavoro

- la produttività è, in genere, superiore a quanto ottenibile con i metodi tradizionali,

vengono accresciute le opportunità di progettazione dei componenti

- il pezzo finale può essere realizzato saldando tra loro componenti semplici che possono avere impieghi diversi, ottenibili con operazioni automatiche e veloci (stampaggio, tranciatura, lavorazioni su esterni, ecc).

Infine, occorre citare un'altra caratteristica significativa della saldatura laser: l'efficienza di fusione. Questa grandezza è definita come il rapporto tra l'energia necessaria per la fusione del

materiale e quella totale ceduta al pezzo. Nel processo a penetrazione profonda, all'elevata efficienza di assorbimento si unisce anche una sufficientemente grande efficienza di fusione. Questo compensa in gran parte il ridotto rendimento di conversione dell'energia elettrica di eccitazione in energia ottica del fascio laser (10% per le sorgenti a CO₂, 3-5% per quelle Nd:YAG), elemento che spesso è considerato una controindicazione per l'utilizzo del laser (specialmente se di alta potenza) in saldatura.

Si deve considerare che, come ogni processo tecnologico, anche la saldatura laser ha degli svantaggi (accostamento dei lembi, allineamento fascio laser-giunto, costi di investimento, ecc.), ma di questi parleremo diffusamente nel seguito.

3. - Materiali che sono convenientemente saldabili con il laser

Il comportamento alla saldatura laser di metalli e leghe risulta essere controllato dalle proprietà fisiche e metallurgiche dei materiali stessi. Poiché queste caratteristiche risultano essere sostanzialmente indipendenti dal metodo di saldatura, tutti i materiali che sono convenientemente saldabili in fase liquida con le tecniche convenzionali sono anche saldabili con il laser. Alcune volte i metalli possono essere saldati in fase solida, senza fusione (ad esempio nei processi a frizione o pressione a freddo); il laser può essere utilizzato come sorgente di calore per eseguire queste saldature, ma non sono note applicazioni industriali di questo tipo.

La tabella seguente fornisce una guida generale per i numerosi materiali metallici di interesse industriale che possono essere saldati con il laser (la tabella in oggetto si riferisce a processi con laser Nd:YAG).

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Ta	E																		
Mo	E	E																	
Cr	E	M	E																
Co	C	M	C	B															
Ti	C	E	E	B	C														
Be	M	M	M	M	C	M													
Fe	C	C	B	E	E	C	C												
Pt	B	C	B	B	E	C	M	B											
Ni	C	B	C	B	E	C	C	B	E										
Pd	C	B	B	B	E	C	C	B	E	E									
Cu	M	M	M	M	C	C	C	C	E	E	E								
Au	nt	nt	M	C	M	C	C	C	E	E	E	E							
Ag	M	M	M	M	M	C	M	M	C	M	E	C	E						
Mg	M	nt	M	M	M	M	M	M	M	M	M	C	C	C					
Al	M	M	M	M	C	C	M	C	M	C	M	C	C	C	C				
Zn	M	nt	M	M	C	M	M	C	M	C	C	B	C	B	M	C			
Cd	nt	nt	nt	M	M	M	nt	M	C	C	C	M	C	B	E	M	M		
Pb	M	nt	M	M	M	M	nt	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
Sn	M	M	M	M	M	M	M	M	C	M	C	M	C	C	M	M	M	M	C

E : Eccellente; B : Buono; C : Corretto; M : Medio; nt : Non trattato

Più in dettaglio, per quanto riguarda la saldatura laser, i parametri più significativi dei materiali sono:

- a. **riflettività superficiale:** è la sola proprietà del materiale che riguarda unicamente la saldatura laser, ma non risulta così importante come può sembrare inizialmente. Quando un fascio laser incide su una superficie metallica fredda, circa il 90-98 % della sua energia viene riflessa. L'energia assorbita porta a fusione la piccola zona in cui il fascio laser è stato focalizzato, facendo aumentare rapidamente l'assorbimento e permettendo così la formazione del keyhole. Pertanto è solo nello stadio iniziale del processo che la riflettività della superficie metallica gioca un ruolo importante. Si deve inoltre notare che questo parametro diminuisce con l'aumentare della densità di potenza laser incidente per cui, al di sopra di una intensità critica, esso si riduce bruscamente a valori molto bassi, consentendo un forte accoppiamento dell'energia laser con il pezzo nel processo di penetrazione profonda;
- b. **diffusività termica:** per la saldatura laser i materiali debbono presentare un basso valore della diffusività termica, poichè in questo caso l'energia laser viene confinata in un volume ristretto, permettendo così la creazione del keyhole;
- c. **temperatura di fusione:** questo parametro ha solo una limitata influenza sul processo di saldatura, poichè la temperatura di equilibrio che si raggiunge nel keyhole è considerevolmente più elevata della temperatura di fusione di qualsiasi materiale;
- d. **temperatura di vaporizzazione:** metalli con basso punto di vaporizzazione presentano scarse applicabilità alla saldatura laser, non permettendo una corretta formazione del keyhole e causando effetti di porosità (esempio tipico è lo zinco);
- e. **viscosità del fuso:** l'elevata viscosità del materiale fuso tende a fare intrappolare delle bolle durante la fase di solidificazione, causando così delle porosità alla base del cordone di saldatura;
- f. **rivestimento superficiale:** generalmente causa dei problemi, introducendo delle porosità nel metallo fuso.

Si deve notare a questo proposito che materiali dissimili sono normalmente saldabili in maniera efficiente purché abbiano punti di fusione vicini e caratteristiche termomeccaniche confrontabili.

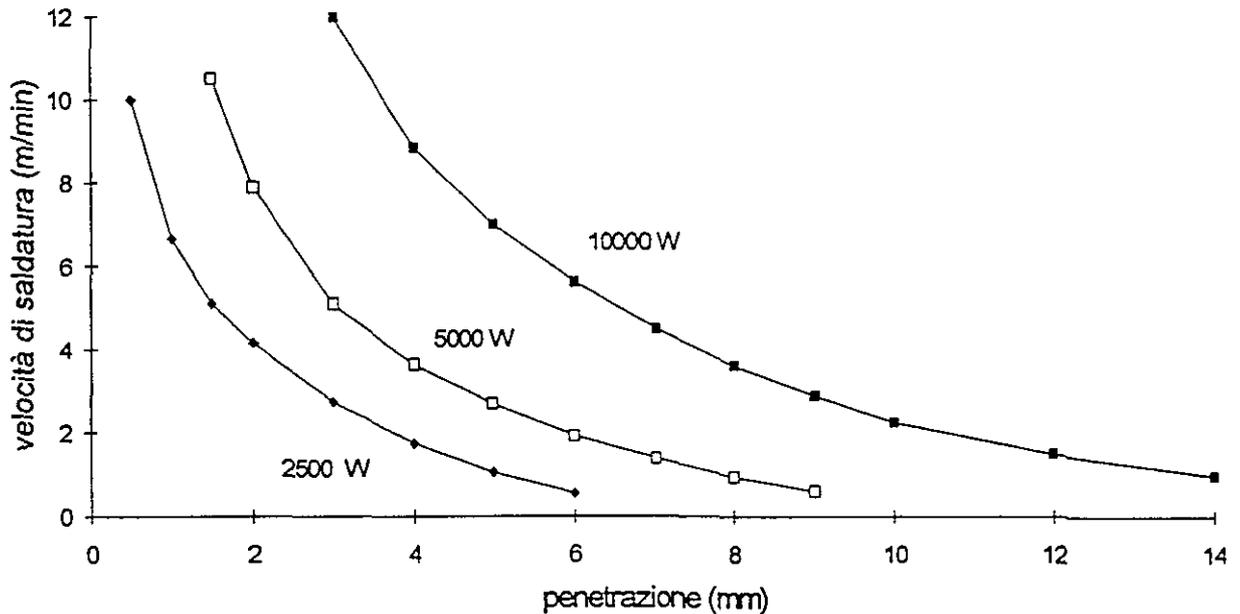
Si deve altresì notare che i materiali plastici sono generalmente non saldabili per effetto del loro basso punto di vaporizzazione e dell'insorgere di reazioni chimiche ad alte temperature.

Di seguito vengono presi in considerazione alcuni tra i principali materiali metallici interessanti per la saldatura laser e su questi saranno fatte ulteriori considerazioni, a precisazione di quanto detto. Si deve tenere presente che i dati di velocità che sono riportati nelle figure seguenti per i diversi materiali considerati sono puramente indicativi in quanto i risultati di saldatura praticamente ottenibili sono fortemente dipendenti da molteplici parametri, come le caratteristiche del giunto desiderate, il sistema di lavoro impiegato, le condizioni di focalizzazione utilizzate, lo stato della superficie del materiale, ecc. Gli effetti di queste variabili di processo saranno considerati nel seguito.

Acciai al carbonio

Sono in generale ben saldabili con il fascio laser, ma possono presentare molteplici varianti di tipo metallurgico. Dati indicativi sulle velocità ottenibili con sorgenti laser a CO₂, sono riportati nella figura seguente.

Acciaio al carbonio



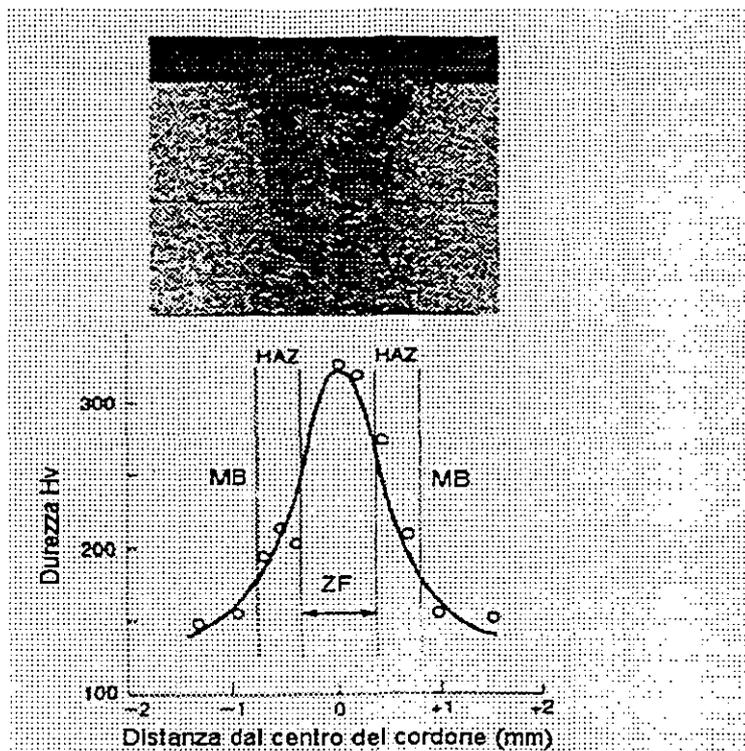
I valori di velocità per le sorgenti da 2.5 kW e 5 kW sono stati ottenuti utilizzando argon come gas di assistenza, mentre per quelli relativi alla sorgente da 10 kW è stato impiegato elio.

Entriamo ora in maggiori dettagli esaminando le influenze dei principali elementi costituenti questa grande classe di materiali.

L'ossigeno è un elemento che è utilizzato nel processo di produzione dell'acciaio; se rimane nel materiale a livelli superiori a 100 ppm, può provocare porosità o cricature nella saldatura, specialmente nel caso di piccoli spessori. Per questo è meglio utilizzare un acciaio calmato (con un limitato contenuto di ossigeno), che presenta inoltre una composizione più uniforme che consente l'ottenimento di giunti con migliori qualità.

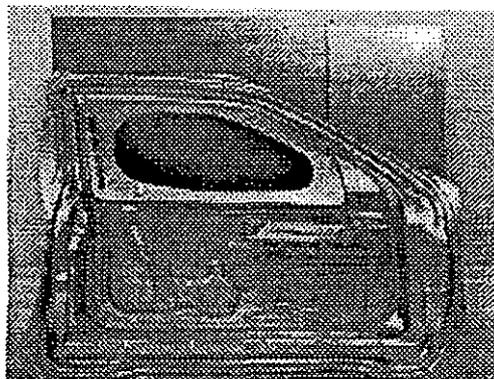
Buona parte di questi acciai (specialmente quelli laminati a freddo) contiene inoltre zolfo o fosforo in quantità sufficienti per provocare cricature a caldo. Per questo, se si devono ottenere giunti con ridotte caratteristiche meccaniche, in cui i materiali possono essere forzati assieme durante il processo di saldatura, possono essere tollerate concentrazioni di zolfo e fosforo fino a circa 0.04% senza creare problemi di cricature; quando invece il giunto deve presentare buone caratteristiche meccaniche, questo livello deve risultare normalmente inferiore a 0.02 %.

La limitazione più importante è però costituita dal contenuto di carbonio in quanto il suo valore determina le caratteristiche di resistenza del giunto. Gli acciai a basso tenore di carbonio (percentuali inferiori a 0.1%) producono, in generale (cioè senza che altri elementi indesiderati siano presenti), buone saldature. Il cordone si presenta molto stretto e con durezza accettabili, perché il rapido raffreddamento produce limitati effetti di indurimento. Quando, ad esempio, due lamiere da 0.7 mm ciascuna, con contenuto di carbonio di 0.04 %, vengono saldate a 6.5 m/min, usando una sorgente a CO₂ da 5 kW, si ottiene un giunto al cui centro la durezza del materiale sale a circa il doppio del valore registrato nel materiale base. Queste condizioni però permettono ancora di eseguire delle imbutiture profonde del pezzo saldato, poichè questi cordoni stretti e duri presentano, sorprendentemente, una buona duttilità, migliore di quanto ottenibile con le tecniche convenzionali.



*Sezione di una saldatura per sovrapposizione di due lamiera e suo traverso di durezza
MB = materiale base
ZF = zona fusa
HAZ = zona alterata termicamente*

Questo permette, ad esempio, di eseguire la saldatura della lamiera piana per uso automobilistico prima della successiva imbutitura, come evidenziato nella figura seguente riportante un pannello interno di una portiera ottenuto con la saldatura laser di due lamiera di diverso spessore.



Esempio di lamiera dissimili imbutite dopo la saldatura laser (interno di una portiera d'auto)

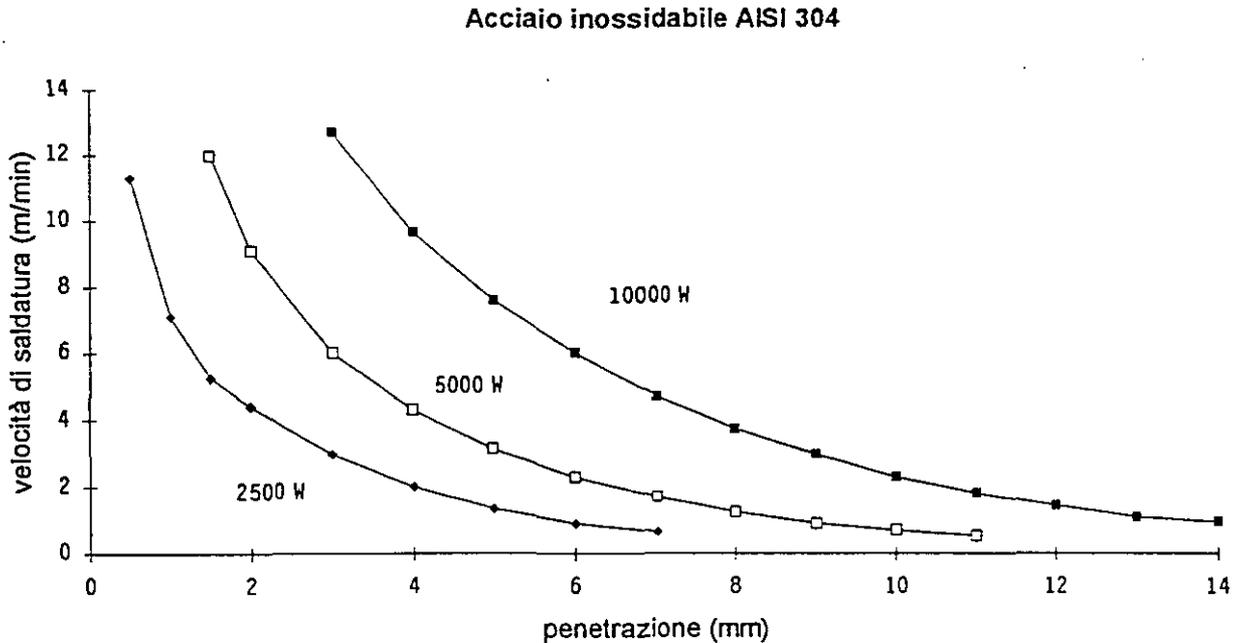
In acciai in cui il contenuto di carbonio supera lo 0.1%, il rapido raffreddamento produce una microstruttura martensitica dura e fragile, che causa una riduzione della duttilità del giunto. In queste strutture martensitiche troppo dure si possono allora verificare delle cricature a freddo sia nel cordone che nella zona termicamente alterata. Per livelli di carbonio superiori a 0.3%, per evitare questi effetti sono necessarie delle operazioni di pre e post-riscaldamento. Si deve però tenere presente che, per una data velocità di raffreddamento, non è solo la percentuale di carbonio a determinare la durezza del giunto, ma anche altri elementi (come ad esempio il contenuto di cromo, manganese, molibdeno, vanadio e rame) vi concorrono. In maniera empirica, si può dire che qualora il seguente fattore CE

$$CE = C\% + Mn\%/6 + (Cr\% + Mo\% + Va\%)/5 \times (Ni\% + Cu\%)/15$$

superi il valore 0.40, debbono essere effettuati dei preriscaldamenti del materiale al fine di ridurre la possibile presenza di difetti nel giunto.

Acciai inossidabili

Hanno normalmente diffusività termica, riflettività e livelli di impurezze inferiori rispetto agli acciai al carbonio, per cui presentano le migliori caratteristiche di saldabilità con il fascio laser. In particolare, gli acciai austenitici (serie 300) presentano buone condizioni di saldabilità, solo l'elevato contenuto di nichel in alcuni di essi può creare delle porosità per la viscosità del materiale fuso. Dati indicativi sulle velocità di saldatura ottenibili con sorgenti laser a CO₂ per l'AISI 304 sono presentati nella figura seguente.



I valori di velocità per le sorgenti da 2.5 kW e 5 kW sono stati ottenuti utilizzando argon come gas di assistenza, mentre per quelli relativi alla sorgente da 10 kW è stato impiegato elio. Indicazioni sulle prestazioni ottenibili con le sorgenti Nd:YAG sono riportate nel successivo paragrafo 5.

La saldatura con le tecniche convenzionali di questi acciai (caratterizzate da lunghi tempi di raffreddamento) causa generalmente fenomeni di sensibilizzazione (ingrossamento del grano, precipitazione dei carburi a bordo dei grani) che riducono la resistenza a corrosione del giunto saldato. Il rapido ciclo termico della saldatura laser minimizza questi effetti, permettendo così di avere buone caratteristiche di resistenza a corrosione (anche a caldo) del giunto. Attenzione deve essere anche data alla saldatura parziale di testa di spessori elevati, a causa di possibili cricature in solidificazione che sono causate dalla diversa resistenza della parte non saldata alle tensioni che si realizzano nel cordone durante il raffreddamento.

Gli acciai ferritici (serie 400) non posseggono le buone caratteristiche di saldabilità degli austenitici. Si deve però notare che, mentre la saldatura di fusione tradizionale dà luogo a giunti caratterizzati da una notevole riduzione della tenacità e soggetti alla corrosione intergranulare, la saldatura laser permette di ridurre notevolmente questi effetti poiché il limitato apporto termico riduce notevolmente il livello dell'ingrossamento del grano nella zona alterata termicamente. Questa può avere però una durezza più elevata per effetto della rapida velocità di raffreddamento.

Negli acciai martensitici (serie 400) l'elevato contenuto di carbonio può causare dei fenomeni di cricatura nel cordone di saldatura. Se la percentuale di carbonio supera il valore di 0.1%, è normalmente necessario utilizzare un filo di apporto austenitico per migliorare la tenacità del

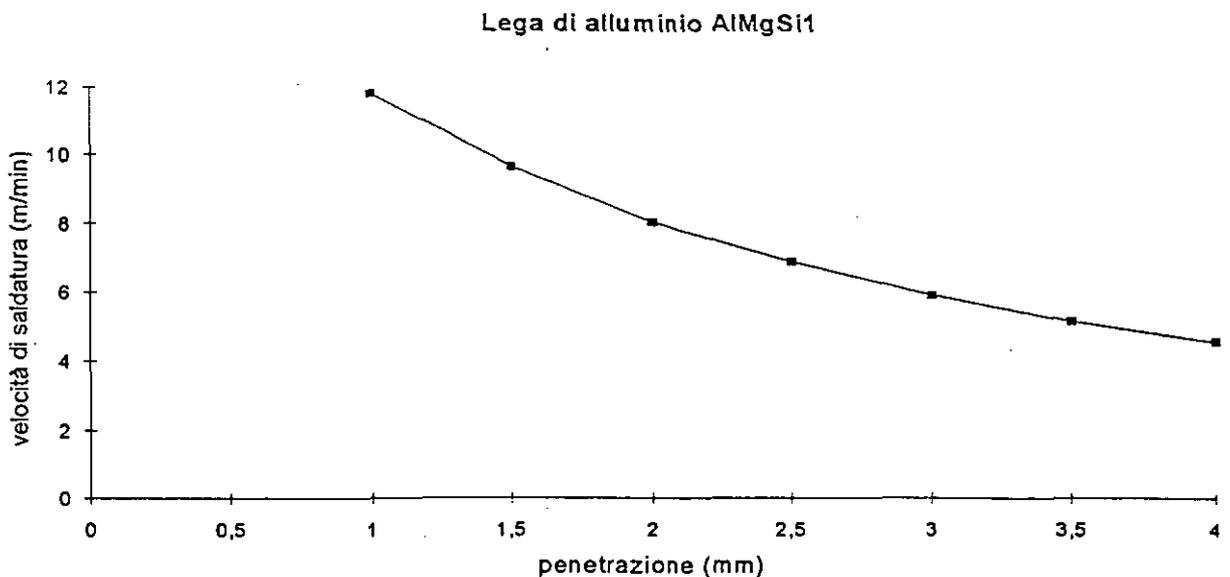
giunto ed evitare microcriccature. Questo però non riduce i problemi di fragilità nella zona termicamente alterata. Problemi di cricatura e di fragilità possono essere ridotti da un preriscaldamento del giunto a 650 - 750 °C. E' indubbio però che queste operazioni possono complicare il processo in maniera tale da sconsigliare qualche volta l'utilizzo del laser.

Ghisa

La ghisa nodulare può essere generalmente saldata utilizzando nichel come filo d'apporto, per evitare cricature nel cordone.

Alluminio e sue leghe

Gli elevati valori della diffusività termica e della riflettività superficiale dell'alluminio non rende questo materiale un buon candidato per la saldatura laser. Le leghe, inoltre, contengono in generale materiali a basso punto di vaporizzazione (magnesio e zinco) che creano porosità. Discreti risultati di saldabilità, prevalentemente con sorgenti laser in funzionamento impulsato, sono possibili per l'alluminio puro (e per la serie 1000) e per le leghe con assenza di magnesio. A livello indicativo nella figura seguente sono riportati dati di saldatura, in assenza di cricatura a caldo, per la lega AlMgSi1, ottenuti con sorgenti laser a CO₂ alla potenza di 4 kW. Il gas di assistenza utilizzato è azoto, con un flusso di 40 l/min. Si deve notare che per le leghe di alluminio le prestazioni ottenibili risultano essere fortemente dipendenti dal tipo di gas di assistenza utilizzato: l'impiego di elio riduce le velocità di lavoro di oltre il 50% poichè, tra l'altro, non permette di sfruttare la reazione esotermica tra alluminio ed azoto.



In molti casi, per evitare cricature, vengono utilizzate leghe speciali (come, ad esempio, AlMg4.5MnZr) come materiale d'apporto.

Per i materiali della serie 6000 molte volte la lega Al-Si viene utilizzata per produrre saldature ermetiche in contenitori di dispositivi elettronici e sensori di pressione.

Rame e sue leghe

Avendo caratteristiche peggiori dell'alluminio, questi materiali per poter essere saldati con il fascio laser generalmente richiedono un rivestimento superficiale per aumentarne l'assorbimento e questo fa ridurre sensibilmente l'utilizzo di questa tecnica di saldatura. Si deve però notare che microsaldature a punti o continue possono essere effettuate su spessori sottili utilizzando sorgenti Nd:YAG con impulsi laser molto corti ad elevata energia. Si deve

considerare inoltre che, a causa del suo elevato contenuto di zinco, l'ottone risulta essere difficilmente saldabile con il laser.

Nichel e sue leghe

La loro bassa diffusività termica favorisce un buon accoppiamento con l'energia laser, all'aumentare del contenuto di nichel si ha però l'insorgenza di porosità, specialmente per elevate penetrazioni. Come per l'acciaio, si deve però dire che le leghe nichel saldabili con le tecniche convenzionali, sono anche saldabili con il laser, con una minore presenza di segregazioni e quindi con migliori caratteristiche di resistenza alle sollecitazioni meccaniche e chimiche. Per evitare l'insorgenza di cricature, grande attenzione deve essere dedicata alla pulizia delle superfici da saldare.

Titanio e sue leghe

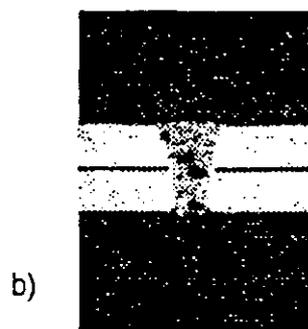
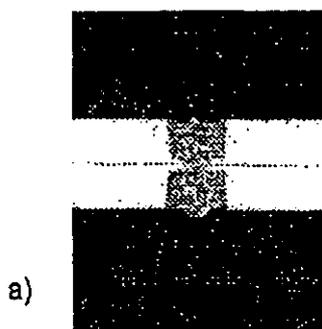
Questi materiali presentano, in generale, buone caratteristiche di saldabilità dando cordoni di saldatura con strutture molto fini, ma grande attenzione deve essere data alla pulizia delle superfici prima della saldatura ed inoltre, essendo fortemente sensibili all'ossidazione, devono essere saldati in atmosfera inerte.

4. - Effetti dei trattamenti superficiali sulla saldabilità degli acciai

Rivestimenti superficiali

Molti rivestimenti superficiali vengono diffusamente utilizzati per aumentare la resistenza a corrosione degli acciai oppure per darne semplicemente un migliore aspetto estetico. Sfortunatamente però questi rivestimenti causano dei problemi per la saldatura laser, specialmente nel caso di materiali in sovrapposizione.

Il rivestimento più diffuso è quello derivante dalla zincatura della lamiera sottile per usi vari (prevalente è quello automobilistico). In questo caso il basso punto di fusione dello zinco facilita la sua vaporizzazione prima che il keyhole sia formato, e questo causa la conseguente formazione di bolle che possono poi rimanere facilmente intrappolate nel giunto, causando indesiderate porosità. Questo effetto è strettamente legato allo spessore globale del rivestimento. Per spessori complessivi della zincatura inferiori a $15 \mu\text{m}$, su lamiere di almeno 0.8 mm , lo zinco può normalmente fuoriuscire dal giunto, così che la porosità derivante è in generale molto ridotta. Per effetto del maggiore volume del materiale vaporizzato, questo non può avvenire in caso di spessori maggiori. Nelle figure seguenti viene mostrato l'effetto dello spessore dello strato di zinco, sulla saldatura in sovrapposizione di due lamiere zincate, con spessore di 0.7 mm .



*Effetti dello spessore dello strato di zinco nella saldatura laser per sovrapposizione di due lamiere di acciaio aventi spessore di 0.7 mm .
a) spessore Zn $8 \mu\text{m}$
b) spessore Zn $12 \mu\text{m}$*

Qualche beneficio può essere ottenuto in questo caso dall'utilizzo di sorgenti YAG con le quali impulsi molto corti (ad esempio, 0.5 ms a 200 Hz) possono limitare l'area in cui lo zinco viene

vaporizzato e questo riduce il volume del gas prodotto. Da questo punto di vista le nuove sorgenti YAG multi chilowatt possono dare dei buoni risultati, potendo generare impulsi corti aventi energia sufficiente per effettuare la saldatura in penetrazione profonda. In generale però è sempre necessario permettere la fuoriuscita dello zinco vaporizzato. Una soluzione per questo è mantenere un leggero scostamento tra le lamiere in sovrapposizione da saldare (tipicamente circa 0.1 mm); si deve notare che è difficile però mantenere queste condizioni nella reale situazione produttiva, specialmente quando si devono saldare componenti non piani. Si deve in ogni caso notare che lo zinco, vaporizzando, contribuisce a creare il denso plasma sopra il punto di lavoro, e questo fa diminuire la potenza laser che raggiunge la superficie. Per eliminare questo, bisogna aumentare la velocità di lavoro e la densità di potenza laser, rispetto a quanto è necessario per il materiale grezzo.

La nichelatura non è molto diffusa nei componenti da saldare, ma vi sono delle applicazioni nel settore dell'industria elettronica in cui i contenitori dei componenti sono normalmente realizzati con una lega ferro-nichel-cobalto con la superficie nichelata (esempio: il kovar). Per nichelature eseguite elettroliticamente non si hanno in generale delle controindicazioni alla saldatura laser. Quelle eseguite invece senza elettrodi, a causa della presenza di fosforo, si hanno delle cricature nel cordone, che possono estendersi anche nella zona termicamente alterata, qualora la saldatura venga eseguita con potenze continue. Questi effetti risultano notevolmente ridotti utilizzando il funzionamento impulsato e buoni risultati vengono ottenuti con le sorgenti Nd:YAG operando con ridotte durate degli impulsi.

L'alluminatura di lamiera metallica è diffusa nell'industria degli elettrodomestici. Per effetto della elevata temperatura di vaporizzazione dell'alluminio (circa 1000 °C superiore a quella dell'acciaio) questo rivestimento non crea in genere problemi nella saldatura laser, sia nella configurazione di testa che in quella in sovrapposizione.

Trattamenti superficiali

I trattamenti superficiali vengono ampiamente utilizzati nei componenti in acciaio per indurire la loro superficie e rimanere tenaci nel cuore. Cementazione e nitrurazione sono i metodi più diffusamente impiegati per eseguire questi trattamenti ed in entrambi i casi si hanno dei seri problemi nella saldatura laser. L'ideale sarebbe quindi eseguire questi trattamenti dopo la saldatura, onde evitare problemi di cricature.

5. - Tipo di sorgente da utilizzare nella saldatura laser

Solo pochi tipi di sorgenti laser posseggono l'energia sufficiente per fondere i materiali metallici. Queste sorgenti attualmente sono:

- laser a CO₂, con potenza massima di utilizzo industriale di 10-15 kW;
- laser Nd:YAG, con potenze medie di utilizzo industriale fino a circa 1000 W; si hanno anche sorgenti in funzionamento continuo con potenze fino a circa 2 kW;
- laser Nd:vetro, con potenze massime di utilizzo industriale di circa 40 W medi.

Le sorgenti neodimio hanno in generale il vantaggio che la loro lunghezza d'onda di emissione (1.06 μm) presenta un maggiore assorbimento da parte delle superfici metalliche e che il fascio

generato può essere trasmesso con fibre ottiche sino al punto di lavoro. Lo svantaggio principale di queste sorgenti è dato in generale dalle scarse caratteristiche del fascio emesso che non consente il raggiungimento di elevate densità di potenza (fanno eccezione le sorgenti nella configurazione slab che però trovano utilizzo prevalentemente nelle applicazioni di foratura).

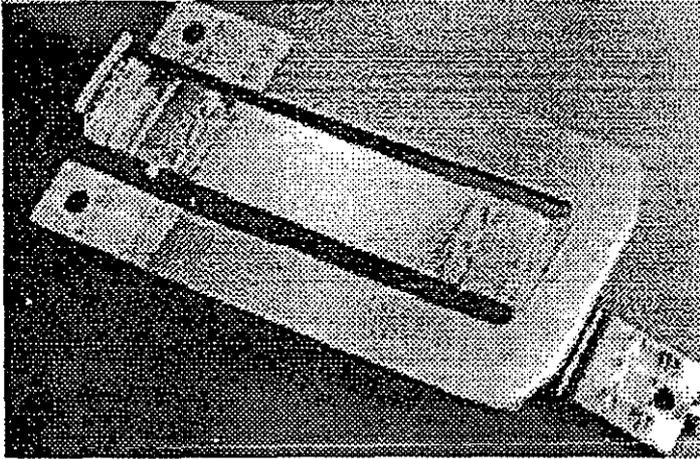
Nelle tabelle seguenti si hanno valori indicativi della riflettività a temperatura ambiente di alcuni materiali metallici alle lunghezze d'onda delle sorgenti Nd:YAG e CO₂, ed una semplice comparazione applicativa tra queste stesse sorgenti laser.

Materiale	Coefficiente di riflessione	
	Nd:YAG $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$	CO ₂ $\lambda = 10.06 \mu\text{m}$
alluminio	96 %	98 %
argento	96 %	99 %
ferro	70 %	96 %
molibdeno	60 %	97 %
nichel	74 %	97 %
oro	97 %	98 %
rame	95 %	98 %
tantalio	85 %	95 %
titanio	58 %	92 %
tungsteno	60 %	97 %
zinco	84 %	97 %

Confronto tra laser Nd:YAG da 1 kW con trasmissione in fibra e laser a CO ₂		
Elementi	Considerazioni	Conseguenze
Risonatore	<ul style="list-style-type: none"> • sistema a molte barrette • bassa vita media delle lampade • scarsa efficienza 	<ul style="list-style-type: none"> • alti costi di investimento • alti costi di funzionamento
Trasmissione fascio in fibra	<ul style="list-style-type: none"> • maneggiamento flessibile del fascio • suddivisione temporale del fascio • suddivisione in energia del fascio 	<ul style="list-style-type: none"> • minori investimenti per lavorazioni 3D • nessuna necessità di riallineamento • operatività con molte stazioni • bassi costi di manutenzione
Testa di focalizzazione	<ul style="list-style-type: none"> • lenti in vetro 	<ul style="list-style-type: none"> • minor costo delle lenti
Processo	<ul style="list-style-type: none"> • ad elevato assorbimento (sui materiali metallici) • trascurabile formazione di plasma • molteplici variabili 	<ul style="list-style-type: none"> • alta efficienza di lavoro sui materiali metallici • difficile ottimizzazione
Stazione di lavoro	<ul style="list-style-type: none"> • problemi di sicurezza 	<ul style="list-style-type: none"> • lavorazioni in ambiente chiuso

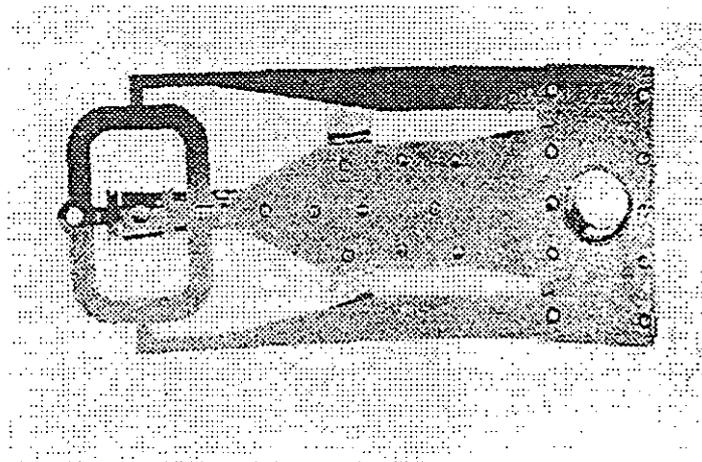
Analizziamo più in dettaglio queste diverse sorgenti (nel capitolo successivo seguiranno alcune considerazioni sugli effetti della potenza di questi laser sulla forma del cordone di saldatura).

Date le limitate frequenze di ripetizione (circa 10 Hz), le sorgenti Nd:vetro sono generalmente confinate ad applicazioni di saldatura a punti di elementi di piccole dimensioni, con penetrazioni normalmente inferiori a 0.5 mm; la breve durata degli impulsi ottenibili con queste sorgenti (generalmente inferiori a 10 ms) assicura un minimo apporto termico e questo consente applicazioni interessanti su parti sensibili al calore. Nelle figure seguenti si hanno alcuni esempi applicativi.



Saldatura a punti con laser Nd:vetro di strain gauge; fascio a forma rettangolare, 1 saldatura/s

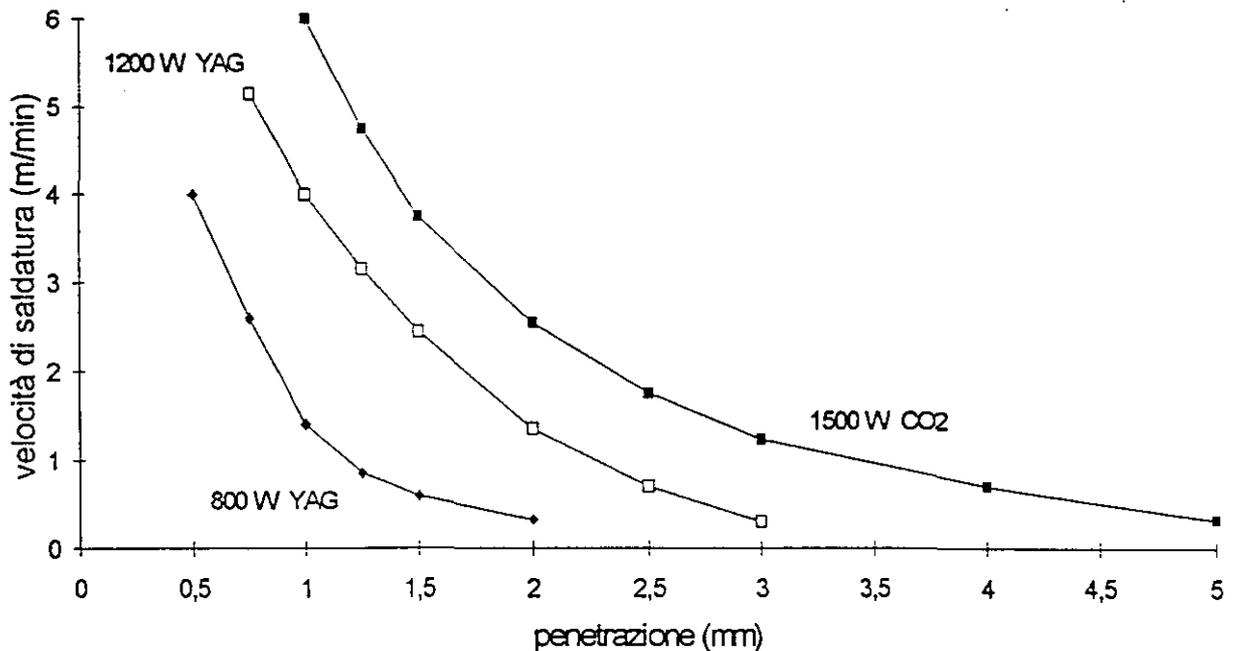
Saldature multiple a punti con laser Nd:vetro su elemento flessibile di stampante elettrica



Le sorgenti Nd:YAG in funzionamento continuo sono attualmente disponibili commercialmente fino a potenze di circa 2.4 kW. Hanno fasci con limitate capacità di focalizzazione per cui devono essere utilizzati sistemi ottici complessi per indirizzare nella fibra ottica il fascio generato e, analogamente, sistemi simili multilente devono essere impiegati per focalizzarlo sulla superficie di lavoro. La principale limitazione di queste sorgenti è quindi data dalla ridotta distanza di lavoro che può sussistere tra lente e la superficie del pezzo (tipicamente 30-60 mm), elemento che causa delle difficoltà nelle applicazioni industriali per la ridotta profondità di campo e per la difficoltà nel posizionare i dispositivi di adduzione del gas di assistenza.. Normalmente, fino a potenze continue di circa 800 W, è possibile ottenere solamente saldature regolate dalla conduzione. Con potenze superiori a 1 kW, la saldatura di penetrazione accentua l'accoppiamento del fascio e si può così aumentare sia la penetrazione che la velocità di lavoro. La forma del cordone di saldatura generato risulta essere molto simile a quella ottenibile con le sorgenti laser a CO₂: stretta e profonda, con una testa di chiodo più pronunciata. Normalmente la larghezza del cordone è maggiore a causa della maggiore

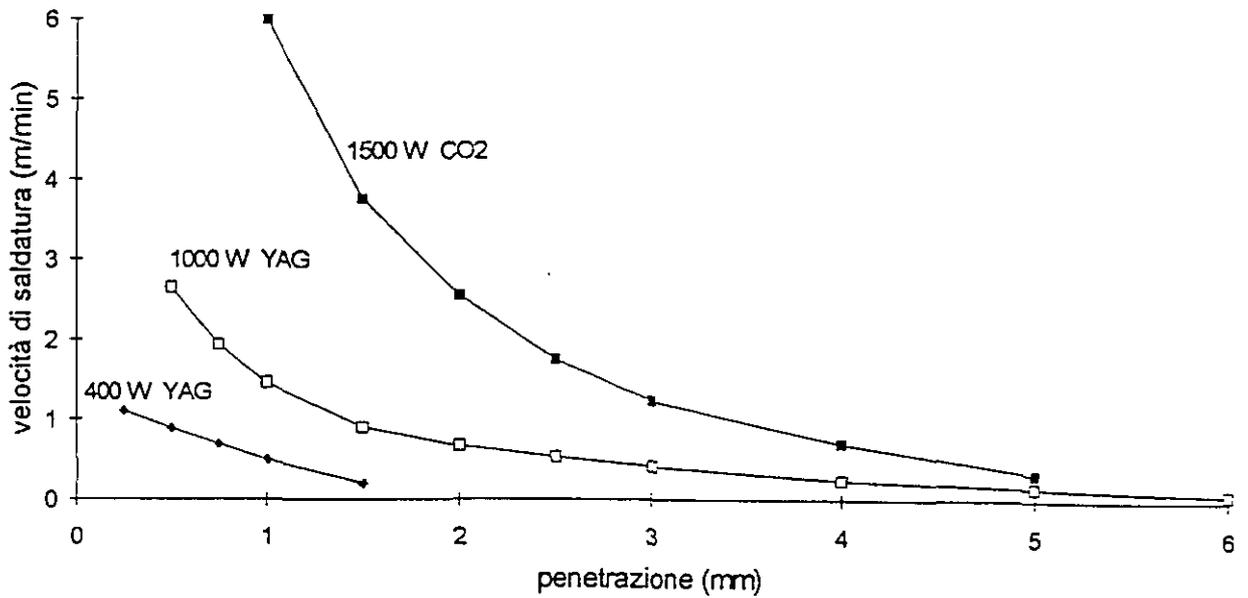
dimensione della macchia focale ottenibile. La massima penetrazione ottenibile con queste sorgenti YAG continue è di circa 3.5 mm; rallentare la velocità di lavoro ha il solo effetto di allargare il cordone senza ottenere un significativo aumento della penetrazione. Nella figura seguente si hanno dati indicativi sulle velocità ottenibili con queste sorgenti per l'acciaio inossidabile AISI 304, con un confronto con quanto ottenibile con un laser a CO₂ alla potenza di 1500 W.

Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG c.w.



Nelle sorgenti Nd:YAG impulsate da una singola barretta di materiale attivo si possono ottenere al massimo circa 500 W con una buona qualità del fascio generato. Potenze medie più elevate possono essere raggiunte utilizzando più cavità, nella configurazione oscillatore-amplificatore, con il vantaggio in questo caso che la buona qualità del fascio dello stadio oscillatore viene preservata dal successivo amplificatore. Commercialmente sono disponibili sorgenti con potenza media fino a circa 1 kW. Queste sorgenti hanno il grande vantaggio rispetto a quelle continue di poter disporre di elevate potenze di picco (per sorgenti con potenza media di 1 kW si possono avere potenze di picco fino a 10 kW, con valori massimi di energia per impulso fino a 100 J), con migliori qualità del fascio, elementi che consentono di poter più facilmente raggiungere la soglia per la penetrazione profonda e di ottenere maggiori penetrazioni. Un altro vantaggio di queste sorgenti impulsate è dato dalla possibilità di adeguare la forma dell'impulso alle diverse condizioni di saldatura. Lo svantaggio più rilevante è invece dato dal fatto che vi sono troppi parametri da variare per ottenere la migliore qualità della saldatura per una data applicazione. Con queste sorgenti si possono avere frequenze di ripetizione fino a 500 Hz e questo consente la formazione di cordoni continui mediante parziale sovrapposizione degli impulsi (ritorneremo su questo importante punto nel capitolo successivo). Nella figura seguente si hanno dati indicativi sulle velocità ottenibili con queste sorgenti per l'acciaio inossidabile AISI 304, con un confronto con quanto ottenibile con un laser a CO₂ alla potenza di 1500 W.

Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG impulsato



Con queste sorgenti l'alta potenza di picco ottenibile con potenze medie ridotte permette penetrazioni fino a circa 2.5 mm negli acciai inossidabili e 1.5 mm nell'alluminio con ridottissimi apporti termici. Queste sorgenti sono perciò ideali per saldare i contenitori dei componenti elettronici sensibili al calore e piccoli pezzi metallici in cui le deformazioni termiche devono essere contenute. Va detto che le velocità di lavoro ottenibili per un dato spessore con le sorgenti impulsive sono inferiori a quanto possibile con quelle continue, ma l'impulsibilità offre maggiori penetrazioni e grande flessibilità di processo.

Se le parti da unire hanno una appropriata metallurgia, allora la saldatura in penetrazione profonda con laser a CO₂ è più veloce rispetto a quanto è possibile con le sorgenti YAG sia continue che impulsive. In generale le sorgenti CO₂ sono più adatte a applicazioni di alti volumi che comprendono la realizzazione di prodotti di consumo e componenti automobilistici. La possibilità di trasportare il fascio YAG in fibra ottica sta ampliando notevolmente il campo di applicazione di queste sorgenti.

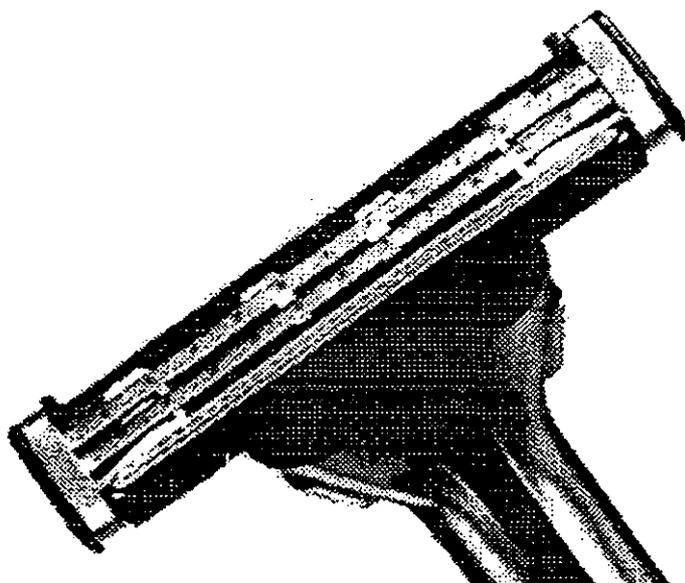
Nelle figure seguenti si hanno degli esempi di applicazione di queste sorgenti YAG impulsive.



*Saldatura di anelli d'oro
con sorgente Nd:YAG
impulsata*



*Saldatura con laser
Nd:YAG impulsata di
contenitori di batterie per
microcircuiti*



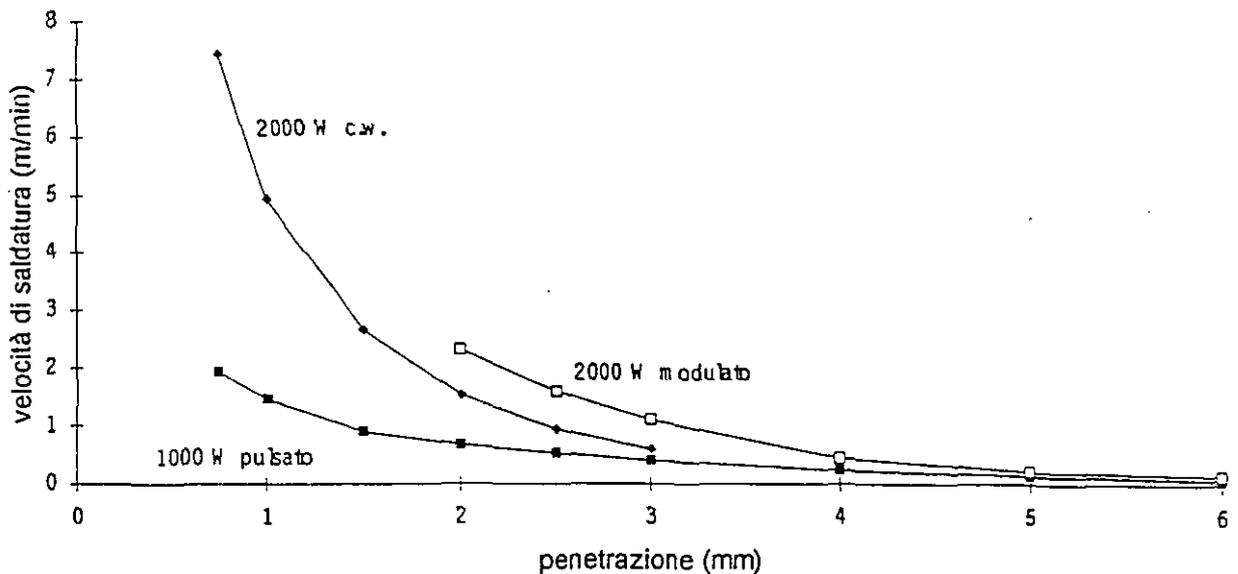
*Le due sottili lame del
rasoio sono unite da 26
saldature a punti eseguite
con laser Nd:YAG
pulsato*

Come si può notare, generalmente si tratta di saldature su componenti di piccole dimensioni. Significativi sono gli esempi relativi alla saldatura di una maglina di catenina d'oro (lega al 75 %) avente lo spessore di 1 mm (l'elevata potenza di picco permette di superare le difficoltà derivanti dall'elevata riflettività del materiale) e quello della saldatura a punti delle lame di un rasoio in cui è stata vincente la possibilità di trasmettere il fascio in fibra (ogni laser permette di avere 60 rasoi/minuto, per un totale di 1560 punti/minuto).

Recentemente sono apparse sul mercato sorgenti Nd:YAG quasi continue, cioè laser che oltre al funzionamento continuo sono in grado di operare in superimpulso, con modulazione sinusoidale o rettangolare (a frequenze comprese tra 100 e 500 Hz), con potenze di picco 2,5 volte il valore continuo. In questo modo una sorgente con emissione continua di 2000 W è in grado di generare anche impulsi con potenza di picco di 5000 W, potendo così operare vantaggiosamente su materiali sottili (lavorando in funzionamento continuo) oppure su materiali altamente riflettenti (come l'alluminio) o rivestiti (come la lamiera zincata) sfruttando la elevata potenza di picco del funzionamento modulato. Nella figura seguente si hanno dei dati

indicativi per l'acciaio inossidabile AISI 304, con un confronto con quanto ottenibile con una sorgente Nd:YAG impulsata con potenza media di 1 kW.

Saldatura AISI 304 con laser Nd:YAG quasi continuo



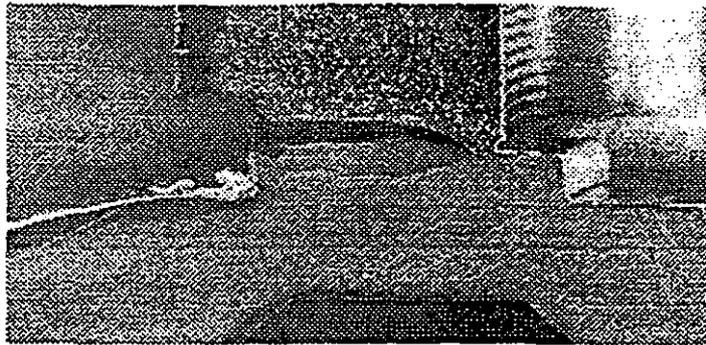
Come noto, le sorgenti laser a CO₂ multi chilowatt si dividono in due categorie, in dipendenza della tecnologia costruttiva: sorgenti a flusso assiale veloce e sorgenti a flusso trasverso.

Con le sorgenti laser a CO₂ a flusso assiale è possibile avere sia il funzionamento impulsato (a frequenze che in alcune sorgenti con eccitazione a radiofrequenza possono andare fino a 100 kHz) che quello continuo; mentre per le seconde si ha solamente il funzionamento continuo. Le sorgenti a flusso assiale generano fasci laser con elevate caratteristiche di focalizzazione (fattore di qualità M² in genere compreso tra 2 e 4, anche per sorgenti di elevata potenza). Questo permette di ottenere, a pari potenza, una maggiore penetrazione, con un keyhole più stabile che riduce gli effetti negativi del plasma che fuoriesce dalla superficie metallica. Il cordone di saldatura si presenta quindi più cuneiforme con una riduzione nell'ampiezza della testa di chiodo. L'elevata focalizzabilità e la derivante ristrettezza del cordone di saldatura fanno però richiedere delle condizioni di accostamento dei lembi da unire severe. Nelle applicazioni industriali queste sorgenti vengono impiegate quando non vi sono problemi di accostamento delle superfici da saldare (permettendo così l'ottenimento di più alte velocità), oppure, per esempio, nelle saldature per sovrapposizione specialmente nel caso in cui la superficie metallica presenti dei rivestimenti (per esempio lo zinco) che possono causare delle porosità. Si deve infine considerare che con questa tipologia di sorgenti sono state raggiunte potenze di uscita paragonabili a quelle ottenibili con le sorgenti a flusso trasverso e, data la loro maggiore diffusione industriale a causa del vasto impiego nelle applicazioni di taglio, questi laser a flusso assiale veloce stanno trovando un diffuso utilizzo anche in saldatura, nonostante il maggiore costo di investimento che riflette la maggiore complessità realizzativa.

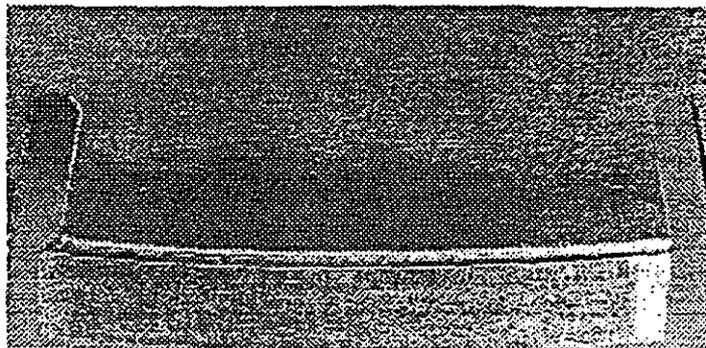
Le sorgenti laser a CO₂ a flusso trasversale presentano invece normalmente fasci laser con distribuzione multimodale, con minori caratteristiche di focalizzabilità. Questo permette di superare, almeno in parte, i problemi di accostamento dei lembi da saldare, dando cordoni di saldatura più ampi, che consentono una migliore resistenza meccanica del giunto. Tutto questo naturalmente a scapito di minori velocità di lavoro. Oltre a questo, le sorgenti a flusso trasverso hanno una maggiore semplicità realizzativa, con conseguenti minori necessità di manutenzione e con un costo di investimento generalmente inferiore a quello dei laser a flusso

assiale di pari potenza.

Nelle figure seguenti si hanno alcuni esempi applicativi.



Saldatura con laser a CO₂ a flusso assiale veloce (2500 W) di un anello di sincronizzazione per autoveicoli: penetrazione 4.75 mm, velocità 1.5 m/min



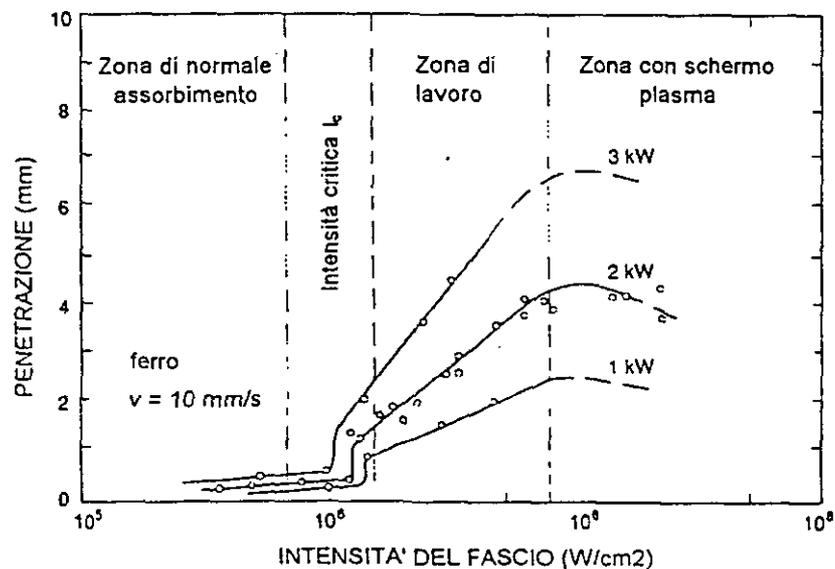
Saldatura con laser a CO₂ a flusso assiale veloce (1500 W) di denti di seghe circolari, con polveri sinterizzate di diamante, per taglio a secco di materiali resistenti: penetrazione 1.8 mm, velocità 0.7 m/min

6. - Caratteristiche di una sorgente per applicazioni di saldatura

Oltre alle già citate possibilità di funzionamento in modo continuo rispetto a quello impulsato, vi sono altre caratteristiche delle sorgenti laser che devono essere considerate nelle applicazioni di saldatura.

Potenza

Poichè la saldatura è un processo di natura termica, la quantità di calore prodotto dall'interazione con la superficie metallica è direttamente legata alla potenza laser.



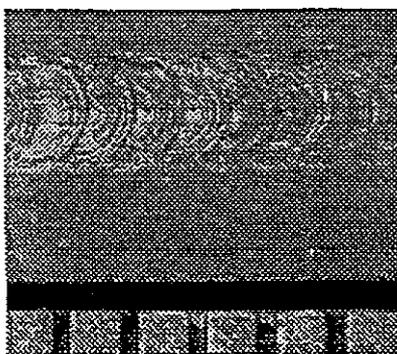
Per generare una saldatura in penetrazione profonda si deve, come detto, superare una soglia critica di circa 10^6 W/cm^2 ; oltre questo valore di soglia per l'innescò del keyhole, la potenza ha un controllo diretto della profondità di penetrazione, come indicato nella figura precedente.

Scendendo in maggiori dettagli, risulta essere relativamente semplice stabilire gli effetti della potenza sulla velocità di lavoro nel caso di saldature continue con laser a CO_2 . In questo caso infatti si ha che, se tutti gli altri parametri rimangono invariati (distribuzione modale, condizioni di focalizzazione, ecc), con un aumento della potenza si possono ottenere maggiori velocità di processo, e questo avviene fino a che si riesce a controllare efficacemente il plasma generato.

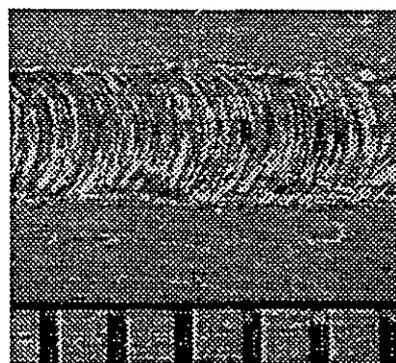
Non è invece possibile fare delle considerazioni analoghe per le sorgenti Nd:YAG (nel seguito parleremo delle sorgenti in funzionamento impulsato che risultano avere una maggiore diffusione), poichè queste operano in diverse condizioni di saldatura in dipendenza della loro potenza media, durata dell'impulso e frequenza di lavoro. Per potenze inferiori a 400 W, le saldature ottenibili fino a spessori di circa 1 mm avvengono per conduzione, con ridotto apporto termico al pezzo. Per velocità inferiori, l'alta energia e l'elevata potenza di picco degli impulsi possono formare la cavità di vapore che fa crescere la penetrazione fino a circa 2 mm. In entrambi i casi il metallo fuso si risolidifica nel tempo che intercorre tra due impulsi e, poichè il fascio deve rifondere del materiale solido riflettente, la penetrazione risulta essere limitata. La saldatura continua è in questo caso ottenibile dalla sovrapposizione parziale degli impulsi e la massima velocità di lavoro ottenibile è data dalla relazione:

$$\text{velocità} = [\text{diametro focale} - (1 - \text{percentuale di sovrapposizione})] \times \text{frequenza}$$

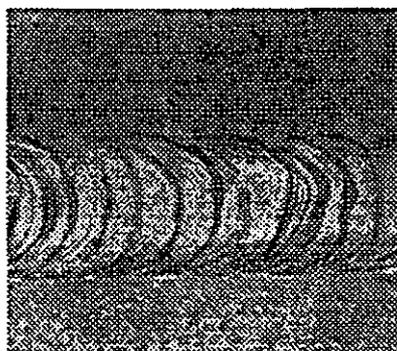
Nella figura seguente si hanno alcuni esempi di cordoni di saldatura ottenuti con percentuali di sovrapposizioni degli impulsi diverse. Il minimo valore di questo parametro per avere dei cordoni consistenti è circa 50%; può aumentare a 70% per saldature ermetiche ed arrivare a 80-90% nel caso in cui si voglia avere un buon aspetto estetico del cordone stesso.



a)



c)

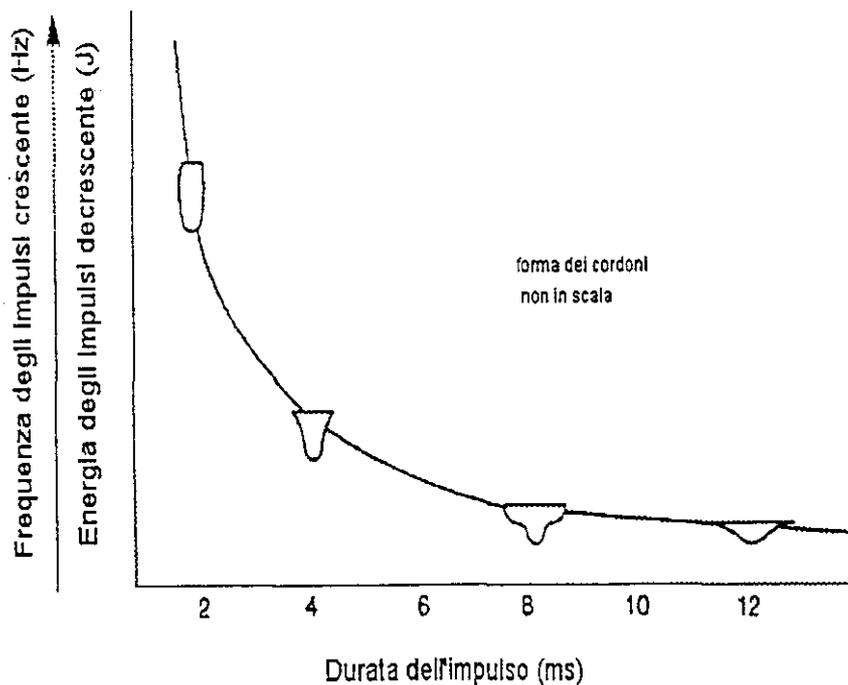


b)

*Cordoni di saldatura
realizzati con laser
Nd:YAG impulsato con
diverse percentuali di
sovrapposizione degli
impulsi: a) 50%, b) 70%,
c) 90%*

Queste considerazioni non consentono di ottenere elevati valori di velocità di lavoro: considerando ad esempio una macchia focale di 0.4 mm e una percentuale di sovrapposizione del 60%, ad una frequenza di ripetizione di 200 Hz corrisponde una velocità di lavoro di 32 mm/s. Si deve tenere presente che il massimo valore della frequenza di ripetizione risulta essere funzione della massima potenza media e dell'energia dell'impulso e diminuisce al crescere di queste.

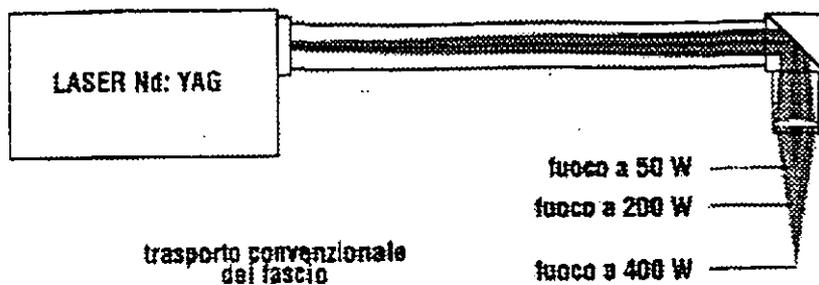
Con sorgenti di potenza media maggiore di 400 W si possono raggiungere le condizioni per avere la penetrazione profonda. Qualora vengano utilizzate larghezze degli impulsi superiori a qualche ms, si ha ancora la risolidificazione del materiale tra due impulsi successivi, per cui la velocità di lavoro dovrà ancora seguire la condizione precedentemente riportata. A potenze medie superiori a 500 W e con impulsi di brevi durate (inferiori a 0.5 ms) non è più possibile ottenere la risolidificazione tra due impulsi successivi, per cui si ha un bagno fuso continuo in cui il calore continua a propagarsi verticalmente. In questo caso la penetrazione aumenta grazie alla rapida formazione della cavità di vapore e ad conseguente maggiore assorbimento di potenza da parte del bagno fuso. Questa condizione inoltre consente un rimescolamento del bagno che produce saldature più larghe con ridotte porosità. La saldatura con bagno fuso continuo presenta un rapporto di forma omogeneo quando la velocità viene ridotta, contrariamente alla saldatura in continuo in cui la riduzione della velocità, una volta raggiunta la massima penetrazione, causa solo l'allargamento del cordone. Il grafico seguente illustra schematicamente la variazione nella forma del cordone di saldatura al variare della durata dell'impulso e della frequenza di ripetizione. Questa figura dà delle indicazioni utili a stabilire la durata dell'impulso necessaria per avere una data forma del cordone.



forma dei cordoni
non in scala

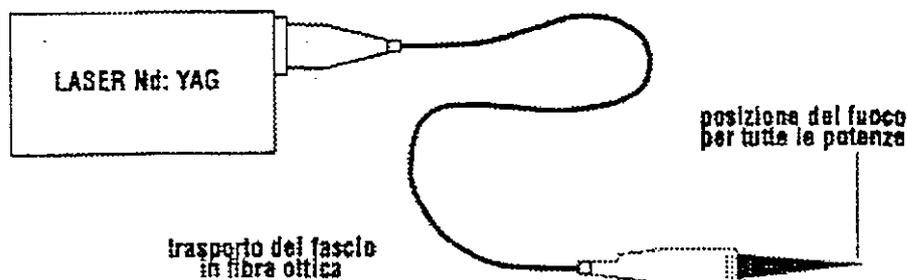
*Variazione schematica
della forma del cordone
di saldatura ottenuto con
una sorgente Nd:YAG
pulsata, al variare della
durata e della frequenza
degli impulsi*

Si deve poi ricordare che, per effetto delle distorsioni termiche indotte nella barretta contenente gli ioni del materiale attivo, nelle sorgenti Nd:YAG all'aumentare della potenza aumenta anche la divergenza del fascio generato, come indicato schematicamente nella figura seguente.



Nel trasporto con specchi del fascio di un laser Nd:YAG, la posizione focale dipende dal livello della potenza media

Questo richiede di aggiustare il telescopio di espansione del fascio, posto entro la sorgente. Solamente le sorgenti YAG nella configurazione slab non risentono di questa limitazione. E' da notare che la trasmissione in fibra del fascio serve a renderne omogenee le caratteristiche e quindi in questo caso non si risente di questi effetti di divergenza.

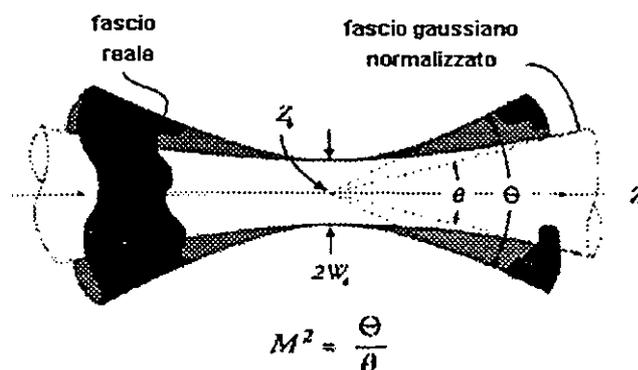


Nel trasporto mediante fibra ottica del fascio di un laser Nd:YAG, la posizione focale rimane invariata al variare della potenza media

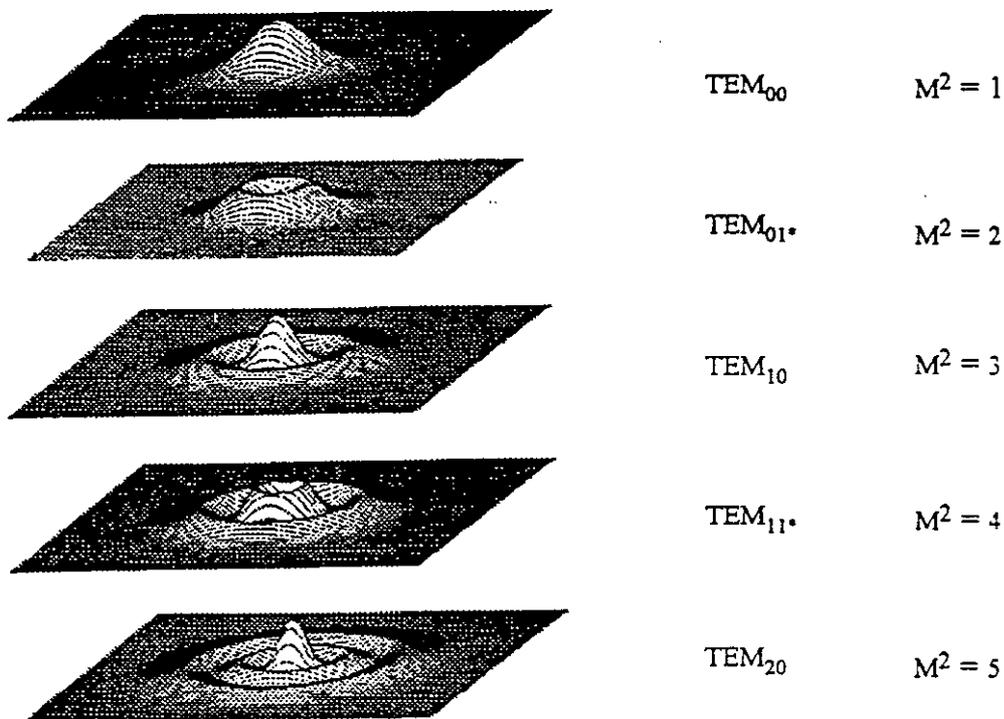
Si deve infine tener presente che, per evitare la formazione di crateri derivanti dall'istantanea applicazione della massima potenza laser, il livello di questa deve poter essere aumentabile con continuità, in maniera automatica, fino al valore massimo (rampa di salita). In maniera analoga, ci deve essere una diminuzione continua della potenza al termine della saldatura, per evitare la formazione di cricche (rampa di discesa).

Modo

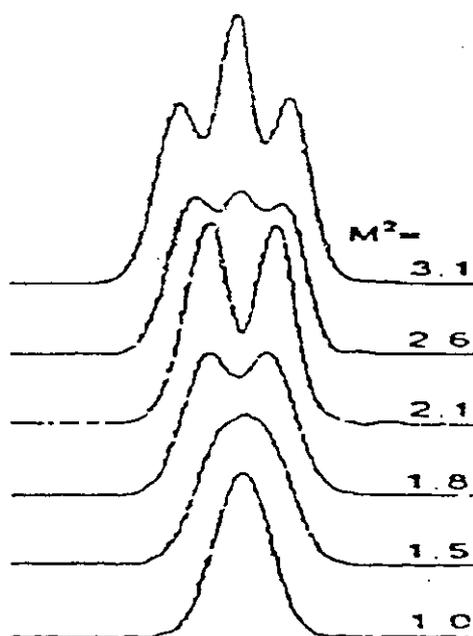
Il modo è una caratteristica della sorgente che rappresenta la distribuzione della intensità lungo una sezione trasversale del fascio laser e che determina le capacità di questo fascio ad essere focalizzato da un determinato gruppo di focalizzazione. Per quantizzare questo importante parametro di una sorgente laser è stato introdotto il parametro M^2 , detto fattore di qualità del fascio. Questo fattore descrive lo scostamento del fascio reale da un puro fascio gaussiano avente la stessa dimensione minima ("beam waist"), ed è dato dal rapporto tra le divergenze di questi due fasci, come indicato nella figura seguente.



Operativamente M^2 è determinato misurando la divergenza di un fascio e la sua dimensione minima e prendendone il prodotto (diviso per il fattore di normalizzazione $4\lambda/\pi$). Questo parametro è ovviamente quindi uguale ad uno per il modo gaussiano TEM_{00} ed aumenta con l'ordine del modo, come indicato schematicamente nella figura seguente per i principali modi di propagazione di fasci laser.

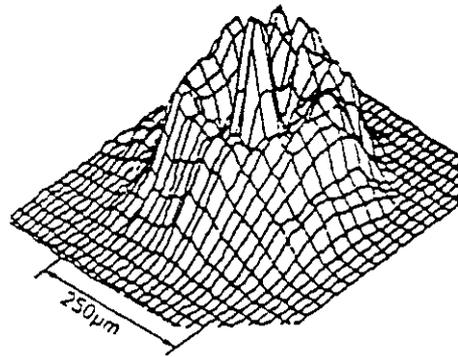


Si deve tener conto che il fascio generato da una sorgente laser risulta essere dato dalla somma pesata di più modi di propagazione, per cui il valore di M^2 si scosterà dai valori esatti visti nella figura precedente, come negli esempi qui sotto rappresentati.

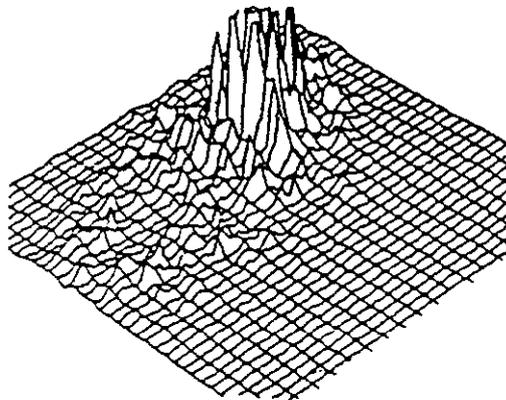


*Profili di intensità
registrati per un laser a
ioni con emissione a 541
nm*

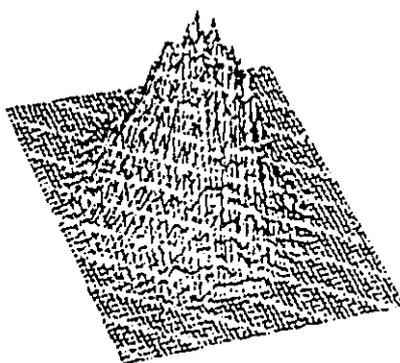
A scopo illustrativo, riportiamo qui alcuni profili di intensità registrati nel punto focale per diverse sorgenti laser; è interessante notare i miglioramenti introdotti nella dimensione della macchia focale del fascio Nd:YAG multimodo dal trasporto in fibra ottica.



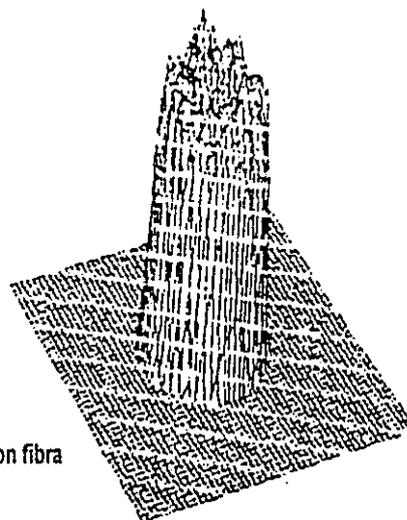
*Profilo di intensità
ottenuto nel punto focale
da una sorgente laser a
CO₂ a flusso assiale
veloce da 2.5 kW
(TEM₁₀)*



*Profilo di intensità
ottenuto nel punto focale
da una sorgente laser a
CO₂ a flusso assiale
veloce da 10 kW con
cavità risonante di tipo
instabile*



senza fibra

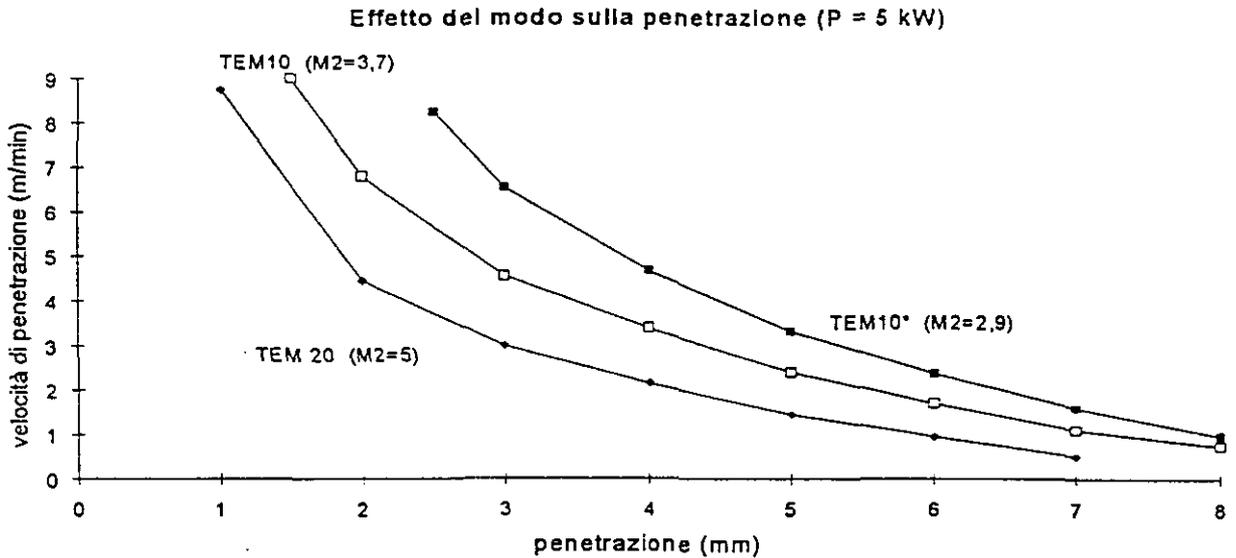


con fibra

*Profili di intensità
ottenuti nel punto focale
da una sorgente laser
Nd:YAG da 400 W medi*

Ricordiamo infine che una determinazione molto indiretta della distribuzione di intensità di un fascio laser (e quindi del suo fattore di qualità M^2) può essere effettuata prendendo una impronta su plexiglass del fascio stesso, in una posizione sufficientemente lontana dalla sorgente. Naturalmente esistono anche sofisticati strumenti che possono caratterizzare con esattezza un fascio laser.

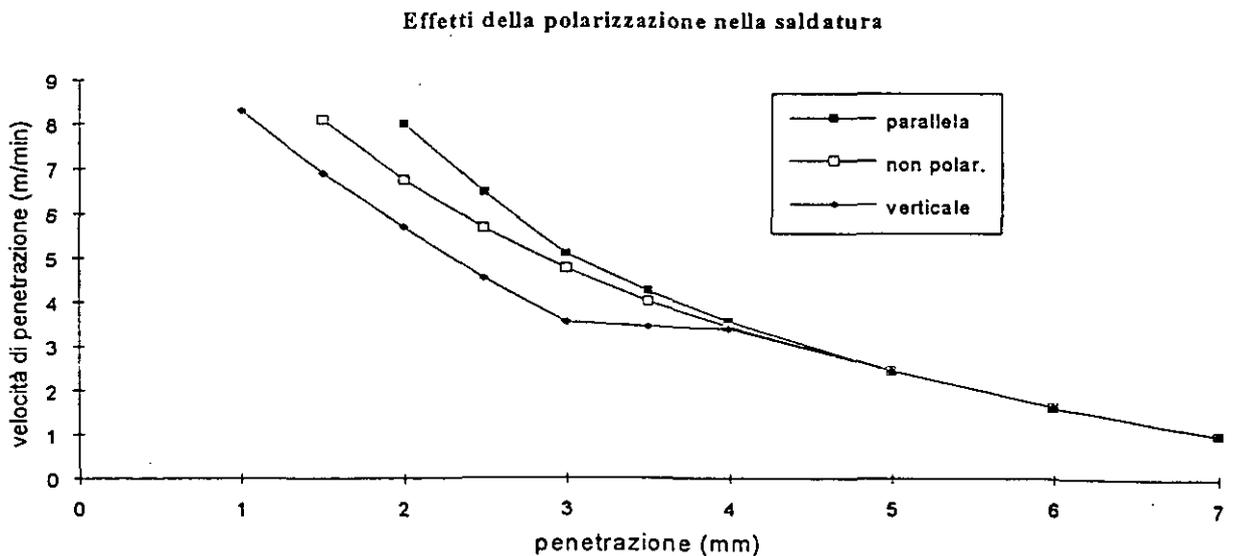
Il parametro M^2 di una sorgente è importante nel processo di saldatura in quanto contribuisce a determinare il livello di potenza al di sopra del quale si ha la penetrazione profonda, ma esercita in questo caso un ruolo minore, ma pur sempre rilevante, di quello che ha nelle applicazioni di taglio. Nella figura seguente riportiamo dati di penetrazione su acciaio al carbonio, alla potenza di 5 kW, ottenuti con fasci di sorgenti laser a CO₂ a flusso assiale veloce con diverso modo di uscita.



Si deve infine notare che i fasci delle sorgenti laser a CO₂ a flusso trasversale (che normalmente vengono generati con cavità risonanti di tipo instabile, dando luogo alla tipica distribuzione di intensità ad anello), nel punto di focalizzazione perdono, come visto nelle figure precedenti, questa forma, dando luogo a buone condizioni di focalizzazione, seppure su macchie di dimensioni maggiori.

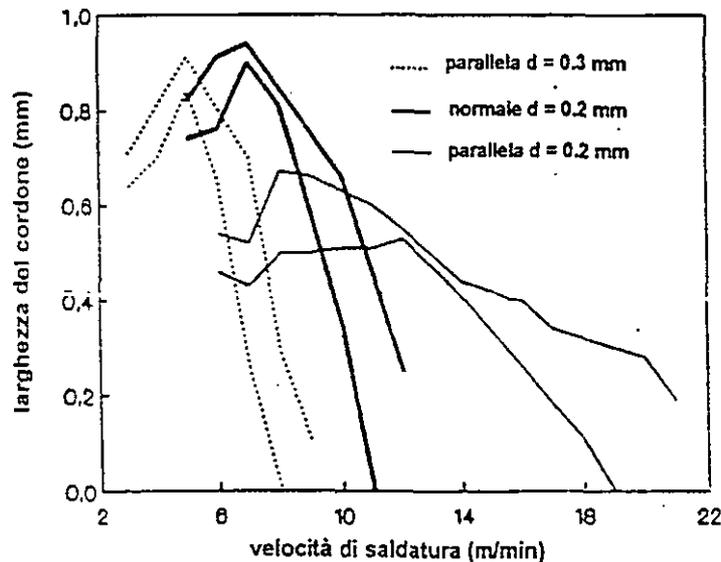
Polarizzazione

Anche nella saldatura laser si risentono gli effetti della polarizzazione del fascio incidente sulla superficie metallica. Recenti risultati sperimentali hanno evidenziato che esiste una soglia oltre la quale l'effetto di accoppiamento della luce laser con il vapore ionizzato presente nel keyhole ha un ruolo inferiore rispetto al normale assorbimento della luce da parte delle pareti della cavità stessa.



Tenendo conto dell'elevato angolo con cui il fascio laser incide sulle pareti del keyhole, è naturale ricavare che, in dipendenza della polarizzazione della luce incidente, oltre questa soglia si possano ottenere risultati di saldatura notevolmente diversi. Per le due direzioni di polarizzazione rispetto al piano di incidenza è come se la saldatura stessa venisse effettuata con fasci laser di uguale potenza, ma con diversa distribuzione modale. Nella figura precedente si ha un esempio per un materiale ferroso.

Questa caratteristica della luce può diventare così una ulteriore variabile di processo molto importante. Da quanto detto si deriva innanzitutto che maggiori velocità di saldatura possono essere ottenute (unitamente alla minima larghezza del cordone di saldatura) con un fascio laser polarizzato linearmente lungo la direzione di lavoro, rispetto a quanto ottenibile con la polarizzazione circolare (vi sono per questo dei dispositivi a specchi che permettono di orientare con continuità la polarizzazione in accordo alla direzione di lavoro). Un ulteriore vantaggio derivante dall'utilizzo della polarizzazione lineare del fascio laser consiste nel controllo flessibile della larghezza del cordone di saldatura. Nella figura seguente i valori di questo importante parametro, a cui risulta essere legata la resistenza del giunto, sono riportati per due diverse condizioni della macchia focale e per stati di polarizzazione diversi, nel caso di saldatura per sovrapposizione di lamiere di acciaio dolce, aventi spessore complessivo di 2mm, ad una potenza di 3.6 kW.



Invece di aumentare la larghezza del cordone aumentando le dimensioni della macchia focale, si può ottenere lo stesso effetto ruotando di 90° il vettore polarizzazione. In questo modo possono essere ottenute le condizioni richieste, ad una velocità di lavoro superiore.

7. - Variabili di processo nella saldatura laser

Oltre alle proprietà del fascio viste in precedenza, molte altre sono le variabili di processo da cui dipende la qualità della saldatura; esaminiamo ora gli effetti del sistema laser.

Focalizzazione

La lunghezza focale del dispositivo di focalizzazione del fascio determina, unitamente alla distribuzione modale del fascio laser vista in precedenza, la dimensione d della macchia focale e quindi il valore della densità di potenza che si è visto essere il parametro determinante per l'innesco del keyhole necessario per avere la penetrazione profonda. I parametri che determinano questo diametro d sono: la lunghezza d'onda λ di emissione, il diametro D del fascio sull'ottica di focalizzazione, la lunghezza focale F del gruppo di

focalizzazione ed il fattore di qualità M^2 del fascio (vengono così trascurati gli effetti di aberrazione del sistema ottico). La relazione è:

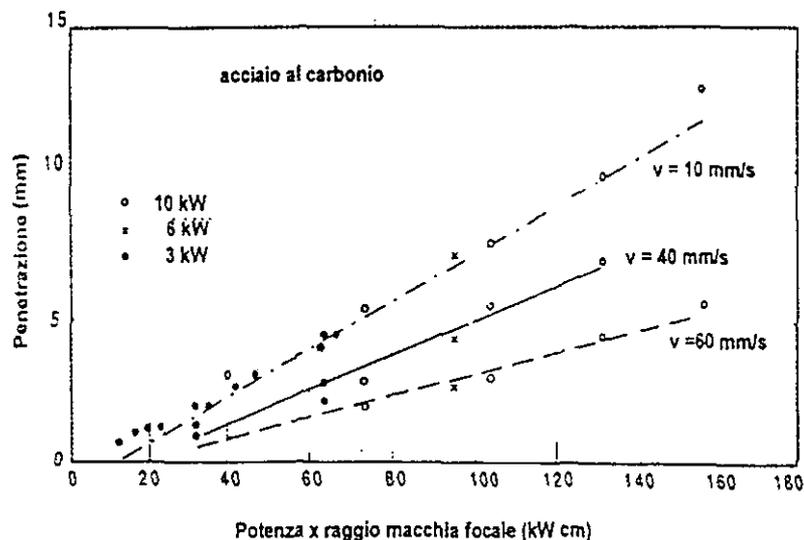
$$d = (4/\pi) \lambda M^2 (F/D)$$

usualmente il numero $F/D = f$ è chiamato semplicemente "numero f".

Un altro elemento importante delle condizioni di focalizzazione è la profondità di campo L che definisce l'escursione verticale per cui la dimensione della macchia non varia più del 5%. Nelle condizioni precedentemente definite, L è data da:

$$L = (8/\pi^2) \lambda M^2 (F/D)^2$$

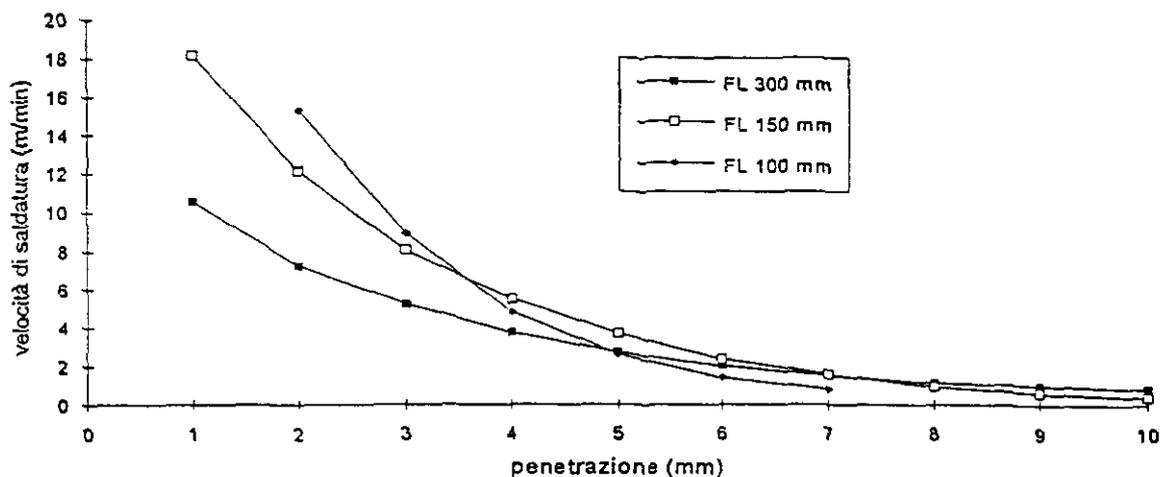
Prima di affrontare la questione relativa alla scelta dell'elemento di focalizzazione che meglio può soddisfare le richieste del dato processo di saldatura, è bene spendere qualche parola sul parametro d . Si è infatti visto che, per ogni data velocità, la profondità di penetrazione è dipendente sostanzialmente dal solo prodotto della densità di potenza I per la dimensione della macchia focale (indipendentemente dalla potenza o dalla tipologia della sorgente impiegata), come evidenziato nella figura seguente.



Tenendo conto che il valore della macchia focale ottenibile per ogni data sorgente laser è ormai un parametro facilmente misurabile con i moderni strumenti che determinano il profilo di un fascio, si evidenzia che, in base ai valori richiesti di penetrazione e velocità, da questa relazione si può scegliere la sorgente laser che meglio risponde alle esigenze in base a considerazioni di produttività e costo.

In linea di principio dovrebbero essere utilizzati elementi di focalizzazione (lenti o specchi) con lunghezza focale la più corta possibile, per favorire l'ottenimento di elevate densità di potenza, anche con potenze relativamente basse. In pratica questo non è possibile poiché si avrebbe una profondità di campo estremamente ridotta e quindi si dovrebbe mantenere costante con grande accuratezza la distanza del gruppo di focalizzazione dalla superficie del pezzo ed in ogni caso la vita degli elementi ottici sarebbe enormemente limitata data la vicinanza con il metallo fuso (calore, spruzzi, vapori, ec). L'esperienza con le sorgenti laser a CO_2 ha indicato che valori del numero f compresi tra 6 e 9 danno le migliori prestazioni, almeno per potenze fino a 6 kW. Come si può notare nel grafico seguente (relativo agli effetti della lunghezza di focalizzazione nella saldatura di acciaio dolce con una sorgente laser da 5 kW), focali corte sono più adatte alla saldatura di piccoli spessori, mentre, come questi aumentano, occorre impiegare focali più lunghe.

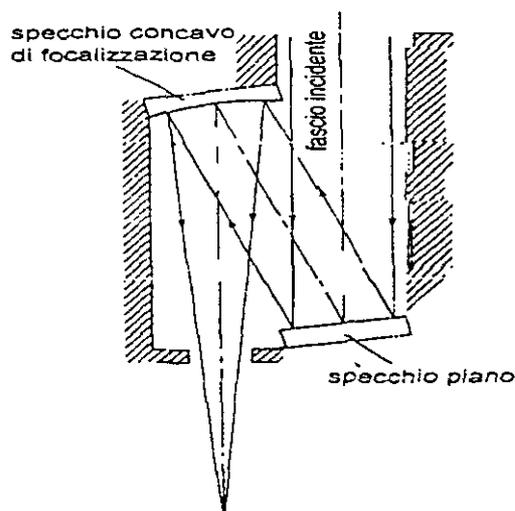
Influenza della lunghezza focale



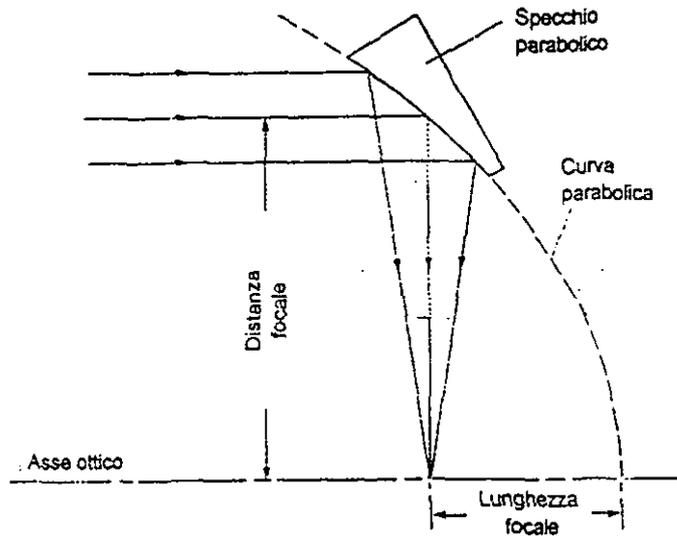
Si è visto invece che valori di f tra 4 e 6 costituiscono una buona scelta per le saldature con laser Nd:YAG.

Come elemento di focalizzazione per le sorgenti YAG vengono utilizzate semplici, e poco costose, lenti in vetro (BK7) o fluoruro di calcio. Tenendo conto della distanza relativamente ridotta esistente tra la lente e la superficie del pezzo in lavorazione, in questo caso normalmente vengono interposti dei vetrini piani, poco costosi e facilmente sostituibili, per evitare di danneggiare con spruzzi la lente.

Per quanto riguarda il fascio di laser a CO_2 , per sorgenti con potenza di 3-5 kW come elementi di focalizzazione vengono utilizzate lenti in KCl o ZnSe, con la prima che è meno costosa ma scarsamente resistente alla umidità e difficile da rivestire con strati antiriflessi e con la seconda che permette invece anche il passaggio del fascio He-Ne, usualmente impiegato come fascio guida per osservare la zona di interazione del fascio infrarosso che è invisibile. Per potenze superiori vengono utilizzati degli specchi poiché, a questi livelli, anche il materiale rifrangente meno assorbente alla lunghezza d'onda del laser a CO_2 (ZnSe), non sopporterebbe, per motivi termici, flussi così elevati. Gli specchi possono essere in rame OFHC (che si presenta facilmente scalfibile e soggetto a corrosione), rame con rivestimento in oro (che ha le migliori caratteristiche di riflettività ma è anche facilmente danneggiabile) o molibdeno (che ha una minore riflettività, ma presenta una maggiore durata). Questi elementi ottici hanno normalmente la forma di convenzionali specchi concavi o specchi parabolici.



Dispositivo di focalizzazione con specchio concavo

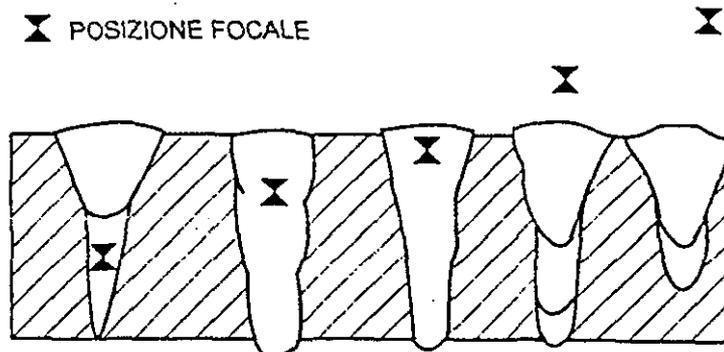


Schema di dispositivo di focalizzazione parabolico fuori asse

Con gli specchi parabolici l'angolo di incidenza del fascio sullo specchio deve essere il più possibile vicino alla normale, per evitare aberrazioni nella macchia focale. Gli specchi parabolici, oltre al vantaggio di produrre macchie focali di dimensioni inferiori e circolari, permettono anche di essere ruotati di 360° attorno all'asse di incidenza del fascio e quindi possono essere impiegati per saldature di elementi tridimensionali. Per contro, oltre ad essere più costosi, presentano maggiori sensibilità ad eventuali disallineamenti del fascio incidente. Questi componenti ottici debbono essere convenientemente protetti dagli elementi prodotti durante la lavorazione (calore, spruzzi di materiale fuso, vapori, etc). Per questo, nei sistemi di focalizzazione con lente o, in generale, per quelli terminanti con un ugello verticale, deve essere fatto fluire un debole flusso di gas di protezione (in questo caso normalmente dello stesso tipo del gas di protezione del keyhole). Negli altri casi, viene utilizzato un forte flusso orizzontale di aria compressa, posta all'estremità del gruppo di focalizzazione, che soffia via i prodotti della lavorazione.

Posizione focale

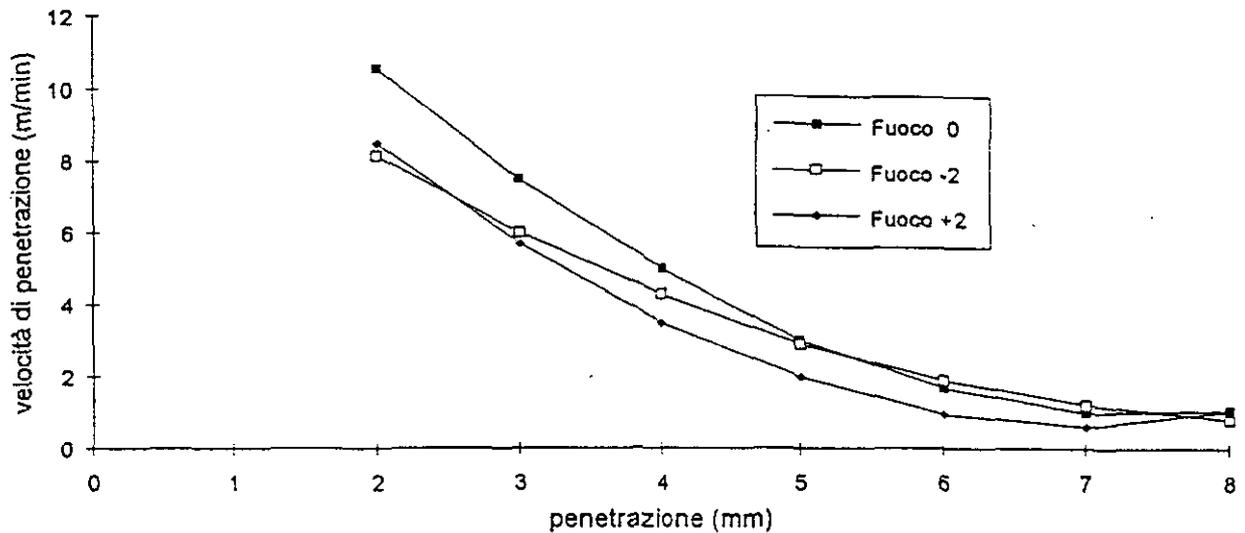
Per avere un consistente processo di saldatura per penetrazione profonda è necessario mantenere costante la densità di potenza nella zona di interazione del fascio laser con il materiale; risulta quindi necessario mantenere con accuratezza la corretta posizione focale rispetto alla superficie del giunto. Nel processo di saldatura la posizione del fuoco ha effetti minori rispetto a quanto avviene per il taglio, poiché vengono utilizzate focali più lunghe con maggiori profondità di campo. La posizione focale ha però effetti sulla forma del cordone, come evidenziato nella figura seguente,



e sulla velocità di lavoro, come riportato dal grafico che segue relativo a penetrazioni su

acciaio dolce con potenza di 5 kW (fuoco 0 significa che esso è posto sulla superficie del pezzo, fuoco -2 indica che esso è posto due millimetri all'interno del pezzo, e così via).

Influenza della posizione focale



E' da tener presente inoltre che non esistono ancora per queste applicazioni dispositivi adattativi per il mantenimento della corretta posizione focale e questo si riflette necessariamente in maggiori complicazioni nel sistema di lavoro utilizzato o pone delle limitazioni al processo.

Gas di copertura

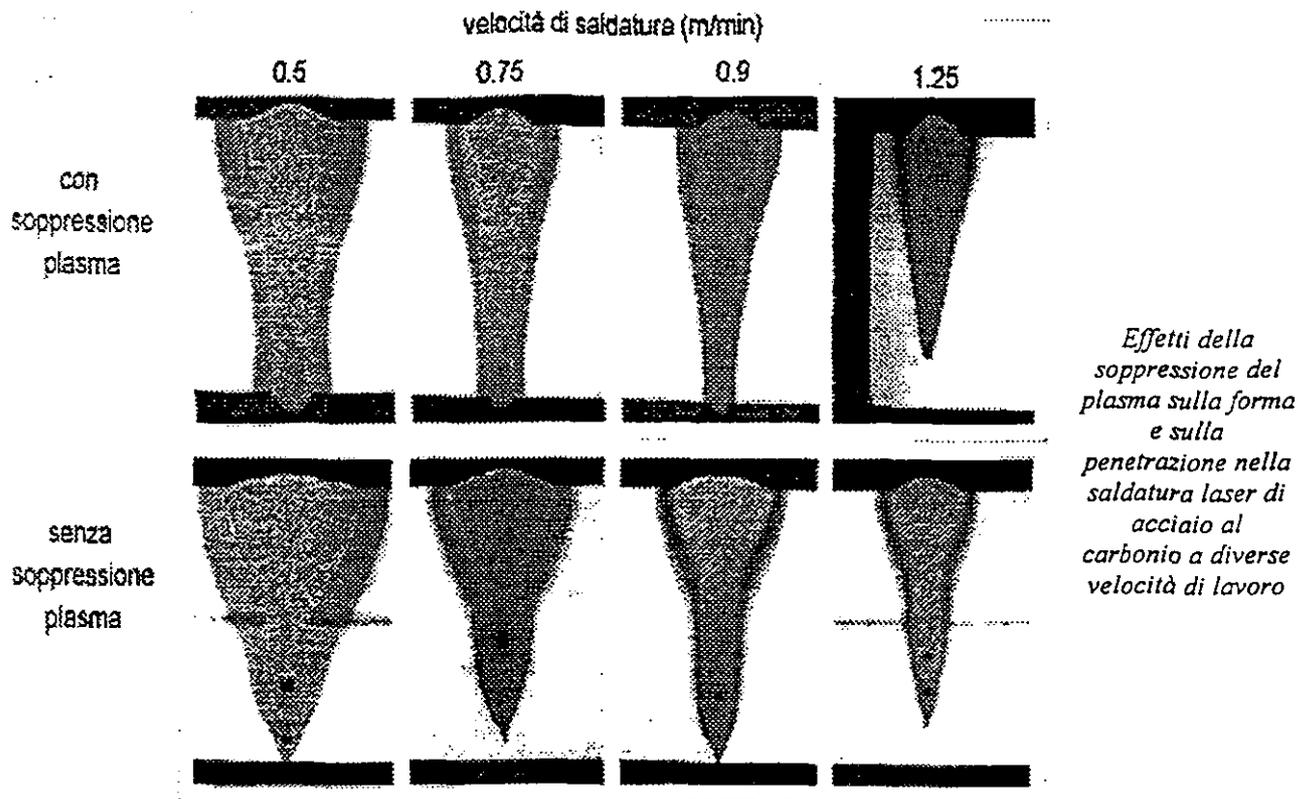
Come nelle tecniche convenzionali, anche nella saldatura laser viene utilizzato un gas di copertura che però in questo caso deve assolvere a due diversi compiti:

- proteggere il metallo fuso dall'ossidazione ed evitare così porosità ed inclusioni di ossidi che peggiorerebbero la qualità del giunto,
- proteggere la propagazione del fascio fino al punto di lavoro, minimizzando l'assorbimento del fascio stesso da parte di gas e vapori che si formano sopra il keyhole.

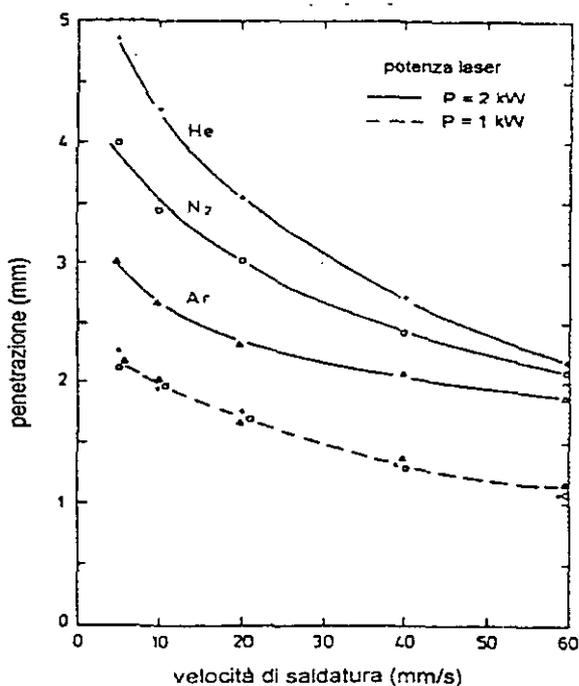
Il primo compito può essere facilmente realizzato con diversi gas, ma il secondo si presenta più difficile.

Perché più semplice, vediamo prima il problema per le sorgenti laser Nd:YAG. Qui, come detto, la formazione del plasma è molto ridotta ed è quindi necessario proteggere unicamente il bagno fuso dall'ossidazione. Per questo, fino a potenze medie di circa 300 W, vengono usati argon ed azoto (in alcuni acciai l'azoto può causare infragilimento, promuovendo la trasformazione martensitica); per potenze superiori viene normalmente impiegata una miscela di anidride carbonica ed argon (all'80%).

Nella saldatura con laser a CO₂ la eventuale riduzione di penetrazione a causa del plasma può essere prevalente solo quando viene usato il gas di copertura errato oppure quando si ha l'abbinamento di una eccessiva potenza laser e di una bassa velocità di lavoro (in genere inferiore a 0.7 m/min). Questo è evidenziato nella figura seguente, in cui sono riportate diverse condizioni di lavoro, con e senza gas di copertura, nella saldatura di acciaio al carbonio, con spessore di 12 mm, utilizzando una potenza di 7.5 kW sulla superficie di lavoro.



Quando la velocità di saldatura è superiore a 1 m/min, un efficiente controllo del plasma può essere ottenuto utilizzando un semplice dispositivo di protezione, con la scelta del corretto tipo di gas. Normalmente viene utilizzato elio come gas di copertura per effetto del suo elevato potenziale di ionizzazione, cioè la sua capacità di assorbire una potenza più elevata prima di ionizzarsi e dar luogo alla formazione del plasma. L'elio permette quindi di raggiungere le penetrazioni più elevate nella maggior parte dei materiali e questo effetto risulta essere più evidente a basse velocità ed all'aumentare della potenza, come evidenziato nella figura sottostante.



Effetti del gas di assistenza sul processo di saldatura di acciaio al carbonio a diverse potenze laser

A causa del rilevante costo di questo gas, l'uso di elio come gas di copertura è quindi raccomandato quando si vogliono effettuare saldature di qualità negli acciai e quando si saldano materiali come titanio e zirconio in cui l'ossidazione del bagno fuso degrada la qualità del giunto.

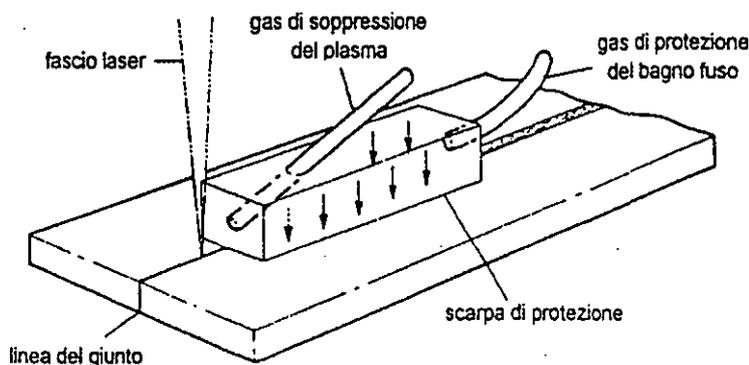
L'azoto (OFN) si comporta sostanzialmente come l'elio nel prevenire la formazione del plasma, ma, come detto, può essere causa di infragilimento negli acciai. Nonostante questo, l'azoto risulta essere diffusamente impiegato nella saldatura della lamiera sottile per applicazioni automobilistiche e nell'industria degli elettrodomestici.

L'argon costituisce un buon gas di copertura per la prevenzione dell'ossidazione del bagno ma, avendo un potenziale di ionizzazione inferiore a quello dell'elio (1.57 eV rispetto a 24.5 eV), la formazione di plasma risulta essere superiore, specialmente all'aumentare della potenza. Avendo un costo nettamente inferiore a quello dell'elio, viene ampiamente utilizzato nelle applicazioni in cui sono coinvolte sorgenti a CO₂ aventi potenza continua inferiore a 2 - 3 kW. Si deve peraltro notare che a questi bassi livelli di potenza il plasma caldo posto sopra il cordone fa rallentare il processo di solidificazione del metallo fuso, dando un cordone più liscio. Essendo più pesante dell'aria, l'argon tende a stagnare sopra la linea di saldatura e formare così improvvisi nubi di plasma che riducono localmente la penetrazione (fenomeno evidente quando la saldatura avviene in zone ristrette). Nelle saldature di spessori elevati, quando le ridotte velocità di lavoro rendono necessaria la soppressione del plasma, l'argon deve essere utilizzato semplicemente come gas per proteggere il cordone dall'ossidazione.

Per i diversi materiali metallici, la tabella seguente può dare alcune indicazioni di massima sul tipo di gas utilizzare per l'assistenza alla lavorazione.

- gas inerte (Ar o He): acciai fortemente legati, materiali non ferrosi;
- gas attivo (CO₂): acciai non legati, acciai a basso tenore di carbonio;
- miscela di gas (Ar + O₂ o Ar + CO₂): acciai non legati, acciai da costruzione.

Molto importante è la dipendenza della qualità della saldatura dalla portata del gas di copertura. In generale si possono distinguere tre diverse zone, ad ognuna delle quali corrisponde un tipico aspetto del cordone. A bassi flussi, l'effetto del plasma è notevole, per cui si hanno penetrazioni ridotte ed il cordone presenta un pronunciato allargamento superficiale (testa di chiodo). A flussi di elio di 10-20 l/min (per potenze fino a circa 3 kW), 15-30 l/min (per potenze fino a circa 6 kW) e 25-40 l/min (per potenze superiori) si ha la situazione ottimale: la penetrazione aumenta drasticamente rispetto alla situazione precedente e rimane costante nel tempo. Per flussi superiori, benchè la formazione del plasma sopra il keyhole sia effettivamente soppressa, l'interazione del gas con il bagno fuso comporta delle alterazioni nel cordone che presenta gibbosità, con porosità di notevoli dimensioni.



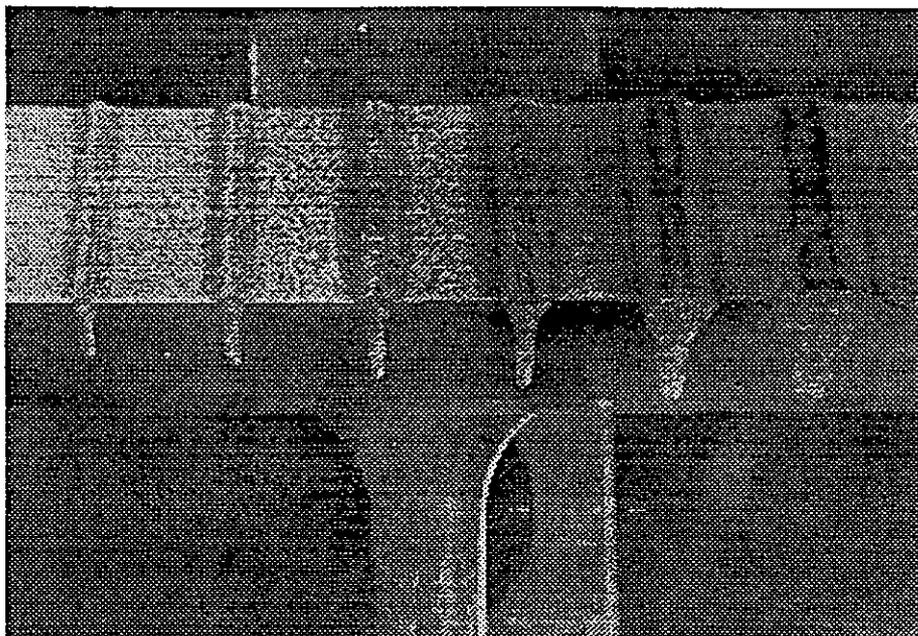
Rappresentazione schematica del dispositivo di adduzione dei gas di assistenza nella saldatura con laser a CO₂

Per potenze fino a circa 3 kW normalmente viene ancora utilizzato un flusso di gas coassiale con il fascio laser. Per potenze superiori il gas viene addotto sul punto d'interazione del fascio da un ugello laterale (normalmente di tipo Linde), inclinato di 45° circa in modo da dare un flusso concorde con la direzione di saldatura.

Nella figura precedente si ha una rappresentazione schematica di un semplice dispositivo con i due flussi per la protezione del bagno fuso e per la soppressione del plasma.

velocità di lavoro

Naturalmente questo, assieme alla qualità del giunto, è uno degli aspetti più importanti del processo di saldatura laser. Come visto, su questo parametro influiscono tutti gli altri precedentemente visti. Nella figura seguente si hanno delle indicazioni sugli effetti della velocità di lavoro sulla qualità del giunto.



Penetrazioni ottenute con un laser a CO₂ a flusso assiale veloce (2500 W) su acciaio inossidabile AISI 304 con velocità decrescenti di un fattore 10 da sinistra verso destra

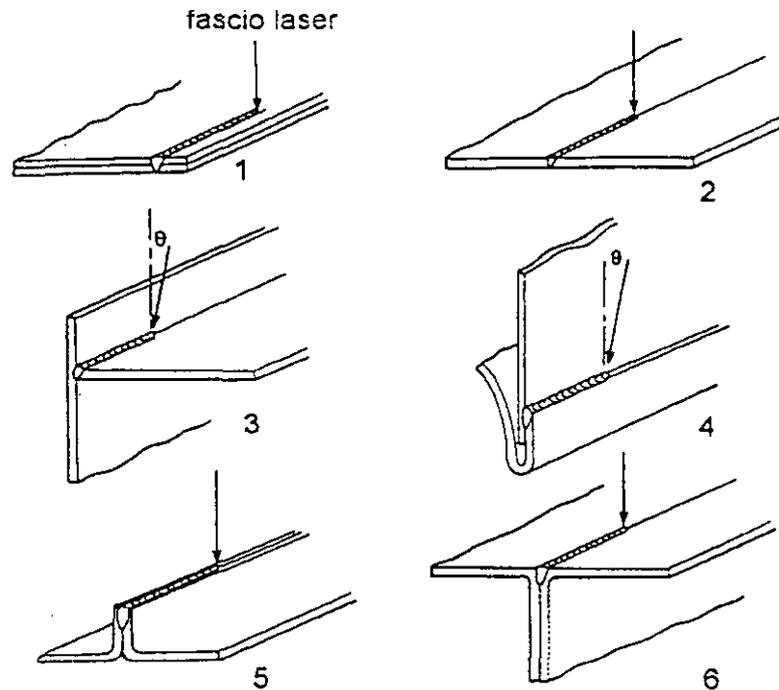
8. - Condizioni di accostamento dei materiali necessarie per la saldatura laser

Il laser fornisce una elevata energia concentrata in una zona estremamente ristretta (generalmente 0.3 - 0.6 mm), che risulta in grado di fondere i lembi dei materiali da unire, senza richiedere generalmente materiale d'apporto. Questo significa quindi che tutto il materiale fuso deve provenire dai materiali che devono essere congiunti. In queste condizioni è quindi indispensabile che i lembi da saldare debbano essere "ben accostati" tra loro per permettere che il materiale fuso li possa congiungere in maniera adeguata. Questa quantità di materiale dipende sostanzialmente dagli scostamenti orizzontali e verticali esistenti tra i lembi e dalle dimensioni della macchia focale. Quest'ultimo argomento è stato ampiamente visto nei capitoli precedenti, vediamo ora gli effetti delle varie geometrie dei giunti e le loro tolleranze dimensionali.

Si ritiene utile concentrare l'attenzione sulla saldatura di spessori inferiori a 3 mm, poiché questi, oltre a rappresentare la situazione più diffusa, costituiscono anche ovviamente quella più difficile. Si deve tener presente che le indicazioni che seguiranno hanno valore solamente indicativo poiché risultano essere fortemente dipendenti dalla natura dei materiali in lavorazione.

Per quanto riguarda la configurazione dei giunti, si deve osservare che la maggior parte delle geometrie utilizzate nei processi convenzionali sono adattabili anche al laser, ma vi sono alcune limitazioni riguardanti le tolleranze.

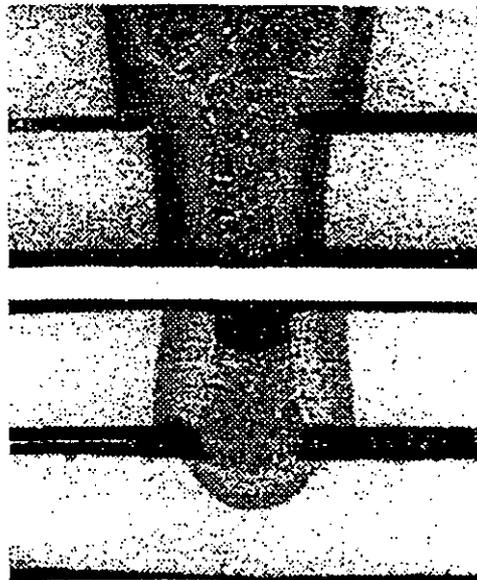
Nella figura seguente sono riportate le principali configurazioni utilizzate nei processi di saldatura laser (si noti che il fascio laser nella figura incide verticalmente sul pezzo, ma questo è solo una questione grafica potendo provenire da qualunque altra direzione); per ognuna di esse seguiranno alcune considerazioni pratiche per quanto riguarda le condizioni di accostamento necessarie per un corretto impiego della tecnologia laser.



a) giunto di sovrapposizione

questa configurazione (posizione 1 del disegno precedente) è al tempo stesso la più diffusa nelle applicazioni industriali ed anche la più semplice dal punto di vista operativo, poichè non presenta problemi di allineamento del fascio laser ed anche perchè la preparazione del giunto non presenta normalmente grandi problemi.

Come indicato nella figura seguente, riportante sezioni trasversali di due lamiere da 1 mm, con scostamenti tra esse rispettivamente di 0.1 mm e 0.25 mm, il processo laser è in grado di sopportare scostamenti fino a circa il 15% dello spessore s della lamiera superiore.



Macrografie dei cordoni di saldatura ottenuti su due lamiere sovrapposte, aventi spessore di 1 mm ciascuna, con uno scostamento tra esse rispettivamente di 0.1 mm (figura superiore) e 0.25 mm (figura inferiore)

Per garantire inoltre una buona resistenza al taglio del giunto, è generalmente necessario che la larghezza media w del cordone risulti almeno uguale a $(0.5 - 0.7) s$

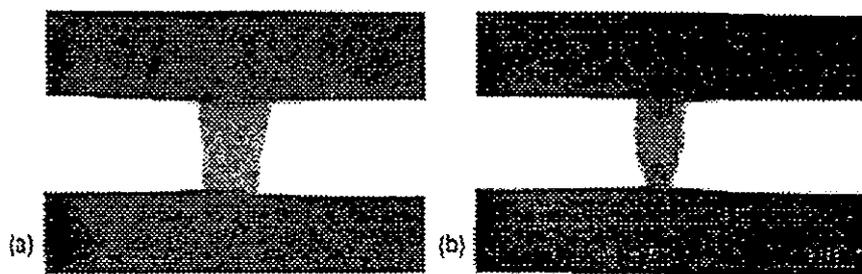
Riassumendo, per questo tipo di giunto è necessario avere:

*scostamenti verticali $\leq 15\%$ dello spessore della lamiera superiore
larghezza media del cordone $\geq 60\%$ dello spessore della lamiera*

b) giunto di testa

è sicuramente la configurazione (posizione 2 del disegno all'inizio del capitolo) che richiede le maggiori attenzioni per quanto riguarda gli scostamenti tra i lembi accettabili dal processo laser e la costanza di posizionamento del fascio rispetto alla linea di giunzione.

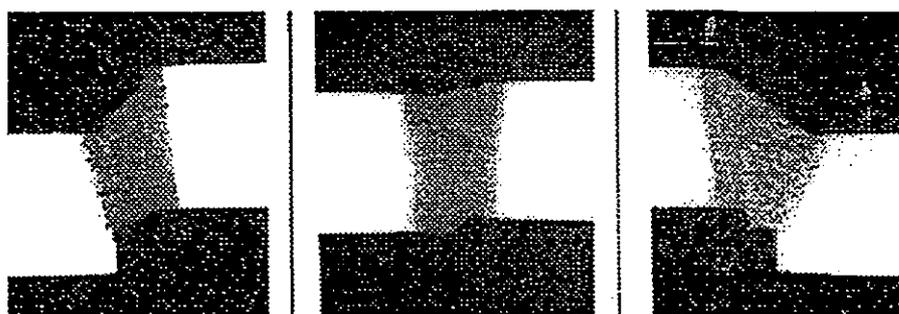
Consideriamo innanzitutto lo scostamento orizzontale tra i lembi. Molte volte si lega questa tolleranza dimensionale allo spessore s della lamiera (scostamenti inferiori al 10% di s), ma questa proporzionalità non è corretta, come indica la figura seguente in cui sono presentate due situazioni con $s = 2$ mm con scostamenti orizzontali di 0.12 mm e 0.25 mm rispettivamente (acciaio dolce, potenza laser 4 kW, velocità 2 m/min).



*Macrografie di cordoni
ottenuti saldando di testa
due lamiere da 2 mm:
nella figura a)
l'insellatura totale è
inferiore al 15%, mentre
nella figura b) è vicina al
50%*

Il massimo scostamento orizzontale permissibile per avere ancora buone caratteristiche del giunto deve essere quindi legato alla dimensione d della macchia focale e pari, tipicamente, al 30% di questa.

Lo scostamento verticale ha invece effetti notevolmente inferiori. La figura seguente riporta un esempio su lamiera di acciaio dolce con spessore di 2 mm.



*Macrografie di cordoni
ottenuti saldando di testa
lamiere da 2 mm con
lembi spostati
verticalmente*

Da questa si ricava che, anche con scostamenti verticali pari al 50% dello spessore, si hanno ancora giunti metallurgicamente accettabili, anche se di dubbio aspetto estetico. Tenendo conto delle diverse condizioni di velocità e di penetrazione, si può dire che in termini generali questo scostamento verticale deve essere contenuto entro il 15% dello spessore s della lamiera.

Per quanto lo scostamento massimo tra la linea del giunto e quella che il sistema di lavorazione fa seguire al fascio laser nel suo moto relativo rispetto al pezzo, questo deve risultare in genere inferiore a circa il 30% della dimensione focale per poter avere ancora buone qualità del cordone.

Riassumendo, per questo tipo di giunto è necessario avere:

scostamenti orizzontali $\leq 30\%$ dimensione della macchia focale
scostamenti verticali $\leq 15\%$ dello spessore minimo della lamiera
allineamento fascio-giunto $\leq 30\%$ dimensione della macchia focale

c) giunto a T

in questo caso (posizioni 3 e 4 del disegno all'inizio del capitolo) il fascio deve arrivare inclinato sul giunto e, tanto maggiore è il numero f , tanto minore sarà l'angolo di inclinazione e migliore la qualità del giunto. Per avere una buona penetrazione, l'angolo di incidenza deve essere compreso tra 7° e 10° (cui corrispondono numeri f tra 6 e 9). Risulta qui necessario avere un corretto allineamento del fascio rispetto alla linea del giunto (normalmente entro ± 0.2 mm dal giunto stesso) e una corretta posizione del fuoco (normalmente entro $\pm 40\%$ dello spessore della lamiera, dall'inizio del giunto).

d) giunti a flangia

le condizioni in questo caso (posizioni 5 e 6 del disegno iniziale) sono sostanzialmente analoghe a quelle del caso b) precedente. Data la configurazione, grande attenzione deve essere però data quando lo spessore della lamiera è di circa 0.7 mm. In questo caso deve essere limitata la larghezza del cordone, cosa che implica la necessità di operare ad elevata velocità.

9. - Preparazione dei giunti necessaria per la saldatura laser

Olio, polvere, frammenti metallici, ruggine ed altri contaminanti che possono essere presenti nella zona di giunzione vengono vaporizzati dal fascio laser incidente ed i vapori risultanti fuoriescono attraverso la zona di minore resistenza rappresentata dal bagno fuso. Questo causa generalmente porosità, con un numero maggiore di zone di propagazione di cricche, che comportano una minore resistenza del giunto. Un ulteriore effetto di questi contaminanti è la produzione di spruzzi di metallo fuso che possono compromettere l'integrità dell'ottica di focalizzazione (vedasi al precedente capitolo 7) e ostruire l'ugello del gas di copertura. Da questo ne consegue che i lembi da saldare devono essere preventivamente puliti. Il metodo di pulizia dovrà essere ottimizzato per ogni applicazione, ma dovrà comprendere gruppi di spazzolatura, lavaggio ed asciugatura. Si deve tener presente a questo proposito che alcune soluzioni di lavaggio (come ad esempio quelle contenenti solfati e fosfati), in base a quanto detto nei capitoli precedenti, possono contribuire sostanzialmente alla produzione di spruzzi.

Per effetto delle ridotte dimensioni della macchia focale e della profondità di campo del fascio focalizzato, il dispositivo di serraggio dei pezzi da unire deve essere esaminato con grande dettaglio. Si deve tenere presente poi che il processo di saldatura laser, benchè produca meno calore diffuso dei processi convenzionali, è sempre un metodo termico di saldatura e quindi induce delle distorsioni i cui effetti devono essere tenuti in debito conto nella progettazione del dispositivo di bloccaggio. Questo deve anche essere in grado di evitare che tensioni indotte nel cordone vi causino delle cricature. Nella realizzazione di questi elementi di bloccaggio dei componenti si deve, in generale, ricordare che:

- poichè questi gruppi devono essere ripetutamente utilizzati, devono essere costruiti in acciaio resistente;
- quando si lavorano componenti sensibili alla temperatura, che possono quindi distorcersi quando vengono liberati dalle tensioni residue, i gruppi di bloccaggio debbono essere realizzati tenendo anche conto della loro funzione di assorbitori di calore (eventualmente raffreddarli con acqua);
- devono fornire uno schermo agli eventuali spruzzi di metallo fuso;
- devono permettere l'accesso facile dei dispositivi di controllo del plasma.

Riteniamo utile riassumere quanto sin qui detto riguardo gli effetti dei parametri più importanti sulla qualità della saldatura.

	Parametro	Influenza sul processo
Fascio laser	<ul style="list-style-type: none"> • Intensità I • Intensità x dimensione della macchia focale • Posizione del fuoco 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Accoppiamento dell'energia ♦ Penetrazione (a velocità costante) ♦ Forma del cordone, difetti
Processo	<ul style="list-style-type: none"> • Potenza • Velocità di lavoro • Gas di copertura 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Qualità del giunto (porosità, durezza, volume del fuso) ♦ Efficienza del processo (penetrazione, volume del fuso). Difetti nel cordone
Pezzo in lavorazione	<ul style="list-style-type: none"> • Materiale • Condizioni superficiali • Geometria del giunto 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Efficienza del processo (penetrazione, volume del fuso) ♦ Difetti (vuoti, spruzzi) ♦ Aspetto del cordone

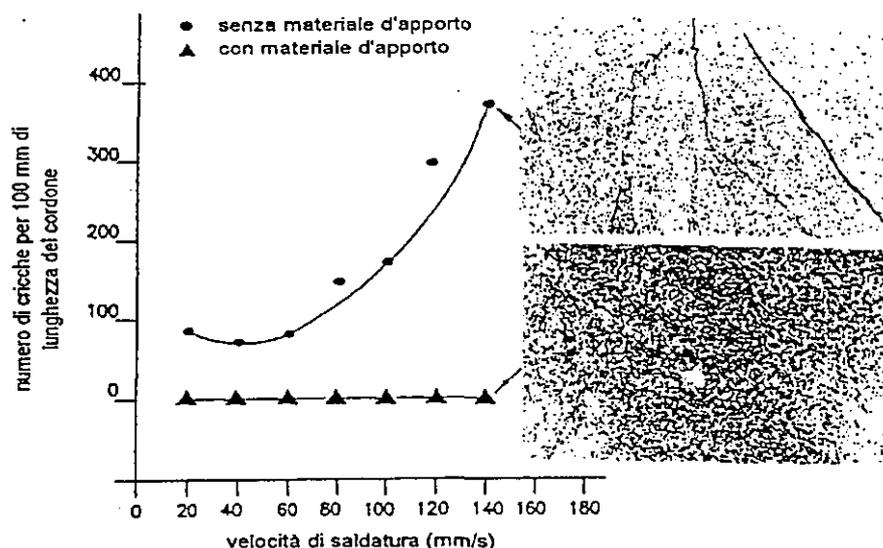
10. - Saldatura laser con filo d'apporto

La caratteristica saliente del processo di saldatura laser, descritto nei capitoli precedenti, è quella di essere autogena e di penetrazione profonda. Nelle applicazioni industriali però si verificano spesso situazioni in cui l'accostamento tra le parti, che si è visto essere necessario per la saldatura autogena, è difficile da realizzarsi. Questa difficoltà può essere superata mediante l'impiego di materiale d'apporto per riempire lo scostamento esistente tra i lembi ed evitare insellamenti del cordone.

Vi sono inoltre due altri motivi che possono suggerire l'uso del materiale d'apporto:

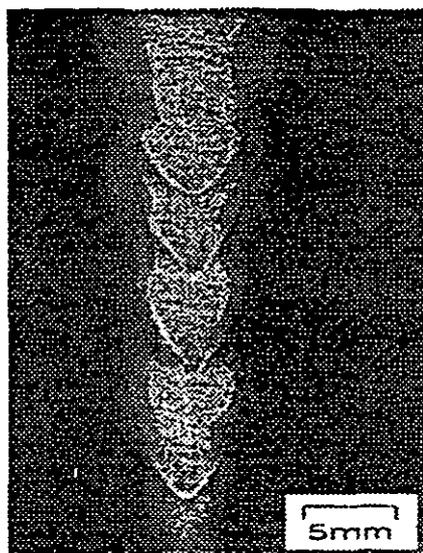
- migliorare le proprietà del giunto, inserendovi un materiale con caratteristiche precise (utile, ad esempio, nella saldatura di materiali temprabili o facilmente soggetti a cricature),
- effettuare saldature con passate successive, per permettere di saldare con il laser spessori molto più elevati di quanto ottenibile con la normale saldatura autogena.

Si deve dire che, benchè nata per sopperire a limitati accostamenti tra i lembi da congiungere, la saldatura laser con filo d'apporto sta sempre più sviluppandosi verso questi due ultimi obiettivi. Nella figura seguente, ad esempio, è riportata l'influenza del filo di apporto sulla suscettibilità alla cricatura della lega di alluminio 6005 (spessore 6 mm); come si può notare l'uso del filo d'apporto riduce drasticamente questa possibilità.



Effetti del filo d'apporto nella saldatura della lega 6005 di alluminio

In questa figura invece si ha la saldatura con 6 passate successive di Fe 37 avente lo spessore di 50 mm, utilizzando una sorgente a CO₂ da 10 kW.



*Saldatura con filo
d'apporto di Fe 37
(spessore 50 mm) con 6
passate successive*

Si deve notare che, data la giovinezza di questa tecnica, non si hanno ancora materiali d'apporto sotto forma di filo adatti alla tecnica laser, ma si devono utilizzare quelli normalmente impiegati nei metodi convenzionali che però non sempre possono essere convenientemente utilizzati, poichè, ad esempio, contengono sostanze necessarie per il mantenimento dell'arco, che non sono richieste dal laser.

Relativamente ai parametri di processo, la saldatura laser con materiale d'apporto non risulta essere molto diversa tecnologicamente rispetto alla saldatura autogena di penetrazione vista nei precedenti capitoli.

La presenza di un materiale aggiuntivo richiede tempi di interazione più elevati per consentire la fusione dal filo d'apporto ed eventualmente di focalizzare il fascio in maniera meno spinta, per ingrandire la pozza fusa in cui deve essere immesso il materiale d'apporto stesso. Si deve tenere presente che, diversamente da quanto avviene nella saldatura tradizionale in cui il materiale d'apporto ha la funzione di elettrodo, oppure può essere posto tra la sorgente di calore ed il pezzo da saldare, con il laser è necessario operare in maniera particolare. Il filo d'apporto non può essere infatti posto nel fascio laser incidente sul pezzo, perchè l'energia del fascio, dopo aver fuso il filo, perderebbe la focalizzazione necessaria per la formazione del keyhole. L'unico modo che rimane per fondere il filo d'apporto è quello di porlo nella zona fusa attorno al keyhole, mantenendolo il più vicino possibile a questa cavità, senza arrivare a disturbarne la dinamica. Occorre quindi che il filo stesso venga posizionato in modo stabile ed addotto in maniera corretta. Il filo viene innanzitutto inserito in un solco tra i materiali da congiungere, di larghezza leggermente superiore a quella del filo stesso (0.6-1.6 mm normalmente), in modo tale che possa essere facilmente guidato vicino al keyhole e non possa avere movimenti indesiderati, come ad esempio alzarsi verso il fascio laser.

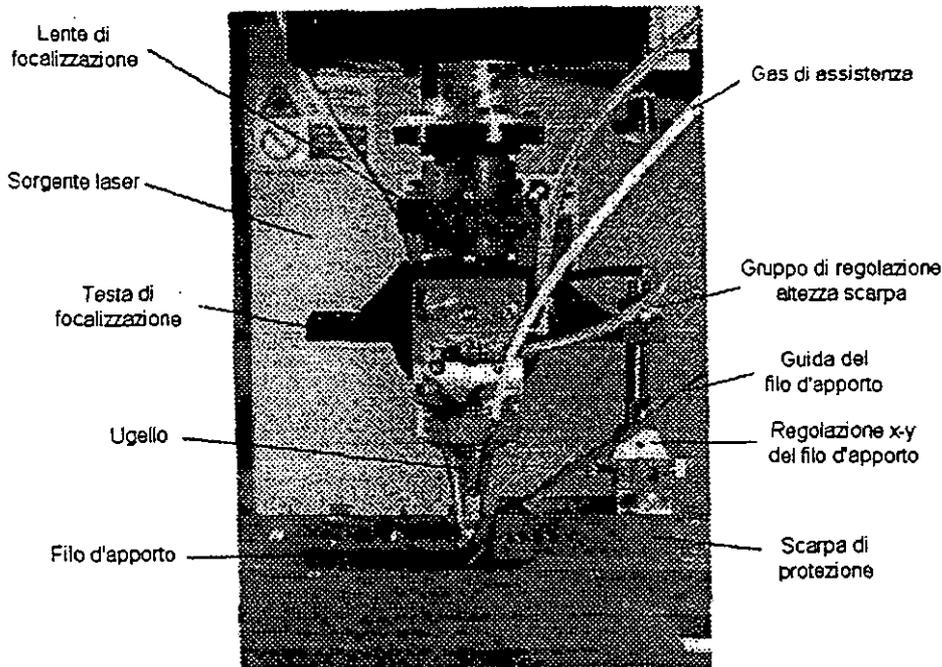
La velocità di scorrimento del filo v_f , per un dato spessore del materiale (cioè per una data velocità di saldatura v_s), è un parametro molto importante che, in linea indicativa, può essere dato dalla seguente relazione:

$$v_f = v_s \times \text{sezione del solco} / \text{sezione del filo}$$

Utilizzando ad esempio un filo da 1.2 mm, entro un solco di 1.5 mm su uno spessore di 8 mm, per effettuare una saldatura a 0.6 m/min, la velocità di scorrimento del filo dovrà essere di circa 6.5 m/min.

Se durante il processo di saldatura vi sono delle variazioni nella larghezza del solco tra i lembi da saldare è necessario adeguarvi la velocità del filo, per permettere un riempimento uniforme del solco.

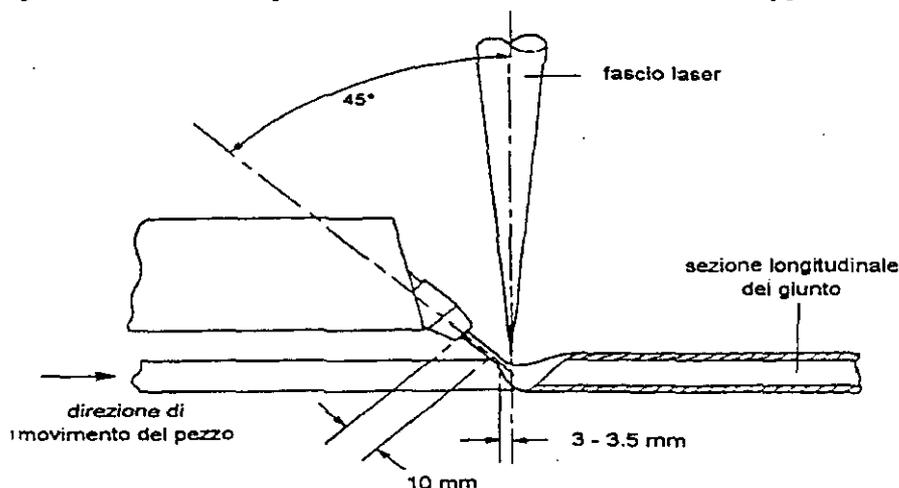
Elemento importante per tutto questo è il porgifilo, il dispositivo che deve: svolgere il filo di materiale d'apporto (avvolto in matassa), guidarlo nel solco e alimentarlo con continuità in maniera regolabile. Nella figura seguente si una presentazione della testa di focalizzazione per una sorgente a CO₂ da 3 kW (con focalizzazione mediante lente), e del sistema di adduzione del filo d'apporto



Esempio di gruppo di focalizzazione con il dispositivo di adduzione del filo d'apporto

Si noti come il dispositivo d'adduzione del filo sia montato su un gruppo che permette il controllo integrale della sua posizione. Interessante è la presenza della scarpa a protezione del materiale fuso.

Importante è infine il posizionamento del filo. Innanzitutto l'angolo d'adduzione deve essere compreso tra 30°-60° (normalmente è posto a 45°), per facilitarne l'immissione nel bagno fuso attorno al keyhole. Il filo può essere inserito nella parte anteriore o in quella posteriore del keyhole. Se il filo d'apporto viene utilizzato unicamente per riempire uno scostamento tra i lembi da congiungere, il metodo più semplice è quello di porre il filo nel più ampio bagno fuso che si forma dietro al keyhole. Questa situazione però non sempre è in grado di consentire il mescolamento del materiale del filo nel bagno fuso, per cui, se il filo d'apporto è utilizzato per modificare le caratteristiche del cordone, è preferibile addurre il filo nel fronte anteriore del keyhole. Lo schema quindi da utilizzare in questo caso è rappresentato nella figura seguente:



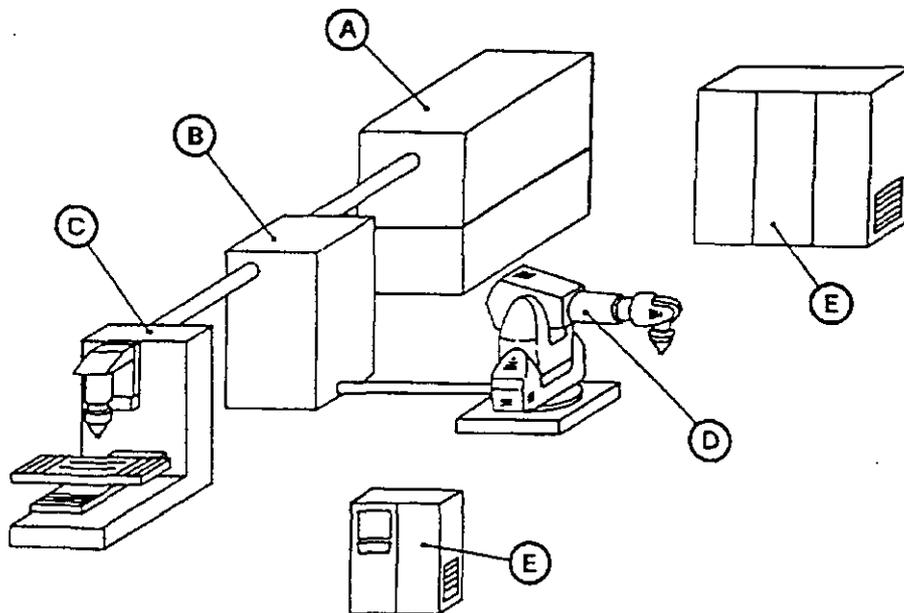
Posizionamento tipico del filo d'apporto per la saldatura profonda 8 mm, con 1.5 mm di scostamento tra i lembi, utilizzando un filo d'apporto di diametro 1.2 mm

11. - Componenti principali di un sistema di saldatura laser

Il successo del processo di saldatura laser dipende, come visto, dal modo con cui il pezzo in lavorazione è fissato e da quello con cui viene manipolato sotto il fascio laser fisso o da come questo si muove attorno al pezzo. Tutti questi movimenti devono avvenire mantenendo le condizioni di accostamento dei giunti e di allineamento del fascio visti nei capitoli precedenti. Un'impianto di saldatura risulta essere composto in generale dai seguenti elementi:

- sorgente laser (CO₂, oppure YAG) che genera il fascio,
- gruppo di trasmissione del fascio per trasferire l'energia dalla sorgente alla zona di lavoro,
- stazione di lavoro per adeguare il fascio alle esigenze del processo,
- unità ausiliaria di controllo.

Nella figura seguente è schematizzato un tale sistema, indicando il percorso del fascio laser, presentando due semplici ipotesi di stazioni di lavoro: una a fascio fisso e pezzo mobile (C) e l'altra con pezzo fisso e fascio mobile mediante un robot (D).



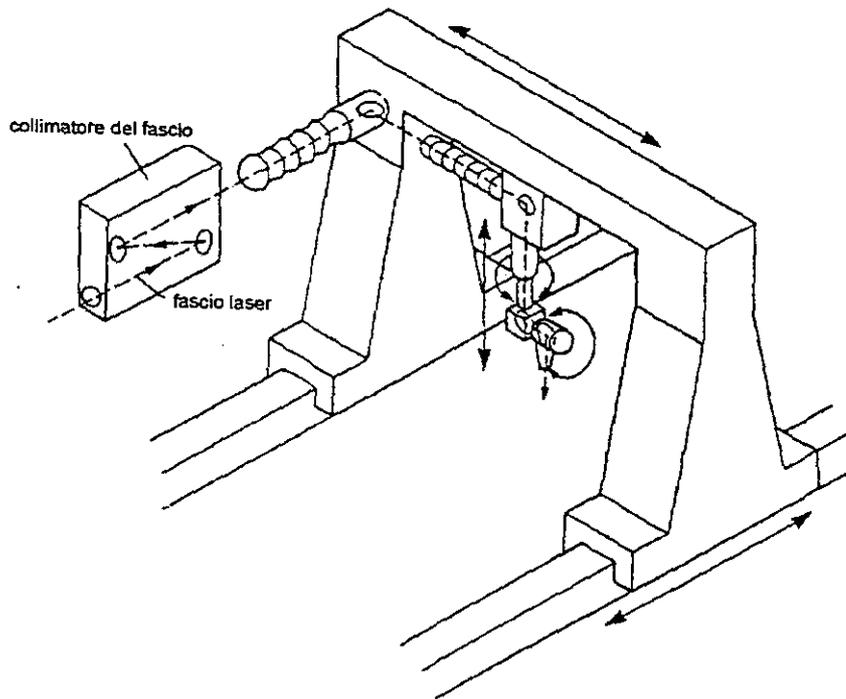
Rappresentazione schematica di un impianto di saldatura laser. A: sorgente laser; B: gruppo di trasmissione fascio; C: stazione di lavoro a fascio fisso e pezzo mobile; D: stazione di lavoro a pezzo fisso e fascio mobile; E: servizi ausiliari di controllo

Nella maggior parte delle applicazioni industriali viene movimentato il pezzo sotto il fascio fisso, ed in questo caso la situazione che più frequentemente si incontra è quella relativa alla saldatura di elementi a simmetria cilindrica che vengono semplicemente posti in rotazione. In questo caso le condizioni di allineamento necessarie per la saldatura laser sono facilmente ottenibili, ad esempio mediante dei riscontri fissi.

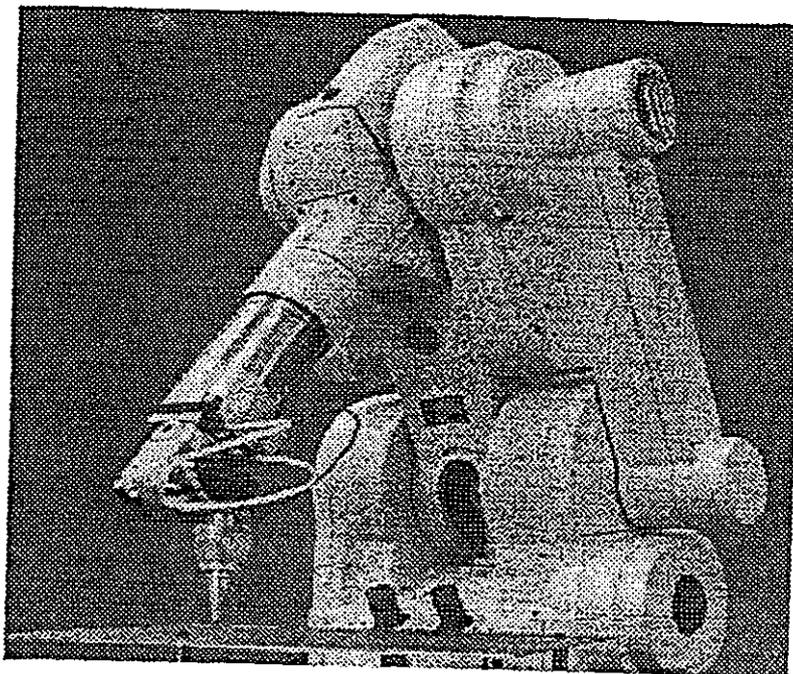
In altre applicazioni (in numero ridotto rispetto al precedente), il pezzo invece viene movimentato (generalmente nel piano) mediante tavole x y z. In questo caso la difficoltà maggiore proviene dalla stabilità dei gruppi di fissaggio del pezzo. Raramente in questo caso le corse delle tavole risultano essere superiori a 1.5 x 1.5 m

Si stanno sempre più diffondendo invece le applicazioni in cui il pezzo in lavorazione rimane in posizione fissa ed il fascio laser viene movimentato attorno ad esso, generalmente su traiettorie tridimensionali. Le soluzioni dal punto di vista sistemistico sono in questo caso diverse per le sorgenti laser a CO₂ rispetto a quelle Nd: YAG.

Con i fasci laser a CO₂ sono possibili due diverse soluzioni: utilizzando un sistema cartesiano di movimentazione del fascio o impiegando un robot polare. Queste due situazioni sono illustrate nelle figure seguenti



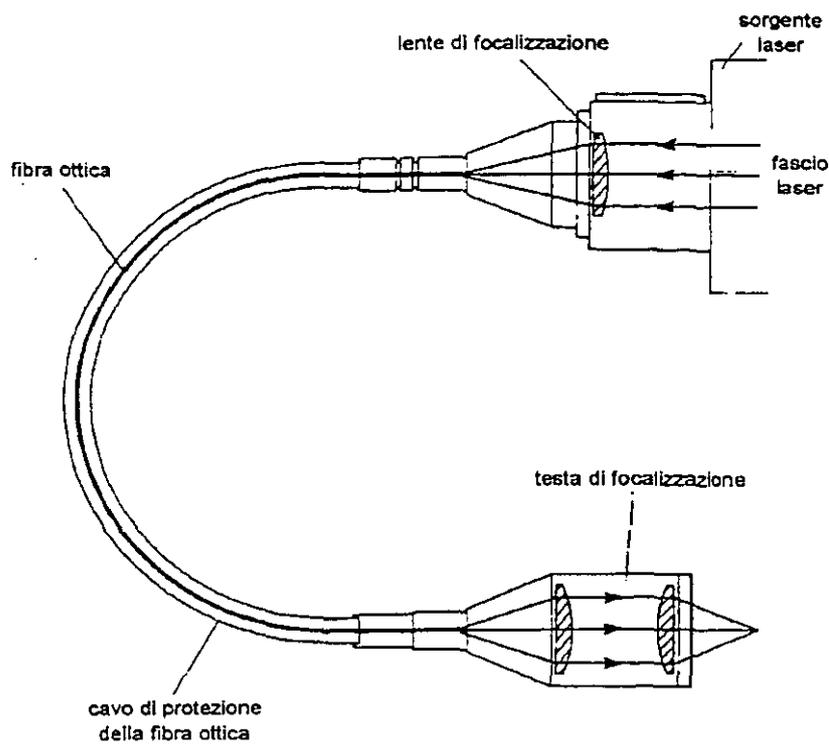
Schema di sistema a portale con movimentazione del fascio laser su 5 assi, con pezzo fisso



Robot polare per la movimentazione nello spazio di un fascio laser a CO₂. Il fascio passa all'interno dei bracci cavi del robot

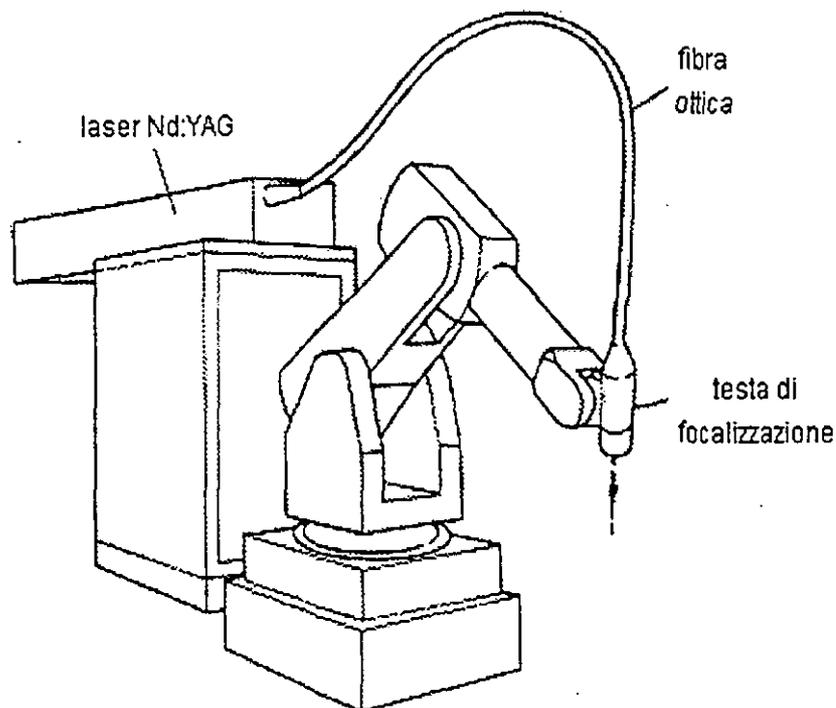
In entrambi i casi il convogliamento del fascio laser sul punto di lavoro avviene mediante specchi. Questo comporta che, oltre a perdere nel trasporto del fascio una certa quantità di potenza, per effetto dell'assorbimento degli specchi (3-5% in dipendenza dalla condizione della superficie degli specchi stessi), si ha la necessità di un frequente riallineamento della catena ottica, indispensabile per il mantenimento delle condizioni operative viste nei capitoli precedenti. Dovendo esaminare le due soluzioni proposte dalle figure precedenti, si deve osservare che in generale il sistema cartesiano si presenta più preciso, con maggiori dimensioni del volume di lavoro, ma molto più costoso della soluzione con il robot polare.

La situazione è diversa per i fasci Nd:YAG poichè la lunghezza d'onda di queste sorgenti (1.06 μm) può essere trasmessa in fibra ottica, senza perdite apprezzabili di potenza.



Trasporto di un fascio Nd:YAG in fibra ottica

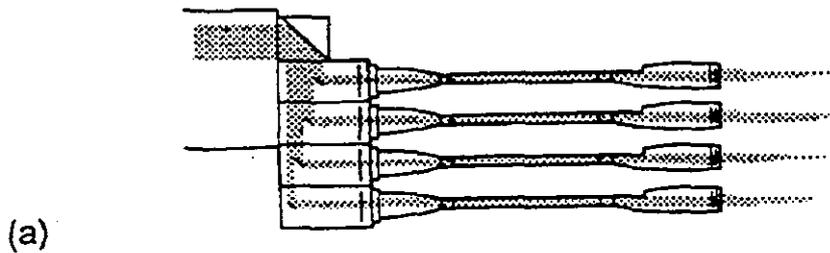
La testa di focalizzazione finale (contenente l'ottica di ricollimazione del fascio fortemente divergente uscente dalla fibra e la lente di focalizzazione sul pezzo in lavorazione) può poi essere facilmente manovrata da un robot, come indicato nella figura seguente.



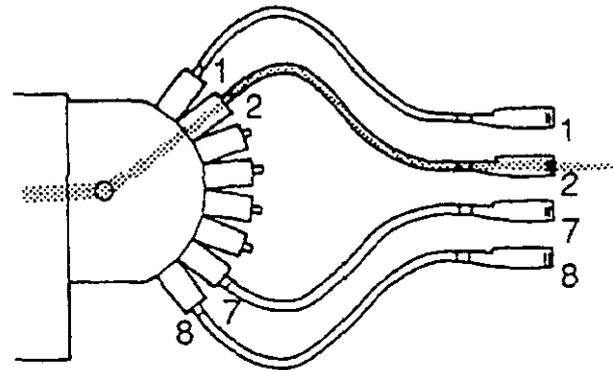
Movimentazione con un robot di un fascio Nd:YAG trasportato in fibra ottica

Il materiale della fibra ottica è generalmente quarzo ed il suo diametro è inferiore a 1 mm. Si deve notare che per la massima efficienza di trasmissione del fascio la dimensione della macchia focale è in questo caso data dal prodotto del rapporto di ingrandimento del sistema ottico finale di focalizzazione per il diametro della fibra utilizzata.

In molti casi il tempo di carico/scarico dei pezzi da saldare è di gran lunga superiore a quello necessario per eseguire la saldatura. In questi casi il sistema può avere più stazioni di lavoro sincronizzate in modo da alternare la saldatura con il posizionamento, il fissaggio e lo scarico dei pezzi. Per questo il fascio laser in molte applicazioni può essere suddiviso in potenza o in sequenza temporale sulle diverse stazioni di lavoro. La figura seguente illustra questa situazione nel caso più frequente di utilizzo di fasci Nd:YAG trasmessi in fibra



(a)



(b)

Modalità con cui un fascio laser Nd:YAG può essere suddiviso su diverse stazioni di lavoro: a) suddivisione dell'energia del fascio; b) indirizzamento in sequenza temporale del fascio

12. - Campi di utilizzo della saldatura laser

Rispetto alle altre tecnologie di saldatura disponibili commercialmente il laser è la più recente. Questo comporta da un lato una certa riluttanza al suo utilizzo in sostituzione di tecniche ben consolidate negli anni, dall'altro il laser è visto come una possibile panacea in grado di risolvere qualsiasi problema. E' necessario tenere presente, come regola generale, che la saldatura laser diventa vantaggiosa solamente quando:

- *i volumi di produzione siano elevati,*
- *la progettazione dei componenti da saldare sia stata appropriata per l'utilizzo della nuova tecnologia.*

Occorre innanzitutto effettuare un'accurata comprensione degli elementi di costo presentati da un sistema di saldatura laser. La tabella seguente contiene un riassunto delle considerazioni economiche che devono essere fatte per avere una valutazione sufficientemente completa di quanto sia l'investimento necessario per l'introduzione di un processo di saldatura laser.

ELEMENTI DI VALUTAZIONE PER L'INTRODUZIONE DELLA SALDATURA LASER

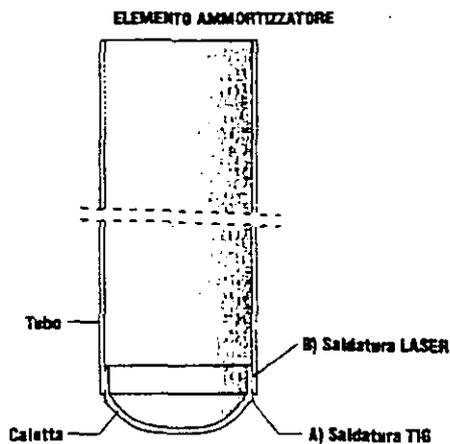
Fattori	Osservazioni sul processo
<ul style="list-style-type: none"> • velocità 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ le velocità di saldatura possono essere molto elevate essendo un processo ad alta densità di energia. L'importanza della velocità dipende dalla relazione tra il tempo di attrezzaggio e quello di saldatura;
<ul style="list-style-type: none"> • costo di preparazione del giunto 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ richiede un buon accostamento dei lembi. tuttavia, non richiedendo generalmente materiale d'apporto, non è necessaria alcuna preparazione del giunto, come l'esecuzione di cianfrini;
<ul style="list-style-type: none"> • costo dell'attrezzatura di fissaggio • attrezzatura ausiliaria 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ è sempre indispensabile e può essere costosa; ♦ non richiede attrezzature particolari come pompe da vuoto o gruppi di adduzione del materiale d'apporto;
<ul style="list-style-type: none"> • rendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ il rendimento complessivo è paragonabile a quello dei processi convenzionali, nonostante il dispendio energetico per la generazione del fascio laser;
<ul style="list-style-type: none"> • costi di controllo 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ benchè sia un processo molto ripetibile, per favorire l'automazione è utile impiegare unità per il controllo in linea della lavorazione;
<ul style="list-style-type: none"> • finitura post-processo 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ l'elevata qualità del cordone ed il ridotto apporto termico minimizzano le operazioni successive di finitura;
<ul style="list-style-type: none"> • costi di investimento • costi di funzionamento 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ sono generalmente elevati; ♦ sono spesso inferiori a quelli dei processi convenzionali;
<ul style="list-style-type: none"> • costi del lavoro 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ la dipendenza da operatori qualificati viene ridotta poichè il processo è facilmente automatizzabile.

La figura seguente mette in evidenza le considerazioni illustrate nella tabella precedente nel caso della saldatura dell'elemento di ammortizzazione per autovetture indicato nella stessa figura.

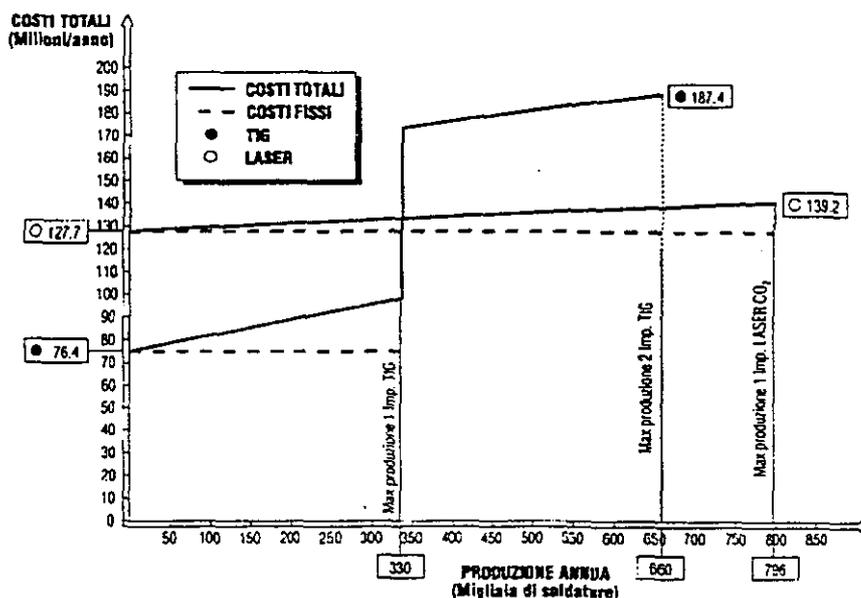
Da questa figura si può facilmente ricavare che il processo di saldatura laser diventa economico, rispetto al metodo TIG tradizionale, solamente nel caso di volumi di produzione elevati. Solo in questo caso infatti è possibile recuperare la differenza tra il costo di investimento di un impianto di saldatura laser e quello di un impianto tradizionale (si deve notare che questa differenza non esiste, almeno nelle stesse sproporzioni, per i processi di taglio).

Come regola generale si può dire: " *Se un sistema laser opera su un turno giornaliero, questo sarà appena sufficiente a ripagare l'investimento fatto; se opera su due turni, darà un guadagno; se potrà operare su tre turni, si potrà trovare il proprietario alle Bahamas o in posti equivalenti* ".

Il fatto che la saldatura laser possa ridurre, o addirittura eliminare, alcune lavorazioni (controllo completo delle saldature, processi di distensione e finitura dei componenti saldati, non utilizzo di elementi di protezione, ecc) costituisce elemento importante di valutazione.



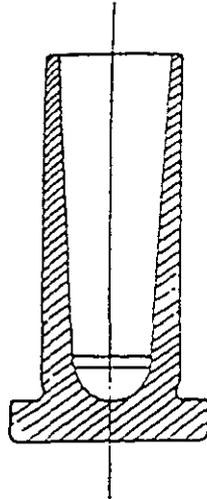
N.B. - La saldatura deve resistere a 49 bar



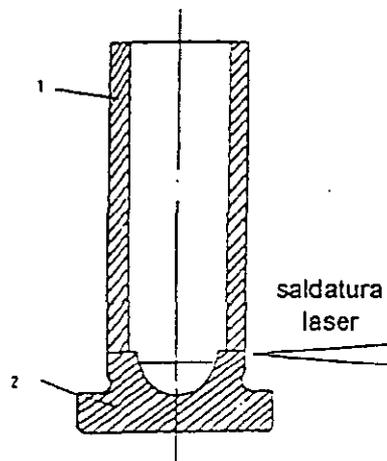
Comparazione economica tra la saldatura TIG e quella con laser a CO₂ di elementi di ammortizzatore

E' importante tenere presente che per potere utilizzare al meglio le potenzialità offerte dal laser in termini di: aumento della produttività, riduzione dei costi, riduzione dei pesi, è necessario che questa tecnologia venga introdotta su componenti appositamente progettati, di facile costruzione meccanica, che possano dare luogo, una volta assemblati ad un'ampia gamma di prodotti. Un semplice esempio che esprime questo concetto è rappresentato nella figura seguente dalla guida piattello punterie di motori diesel. La soluzione attuale prevede un greggio in ghisa conchigliata, lavorato di sgrossatura su tutte le superfici e sottoposto ad un processo di tempra totale. Il ciclo si conclude con le operazioni di rettifica delle superfici di scorrimento. La soluzione laser prevede l'unione di componenti elementari prefiniti: piattello in UX200CR13 su stelo in tubo C 10. Questa soluzione, che come si vede ha richiesto la riprogettazione dei componenti, permette di mantenere le tolleranze richieste a disegno, di ridurre i costi di fabbricazione e di aumentare la resistenza all'usura delle superfici interne ed esterne del piattello attraverso una più appropriata scelta del materiale.

Da questo esempio si comprende come, per calcolare l'economicità di utilizzo del processo di saldatura laser, sia necessario tenere in conto da una parte i costi di riprogettazione, ma dall'altra l'eliminazione di molte lavorazioni necessarie con la tecnica tradizionale. Solo raramente si è potuto osservare dei vantaggi economici dalla sola sostituzione della tecnica convenzionale con il laser.



mat.1 C10
mat.2 UX200CR13



*Esempio di utilizzazione
dei vantaggi della
saldatura laser dopo la
riprogettazione del
componente: guida
piattello punterie dei
motori diesel*

Da questo esempio si comprende come, per calcolare l'economicità di utilizzo del processo di saldatura laser, sia necessario tenere in conto da una parte i costi di riprogettazione, ma dall'altra l'eliminazione di molte lavorazioni necessarie con la tecnica tradizionale. Solo raramente si è potuto osservare dei vantaggi economici dalla sola sostituzione della tecnica convenzionale con il laser.

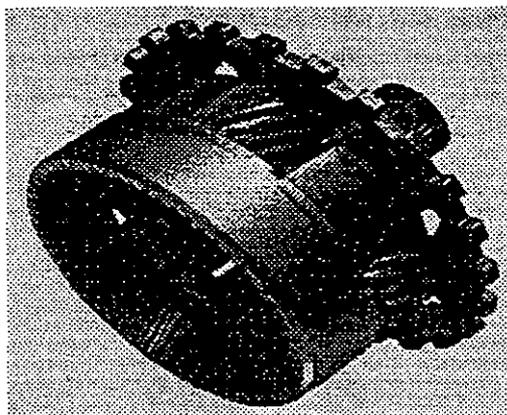
13. - Considerazioni economiche

Dopo aver ricapitolato i vantaggi che possono derivare dalla saldatura laser,

- riduzione del costo dei materiali,
- riduzione del costo di rilavorazioni,
- riduzioni nell'impiego di mano d'opera,
- riduzione dei costi di manutenzione,
- riduzione degli scarti,
- semplificazione della progettazione,
- lavorazione in linea.

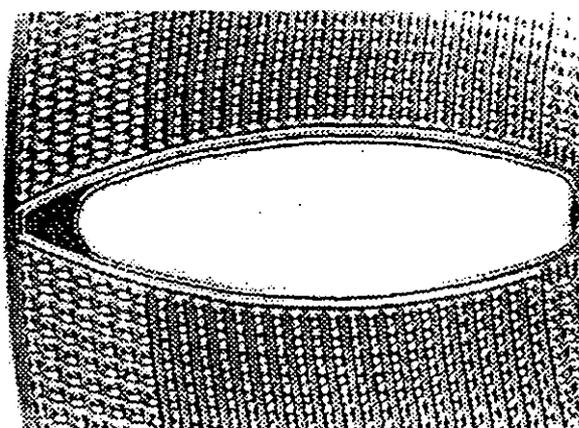
a titolo di esempio e di stimolo presentiamo nel seguito alcuni esempi di economicità del laser rispetto ai metodi convenzionali. Gli esempi sotto riportati fanno riferimento a reali utilizzi industriali.

Esempio 1: saldatura di componenti della trasmissione per autovetture



	laser (5kW)	fascio elettronico (15 kW)
tempo ciclo	12 s/pezzo	9 s/pezzo
investimento	laser 325 k\$	e - beam 475 k\$
	sistema 250 k\$	sistema 285 k\$
	totale 23.0 \$/h	totale 30.4 \$/h
funzionamento	elettricità 6.0 \$/h	elettricità 1.0 \$/h
	miscela 0.7 \$/h	olio 0.4 \$/h
	gas assist. 3.0 \$/h	
	totale 9.7 \$/h	totale 1.4 \$/h
manutenzione	lavoro (0.05 U/h) 2.5 \$/h	lavoro (0.2 U/h) 10.0 \$/h
	ottiche 13.0 \$/h	parti ricambio 30.0 \$/h
	totale 15.5 \$/h	totale 40.0 \$/h
TOTALE	48.20 \$/h	71.80 \$/h

Esempio 2: saldature di piastre di scambiatori di calore



	laser (1.5 kW)	resistenza
unità produttive	2 sorgenti laser con una unità di carico/scarico	14 stazioni con due unità di carico/scarico per ciascuna
manutenzione	2 persone su due turni (pari a circa 50 h/settimana)	8 persone su due turni (pari a circa 100 h/settimana)
personale operativo	1 U/turno	2.5 U/turno
TOTALE	240.74 \$/pezzo	655.30 \$/pezzo

Esempio 3: saldatura distanziali in alluminio per doppi vetri

per effetto dell'aumentata rigidità del componente per effetto della saldatura, si ha una riduzione di 0.3 mm nello spessore del nastro di alluminio.

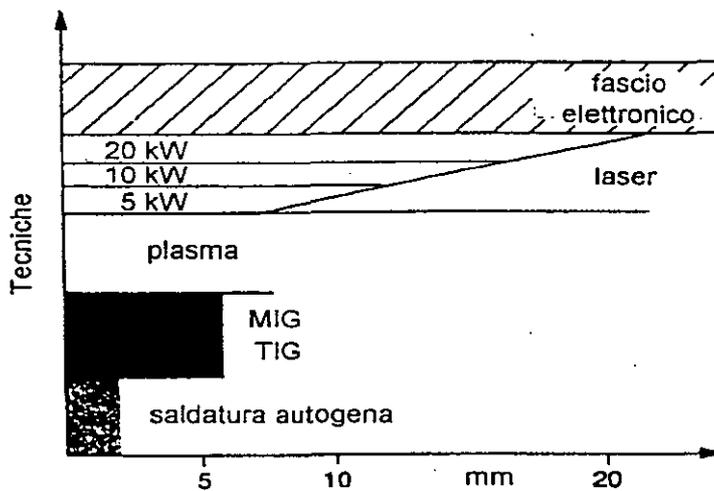
risparmio di materiale $3 \text{ cm} \times 0.03 \text{ cm} \times 8000 \text{ cm/min} = 720 \text{ cm}^3/\text{min}$ pari a 430.000 L/h
costo di funzionamento 6.000 L/h
costo di investimento 450.000.000 L

Tempo di recupero dell'investimento circa 1060 ore

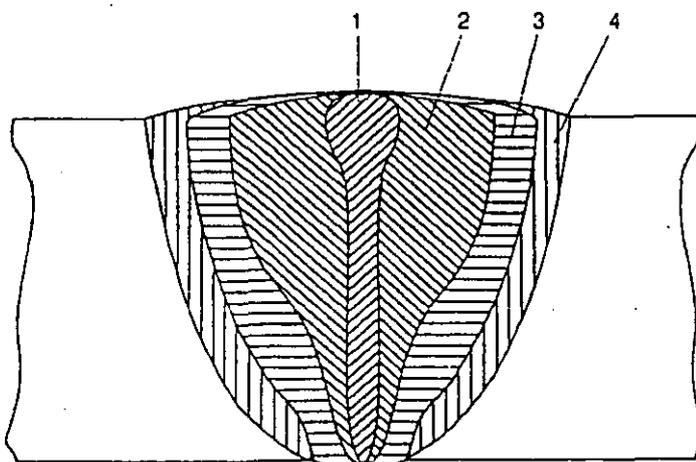
14. - Confronto con le tecniche convenzionali

Il laser ha sempre trovato delle difficoltà nella sostituzione di tecniche convenzionali di produzione, mentre raramente si è assistito a resistenze a nuove metodologie produttive; vi sono infatti molte tecniche utilizzate industrialmente per unire metalli.

Per considerare l'uso in modo corretto del laser è necessario conoscere come questo processo differisca dalle altre tecniche. Nelle figure seguenti, ad esempio, si hanno delle indicazioni degli spessori massimi saldabili con i vari metodi ed un confronto tra la forma dei cordoni di saldatura ottenibili.



Indicazione degli spessori massimi saldabili con varie tecniche



Indicazione della forma dei cordoni di saldatura saldabili con le diverse tecniche: 1) laser e fascio elettronico, 2) plasma, 3) MIG, 4) TIG

Da quest'ultima figura si può notare come i processi ad energia concentrata (laser e fascio elettronico) presentino forme simili del cordone di saldatura (sugli elevati spessori, o a basse velocità di lavoro, il cordone ottenuto con il laser si allarga leggermente rispetto a quello ottenuto con il fascio elettronico e la testa di chiodo si presenta più pronunciata) che differiscono fortemente da tutte le altre che sono caratterizzate da un maggiore apporto termico.

La seguente tabella fornisce gli elementi per un utile, anche se sommario, confronto tra le varie tecniche di saldatura.

	laser	fascio elettronico	resistenza	arco plasma
generazione di calore	bassa	modesta	modesta	molto alta
qualità	eccellente	eccellente	buona	eccellente
velocità	buona	alta	modesta	alta
costo investimento	alto	elevato	basso	basso
costo funzionamento	modesto	basso	basso	basso
costo attrezzaggio	basso	alto	alto	modesto
controllabilità	molto buona	buona	bassa	discreta
possibilità automazione	eccellente	buona	discreta	discreta
gamma materiali dissimili	molto ampia	ampia	limitata	limitata

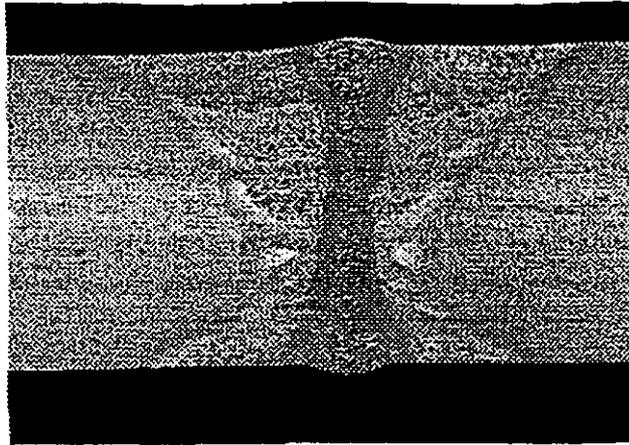
Analizziamo ora brevemente queste tecnologie di saldatura alternative al processo laser.

Brasatura

È un processo che non porta a fusione il materiali base dei lembi da congiungere, ma li unisce utilizzando come materiale d'apporto una lega basso fondente. Questo metodo è impiegato quando: le temperature di saldatura altererebbero le caratteristiche dei materiali base; materiali non saldabili devono essere uniti; lo scarso accostamento dei lembi richiede materiale d'apporto; può rendersi necessario il disassemblaggio dei pezzi. Quando nessuno di questi fattori è presente, la saldatura laser può ridurre i costi eliminando la lega ed aumentando la temperatura di esercizio del componente saldato. In alcuni casi il laser è utilizzato come sorgente di calore in impianti di brasatura. Questo può essere convenientemente applicato se l'energia incidente deve essere localizzata (per esempio in vicinanza di elementi sensibili al calore) oppure se sono richieste elevate velocità del processo.

Saldatura ad arco

Le molte varianti della saldatura ad arco utilizzano l'elettricità per apportare calore alla superficie del giunto che fluisce poi all'interno per conduzione termica. Questo produce cordoni di saldatura larghi, con limitate penetrazioni come è tipico delle saldature per conduzione. Saldature più profonde possono essere ottenute con passate multiple utilizzando materiale d'apporto. La quantità di calore fornita ai lembi da saldare è in ogni caso elevata, con conseguenti distorsioni termiche dei componenti, ampie zone alterate termicamente e scadenti microstrutture nel giunto per effetto dei lenti rapporti di solidificazione. Per contro l'ampia zona riscaldata permette accostamenti dei lembi meno critici di quanto sia necessario con il processo laser. La figura seguente dà un esempio di confronto con quanto è possibile ottenere con il laser: una sola passata laser da ogni lato del giunto è stata sovrainposta a 11 passate ad arco (lo spessore è 25 mm).



Una saldatura laser con penetrazione da entrambi i lati del giunto è stata sovrapposta ad un cordone ottenuto con l'arco in 11 passate successive su un pezzo di acciaio spesso 25 mm

Alcuni processi ad arco, come SMAW e SAW non sono confrontabili con il laser, rivolgendosi a spessori elevati. Il processo GMAW, denominato anche MIG, utilizza un elettrodo consumabile ed un gas di copertura. E' un metodo utilizzabile nella maggior parte dei metalli e delle leghe, in modo anche automatico, poichè la composizione dell'elettrodo può essere adeguata al tipo di saldatura da effettuare. Questo processo può produrre saldature multipasso molto profonde. Nel caso di spessori fino a 4 mm, il metodo GMAW è più lento rispetto al laser di un ordine di grandezza, causando elevate distorsioni termiche.

Il processo GTAW, anche noto come TIG, utilizza un elettrodo in tungsteno non consumabile circondato da un gas di copertura. E' un metodo più conveniente, rispetto al precedente, per la saldatura di spessori sottili, ma le velocità di saldatura sono ancora molto inferiori a quanto ottenibile con il laser, con apporto di calore molto superiore, che produce distorsioni.

Il processo PAW è simile al GTAW con l'eccezione che la torcia produce in questo caso un arco molto più contenuto spazialmente, facendo aumentare la temperatura dell' arco e la densità d'energia. Questo conduce a maggiori penetrazioni e a più elevate velocità rispetto al GTAW, ma sempre inferiori a quanto ottenibile con il laser. Le grandi torce richieste da questo metodo non permettono inoltre un facile accesso al giunto.

Saldatura a resistenza

E' generalmente utilizzata nella saldatura della lamiera. Il processo comprende l'aggancio delle parti da saldare, tramite i due elettrodi, ed il flusso di corrente elettrica sulle parti a contatto, fino a portarle a fusione. Questo processo presenta, rispetto al laser, le seguenti caratteristiche:

- l'accostamento dei pezzi è poco importante, essendo i pezzi posti necessariamente a contatto dall'azione meccanica degli elettrodi;
- possono essere saldate lamiere galvaniche, poichè la zona di saldatura è limitata,
- gli elettrodi tendono ad accumulare scorie, specialmente nella saldatura di lamiere ricoperte galvanicamente, richiedendo frequenti pulizie;
- si deve poter avere un accesso per gli elettrodi da entrambi i lati del giunto.

In conclusione si può affermare che il laser può fornire una buona alternativa alla saldatura a resistenza solamente quando il pezzo può essere progettato in modo da garantire un perfetto accostamento dei lembi da unire.

Saldatura a fascio elettronico

La saldatura a fascio elettronico è un processo a elevata energia che eccelera un fascio di elettroni verso il materiale da lavorare. Il calore generato in una zona ristretta produce una saldatura in penetrazione profonda, come il laser.

Si possono così sintetizzare le differenze pratiche tra questi due metodi di saldatura molto simili tra loro:

- con il fascio elettronico si può avere una penetrazione decisamente superiore a quanto ottenibile con il laser,

- gli elettroni si accoppiano bene con i metalli, facendo in modo che la maggior parte della loro energia venga assorbita. Il laser a CO₂ presenta invece delle difficoltà ad iniziare la saldatura a causa della elevata riflettività della maggior parte dei metalli alla lunghezza d'onda di 10.6 μm.
- gli elettroni vengono diffusi in aria, di qui la necessità di operare sotto vuoto, cosa che costituisce il maggior svantaggio di questa tecnica. La presenza dell'aria non altera solamente il processo, ma favorisce il surriscaldamento del cannone elettronico. Altre cause di danneggiamento possono provenire dall'olio vaporizzato proveniente dalla superficie dei materiali da unire. Il laser presenta efficienze temporali notevolmente superiori a quanto dato dal fascio elettronico;
- gli elettroni vengono deflessi dai campi magnetici, tutti i componenti posti nella zona sotto vuoto devono essere smagnetizzati. Questa difficoltà non esiste nel laser.
- nell'interazione degli elettroni con la superficie metallica vengono generati raggi X che richiedono adeguati schermi di protezione del personale. Il laser emette solamente radiazioni diffuse, che possono essere bloccate da schermi metallici, plastici o vetrosi.

15. - Sicurezza

" Tutte le forme d'energia sono pericolose, anche l'aumento di energia potenziale che si ha salendo le scale può esserlo ". In questa forma sdrammatizzante si può iniziare la trattazione di questo argomento. Certamente la luce laser non esce da questa regola, ma si deve dire che fino ad ora gli inconvenienti registrati nei sistemi industriali di lavorazione laser sono stati molto limitati sia nel numero che nella gravità. Ben più rischiosa da questo punto di vista si presenta la frequentazione delle discoteche, dove fasci laser nel visibile vengono fatti roteare nello spazio senza molte protezioni.

Si deve ricordare che sostanzialmente tre possono essere le cause di pericolo nell'uso del laser:

1. pericoli derivanti dalla luce laser diretta o diffusa,
2. pericoli elettrici,
3. pericoli da vapori e fumi;

vediamoli brevemente, applicati al processo di saldatura.

Pericoli derivanti dalla luce laser stessa

Le sorgenti laser impiegate nelle operazioni di saldatura sono classificate dalla normativa europea IEC 825 nella classe 4, come estremamente pericolose, sia per la luce diretta che per quella diffusa.

La tabella seguente indica per ogni sorgente impiegabile, gli effetti biologici della radiazione

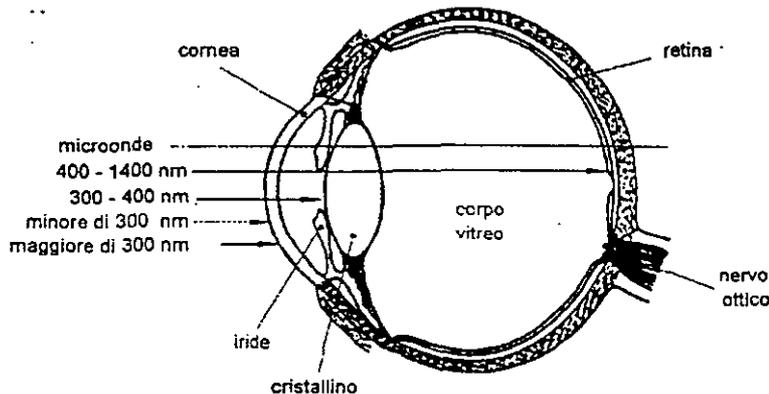
Sorgente laser	Lunghezza d'onda (nm)	Effetto biologico
CO ₂	10060	termico
Nd:YAG e vetro	1060	termico
GaAs (diodo)	780 - 840	termico (+)
He Ne	633	termico (+)
Argon	488 - 514	termico - fotochimico
XeF (eccimero)	351	fotochimico
XeCl (eccimero)	308	fotochimico
KrF (eccimero)	254	fotochimico

- (+) la potenza è insufficiente a causare danni, se non attraverso la visione oculare diretta del fascio

Le densità di potenza che possono essere ottenute dal fascio laser focalizzato, in propagazione libera, riflesso o diffuso da superfici metalliche, dati i livelli di potenza impiegati nelle lavorazioni laser, sono molto superiori a quelli previsti nelle normative di sicurezza (valori MPE: livelli di massima esposizione possibile). Come valore indicativo, per evitare danni agli occhi o alla pelle, utilizzando fasci a CO₂, bisogna che la densità di potenza, nei luoghi di possibile interazione, non superi la densità di potenza di circa 0.1 W/mm². Questo comporta che in ogni caso l'interazione diretta di queste radiazioni luminose con il corpo umano può essere dannosa.

l'occhio

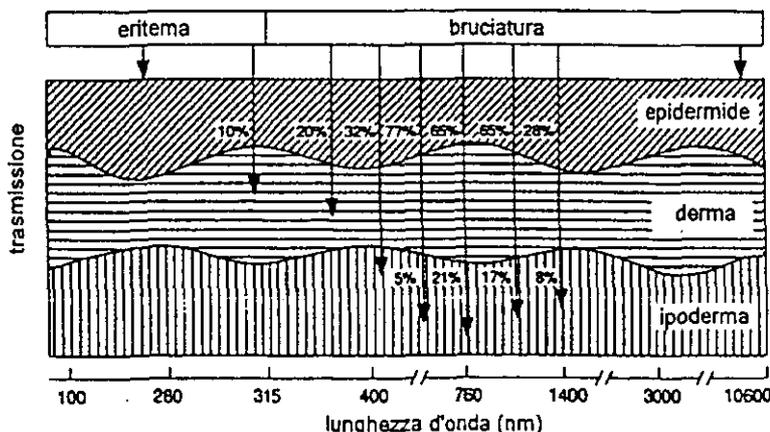
La lunghezza d'onda di emissione delle sorgenti Nd:YAG risulta essere particolarmente dannosa per l'occhio, poiché il cristallino può focalizzare il fascio sulla retina e causarvi una zona morta locale. Si deve tenere presente che questo danno non viene avvertito immediatamente. La lunghezza d'onda delle sorgenti a CO₂ non viene generalmente trasmessa dal cristallino, per cui in questo caso il danneggiamento si configura con una bruciatura della cornea e la formazione della cataratta. Per questo le persone addette alle lavorazioni laser dovrebbero sottoporsi periodicamente (tipicamente ogni sei mesi) ad una visita oculistica, per rilevare la presenza di eventuali danni locali. Per entrambe queste sorgenti laser esistono degli occhiali di protezione che devono essere sempre utilizzati dalle persone addette alla lavorazione.



Assorbimenti della struttura oculare alle varie lunghezze d'onda

la pelle

I pericoli per la pelle non devono essere sottostimati, anche se raramente può avvenire il contatto con la radiazione diretta o diffusa del fascio laser. Nella figura seguente sono schematizzati gli effetti per le varie lunghezze d'onda delle sorgenti utilizzate nelle lavorazioni meccaniche.



effetti sulla pelle delle varie lunghezze d'onda

Nel caso di lavorazioni tridimensionali, è da tener presente il pericolo che tutta o parte della potenza laser venga rivolta verso l'esterno della stazione di lavoro. In questo caso per le sorgenti a CO₂ sono indispensabili strutture in materiale acrilico di contenimento del volume di lavoro, con interposti degli elementi di protezione (ad esempio: gas in sovrappressione) che possano segnalare tempestivamente l'occasionale incidenza del fascio. Poichè, come visto, la luce emessa dalle sorgenti laser a Nd risulta essere particolarmente dannosa sia per gli occhi che per la pelle, è assolutamente necessario che i sistemi di lavoro relativi vengano completamente contenuti entro una struttura metallica o in muratura, per non permettere il contatto, anche occasionale, con l'uomo.

Nelle lavorazioni una parte del materiale sottoposto alla luce laser, viene fusa. Si possono allora avere gocce di materiale che vengono proiettate lontano dal getto del gas di assistenza. Particolare attenzione deve poi essere dedicata alla presenza nelle vicinanze della stazione di lavoro di materiali plastici (ad esempio tubazioni dei vari gas di assistenza) facilmente infiammabili con l'interazione accidentale con la luce laser riflessa o diffusa.

Nel caso dell'applicazione di saldatura, si possono avere ulteriori pericoli dalla radiazione infrarossa ed ultravioletta emessa dal plasma presente sopra il keyhole. Questa radiazione risulta essere particolarmente evidente nel caso di funzionamento impulsato delle sorgenti laser. E' bene per questo porre dei filtri (particolarmente per la luce UV) sopra gli occhiali normalmente utilizzati per la protezione dalla luce laser.

Si deve notare che anche il fascio guida He-Ne può causare dei danni: bisogna evitarne la visione diretta, almeno per fasci con potenza superiore a 0.5 mW.

Si suggerisce in ogni caso di prendere visione delle normative di sicurezza europee IEC 825 (norma CEI 76-2) e della "Guida per l'utilizzo degli apparati laser" (fascicolo CEI 1284 G).

Pericoli elettrici

Le sorgenti laser per lavorazioni meccaniche richiedono un'elevata potenza elettrica d'ingresso per l'eccitazione del mezzo attivo. Questo rende necessaria l'installazione di adeguati dispositivi di sicurezza sugli alimentatori, secondo quanto disposto dalle norme europee IEC 820 (norme CEI 76-1). Si deve tener presente che tutte le sorgenti laser impiegabili nelle lavorazioni meccaniche soddisfano questa normativa.

Si deve fare attenzione però che normalmente gli alimentatori elettrici delle sorgenti laser comprendono condensatori ed altri dispositivi che mantengono l'energia immagazzinata anche dopo lo spegnimento della sorgente stessa. Prima di ogni intervento sulle sorgenti, è buona precauzione quindi scaricare a terra questa energia. Bisogna considerare che questa è la causa prevalente di incidenti.

Pericoli da vapori e fumi

Nei processi di saldatura laser questo tipo di pericolo è minore rispetto al taglio.

I componenti ottici in trasmissione (finestra d'uscita della sorgente laser e lente di focalizzazione) sono costituiti da materiali (come GaAs e ZnSe) potenzialmente tossici. Quando questi componenti vengono danneggiati termicamente, si decompongono liberando vapori tossici, che normalmente ricondensano sulla loro superficie. E' necessario disporre di un luogo chiuso per la conservazione di questi componenti.

La seconda e più importante causa di pericolo proviene da fumi e vapori metallici che vengono prodotti nel corso della lavorazione. E' difficile fare delle esemplificazioni in questo caso, tanto è diversa la composizione dei materiali che possono convenientemente essere saldati con il fascio laser.

Precauzioni per la protezione dal fascio laser

Riteniamo, in conclusione, più interessante per il lettore dare dei suggerimenti pratici:

- tutte le operazioni di modifica e manutenzione di un sistema laser devono essere effettuate da personale propriamente addestrato,
- tutto il percorso del fascio laser dalla sorgente al punto di lavoro deve essere contenuto in apposite tubazioni metalliche. Questi condotti devono essere posti ad altezze non raggiungibili da mezzi di trasporto od altro. Nel caso della propagazione di fasci laser a CO₂ questa tubazione deve essere in leggera sovrappressione per proteggere i componenti ottici dalla polvere esterna,
- tutte le aperture nel percorso del fascio verso il punto di lavoro debbono avere degli interlocks di sicurezza che automaticamente spengano la sorgente laser .
- la testa di focalizzazione deve essere sempre racchiusa entro pareti di sicurezza in cui l'eventuale apertura delle porte comporti lo spegnimento immediato ed automatico della sorgente,
- il percorso del fascio laser deve sempre terminare su di una superficie metallica assorbente,
- finestre di osservazione per le stazioni di lavoro con laser Nd:YAG devono utilizzare materiali speciali di protezione. Vetro o materiali acrilici sono infatti trasparenti a questa lunghezza d'onda. Per evitare rischi di danni agli occhi, è meglio utilizzare impianti di visione televisivi a circuito chiuso, al posto delle finestre di osservazione,
- quando si opera con materiali metallici riflettenti, particolare attenzione deve essere dedicata per evitare che la luce laser diffusa da questi possa essere diretta verso le finestre di osservazione.

In conclusione: *"Il laser è un utensile sicuro, ma deve essere utilizzato correttamente. E' responsabilità dell'utilizzatore sapere come adoperarlo proficuamente in sicurezza".*

16. - GLOSSARIO

acciaio dolce

termine generico per un acciaio al carbonio che contiene carbonio a 0.1-0.25%

acciaio inossidabile

vasta classe di acciai in cui il cromo è caratteristica comune per aumentarne la resistenza a corrosione

asse ottico

retta passante per i centri di curvatura delle superfici ottiche di una lente

assorbimento

capacità di un mezzo ad assorbire una radiazione; dipende dalla lunghezza d'onda, aumenta con la temperatura e con la densità della potenza incidente

calore latente di trasformazione di fase

determina il calore necessario per fondere (o vaporizzare) un materiale dopo che questo è stato portato alla temperatura di fusione (o di vaporizzazione)

cavità risonante

zona compresa tra due specchi che contiene il mezzo attivo. Gli specchi riflettono avanti ed indietro la radiazione coerente generata per emissione stimolata (vedasi) per amplificarla. L'emissione del fascio avviene da uno dei due specchi (detto finestra d'uscita (vedasi)) che risulta essere parzialmente riflettente, mentre l'altro è totalmente riflettente. Detta anche semplicemente cavità o risonatore

cavità risonante ripiegata

cavità risonante in cui il cammino ottico è ripiegato, mediante specchi piani preallineati, per compattare le dimensioni di una cavità lunga

collimatore

dispositivo ottico con cui normalmente viene aumentato il diametro del fascio per ridurre la divergenza

conducibilità termica

regola il flusso di calore entro un materiale e quindi determina la velocità con cui il calore viene rimosso dalla zona di incidenza del fascio laser

densità di potenza incidente

rapporto tra la potenza del fascio laser incidente sul materiale e l'area della macchia focale sulla superficie del pezzo

depolarizzatore (ECQ)

dispositivo a spostamento di fase che trasforma un fascio polarizzato linearmente in uno polarizzato circolarmente

diametro del fascio

diametro di quella porzione del fascio in cui è contenuto l'86% della potenza d'uscita

divergenza

angolo con cui il fascio laser si allarga nel campo lontano

efficienza di fusione

rapporto tra l'energia necessaria per la fusione del materiale e quella totale ceduta al pezzo

emissione stimolata

quando un atomo, ione o molecola capace di azione laser, eccitato ad un più alto livello di energia da una fonte esterna, viene investito da una radiazione elettromagnetica risonante con questo livello di energia metastabile, questa ne stimola il decadimento facendogli emettere l'energia in eccesso. Queste due radiazioni elettromagnetiche (quella che è servita da stimolo e l'altra emessa dall'elemento) hanno la stessa lunghezza d'onda, fase e coerenza spaziale. La luce amplificata in questo modo risultante è intensa, monocromatica e coerente, cioè è una luce laser

fattore di qualità del fascio M^2

rapporto della divergenza di un fascio reale rispetto ad uno limitato per diffrazione avente lo stesso diametro minimo. Caratterizza la focalizzabilità del fascio laser generato da una sorgente

finestra d'uscita

specchio del risonatore parzialmente riflettente che trasmette il fascio laser (lo specchio opposto è totalmente riflettente)

funzionamento continuo (c.w.)

modo di operazione a potenza costante nel tempo

funzionamento impulsato

la potenza d'uscita viene modulata nel tempo. Nelle sorgenti laser a CO_2 la potenza di picco è normalmente poco superiore al valore nominale; nelle sorgenti YAG questa può essere molte volte superiore a questo valore

funzionamento in superimpulso

caratteristico delle sorgenti a CO_2 in cui viene applicata una energia di eccitazione di intensità superiore a quella normalmente usata per il funzionamento continuo. Permette di ottenere potenze di picco da due a otto volte circa superiori al valore nominale

funzionamento in iperimpulso

caratteristico di alcune sorgenti a CO_2 in cui il funzionamento in superimpulso (con potenze di picco 2-3 volte il valore nominale) è sommato ad un livello continuo. Può essere utile per la lavorazione di materiali altamente riflettenti

gas di assistenza (saldatura)

gas che favorisce la lavorazione laser e contribuisce a mantenere pulito il gruppo di focalizzazione del fascio. Nella saldatura in penetrazione profonda serve a controllare il plasma (vedasi) che si viene a formare sopra il keyhole (vedasi)

HAZ (heat affected zone)

estensione della zona termicamente alterata

inversione di popolazione

si ha quando nel mezzo attivo vi sono più molecole (o atomi o ioni) che sono in uno stato eccitato rispetto a quante ve ne siano allo stato fondamentale. E' una situazione indispensabile affinché avvenga l'emissione stimolata (vedasi) e dar luogo all'effetto laser

kerf

larghezza del materiale perso durante l'azione di taglio (larghezza del solco di taglio)

keyhole

capillare che viene creato dall'incidenza su un materiale metallico di un fascio laser con densità di potenza superiore a circa $5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. E' alla base della saldatura in penetrazione profonda (vedasi). Riempito di vapore metallico durante l'incidenza del fascio, viene successivamente chiuso dal metallo fuso che lo circondava. E' anche alla base del processo di taglio ad alta velocità di materiali metallici e non, in spessori sottili

laser

acronimo di *Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. E' costituito da un risonatore (vedasi), con due specchi alle estremità, che contiene il mezzo attivo (vedasi) che deve essere eccitato in uno stato metastabile da uno stimolo esterno (normalmente una scarica elettrica o luminosa). La transizione da questo stato metastabile verso quello fondamentale è accompagnata da emissione luminosa (fotoni) coerente

laser a CO₂

laser a gas in cui il CO₂ è l'elemento attivo. Consente di ottenere elevate potenze d'uscita (fino a 45 kW in sorgenti industriali). Il mezzo attivo è costituito generalmente da una miscela di CO₂, N₂ ed He. La molecola di CO₂ è quella che genera l'effetto laser; l'azoto è indispensabile per creare l'inversione di popolazione (trasmettendo la sua energia per urto alle molecole di anidride carbonica); l'idrogeno favorisce lo smaltimento del calore. Ha una efficienza di circa 10-12%

laser a CO₂ sigillato

laser a CO₂ in cui la miscela laser contiene degli additivi che impediscono la dissociazione nel tempo dei componenti per effetto termico; in questo modo si può operare per alcune ore (3000-5000 in media) senza flusso di gas. Dopo questo tempo il tubo va sostituito. Sono disponibili con potenze fino a circa 200 W. Sopra 100 W di potenza d'uscita richiedono il raffreddamento ad acqua

laser a flusso assiale

laser a gas in cui la direzione del flusso del gas coincide con quella di propagazione del fascio laser generato; possiede una buona capacità ad essere focalizzato

laser a flusso trasversale

laser a gas in cui la direzione del flusso del gas è perpendicolare a quella di propagazione del fascio generato. Sono caratterizzati da una struttura molto semplice, ma generano fasci laser scarsamente focalizzabili

laser a gas

laser in cui il mezzo attivo è gassoso. L'eccitazione normalmente avviene mediante scarica elettrica in DC (prevalentemente), RF (il suo uso sta crescendo) o AC (scarsamente impiegata)

laser a stato solido

laser in cui il mezzo attivo è costituito da materiale solido (normalmente a forma di barretta, ma anche nella configurazione slab). L'eccitazione avviene normalmente mediante lampade flash

laser Nd in vetro

sorgente a stato solido in cui il mezzo attivo è costituito dagli ioni di neodimio dispersi in una matrice vetrosa. Viene eccitata normalmente da lampade flash

laser Nd:YAG

sorgente a stato solido in cui il mezzo attivo è costituito dagli ioni di neodimio dispersi in un granato di ittrio ed alluminio (Yttrium-aluminium-garnet). Viene eccitata normalmente da lampade flash. Genera potenze maggiori e con maggiori frequenze di ripetizione rispetto alle sorgenti in vetro. Ha una efficienza di 2-4 %

lente asferica

lente con una superficie non sferica per eliminare aberrazioni; consente le migliori condizioni di focalizzazione di un fascio

lente menisco

lente avente una superficie concava e l'altra convessa

lente piano-convessa

lente con una superficie piana ed una convessa; presenta forti aberrazioni sui grandi diametri

limitato per diffrazione

caratteristica di un sistema ottico in cui solo l'effetto della diffrazione determina la qualità dell'immagine prodotta

luce coerente

radiazione luminosa composta da treni d'onda che vibrano in fase uno con l'altro

mezzo attivo

mezzo in cui si può avere l'azione laser, piuttosto che il semplice assorbimento, ad una data lunghezza d'onda. Può essere solido, gassoso o liquido. Deve avere atomi, ioni o molecole che possano essere eccitati in uno stato metastabile da una fonte di energia esterna

modo

caratteristica di ogni sorgente; rappresenta la distribuzione di intensità lungo una sezione trasversale del fascio generato: E' rappresentato come TEM_{pq} (Transverse Electromagnetic Mode, con p e q rappresentanti il numero di nodi in cavità in direzioni tra loro ortogonali) Il modo fondamentale o gaussiano TEM_{00} rappresenta un fascio ideale limitato per diffrazione. Più alto è l'ordine del modo (valori p,q crescenti), minori sono le prestazioni di focalizzazione del fascio. Può essere anche rappresentato dal fattore di qualità del fascio M^2 (vedasi). Il modo di una sorgente può essere modificato inserendo un diaframma nella cavità

numero-f

rapporto tra la lunghezza focale del dispositivo di focalizzazione (lente o specchio) ed il diametro del fascio laser su di esso incidente. In assenza di aberrazioni, determina, assieme al fattore di qualità del modo M^2 , la dimensione della macchia focale e la relativa profondità di campo

piano di incidenza

piano contenente il fascio incidente e la normale alla superficie di incidenza

plasma

gas o vapore metallico fortemente ionizzato che si forma sopra la zona di interazione del fascio laser con la superficie metallica

polarizzazione

la luce è un fenomeno ondulatorio; essa si propaga in linea retta, con l'effetto ondulatorio dei campi magnetici ed elettrici che la formano trasversalmente alla direzione di propagazione. Quando il campo elettrico può ruotare uniformemente su 360° , si parla di polarizzazione

circolare; quando rimane diretto secondo una precisa direzione, si ha una polarizzazione lineare. La relazione angolare tra il piano di polarizzazione e quello di incidenza, stabilisce lo stato di polarizzazione della luce (vedasi)

profondità di campo

zona di lavoro di un fascio focalizzato in cui la dimensione della macchia non aumenta più di una determinata quantità (normalmente del 5%) rispetto al suo valore minimo

rapporto di forma

rapporto tra la profondità del cordone di saldatura e la sua larghezza media

rivestimento dielettrico

rivestimento altamente riflettente costituito da strati alternati di materiali rispettivamente ad indice di rifrazione superiore ed inferiore rispetto a quello del substrato

saldatura per conduzione

si ha quando l'energia del fascio laser incidente è sufficiente per fondere il materiale metallico nella zona di interazione ma non per vaporizzarlo; il calore in questo modo sviluppato in superficie penetra nel materiale per diffusione termica. Il processo risulta essere regolato dalla conducibilità termica del materiale (vedasi). Il cordone di saldatura prodotto ha una forma emisferica, con rapporto di forma (vedasi) di circa 1. Avviene per densità della potenza incidente inferiore a 10^6 W/cm²

saldatura per penetrazione profonda

per densità della potenza laser incidente superiori a circa $5 \cdot 10^6$ W/cm² si ha anche la vaporizzazione del materiale metallico nella zona di interazione con la conseguente formazione del keyhole (vedasi). Il cordone presenta una forma allungata cuneiforme, con rapporti di forma che possono raggiungere valori di 5-7

spostamento di fase

un cambiamento nella direzione di polarizzazione del fascio

stato di polarizzazione p

la polarizzazione è parallela al piano di incidenza (vedasi)

stato di polarizzazione s

la polarizzazione è perpendicolare al piano di incidenza (vedasi)

taglio laser di fusione

taglio di materiali metallici con assistenza di gas inerte ad alta pressione che espelle il materiale fuso. Non ossida il bordo di taglio



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal **Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali**
dell' **Associazione Italiana di Metallurgia**
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
**Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili**

**La saldatura al fascio elettronico per unioni
omogenee e eterogenee**
S. Tosto

Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

Table 1 The maximum power densities of the various heat sources used for welding

Heat source	Maximum power density $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
Gas flame	$5 \cdot 10^3$
Electric arc	10^4
Plasma	10^5
Laser beam (continuous)	10^7
Electron beam	10^7

UN SISTEMA DI TRATTAMENTO MEDIANTE FASCIO ELETTRONICO RISULTA COSTITUITO
DAI SEGUENTI ELEMENTI FONDAMENTALI:

- un cannone elettronico con sistema da vuoto;
- un generatore di alta tensione;
- un sistema di lenti elettromagnetiche per la focalizzazione del fascio
- una camera di lavoro con relativo impianto da vuoto;
- un quadro di comando e controllo;
- un sistema di spostamento con movimentazione del campione;
- un programmatore a controllo numerico dei parametri di processo e della movimentazione del campione;
- un sistema di registrazione dei parametri fondamentali;
- un sistema di deflessione e pulsazione del fascio elettronico.

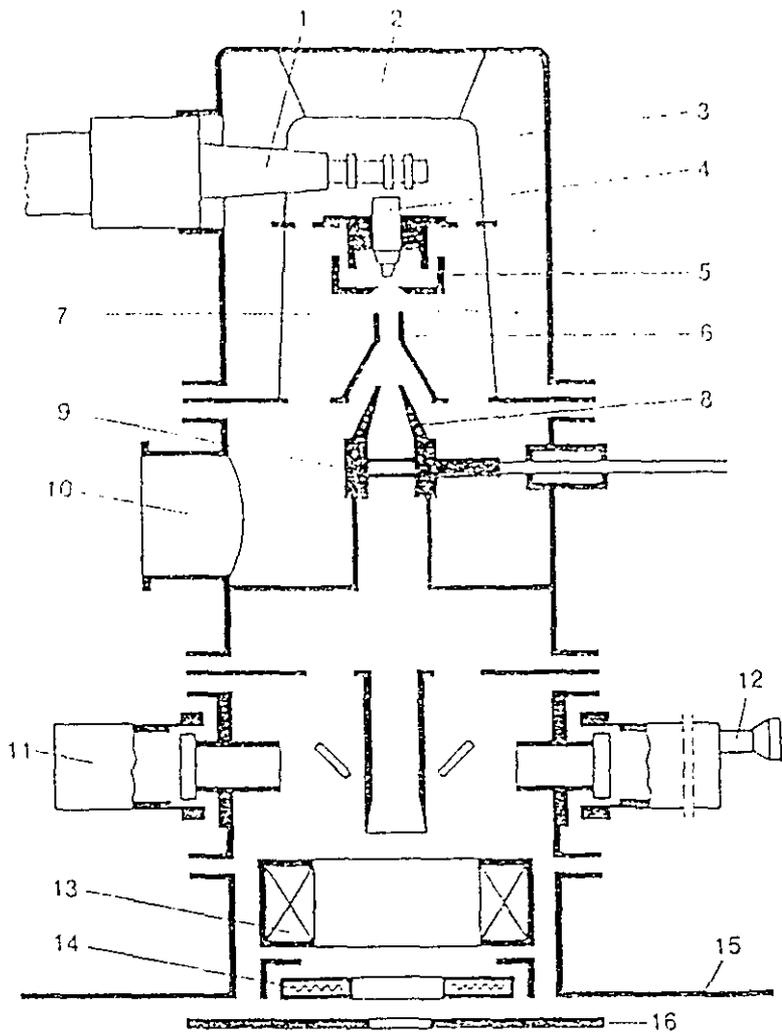


Fig. 188 Cross section of an electron beam gun:

- 1 High voltage cable
- 2 Lid of electron gun which can be opened to change the cathode
- 3 High voltage insulator
- 4 Cathode exchange cartridge
- 5 Control electrode
- 6 Anode
- 7 Beam generator space
- 8 Pressure stage
- 9 Column valve
- 10 Connections for evacuating the beam generator
- 11 Lighting for the optical viewing system
- 12 Viewing system with telescope
- 13 Focusing lens
- 14 Beam deflection system
- 15 Part of the working chamber
- 16 Heat shield.

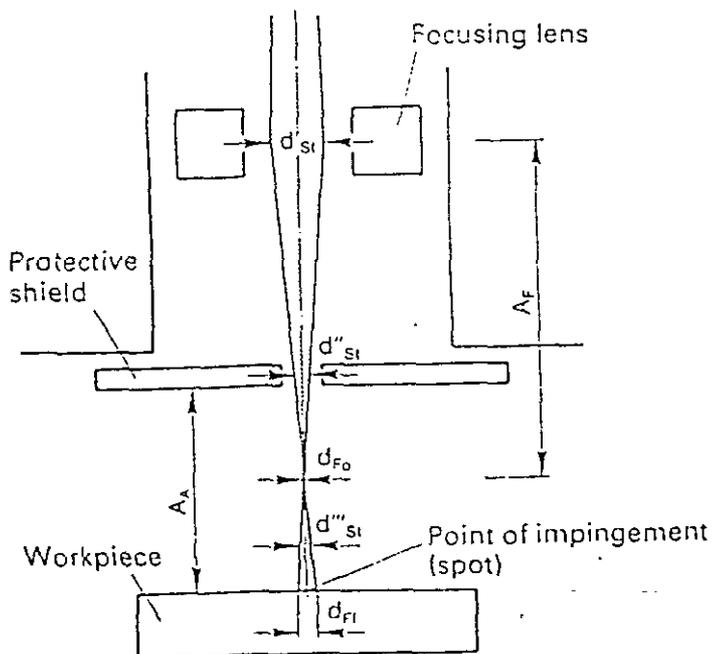


Fig. 55 Definition of focal diameter d_{Fo} , spot diameter d_{Fl} and beam diameter d_{St} in various planes of measurement, working distance A_A and focal distance A_F .

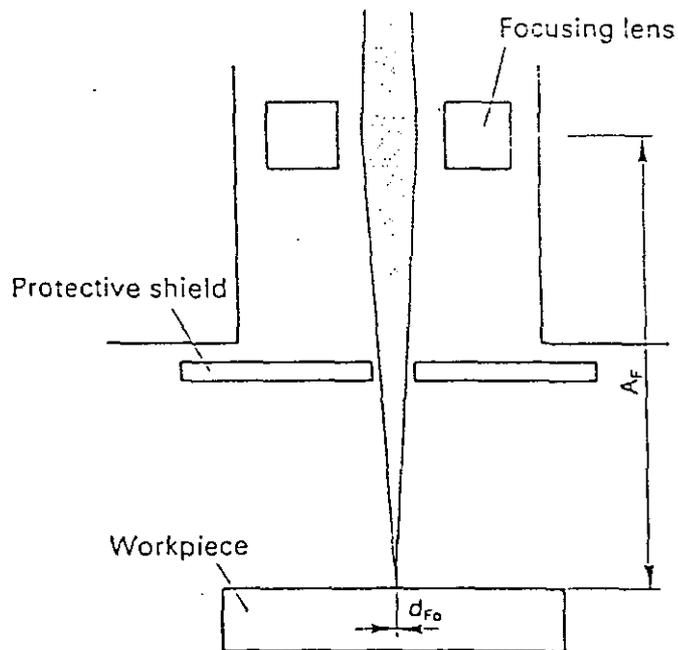


Fig. 56 Distance A_F under 'normal' focusing conditions.

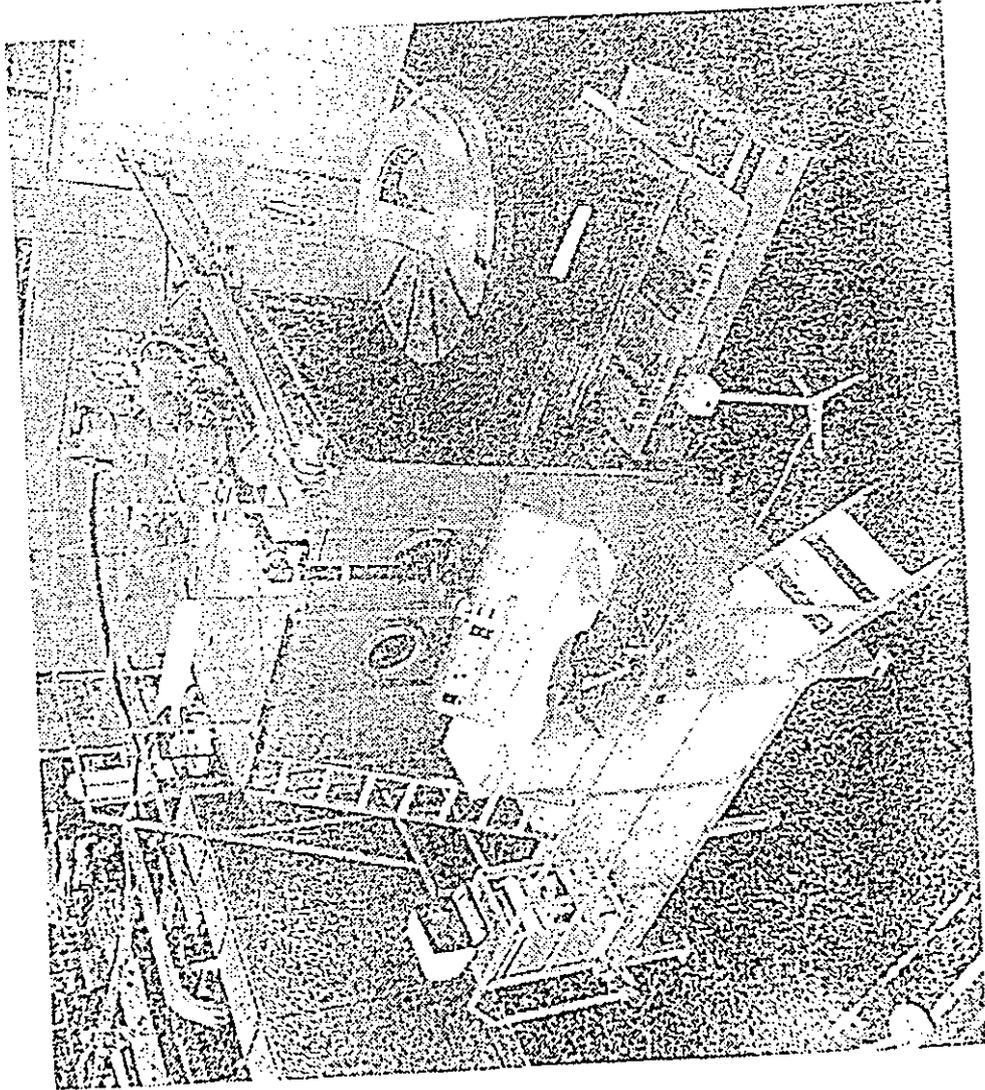


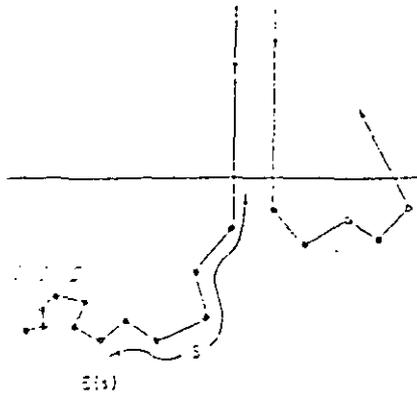
Fig. 187 Front view of an electron beam welding machine with the working table run out of the working chamber showing the rotary positioning arrangement. Maximum beam power $P = 30 \text{ kW}$, $v = 10 \text{ m}^3$.

TABELLA I — Caratteristiche degli impianti a fascio elettronico dell'ENFA.

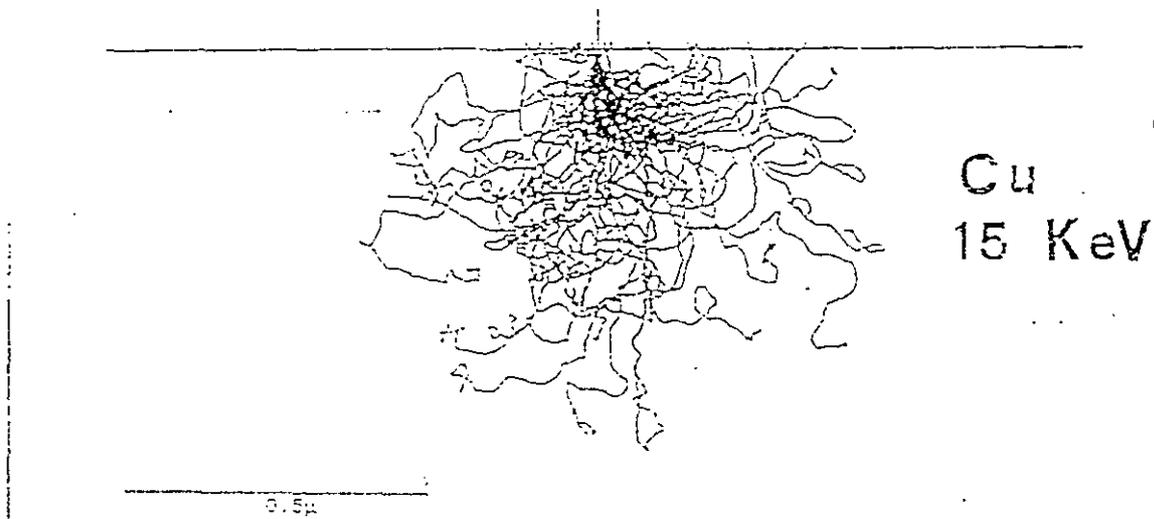
Impianto	ALCATEL	ALCI-TECHMETA
Anno di installazione	1969	1985
Potenza max (kW)	10	50
Dimensioni della camera (m ³)	0,6	1,3
Tensione max (kV)	60	75
Catodo	a pasticca a risc. ind.	a pasticca a risc. ind.
Posizione cannone	verticale	vert./orizz.
Bobine di focalizzazione	1	2
Movimenti	X, Y, θ	X, Y, θ
Vuoto nella camera (mbar)	10^{-4}	10^{-4}
Tempo di evacuazione (min)	10	3
Deflessione del fascio	si	si
Pulsazione del fascio	no	si
Controllo numerico dei movimenti	no	si
Contr. numer. parametri del fascio	no	si
Operazione in vuoto locale	no	predisposto

TABELLA II — Potenzialità dell'impianto da 50 kW.

Potenza (kW)	0,5-50
Spessori saldabili (mm):	
acciaio	0,5-100
alluminio	0,5-120
rame	0,5-60
Dimensioni massime dei componenti (mm):	
lunghezza	1300 (aumentabile con prolunga)
altezza	600 (aumentabile a 900)
profondità	900
Peso max del pezzo (kg):	
sulla tavola	1000
sul mandrino	300
Capacità operative in saldatura (mm):	
— corsa movimento X	610
— corsa movimento Y	400
— diametro circolare max	850



GLI ELETTRONI DEL FASCIO INTERAGISCONO CON I NUCLEI E GLI ELETTRONI DEL MATERIALE. LE COLLISIONI CON I NUCLEI SONO ESSENZIALMENTE ELASTICHE E CAMBIANO DRASTICAMENTE LA DIREZIONE DI MOTO.



IL TRASFERIMENTO DI ENERGIA AVVIENE MEDIANTE COLLISIONI ANELASTICHE CON GLI ELETTRONI DEL MEZZO.

TRAMITE PROCESSI DI RILASSAMENTO, L' ENERGIA ASSORBITA E' CONVERTITA

**** "ISTANTANEAMENTE" ****

IN CALORE RETICOLARE (RISCALDAMENTO "QUASI-ADIABATICO").

NEI METALLI IL TEMPO MEDIO DI COLLISIONE ELETTRONE - FONONE E' DELL' ORDINE DI 10^{-13} SEC; PERTANTO L' ESISTENZA DI DUE TEMPERATURE (ELETTRONICA E RETICOLARE) E' LIMITATA A TRANSIENTI TEMPORALI DI QUESTO ORDINE DI GRANDEZZA.

I TEMPI DI INTERAZIONE USUALMENTE UTILIZZATI SONO:

$1-10^{-4}$ SEC PER LE SORGENTI CONTINUE;

QUALCHE DECINA DI NANOSECONDI PER LE SORGENTI PULSATE;

IN TALI INTERVALLI DI TEMPO RETICOLO ED ELETTRONI POSSONO CONSIDERARSI

***** IN EQUILIBRIO TERMICO *****

For the range of accelerating voltages from 0.5 to 3×10^3 kV, the depth of electron penetration into metals can be found from the formula

$$\gamma\delta = 10^{-5}V^{3/2} \quad (3.15)$$

where γ is the density, g/cm^3 ; δ the electron path, cm; and V the accelerating voltage, kV.

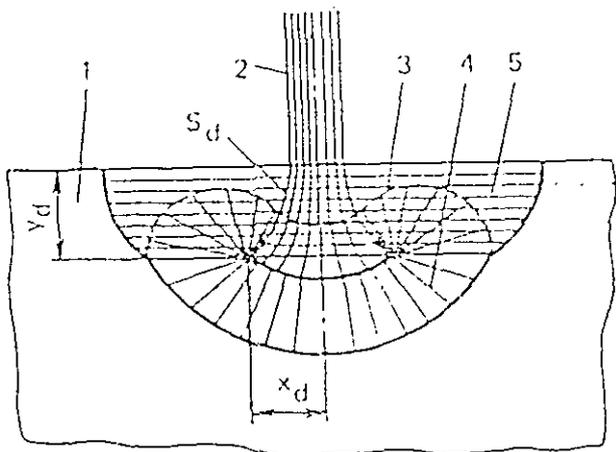


Fig. 3.10. Model of the zone of interaction of a monokinetic electron beam with a substance: 1, target; 2, electron beam; 3, region of beam scattering through small angles due to collisions; 4, region of diffusely scattered electrons; 5, backward scattering through large angles due to collisions; subscript d at the symbols of parameters identifies the mean diameter

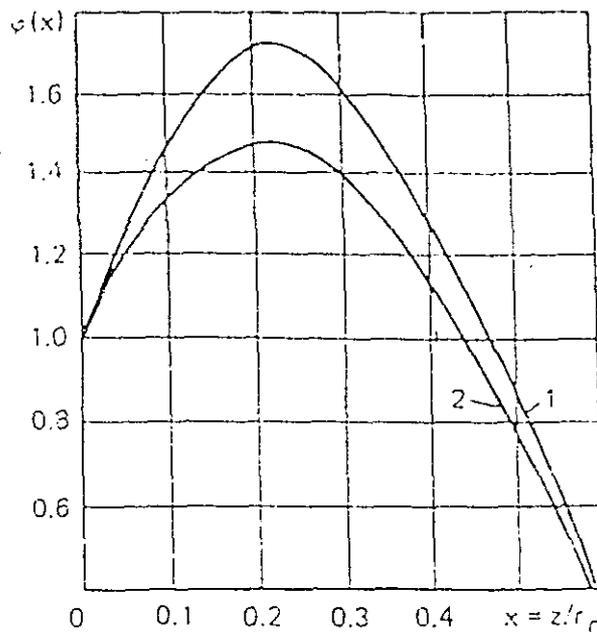


Fig. 3.9. Distribution of released electron energy: 1, Gorelik's curve; 2, Spenser's curve

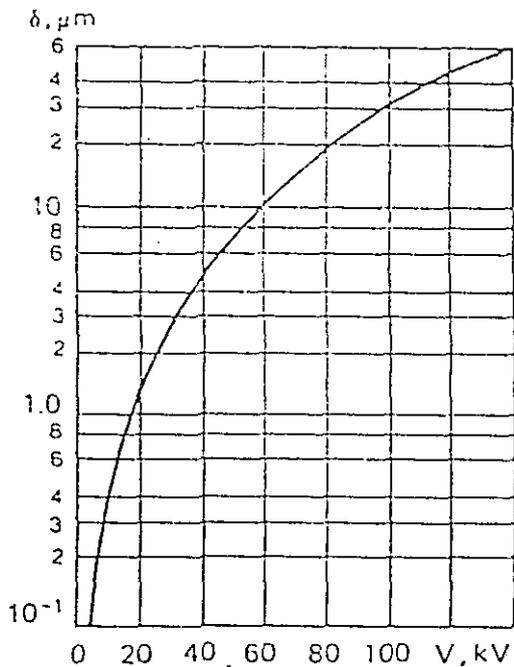


Fig. 3.6. Depth of penetration of electrons into iron as a function of accelerating field

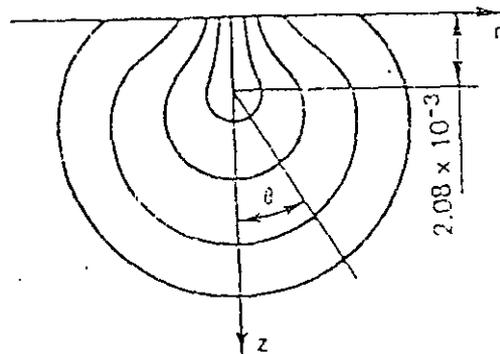


Fig. 3.8. Profiles of equal energies $|dE/dv|/|dE/dv|_0$ coupled from the electron beam to an aluminum plate; $|dE/dv|_0 = 10^6 \text{ MeV/cm}^3$

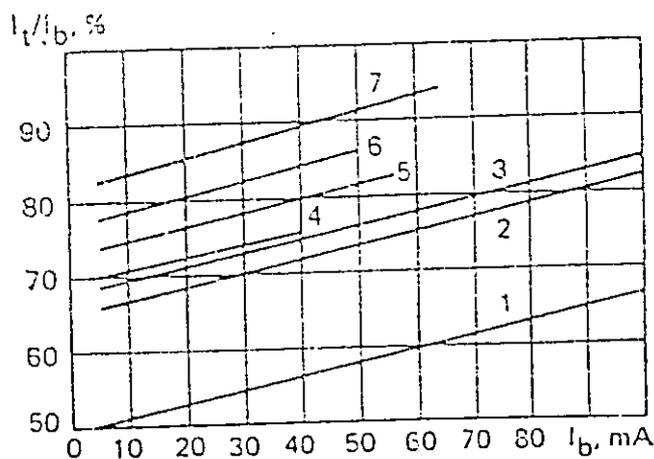
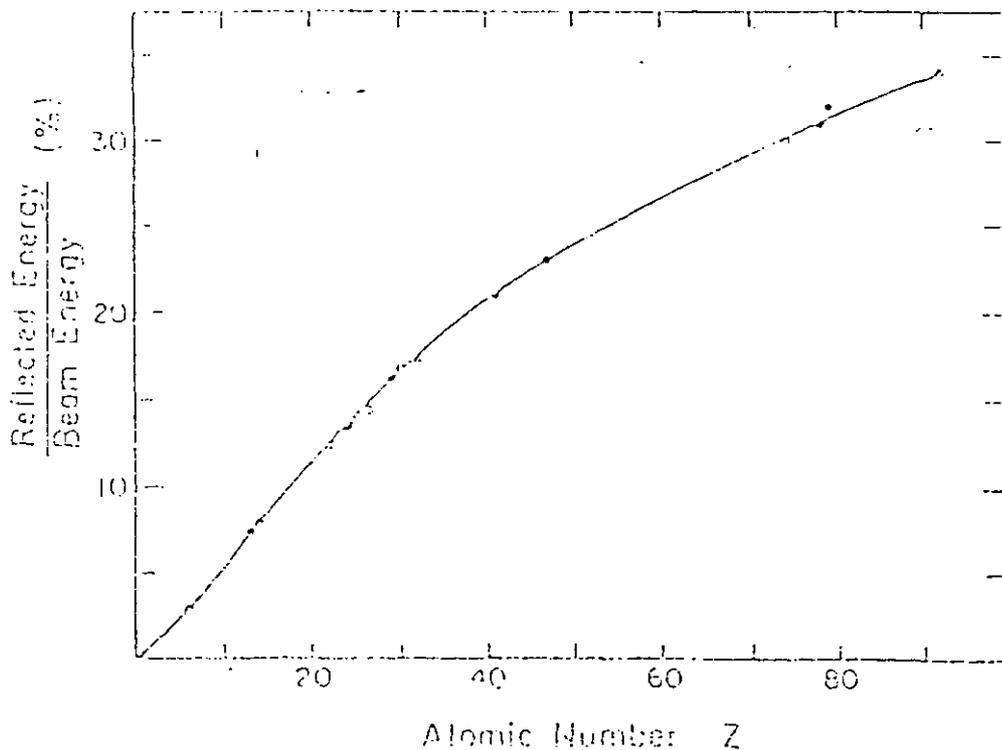


Fig. 14.1. Current I_t through the target of W (1), Mo (2), Ni and Cu (3), stainless steel (4), Zr (5), Ti (6), and Al (7) as a function of beam current I_b

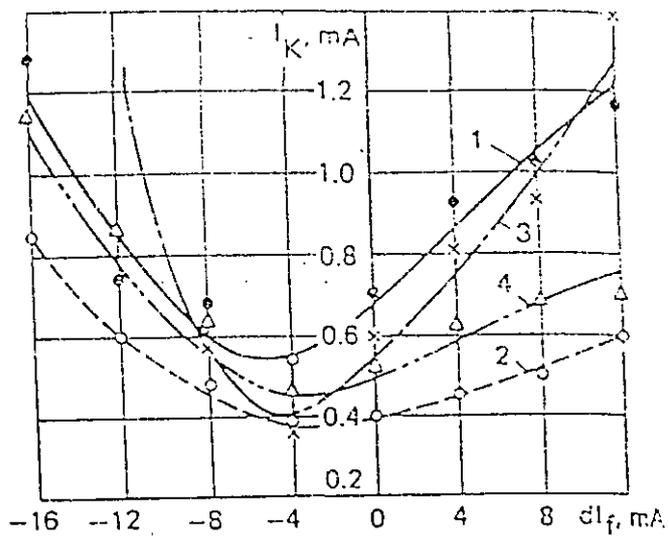


Fig. 14.2. Secondary emission current I_s as a function of the degree of focusing, dI_f , in welding stainless steel at various values of energy input per unit weld length: 1, 6540 J/cm; 2, 4360 J/cm; 3, 3275 J/cm; 4, 2180 J/cm

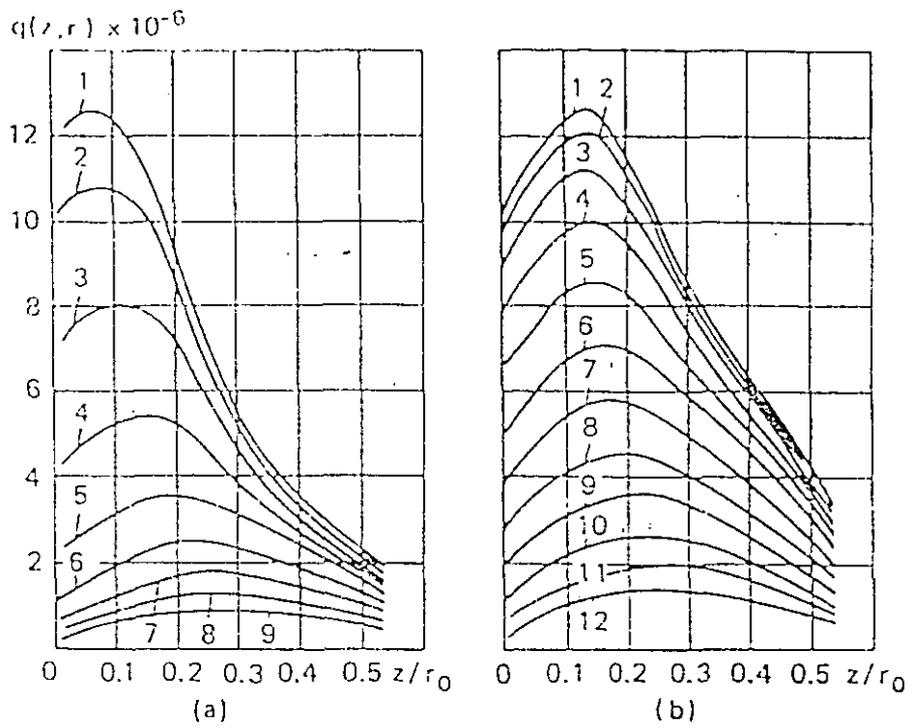


Fig. 3.12. Spatial distribution of source heat density

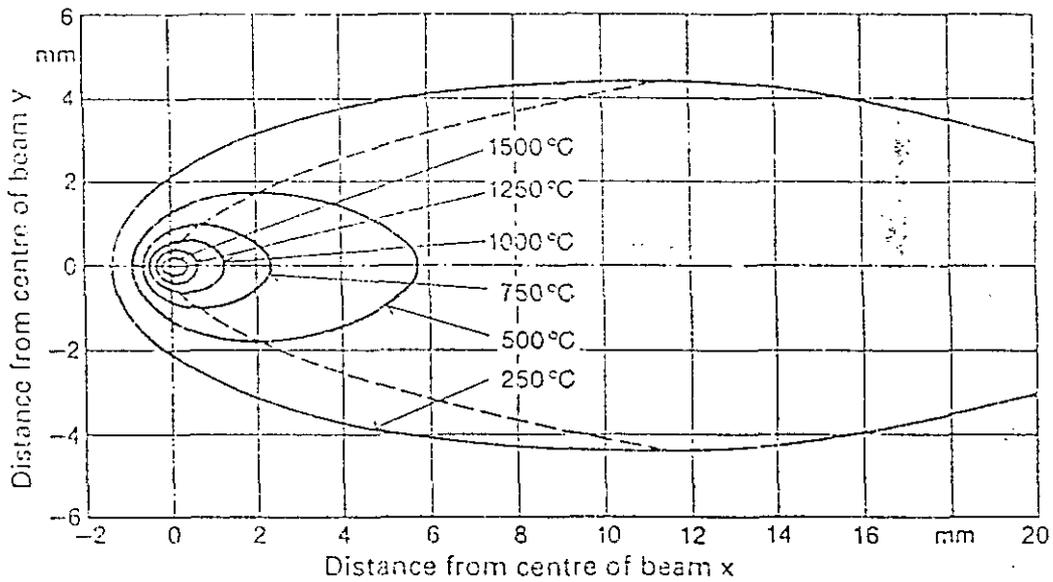


Fig. 83 Quasi-stationary temperature field when electron beam welding St 42; $t = 8 \text{ mm}$, $v_S = 6.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [71].

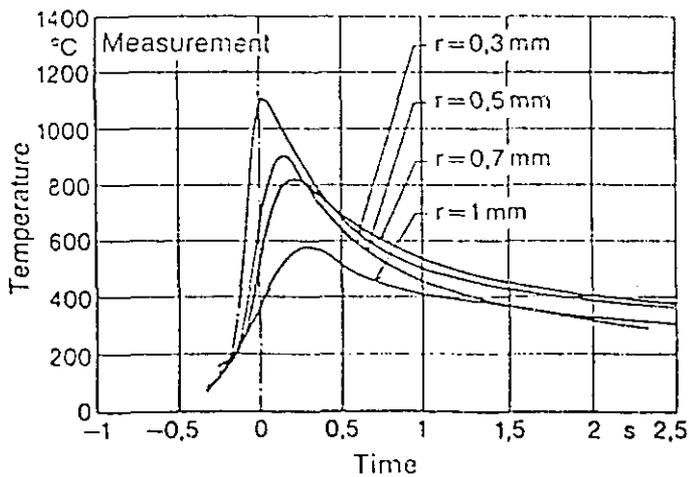


Fig. 84 Time – temperature curves at various distances from the centre of a weld in St 52 [71]. $t = 8 \text{ mm}$, $v_S = 6.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

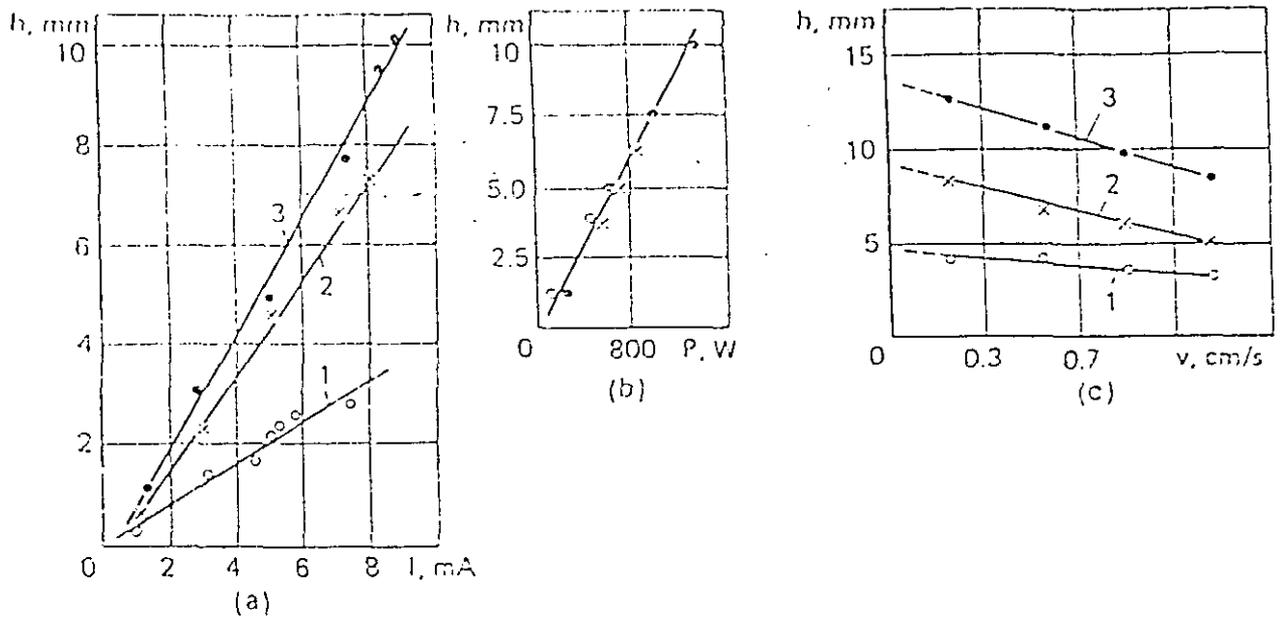


Fig. 11.10. Penetration depth as a function of beam current (a), power (b) and weld speed (c); (a) stainless steel at $v = 1.2$ cm/s, $V = 100$ kV (curve 1) $V = 130$ kV (curve 2), and $V = 150$ kV (curve 3); (b) stainless steel at $v = 1.2$ cm/s and $V = 100$ to 150 kV; (c) low-carbon steel at $V = 100$ kV and $I = 7$ mA (curve 1), $V = 125$ kV and $I = 10$ mA (curve 2), and $V = 150$ kV and $I = 13$ mA (curve 3)

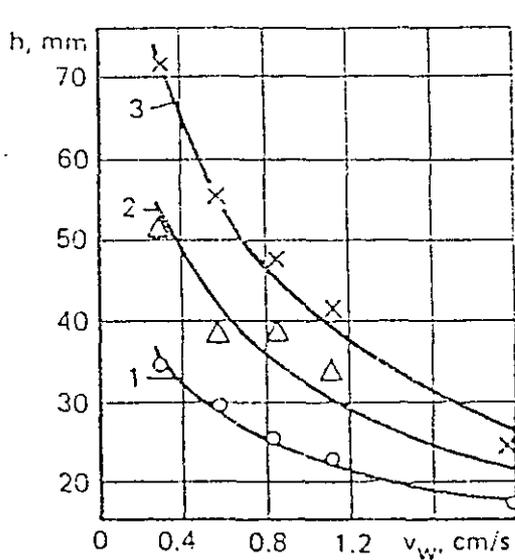


Fig. 11.11. Penetration depth as a function of weld speed and accelerating voltage V at constant power of 10 kW and power density of about 5×10^6 W/cm² ($r_e = 0.25$ mm): 1, 30 kV; 2, 63 kV; 3, 100 kV [3]

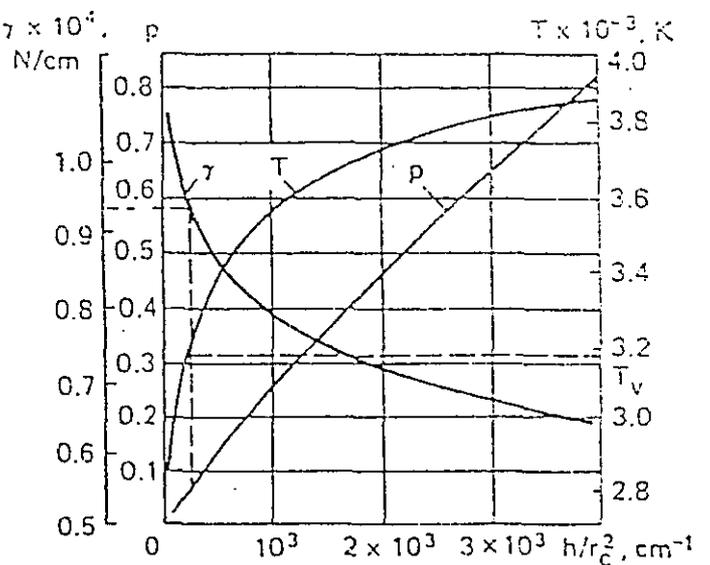


Fig. 11.12. Maximum values of T (K) and vapor pressure p (MPa) and minimum values of surface tension γ (N/cm) along the cavity axis versus parameter h/r_c^2 defining cavity dimensions [3]

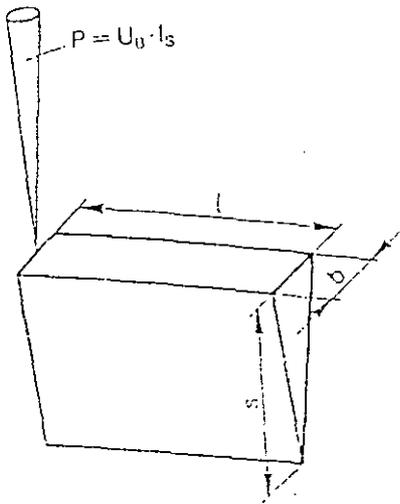


Fig. 61 The volume of material melted by an electron beam.

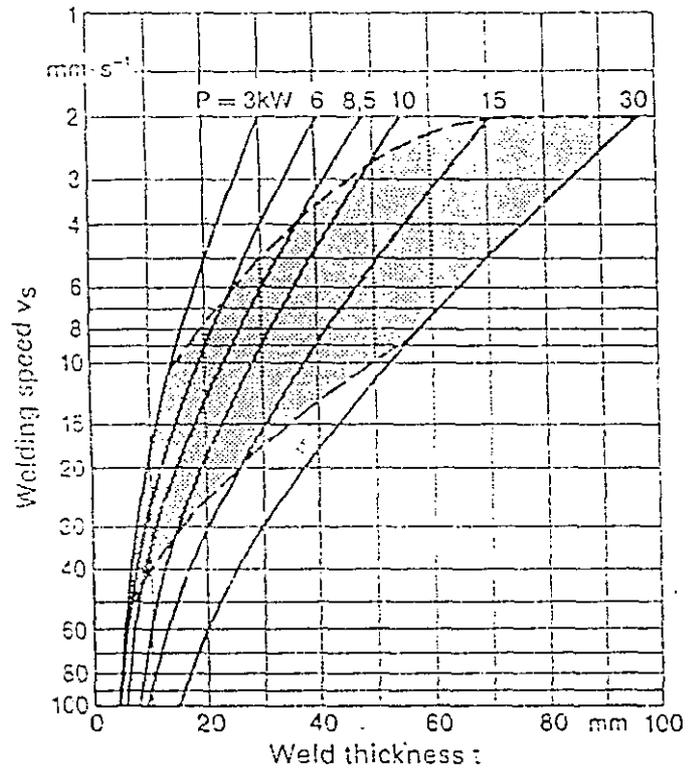


Fig. 62 Guide values for the thickness of welds which can be achieved in steel as a function of beam power and welding speed. P = the maximum available power of the welding machine. Shaded area = the economically viable area of working.

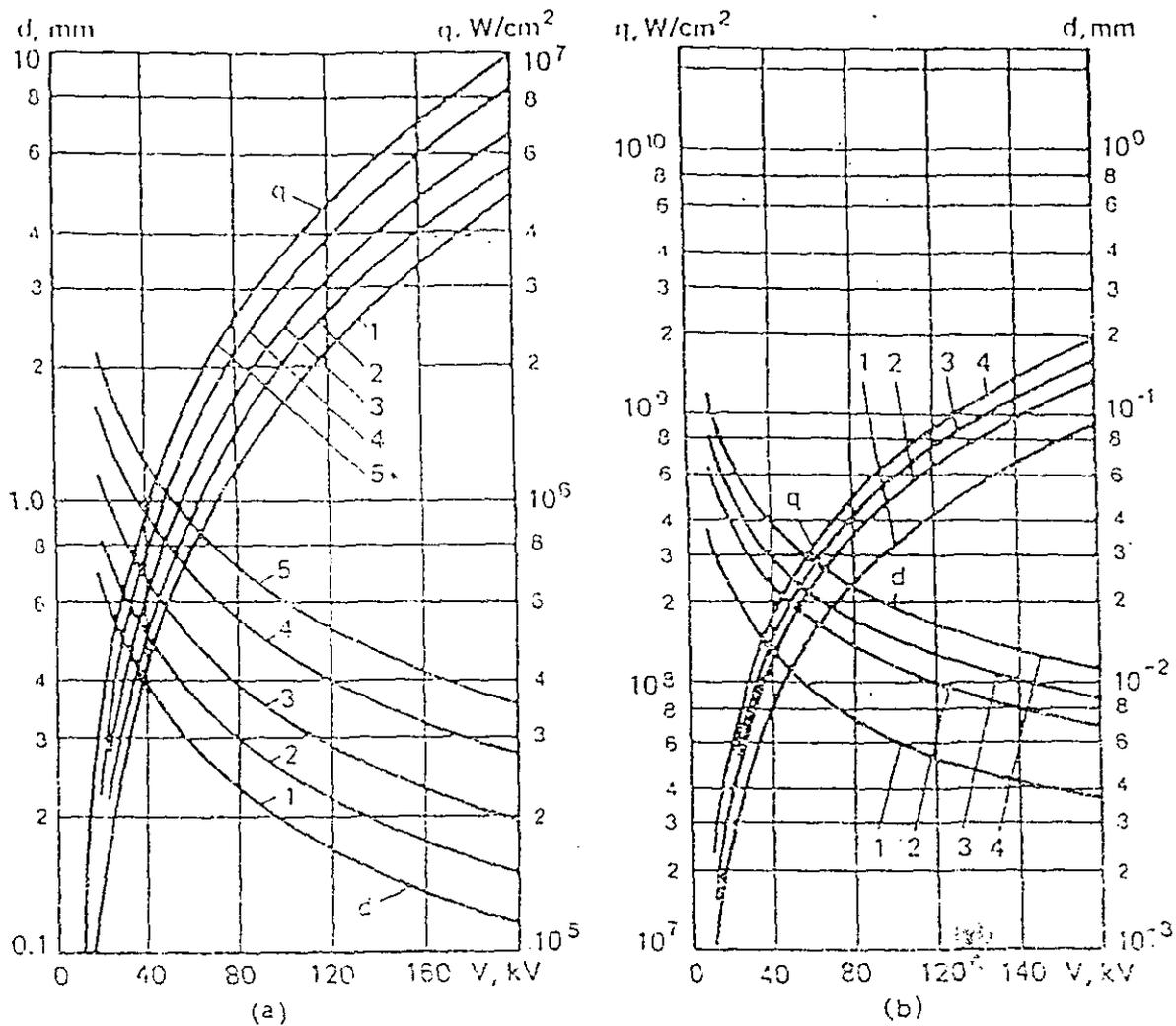


Fig. 2.2. Beam diameter d and power density q versus accelerating voltage at different values of power P [2]: (a) for welding: 1, $P = 0.5$ kW; 2, $P = 1$ kW; 3, $P = 2$ kW; 4, $P = 5$ kW; 5, $P = 10$ kW; (b) for cutting: 1, $P = 0.1$ kW; 2, $P = 0.5$ kW; 3, $P = 1$ kW; 4, $P = 2$ kW

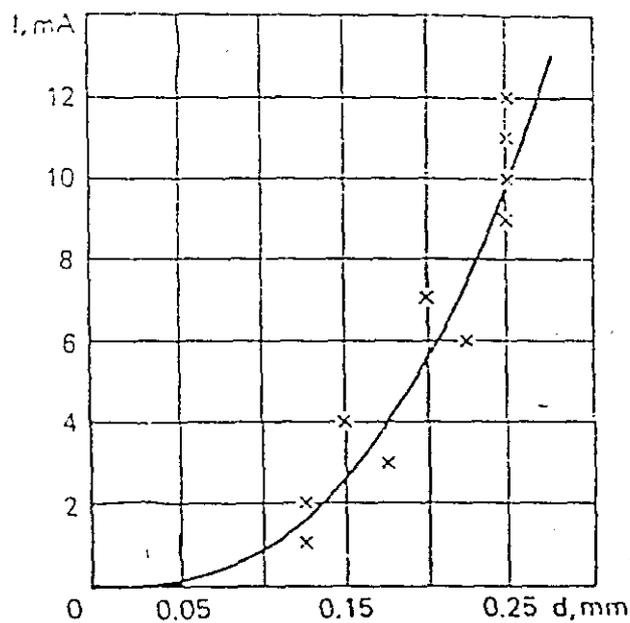


Fig. 2.1. Beam diameter versus current at constant accelerating voltage $V = 100$ kV for welding [1]

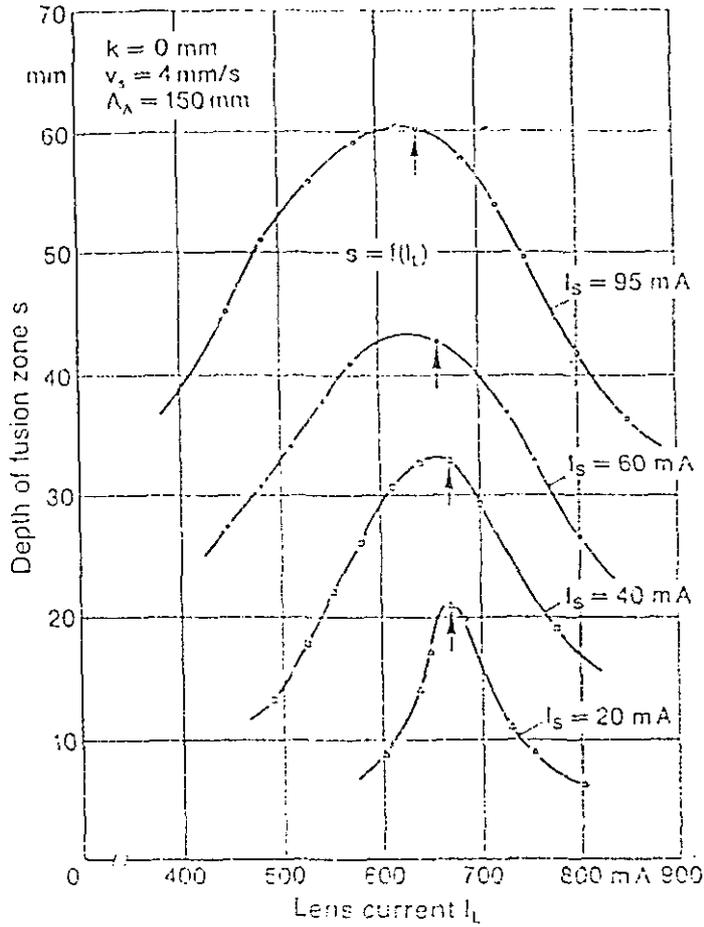


Fig. 57 Depth of the fusion zone s as a function of the lens current I_L , k = the vertical distance between the cathode and the control electrode. Material: Ck 22, \uparrow = Normal lens current [58].

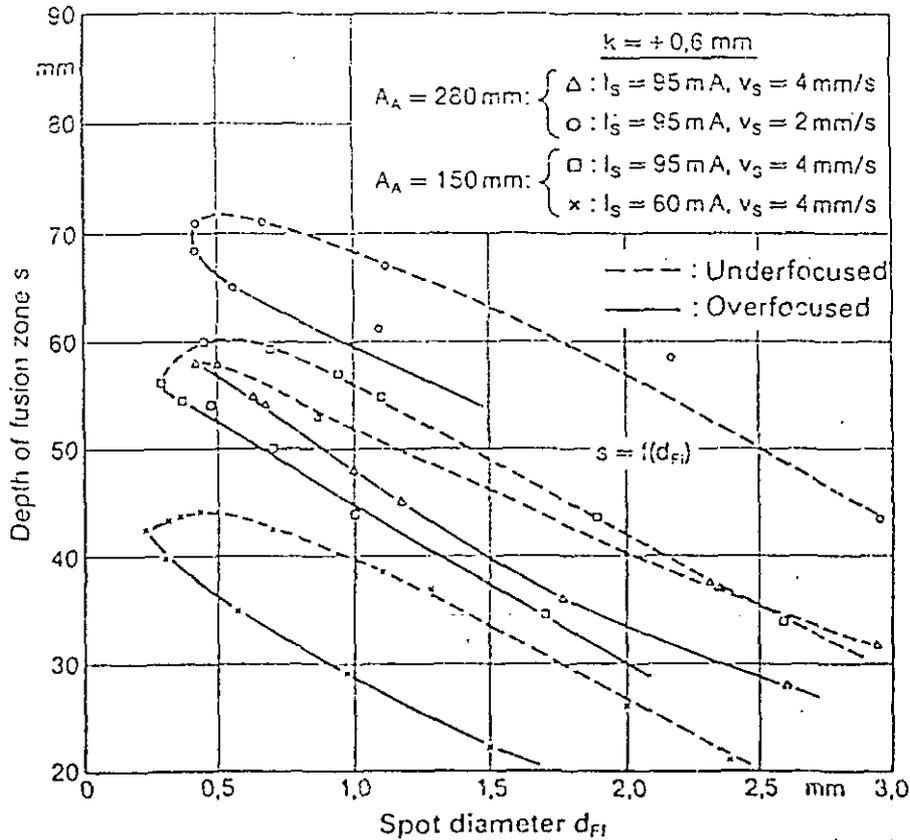


Fig. 58 Depth of the fusion zone s as a function of the spot diameter d_{FI} , otherwise all other details as in Fig. 57.

TRANSIENTI TERMICI OTTENIBILI CON I FASCI ELETTRONICI

ALTI GRADIENTI SPAZIALI E TEMPORALI DI TEMPERATURA

	SORGENTI CONTINUE	SORGENTI PULSATE
dT/dt	$10^3 - 10^6$ K/sec	$10^9 - 10^{10}$ K/sec
dT/dx	$10^4 - 10^5$ K/cm	$10^6 - 10^7$ K/cm
V DI AVANZAMENTO DEL FRONTE FUSO	QUALCHE METRO/sec (O FRAZIONE)	DECINA DI METRI/sec

CONSEGUENZE

CRESCITE EPITASSIALI

TESSITURE PREFERENZIALI

STRESS RESIDUI IN SUPERFICIE

TRASFORMAZIONE DI FASE / FORMAZIONE DI FASI METASTABILI

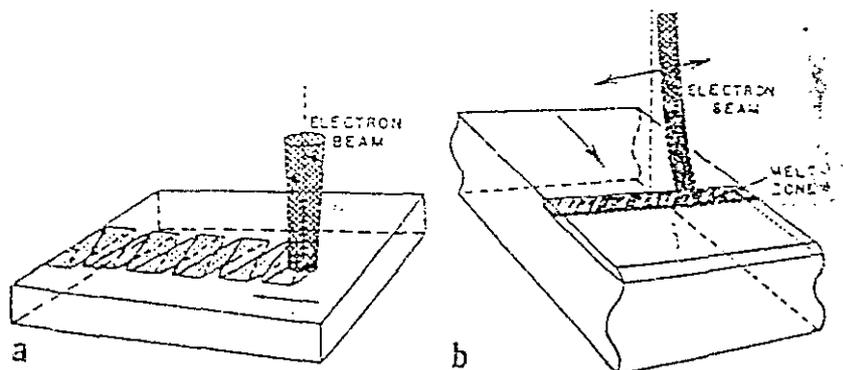


FIG. 1. Schematics of electron beam surface melting (glazing) modes; (a) point-source melting, (b) line-source melting.

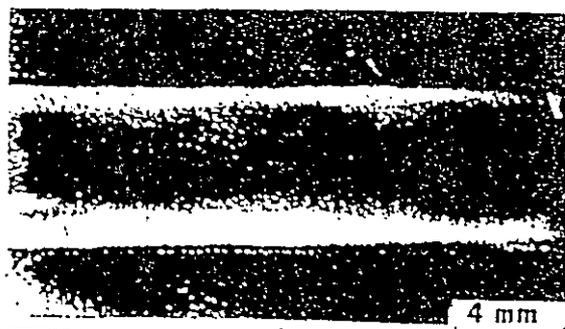


FIG. 2. Characteristically smooth e.b. glazed layer on alloy 8 (Stellite 6 + TiC); substrate pre-heated to avoid cracking.

E' NECESSARIO UNO STUDIO DETTAGLIATO DI FENOMENOLOGIE CHE IN ANALOGHI TRATTAMENTI DI TIPO CLASSICO SONO SOLO MARGINALI O ASSENTI.

VELOCITY PROFILE IN STATIONARY WELD POOL

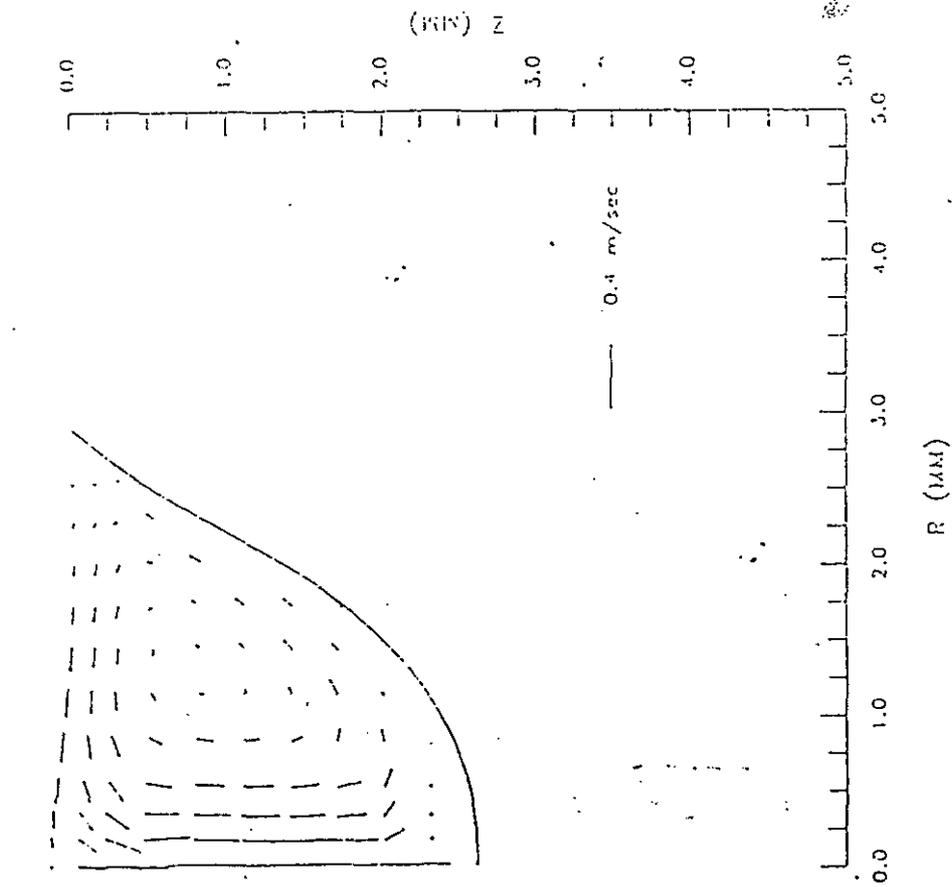


Fig. 3 - Calculated velocity field due to a Gaussian current source of 150 A.

CURRENT DENSITY IN WELD POOL

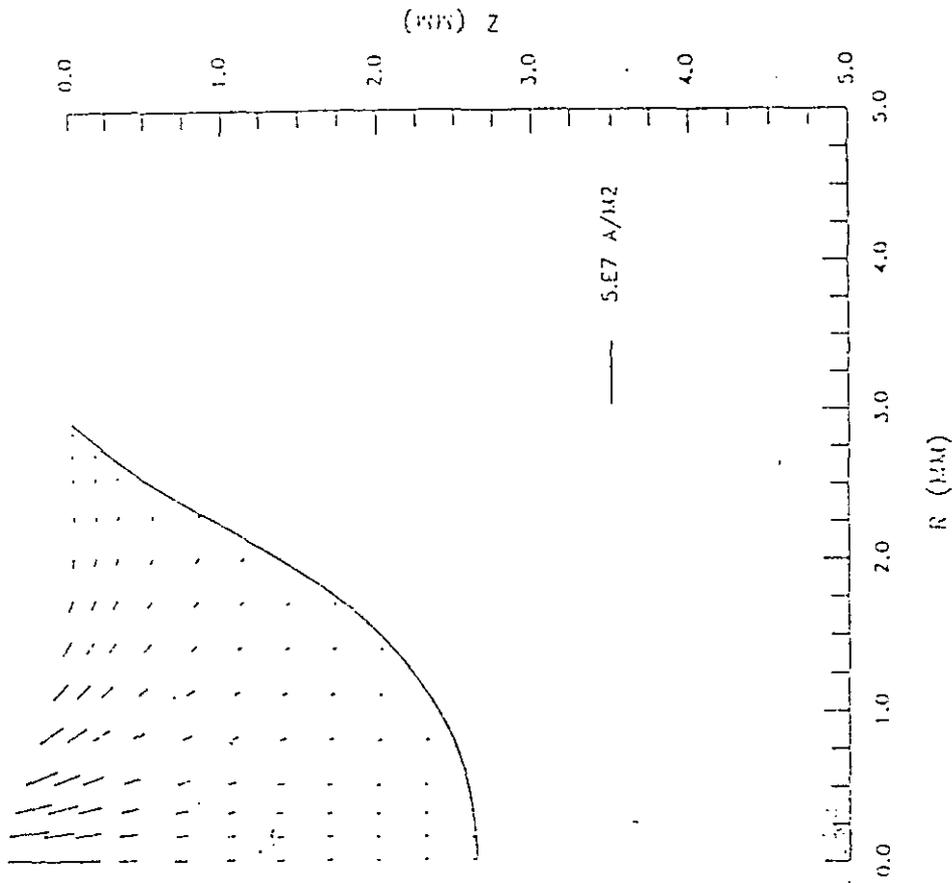


Fig. 4 - Calculated current-density field due to a Gaussian current source of 150 A.

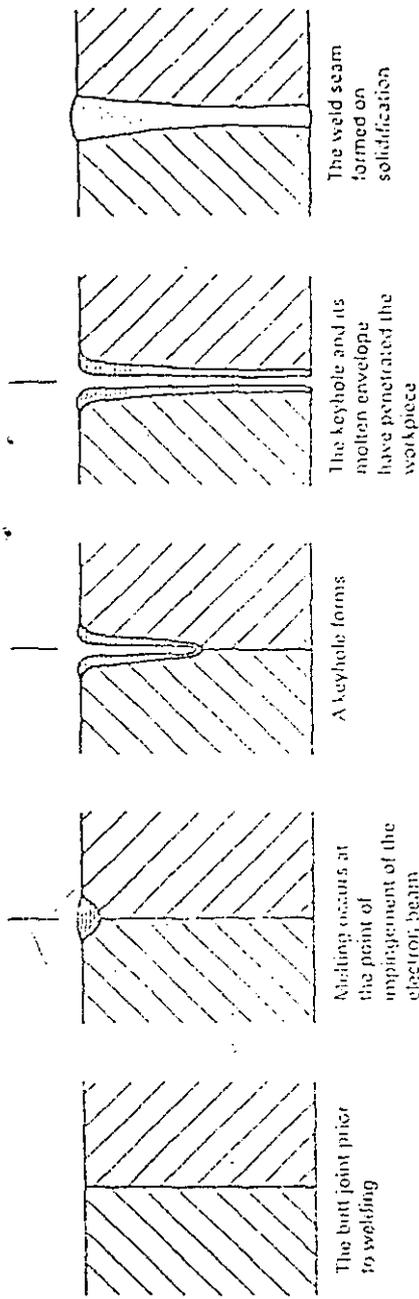


Fig. 34 The various stages of deep penetration welding.

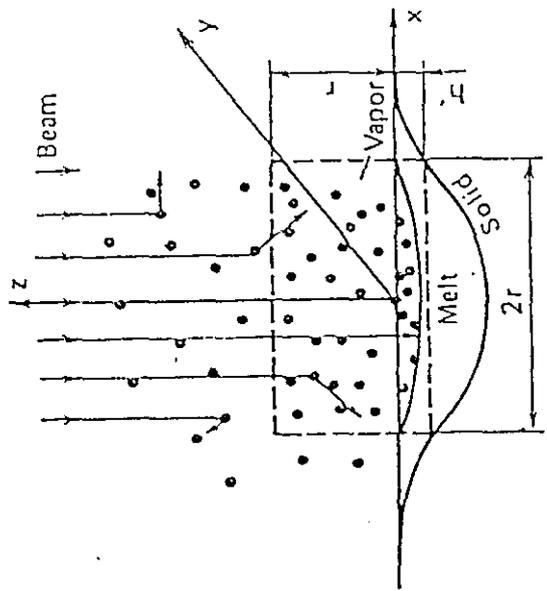


Fig. 12.7. Model illustrative of EB-solid interaction: r , EB radius; h , electron penetration depth; x , y , z , coordinates

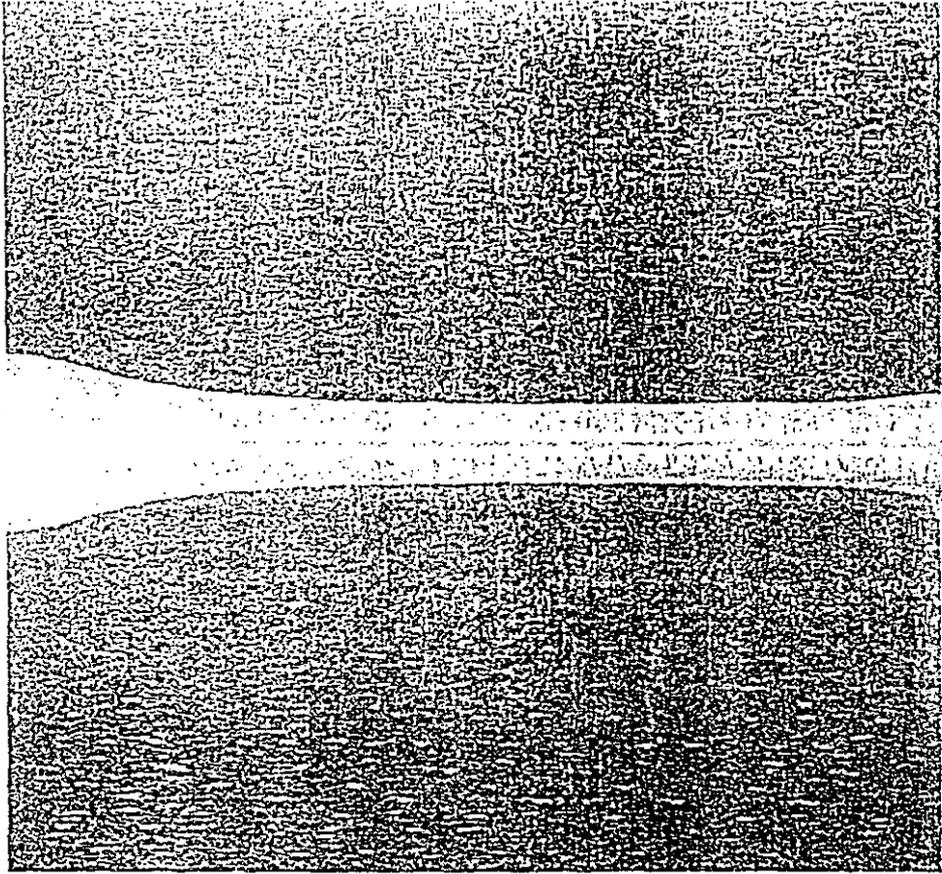


Fig. 35 Macroscopic cross section through the fusion and heat affected zones of a 50 mm thick low alloy steel

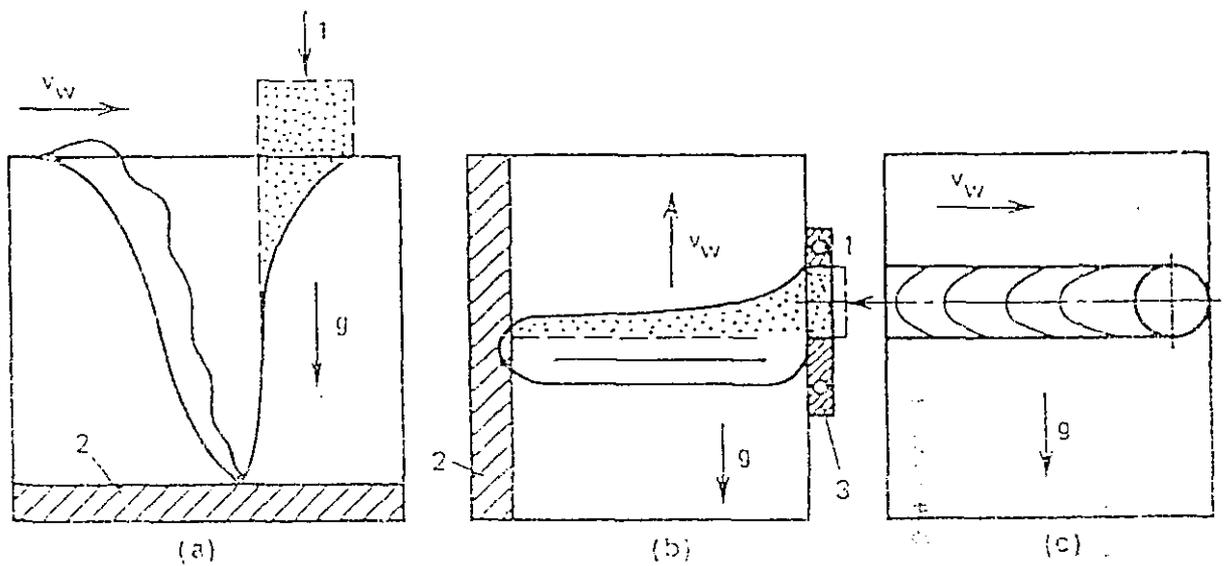


Fig. 11.14. Schemes illustrating EBW methods: 1, EB; 2, support; 3, water-cooled slide block; v_w , weld speed; g , force of gravity

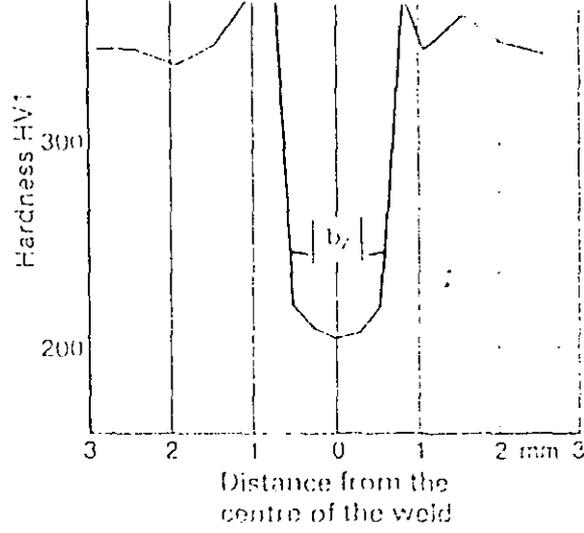


Fig. 90 Hardness trace across a weld in X 5 NiCrTi 26 15. $t = 3 \text{ mm}$, $v_s = 83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

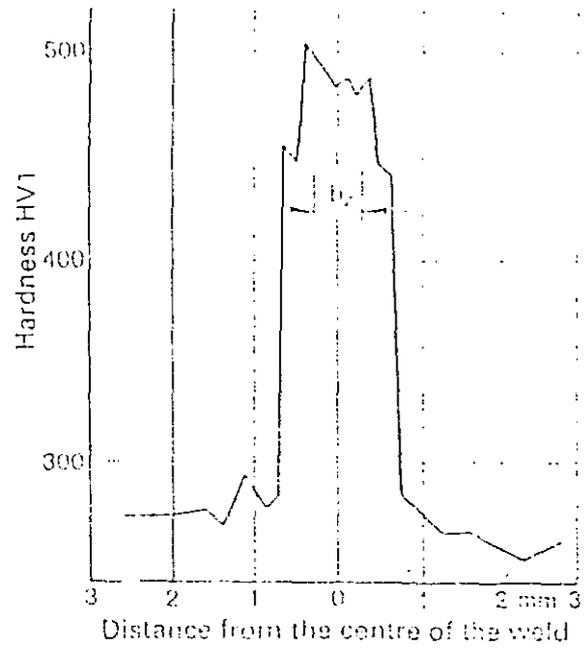


Fig. 88 Hardness trace across a weld in 21 CrMoV 5 11 $t = 2.5 \text{ mm}$, $v_s = 150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, not post heat treated.

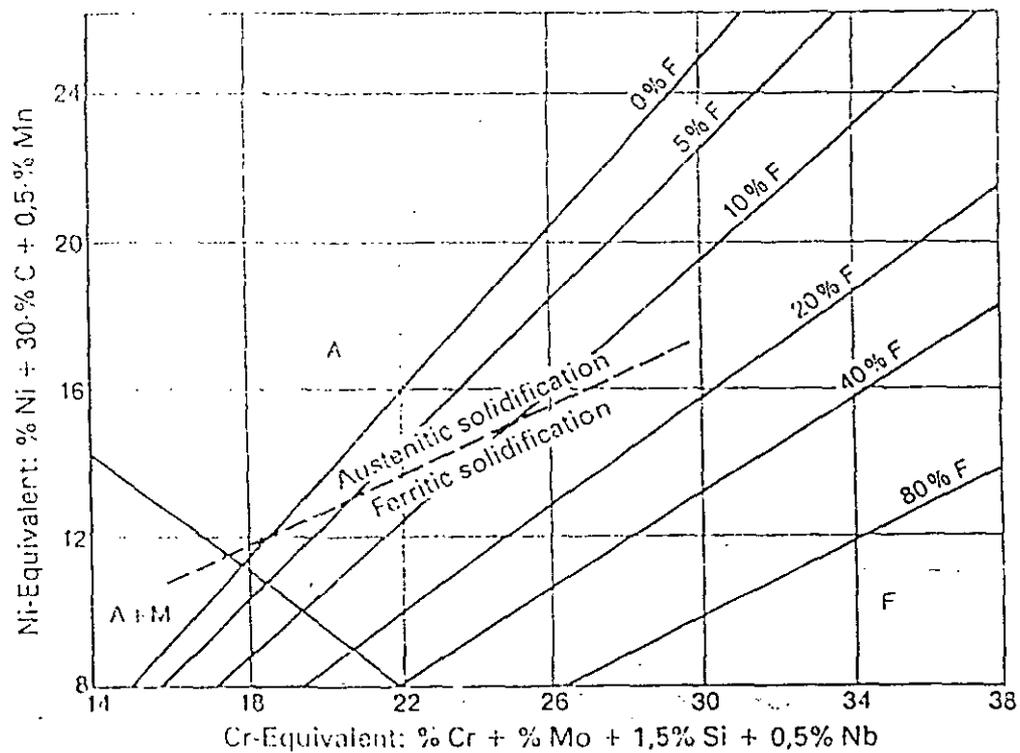


Fig. 89 Austenitic and ferritic solidification expressed as a Schaeffler diagram [80].

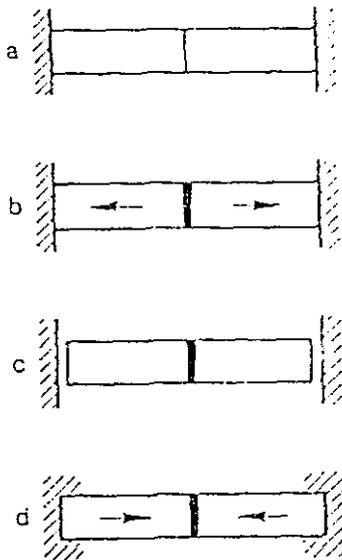
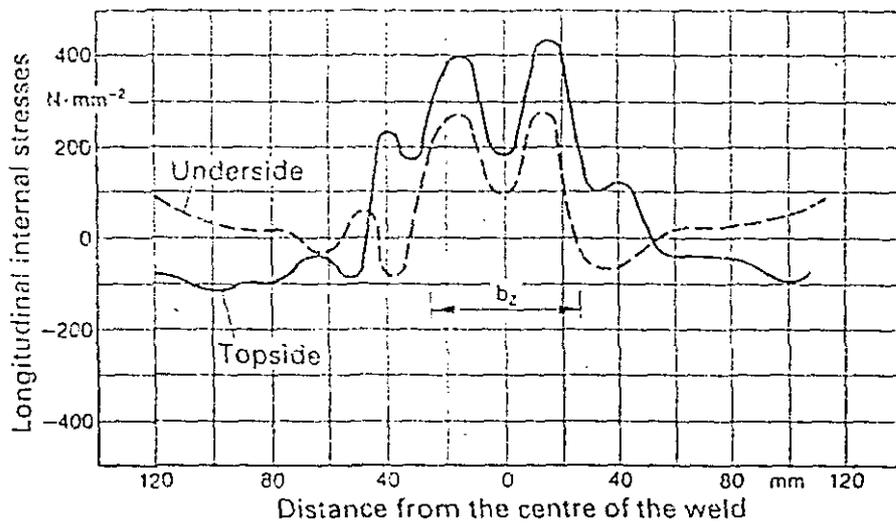


Fig. 85 The formation of transverse shrinkage and internal shrinkage stresses on welding: a) Before welding; b) Expansion during welding; c) Unrestrained shrinkage; d) Shrinkage prevented.



Material: 22 MnMoNi 55.
 Specimen dimensions
 220 × 250 mm, t =
 75 mm, DY-seam [75].

for an electron beam I
 butt weld.

- A – Weldable using normal practice.
Normal practices are: De-focusing, beam oscillating, beam offset, use of stress relieving slots adjacent to the weld, etc.
- B – Weldable using particular techniques.
Particular techniques are: Pre- and post-weld heating, welding using additives or filler materials, etc.
- C – Of limited weldability.
Welds in these materials are not evaluated in DIN 8563 Part 11 and are only for use in limited applications.

Table 2 lists details of the electron beam weldability of a number of metallic materials.

Table 2 The relative electron beam weldability of metals (from information sheet DVS 3204)

Material No.	Identification	Weldability	Depth of weld examined, mm
<i>1. Steel</i>			
1.0038	R St 37-2	A	20
1.0060	St 60-2	B	10
1.0401	C 15	A	10
1.0460	C 22.8	B	50
1.0526	C 45	B	5
1.0570	St 52-3	A	20
1.1191	Ck 45	B	10
1.2241	51 CrV 4	A	2
1.4006	X 10 Cr 13	A	20
1.4057	X 22 CrNi 17	A	10
1.4303	X 5 CrNi 18 12	A	5
1.4404	X 2 CrNiMo 17 13 2	B	50
1.4541	X 6 CrNiTi 18 10	A	50
1.4580	X CrNiMoNb 17 12 2	B	50
1.4923	G-X 14 CrCoMo 12 10	A	10
1.4980	X 5 NiCrTi 26 15	A	5
1.5920	18 CrNi 8	A	10
1.6358	X 2 NiCoMo 18 9 5	A	10
1.7131	16 MnCr 5	A	10
1.7335	13 CrMo 4 4	A	50
1.8902	StE 420	A	20
<i>2. Copper materials</i>			
2.0040	OF-Cu ¹⁾	A	25 ²⁾
2.0070	SE-Cu	B	25 ²⁾
2.0090	SF-Cu	B	25 ²⁾
2.0916	AlBz 5	A	18
2.1030	SnBz 8	A	5

3. Nickel materials

2.4375	NiCr 30 Al	A	5
2.4858	NiCr 21 Mo	A	30
2.4951	NiCr 20 Ti	A	10
2.4969	NiCr 20 Co 18 Ti	B	10

4. Aluminium materials

3.0255	Al 99.5	A	5
3.0515	AlMn 1	A	5
3.1355	AlCuMg 2	A	10
3.2315	AlMgSi 1	A	12
3.2581	G-AlSi 12	A	40
3.3535	AlMg 3	B	5
3.3547	AlMg 4.5 Mn	A	1.5
3.3555	AlMg 5	A	10

5. Titanium materials

3.7035	Ti 2	A	50
3.7165	TiAl6 V 4	A	50
3.7175	TiAl6 V 6 Sn 2	B	25
3.7255	Ti 3 Pd	A	50

6. Material combinations

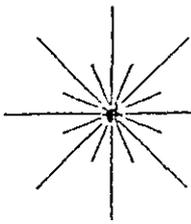
1.0401 with	C 15 with	B	7
1.1173	CR 34		
1.0570 with	St 52-3 with	A	6
1.7321	20 MoCr 4		
1.2003 with	75 Cr 1 with	A	2.5
1.3342	SC 6-5-2		
1.4006 with	X 10 Cr 13 with	A	20
1.7335	13 CrMo 4 4		
1.4303 with	X 5 CrNi 18 12 with	A	5
2.4668	NiCr 19 NbMo		
1.5919 with	15 CrNi 6 with	A	2
1.7147	20 MnCr 5		

7. Special metals and metal combinations

	Mo (cast)	B	3.5
	Mo with Ta	B	1.6
	Mo 0.5 Ti	A	2.5
	TZM (Mo-alloy)	A	8
	Nb	A	1
	Nb with Ta	A	0.2
	Nb with Ti	A	3
	Nb 1 Zr	A	3
	Ta	A	3
	T	B	3.8
	Zircalloy-2	A	15

¹ P and O₂ contents <5 ppm

² No heat treatment necessary with T >200°C after welding.



Review
of Mathematical Models
of High Power Laser
Material Processing

in the Framework of the EU 194 Working Group
on Mathematical Modeling

Editors: Dieter Schuöcker (Chairman)
Markus Beck
John Dowden
Phiroze Kapadia
Alexander Kaplan
Didier Kechemair
William O'Neill
Jose L. Ocaña
William Steen
Sebastian Tosto

January 1993

Sponsored by the Austrian Ministry for Science and
Research (BMWV), Vienna

FINAL TECHNICAL REPORT

CONTRACT No : BREU - CT 90 - 0134

PROPOSAL No : BE - 3489 - 89

TITLE : Analysis of Beam / Workpiece Interaction applied
to Electron Beam Welding for Industrial Application

PROJECT
COORDINATOR : Institut für Schweißtechnische
Fertigungsverfahren (ISF), Germany

PARTNERS :

Siemens	Germany
PTR Präzisionstechnik	Germany
Messer Griesheim	Germany
Institut de Soudure	France
Sciaky Industries	France
ENEA	Italy
ISQ	Portugal
Force Institutes	Denmark

STARTING DATE : 1.02.1991

DURATION : 36 months



PROJECT FUNDED BY THE COMMISSION
OF THE EUROPEAN COMMUNITIES UNDER
THE BRIT / EURAM PROGRAMME

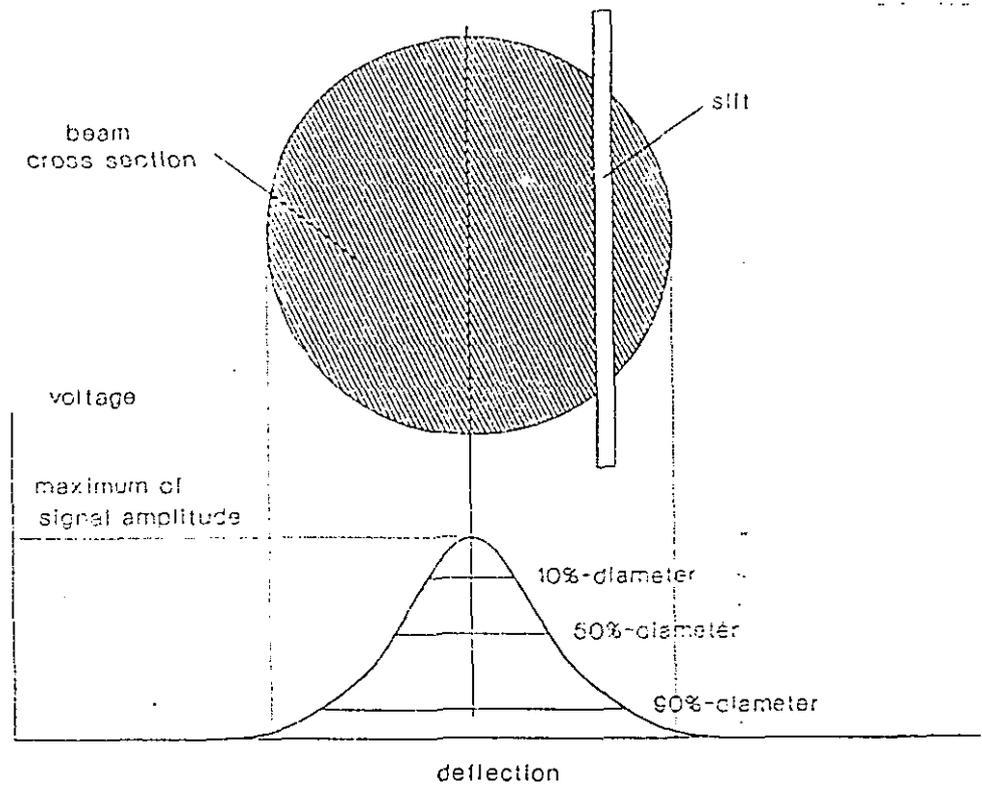


Fig. 3: Definition of slit measurement values

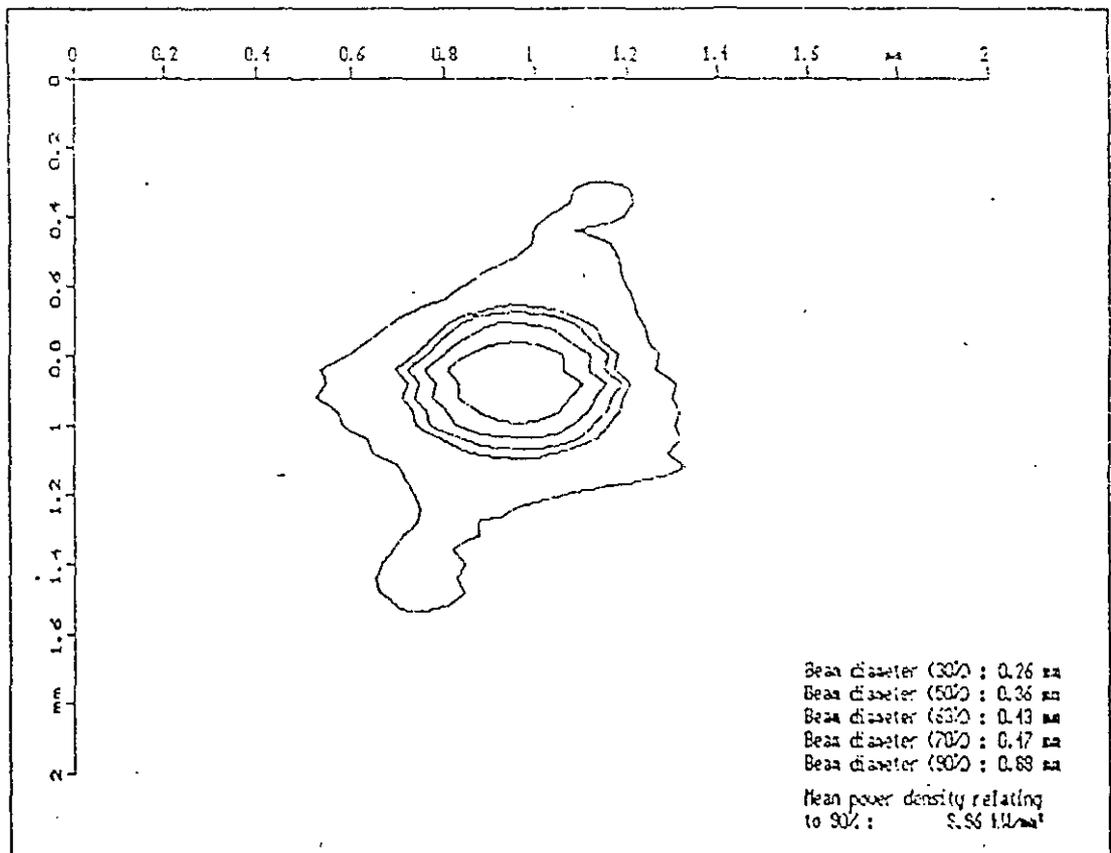
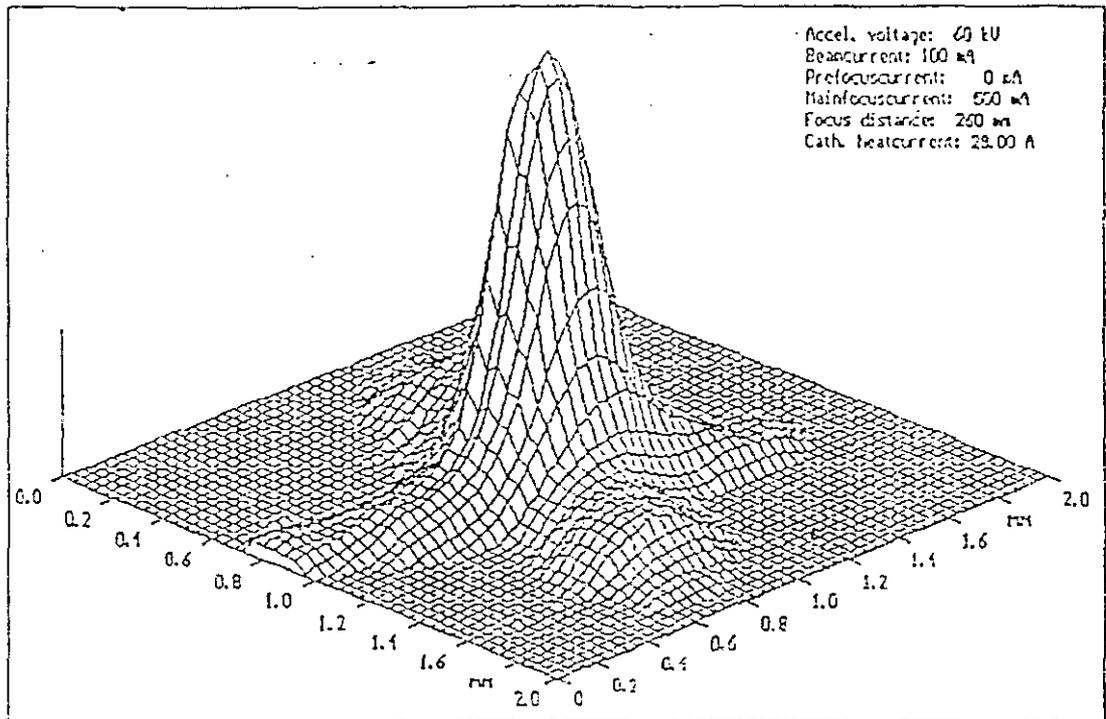


Fig. 4: Documentation of a hole measurement: Power density distribution with power density lines

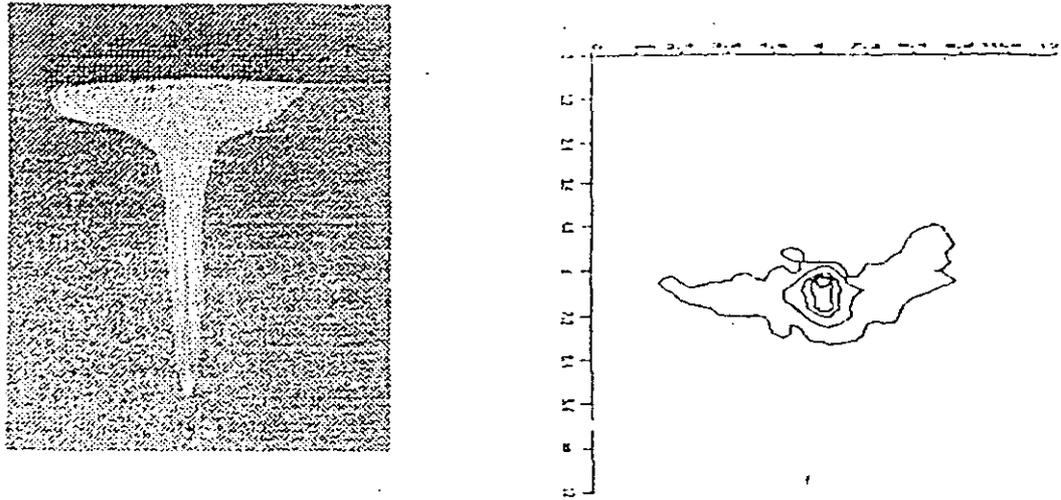


Fig. 33: Influence of beam imperfections to weld result; $P = 12 \text{ kW}$, $v_t = 10 \text{ mm/s}$

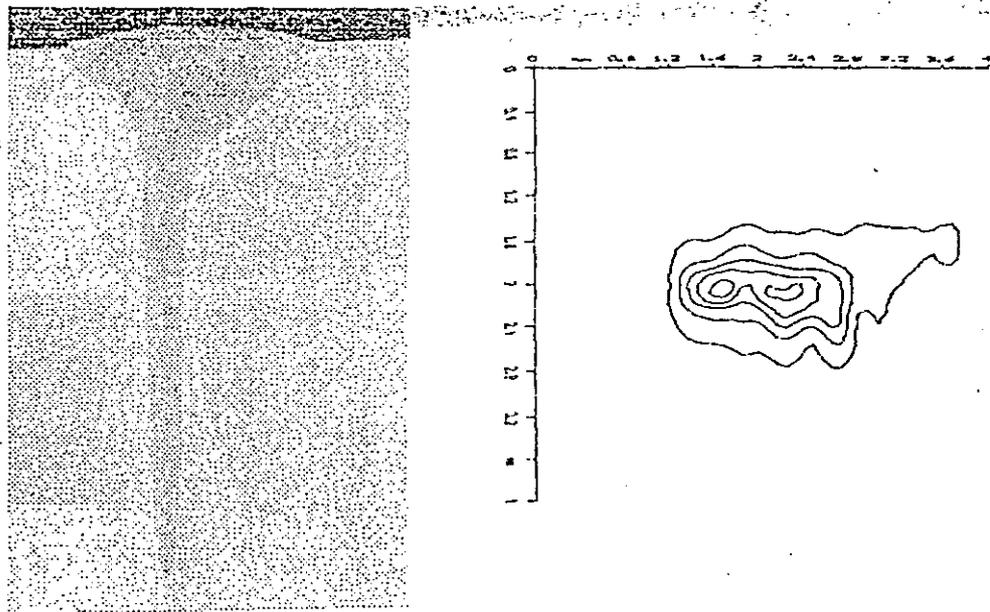
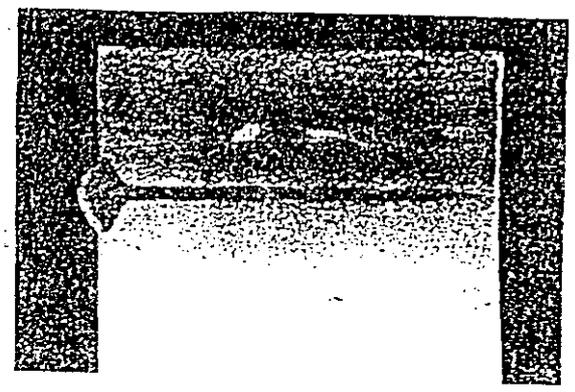


Fig. 34: Influence of beam imperfections to weld result; $P = 24 \text{ kW}$, $v_t = 10 \text{ mm/s}$



1:1

Fig. 11 30 kW machine, overfocused beam generator, P = 7,5 kW, $v_s = 2$ mm/s,



1:1

Fig. 16 Reference weld. 30 kW machine with beam generator, P = 12 kW

FRONT VIEW
 Arc voltage: 15,4 V
 Feed speed: 30 mm/s
 Reflector: 0 A
 Modulation: 100 Hz
 Laser power: 30 W
 Cut thickness: 3,0 mm

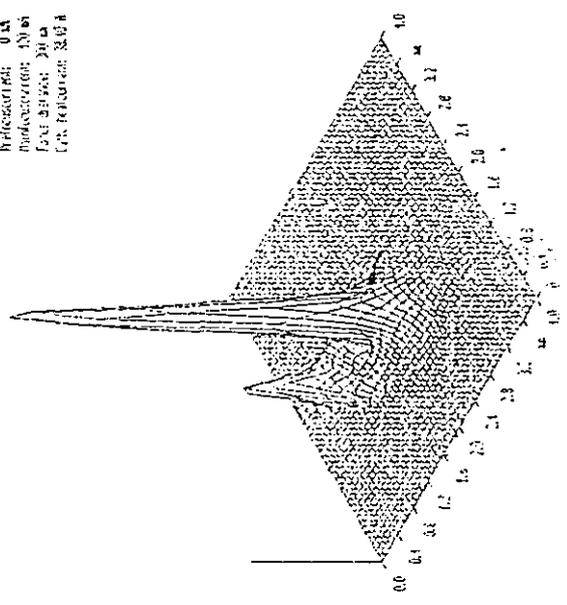
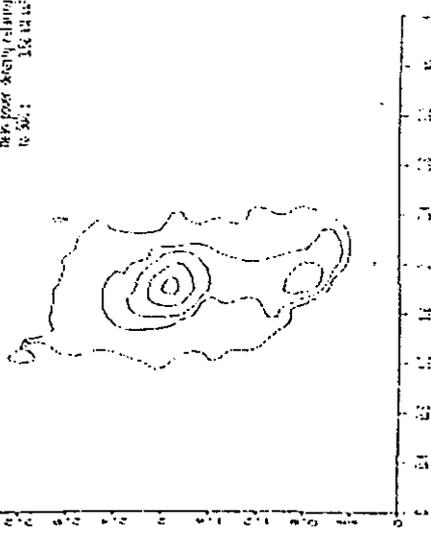


Fig. 17 Beam shape for the 30 kW machine with the beam generator.

Beam diameter (mm): 0,15 to 0,25
 Laser power (W): 0,25 to 0,5
 Feed speed (mm/s): 1,5 to 3
 Modulation (Hz): 1,5 to 3
 Reflector (A): 1,5 to 3
 Max power (W): 1,5 to 3
 Cut thickness (mm): 1,5 to 3



FRONT VIEW
 Arc voltage: 15,4 V
 Feed speed: 30 mm/s
 Reflector: 0 A
 Modulation: 100 Hz
 Laser power: 30 W
 Cut thickness: 3,0 mm

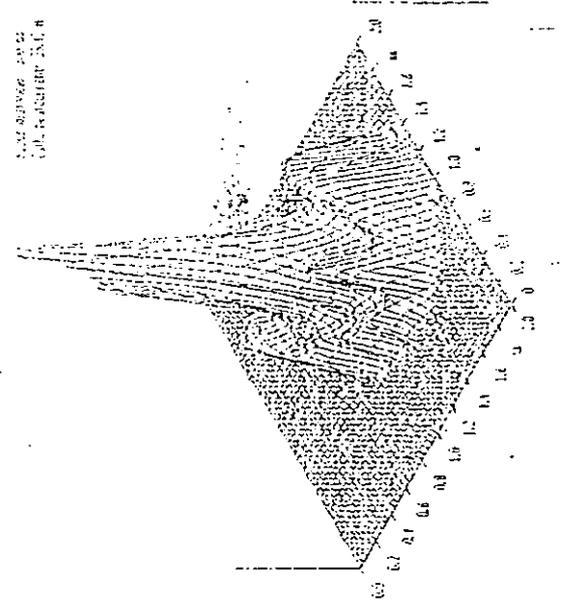
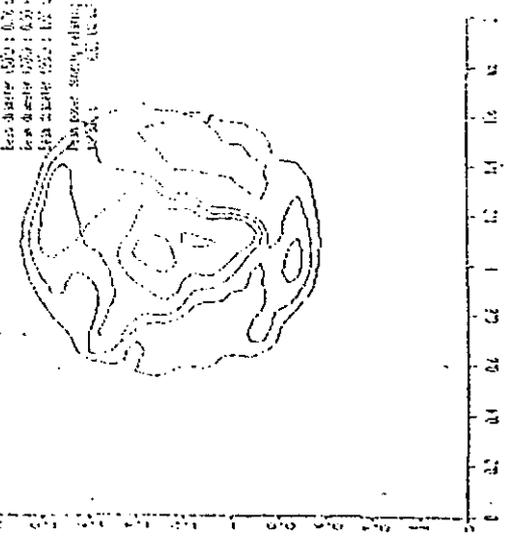


Fig. 12 Beam shape of the 30 kW machine with the focused beam generator.

Beam diameter (mm): 0,15 to 0,25
 Laser power (W): 0,25 to 0,5
 Feed speed (mm/s): 1,5 to 3
 Modulation (Hz): 1,5 to 3
 Reflector (A): 1,5 to 3
 Max power (W): 1,5 to 3
 Cut thickness (mm): 1,5 to 3



BRITE "Heavy Section Welding"

1. Comparative results of different high power laser systems
2. Key-hole and plasma analysis
 - high speed video camera
 - optical and acustical measurements

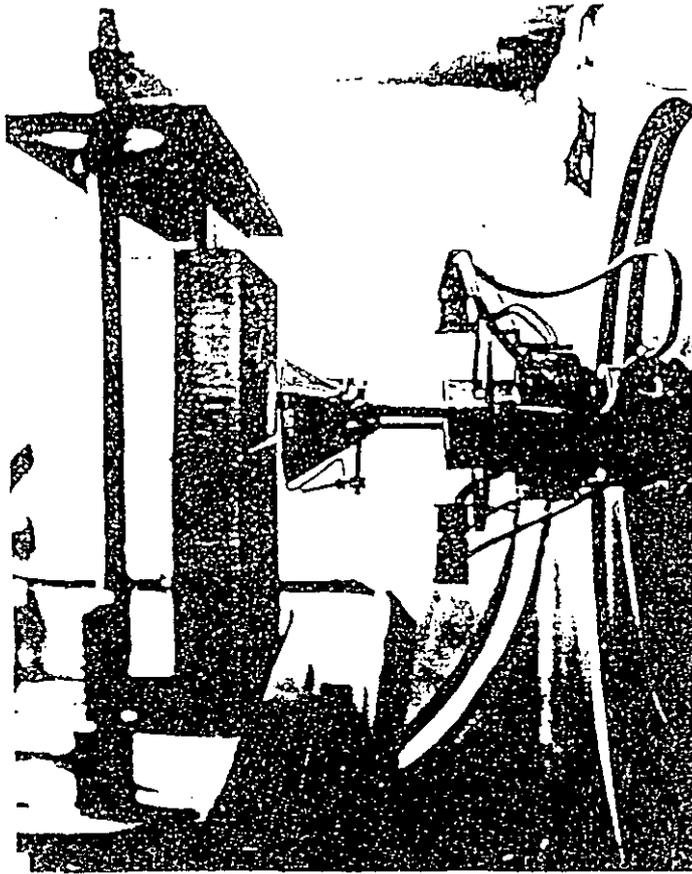


Fig. 6 - Experimental set up. From left to right: workpiece, funnel and focus coil.
Minimum distance between funnel and workpiece: 15mm.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

Facilities: F1) 50 KW, 70 KV electron beam, horizontal gun
F2) 10 KW, 50 KV electron beam, vertical gun

Materials: ASTM A 387 gr. 22 (2 1/4Cr - 1 Mo)
thickness: 6 mm and 50 mm

Workpieces

dimensions: 40 x 200 mm, 50 mm thick
60 x 200 mm, 6 mm thick

Welding

conditions: full penetration, melting runs

Welding

parameters: see tab. 5

Weight

measurements: - workpieces weight measurements: see tab. 5
- collection of material coming out from the melt pool by a pirez funnel (see fig. 6).
Collection measurements are performed in runs 1 to 4 only.

N.	Facility	t (mm)	PI (KW)	v (m/min)	L mg/s	C mg/s	C/L (-)	M (g)	M (g/s)	L/M (-)
(-)	(-)									
1	F1	50	21	0,15	200	32	0,16	300	4,2	0,048
2	F1	50	21	0,15	208	29	0,14	300	4,2	0,050
3	F1	50	21	0,20	272	46	0,17	300	5,6	0,049
4	F1	50	21	0,20	302	50	0,17	300	5,6	0,054
5	F2	6	5	0,66	37	-	-	14	0,85	0,044
6	F2	6	5	0,66	30	-	-	14	0,85	0,035
7	F2	6	5	1	65	-	-	14	1,3	0,050
8	F2	6	5	1	37	-	-	14	1,3	0,029
All data							< 20%			2,5-5,5%

L = mass loss

C = collected mass

M = molten zone mass

HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS ELECTRON BEAM AND LASER
WELDING OF STEELS

Tosto S.

ENEA Casaccia

Nenci F.

via Anguillarese 301
00060 Roma

KEYWORDS: Electron beam; Laser; Tensile Properties;
Microhardness; Microstructure

Purpose of the paper is to evaluate the feasibility of
homogeneous and heterogeneous electron beam and laser
welding of:

INCONEL 600 SUPERALLOY

SA508 FERRITIC STEEL

AISI 316 L STAINLESS STEEL

The activity is aimed to:

- check the feasibility of laser and electron beam
homogeneous and heterogeneous welding of austenitic and
ferritic steels;
- examine the microstructural and metallurgical properties
of the joints, in comparison with the standard welding
procedures;
- compare the mechanical properties of the joints obtained
with laser and electron beam irradiation.

ELEMENTS	INCONEL 600	SA 508	AISI 316 L
C	0.071	0.20	0.013
Si	0.31	0.03	0.55
Mn	0.25	0.136	1.45
Cr	15.95	0.02	16.91
Ni	74.10	0.72	11.96
Mo	-	0.52	2.10
S	0.003	0.008	0.008
P	-	0.008	0.027
Cu	0.07	0.02	0.34
Fe	8.70	-	-
Ti	-	-	0.055
Co	-	0.006	0.17
N	-	-	0.02
W	-	0.01	-
As	-	0.006	-
Sb	-	0.0012	-
Al	-	0.004	-
Sn	-	0.003	-

The materials were hot rolled to a thickness of 10 mm and heat treated for stress relieving.

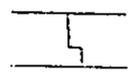
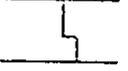
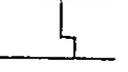
The INCONEL 600 has been also heat treated for 2 hours at 1100 C and then quenched in water. Partial solubilization was obtained with this heat treatment; also, grain coarsening (ASTM grade 3 to 3.5) was observed.

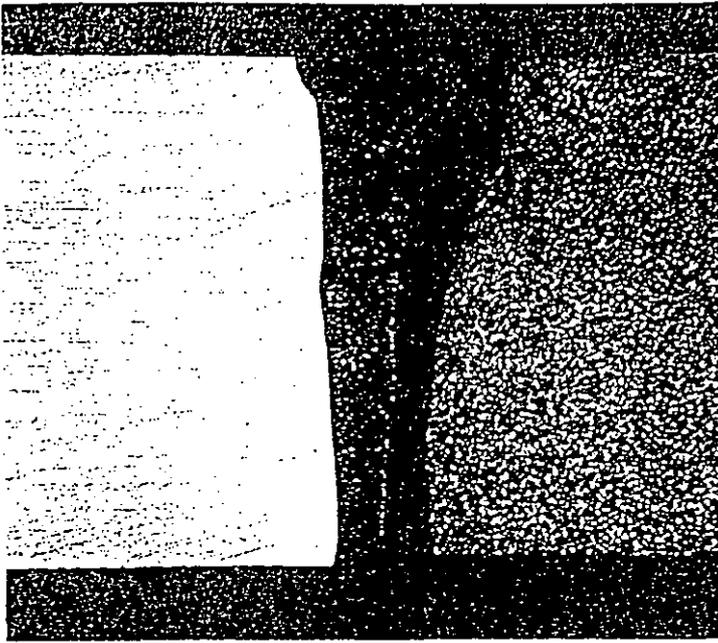
The samples of ferritic steel were obtained from a forged component in the quenched and tempered condition.

Sheets of INCONEL 600, SA508 and AISI 316 L having a surface of 300x100 mm were butt welded along the longest dimension, normal to the rolling direction. Some sheets were machined as shown in the following table before butt welding.

The Electron Beam (EB) machine used for the tests had a power of 50 KW. The gun was in horizontal position. The accelerating voltage was 60 kV, the working distance 150 mm. The residual vacuum in the specimen chamber was in all cases 10^{-3} mbar.

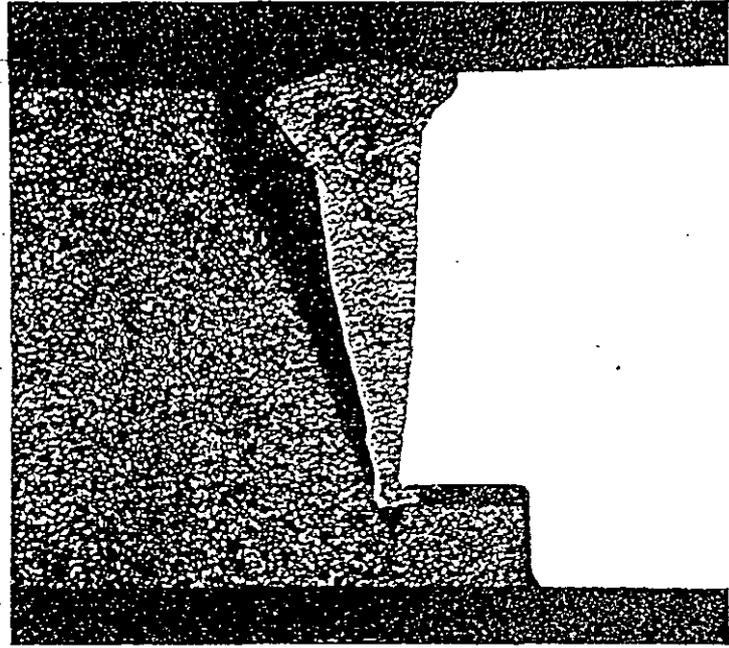
The CW CO₂ laser had a maximum power of 15 KW.

SAMPLE	MATERIALS	joint shape	ELECTRON BEAM		LASER	
			Power KW	travel speed m/min	Power KW	travel speed m/min
A	INCONEL 600 INCONEL 600		7.2	1	13	2.0
B	INCONEL 600 INCONEL 600		5.4	1	9	2.7
C	INCONEL 600 AISI 316 L		7.2	1	13	2.0
D	INCONEL 600 AISI 316 L		5.1	1	9	2.7
E	SA 508 SA 508		7.8	1	7	0.75
F	SA 508 SA 508		5.7	1	9	2.7
G	SA 508 AISI 316 L		7.8	1	7	0.75
H	SA 508 AISI 316 L		5.4	1	9	2.7
I	INCONEL 600 INCONEL 600 (as supplied)		7.2	1	13	2.0



AISI 316 L

SA 508



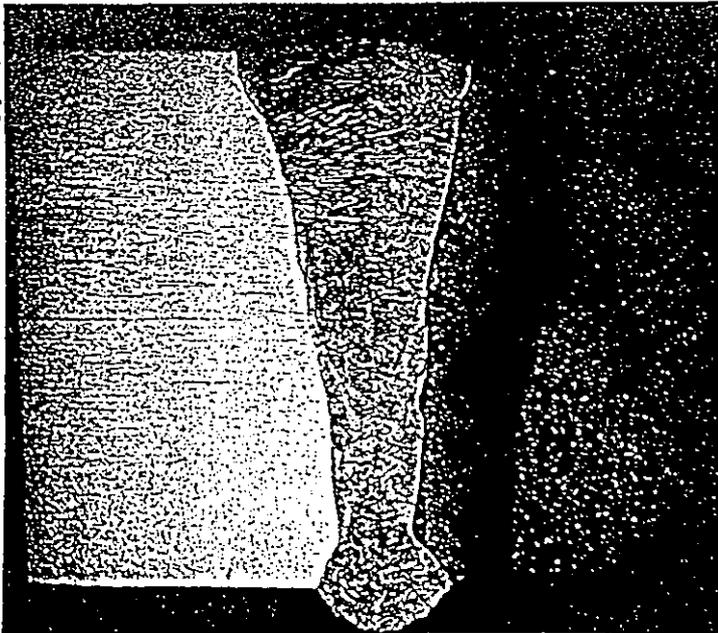
SA 508

AISI 316 L

Saldature a FE su accoppiamenti SA 508 / AISI 316 L (6,5x)

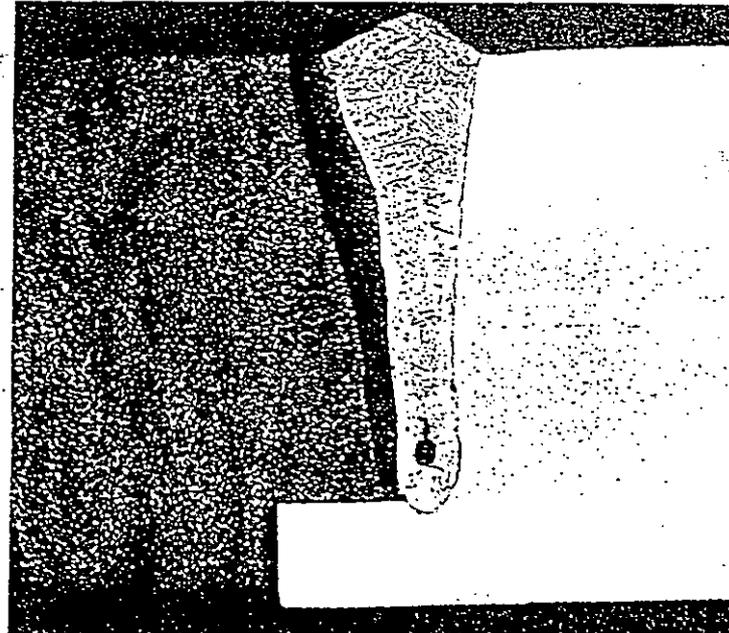
AISI 316 L

SA 508

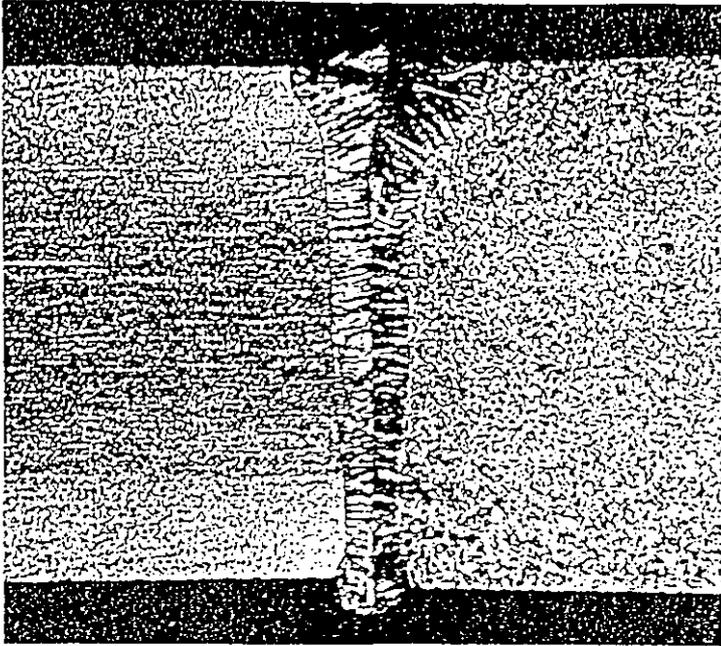


SA 508

AISI 316 L

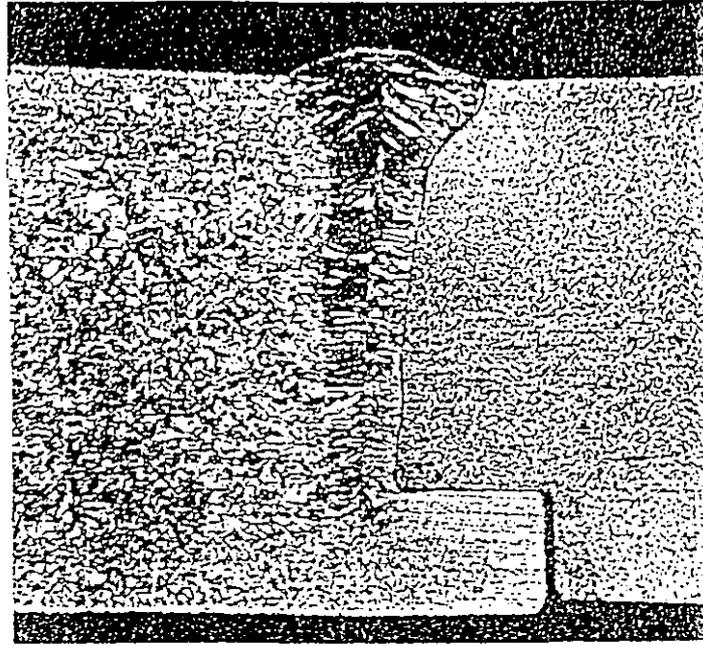


Saldature Laser su accoppiamenti SA 508 / AISI 316 L (6,5x)



AISI 316 L

Inconel 600



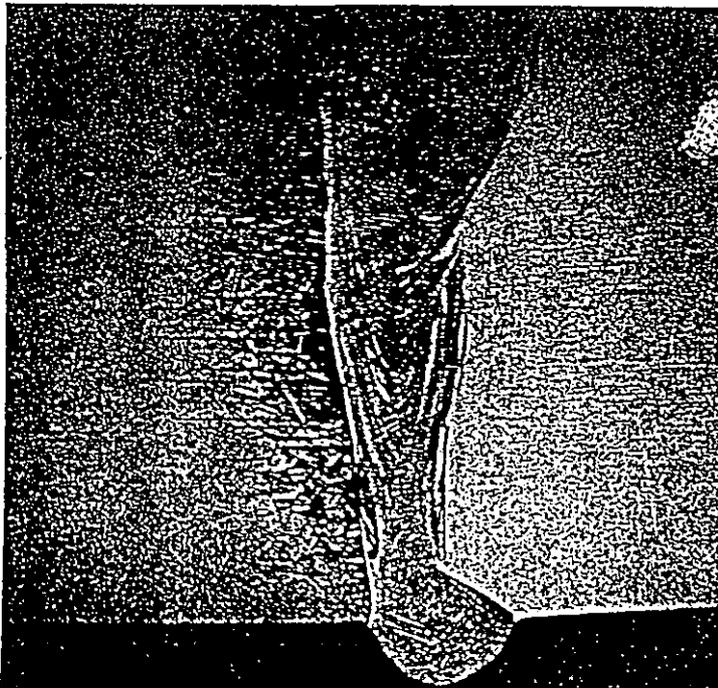
Inconel 600

AISI 316 L

Saldatura a FE su accoppiamenti Inconel 600 / AISI 316 L (6,5x)

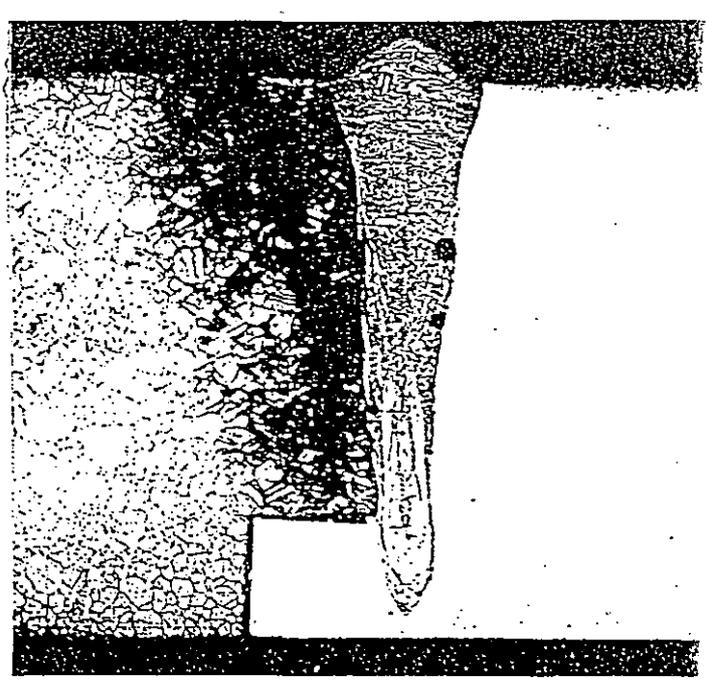
Inconel 600

AISI 316 L

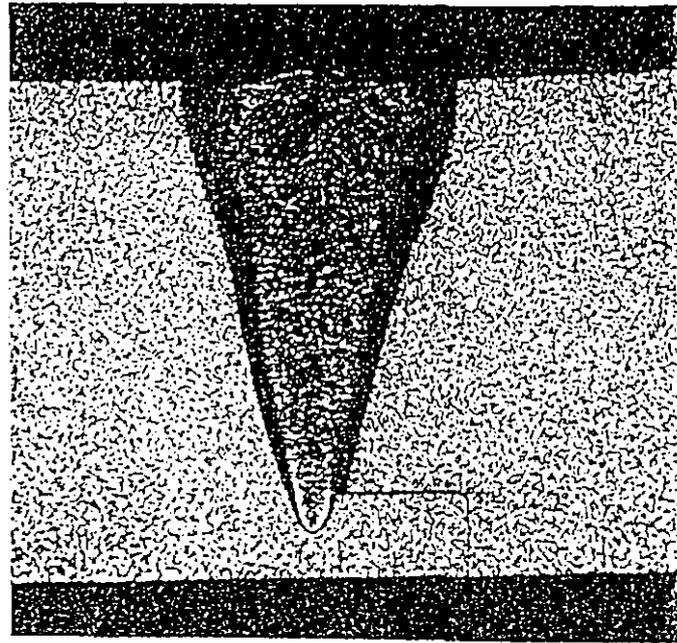
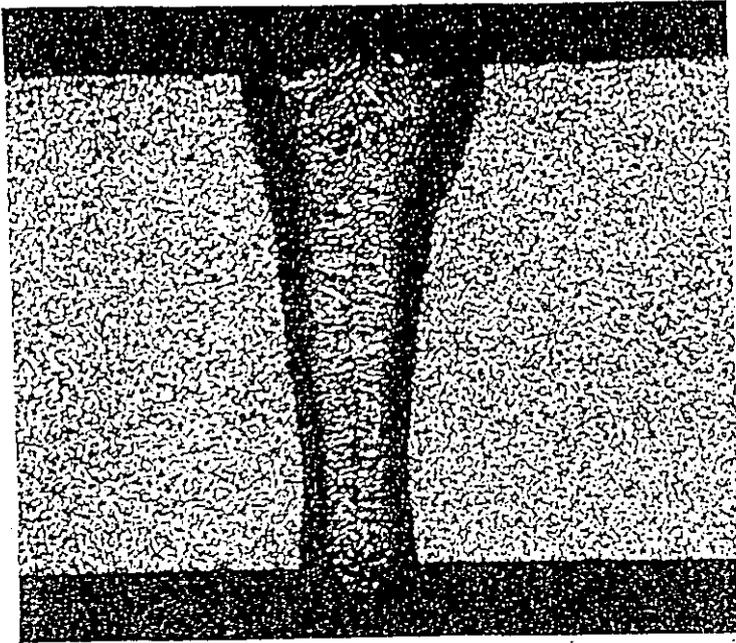


Inconel 600

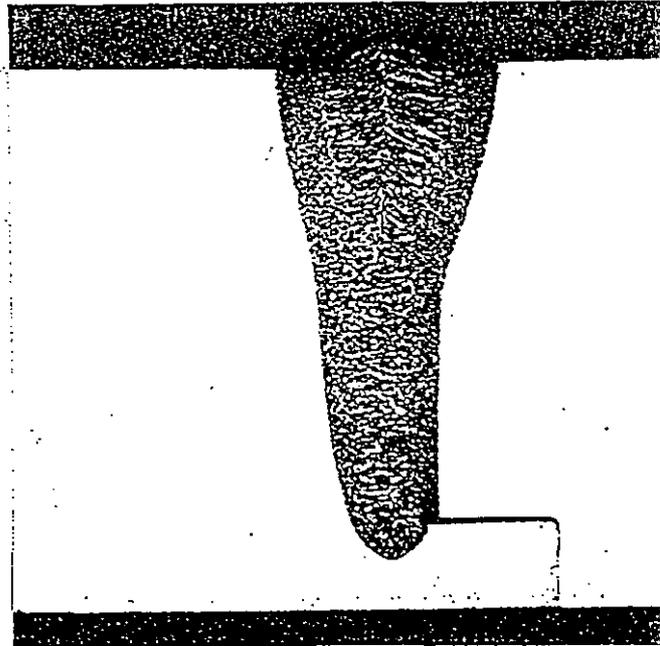
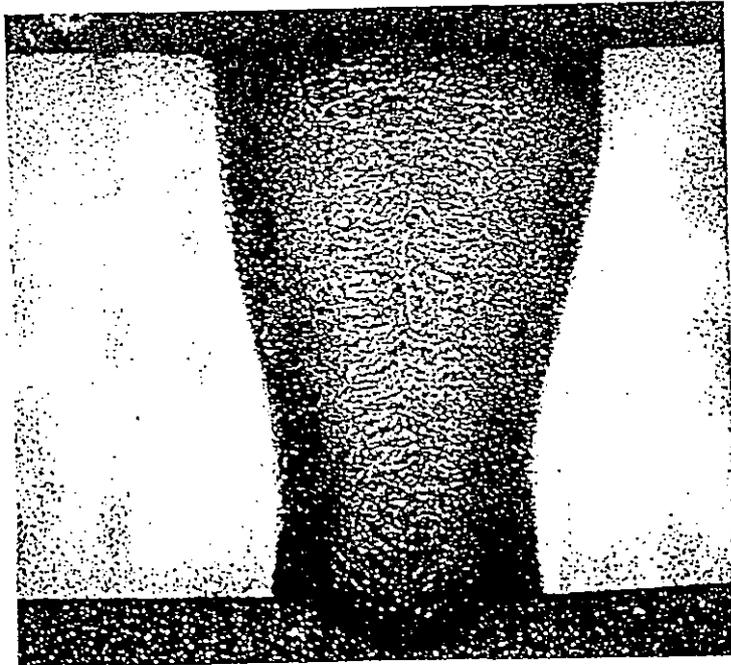
AISI 316 L



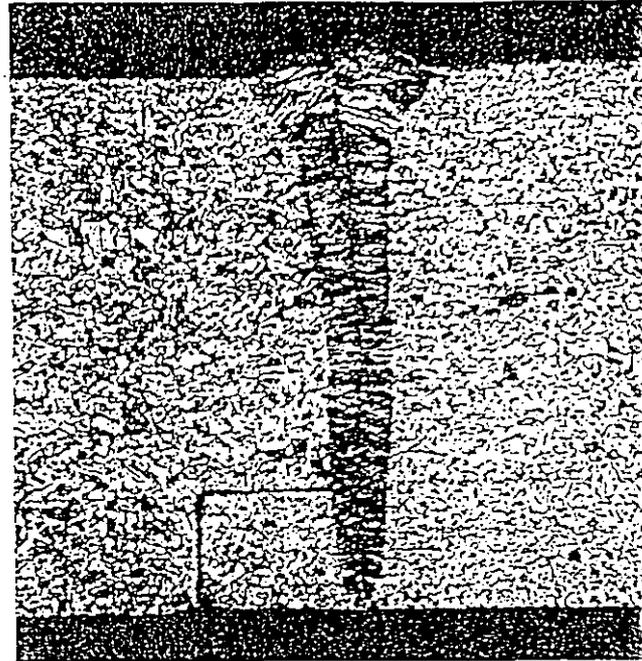
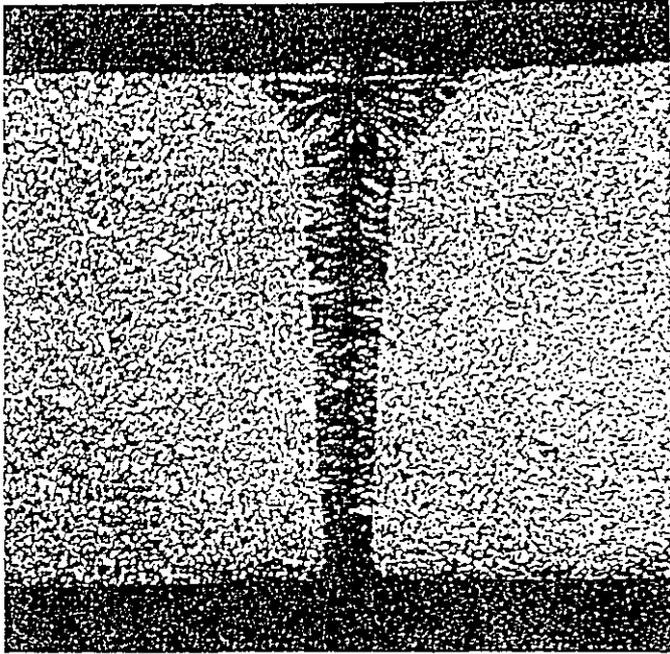
Saldature Laser su accoppiamenti Inconel 600 / AISI 316 L (6,5x)



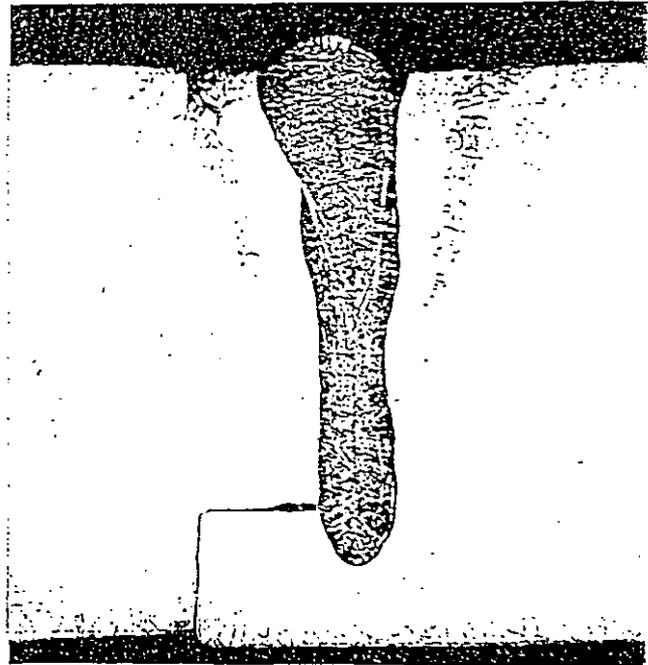
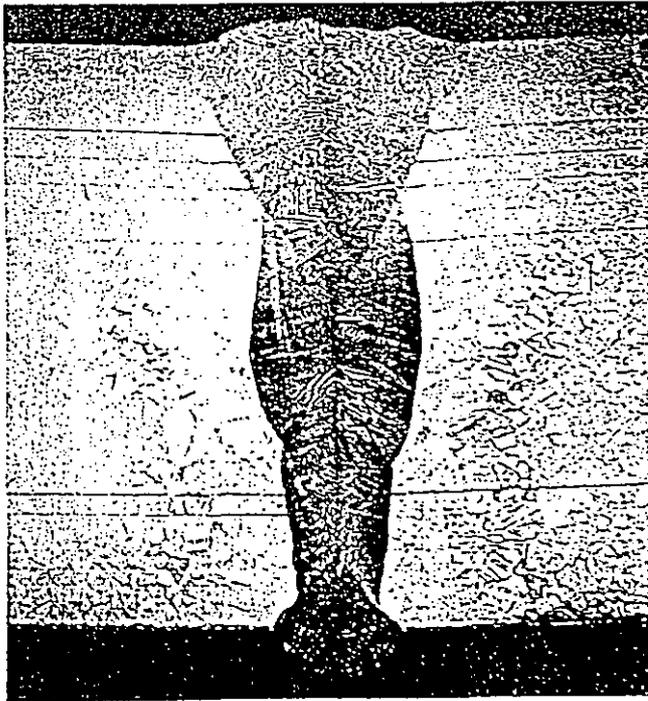
Saldature a FE su accoppiamenti SA 508 (6,5x)



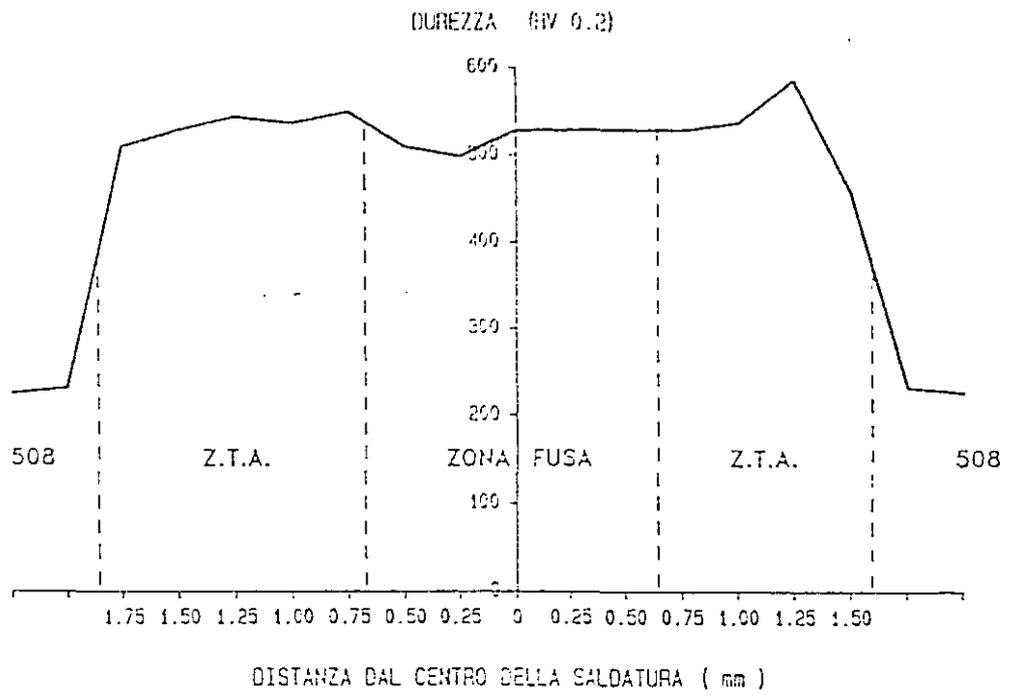
Saldature Laser su accoppiamenti SA 508 (6,5x)



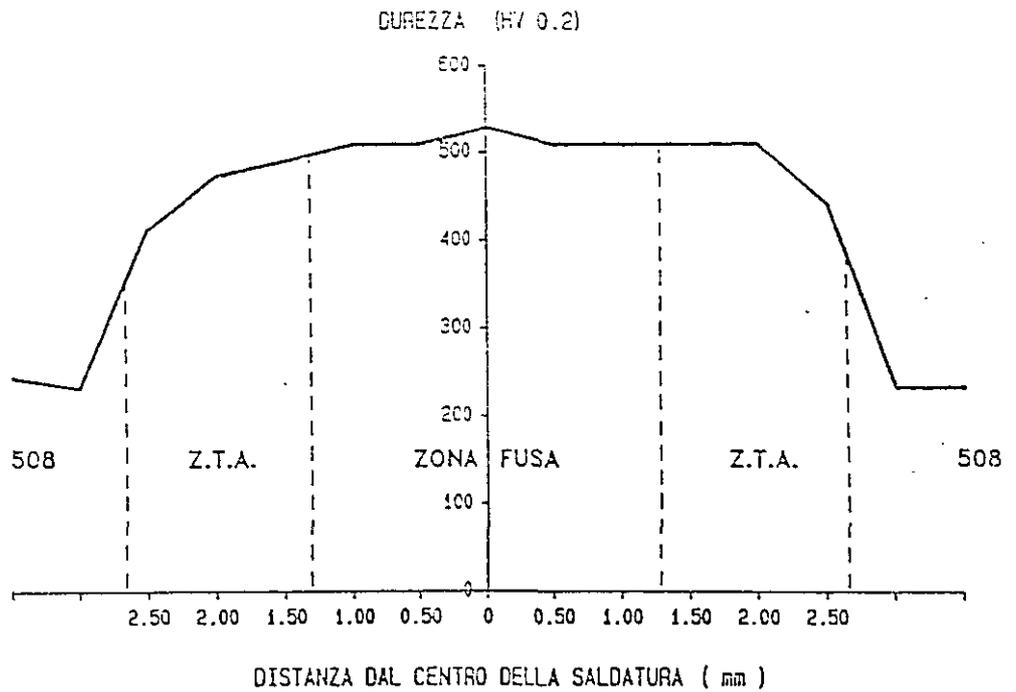
Macrografie di saldature a FE su accoppiamenti Inconel 600 (6,5x)



Macrografie di saldature LASER su accoppiamenti Inconel 600 (6,5x)

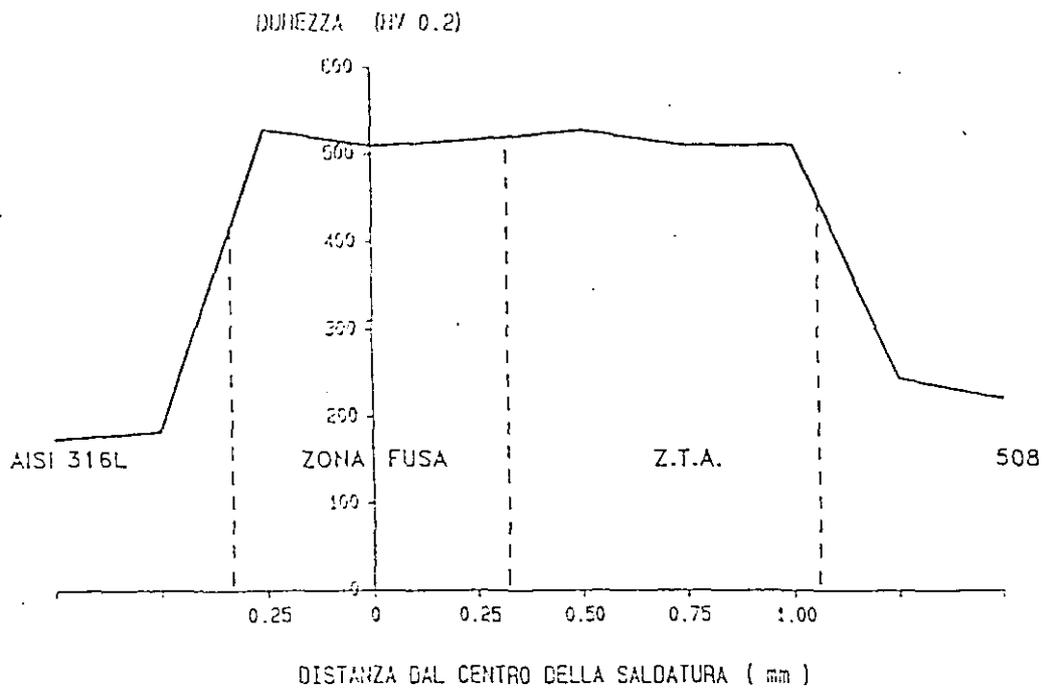


Microdurezze di saldature a FE su accoppiamenti di SA 508

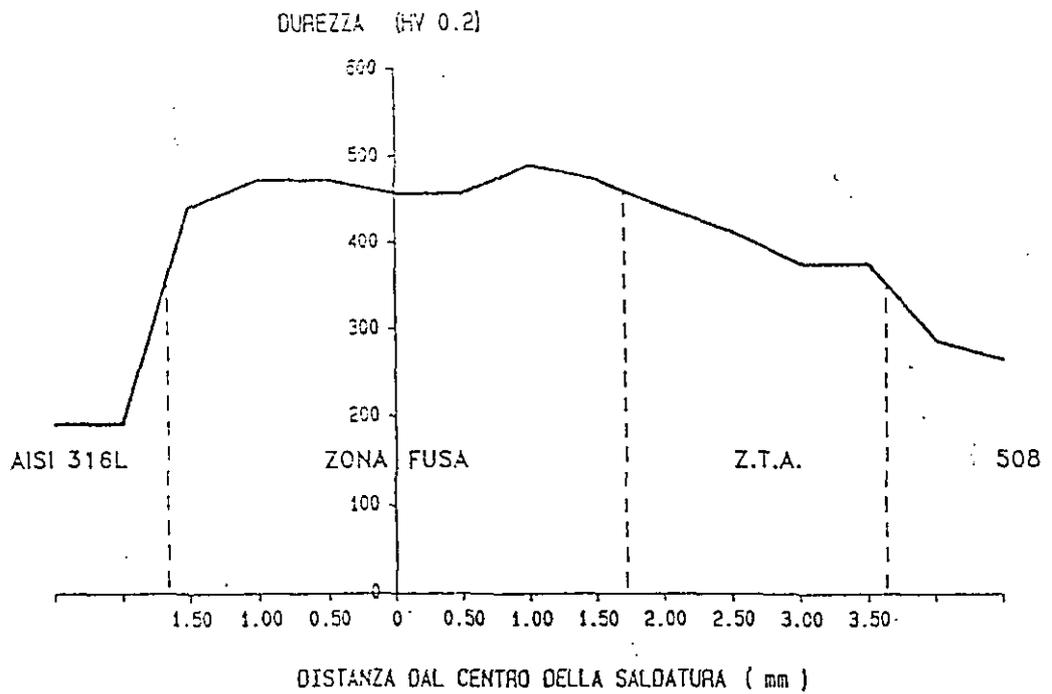


Microdurezze di saldature Laser su accoppiamenti di SA 508

Fig. 18



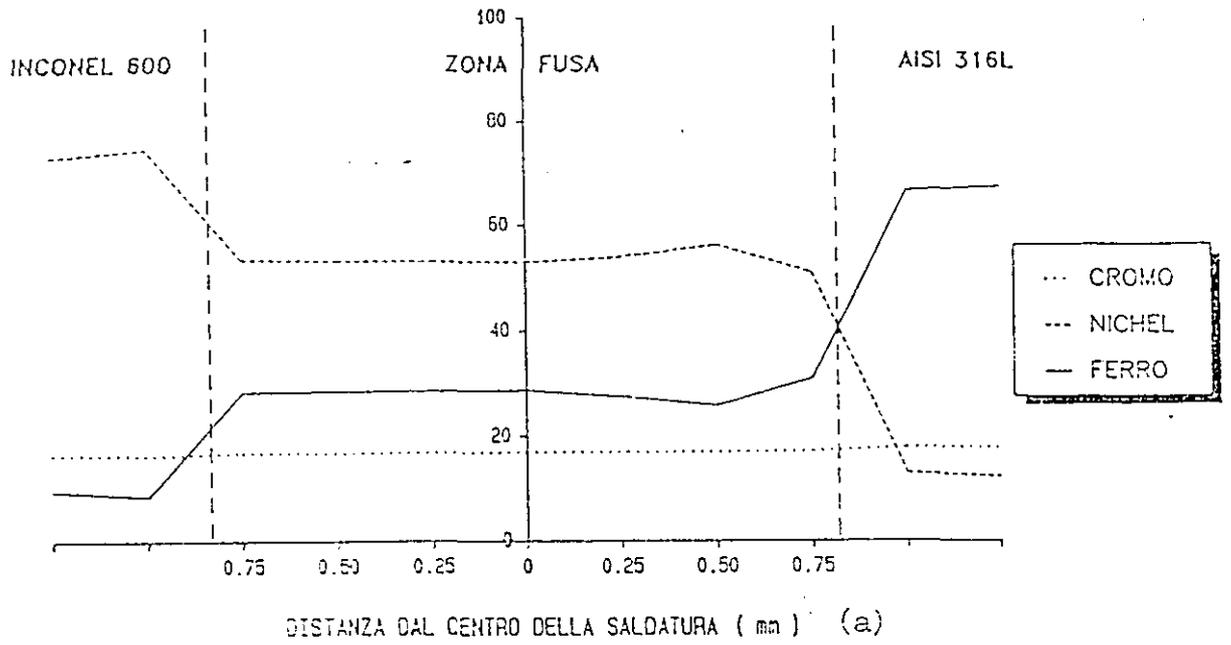
Microdurezze di saldature a FE su accoppiamenti di SA 508 / AISI 316 L



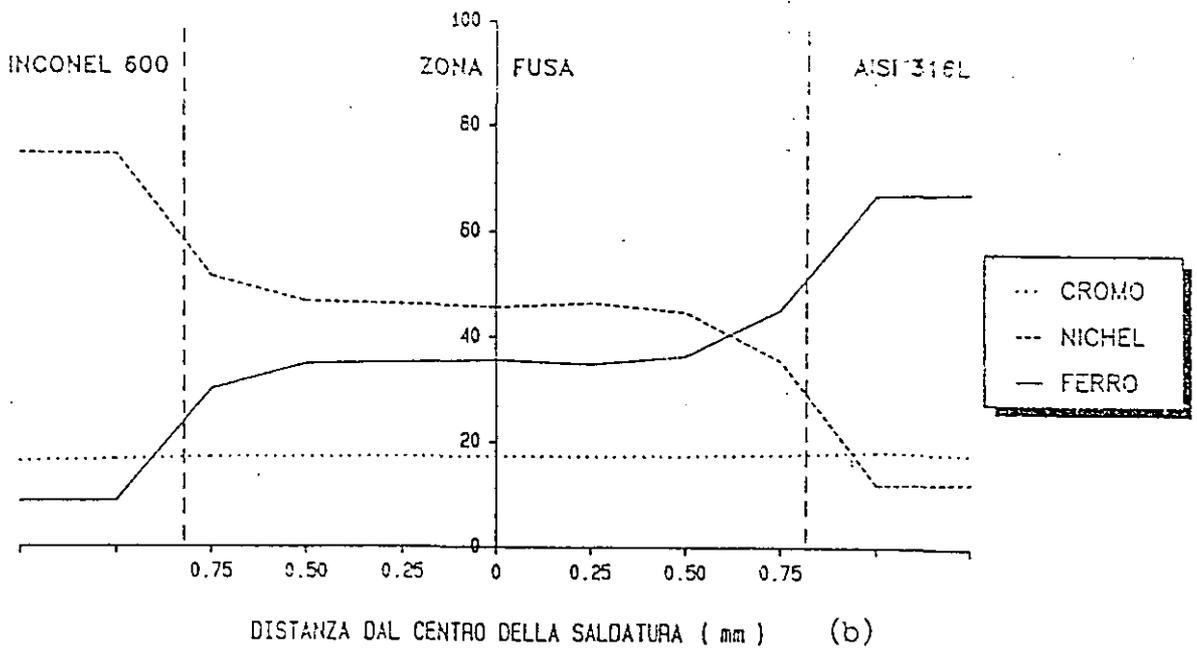
Microdurezze di saldature Laser su accoppiamenti di SA 508 / AISI 316 L

Fig. 19

% ELEMENTI DI LEGA



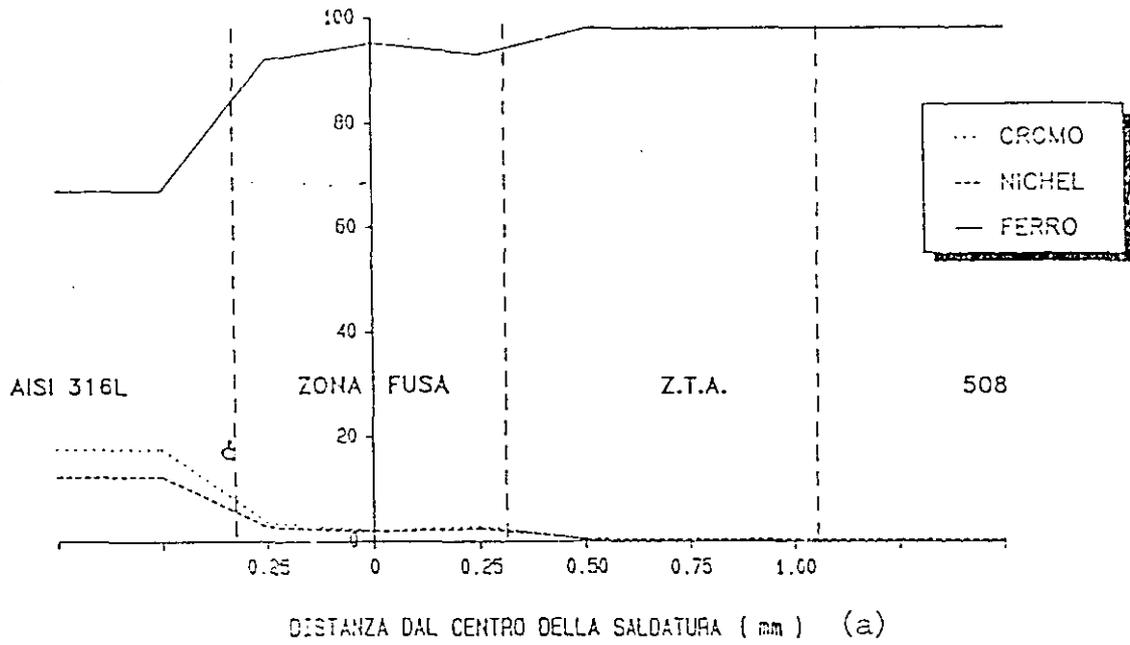
% ELEMENTI DI LEGA



Analisi EDAX su giunti Inconel 600 / AISI 316 L saldati con FE (a) e Laser (b)

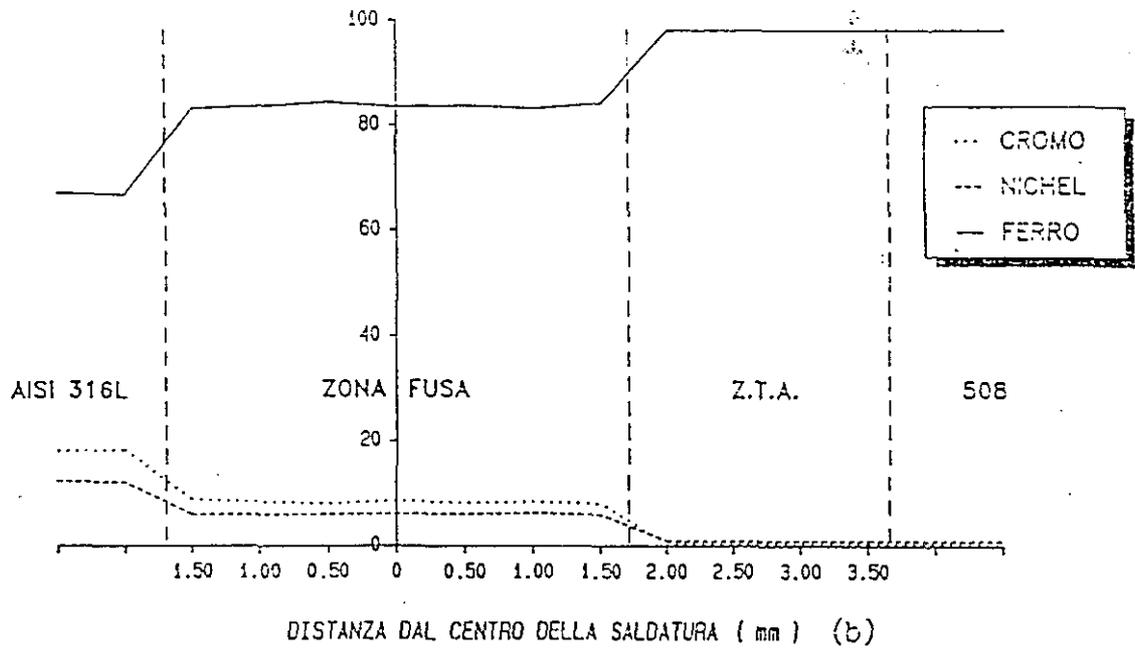
Fig. 20

% ELEMENTI DI LEGA



DISTANZA DAL CENTRO DELLA SALDATURA (mm) (a)

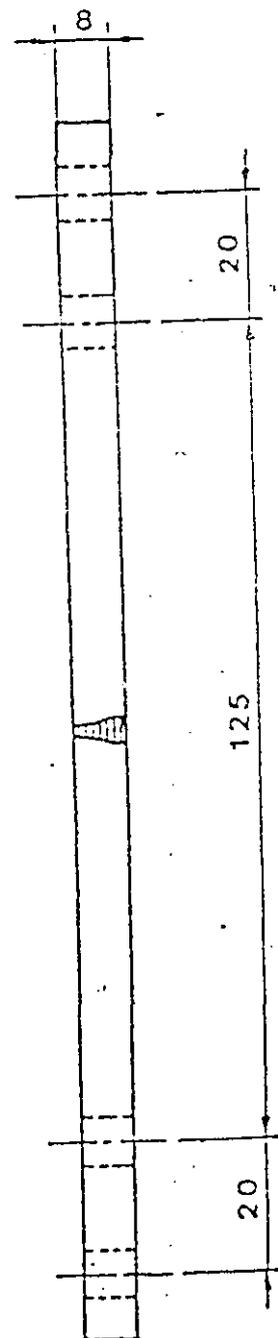
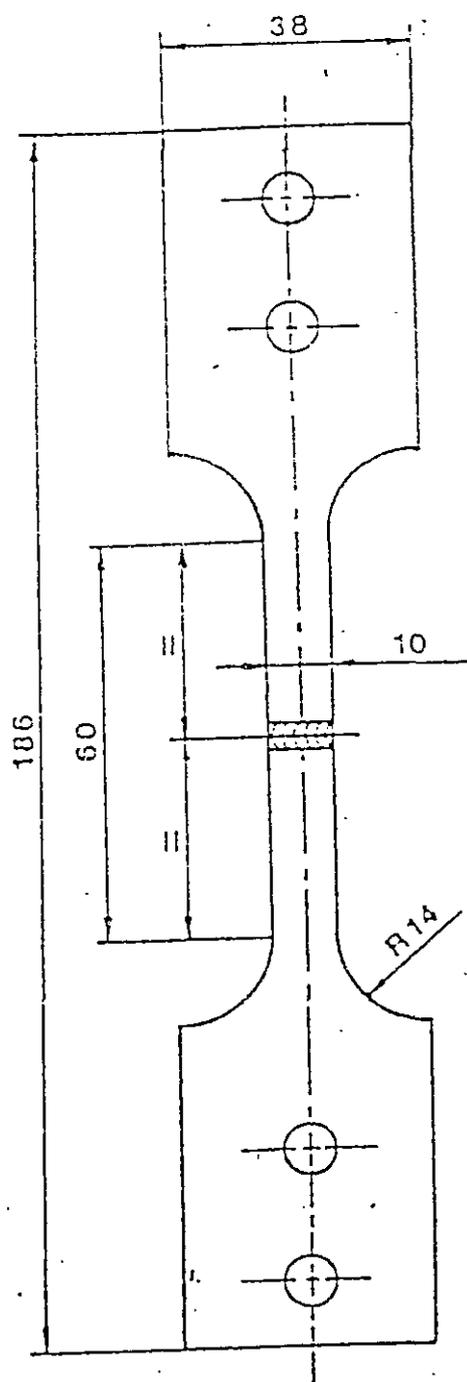
% ELEMENTI DI LEGA



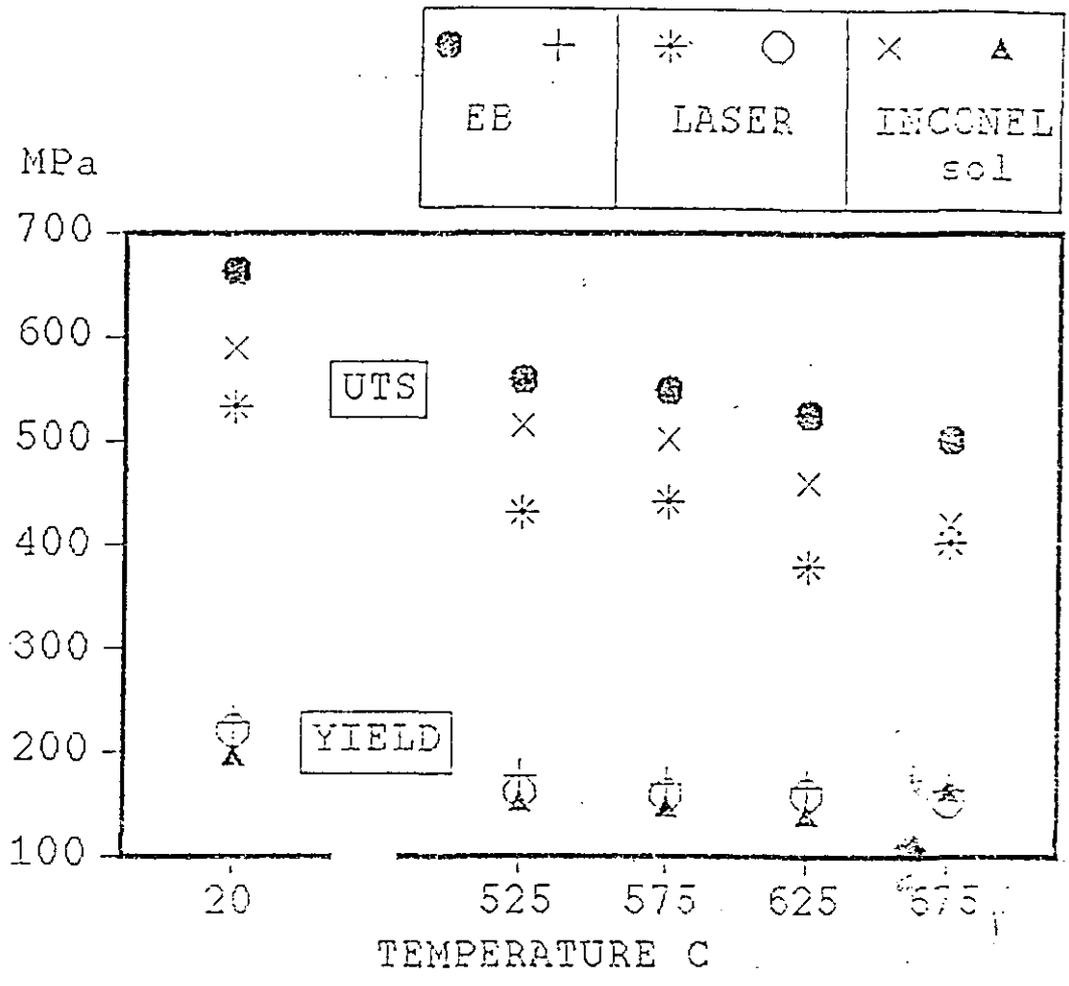
DISTANZA DAL CENTRO DELLA SALDATURA (mm) (b)

Analisi EDAX su giunti SA 508 / AISI 316 L saldati con FE (a) e Laser (b)

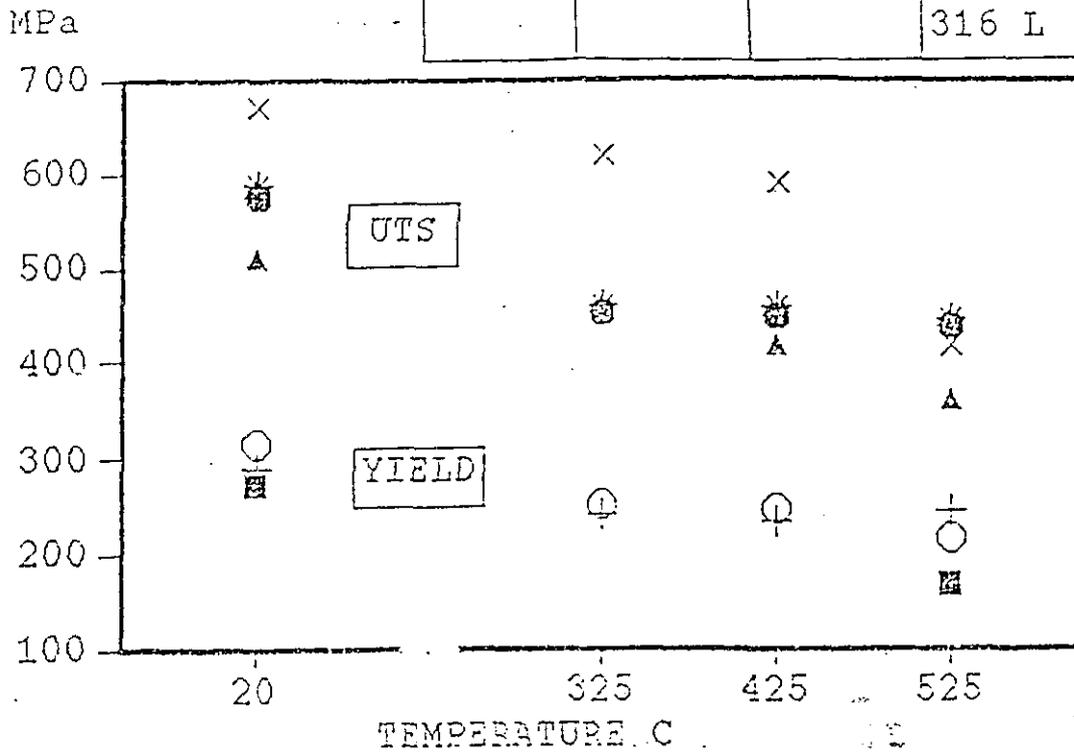
Fig. 21

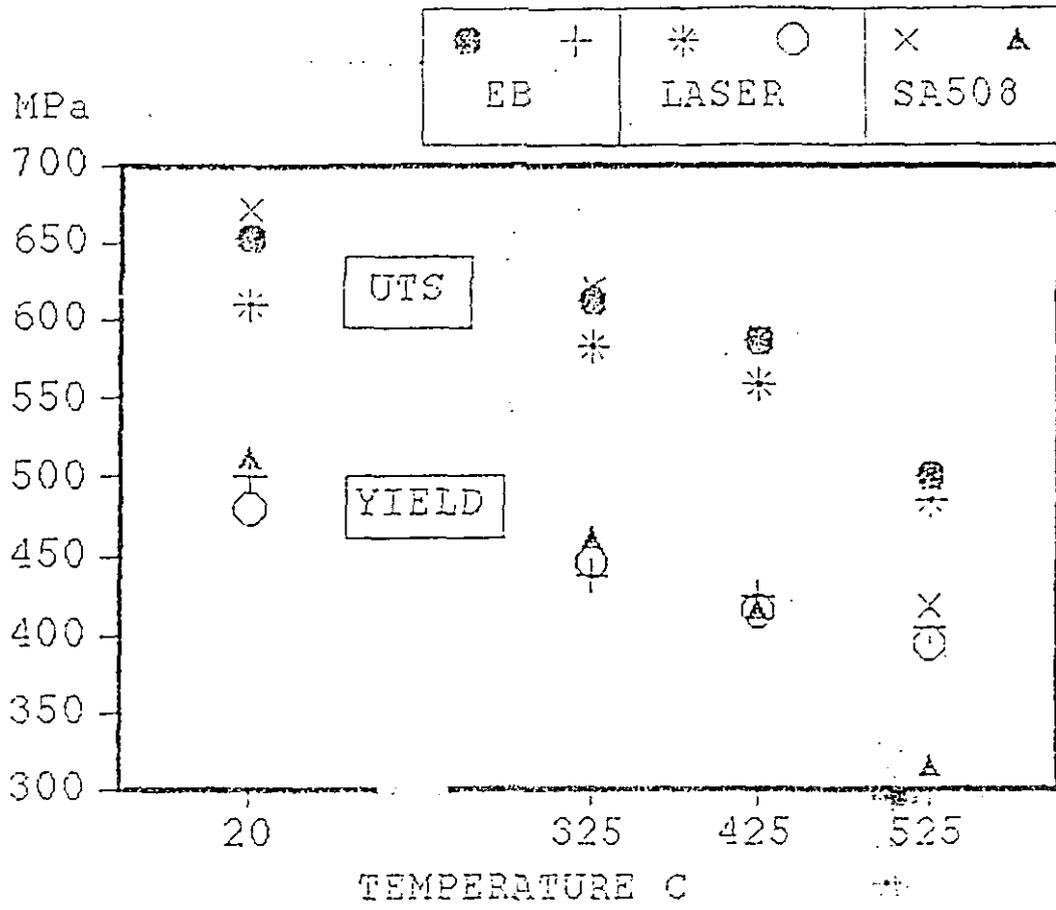


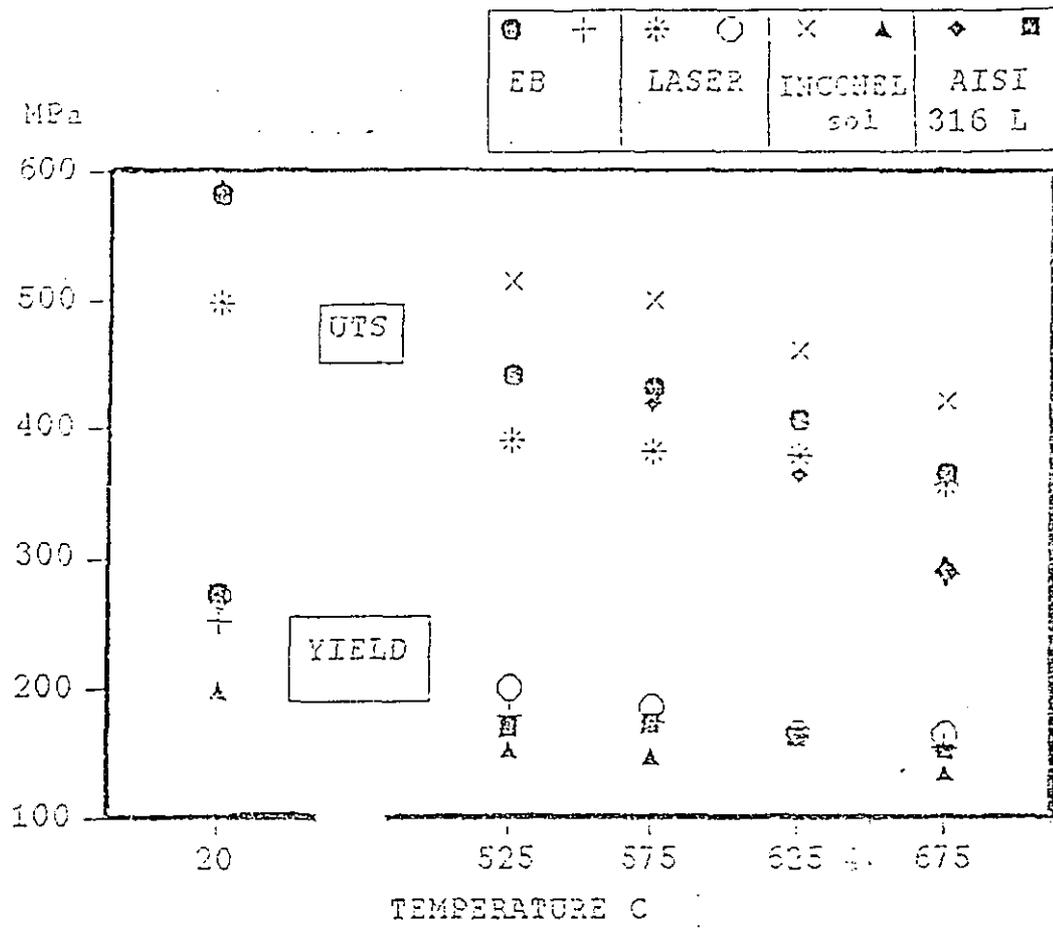
1.6



⊗	+	*	○	×	△	◇	⊠
EB		LASER		SA508		AISI	316 L







CONCLUSIONS

-The microstructures of both EB and laser welded samples are similar.

-The mechanical properties of the EB welded joints are better than that of the the laser welded joints. It can be due to the presence of diffused porosity in the laser welded samples.

-Some microcracks have been evidenced, in the HAZ of EB and laser welded INCONEL 600. The tendency to crack is reduced in the case of the partially solubilized alloy. However, these microcracks are not critical for the tensile properties of the joints.

-The microhardness of austenitic steels is significantly affected by EB and laser irradiation with the respect to the base alloy only in the case of heterogeneous welding. In the case of ferritic steel the microhardness increase in the molten and heat affected zones is due to quenching.

-The chemical composition of the welded zone is homogeneous in all cases.

These results demonstrate the feasibility of laser and electron beam homogeneous and heterogeneous welding of INCONEL 600, AISI 316 stainless steel and SA.508 steels.



INNOVAZIONE NELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI

Giornata di studio e di aggiornamento
organizzata dal Centro di Studio Meccanica
ed Applicazione Materiali
dell' Associazione Italiana di Metallurgia
in collaborazione con
Istituto Italiano della Saldatura

Con il patrocinio del
Centro Inox - Milano
Centro per lo studio e lo sviluppo delle applicazioni
degli acciai inossidabili

**Qualità e certificazione nelle costruzioni saldate:
in ambito europeo e nazionale**
G. Costa
M. Scasso
G.F. Ghiglia

Milano 23 novembre 1994
sede: Piazzale Rodolfo Morandi 2

QUALITA' E CERTIFICAZIONE NELLE COSTRUZIONI SALDATE:
IN AMBITO EUROPEO E NAZIONALE

DOTT.ING. GIULIO COSTA
DOTT.ING. MAURO SCASSO
DOTT.ING. GIAN FABRIZIO GHIGLIA

ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA - GENOVA

NEL 1993 IL GRANDE MERCATO INTERNO DELLA COMUNITA' ECONOMICA EUROPEA È DIVENTATO UNA REALTÀ; GLI ANNI A SEGUIRE, PERTANTO, CI PORTERANNO INEVITABILMENTE UNA NUOVA ORGANIZZAZIONE DEL MONDO EUROPEO DELLA PRODUZIONE. IN QUESTA ORGANIZZAZIONE SARÀ CERTAMENTE MAGGIORE LA RICHIESTA DI QUALITÀ E SICUREZZA, SENZA ULTERIORE INCREMENTO DEI COSTI; LA COSTANZA DELLE CARATTERISTICHE DI PRODOTTO ESSENDO ASSICURATE IN LARGA MISURA DALL'ADOZIONE DI PROCEDURE QUALIFICATE, SPECIALMENTE QUANDO SONO IMPIEGATI PROCESSI DI PRODUZIONE SPECIALI, QUALI LA SALDATURA.

IN QUEST'OTTICA DIVENTANO ASSOLUTAMENTE DETERMINANTI I RIFERIMENTI NORMATIVI E LA PROFESSIONALITÀ DEGLI OPERATORI.

NELLA PRESENTE MEMORIA È PRESENTATA L'ATTUALE SITUAZIONE NORMATIVA IN AMBITO EUROPEO E NAZIONALE, ATTINENTE LE COSTRUZIONI SALDATE, IN RELAZIONE ALLA QUALITÀ ED ALLA CERTIFICAZIONE DEI SISTEMI, DEI PROCESSI E DEL PERSONALE.

1. NORMATIVA DI SISTEMA E DI PROCESSO

IL CEN (COMITÈ EUROPEEN DE NORMALIZATION) È L'ENTE, CON SEDE A BRUXELLES, CHE HA LO SCOPO DI ARMONIZZARE LA NORMATIVA EUROPEA. CREATO NEL 1961 COME ASSOCIAZIONE DI TUTTI GLI ENTI NORMATIVI NAZIONALI DEI PAESI EUROPEI, IL CEN SVOLGE LA SUA ATTIVITÀ MEDIANTE COMITATI TECNICI, I QUALI ELABORANO PROGETTI CHE, SOTTOPOSTI AL VOTO DI TUTTI GLI ENTI MEMBRI, DIVENTANO, SE APPROVATI, NORME EUROPEE. IL CEN HA RECENTEMENTE ASSUNTO GRANDE IMPORTANZA; INFATTI CON IL COMPLETAMENTO DEL MERCATO INTERNO EUROPEO DOVRÀ ESSERE POSSIBILE LA LIBERA CIRCOLAZIONE DEI PRODOTTI IN TUTTI I PAESI DELLA COMUNITÀ.

TRAMITE IL CEN (E QUINDI GLI ENTI NORMATIVI NAZIONALI) SI REALIZZA, PERTANTO, L'ARMONIZZAZIONE DELLE NORMATIVE TECNICHE, FINALIZZATE A FAVORIRE LA RISPONDEZZA DEI PRODOTTI ALLE RISPETTIVE DIRETTIVE.

I PRINCIPALI COMITATI TECNICI DEL CEN PREPOSTI ALL'ELABORAZIONE DELLA NORMATIVA NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI SALDATE SONO:

- IL TC 121 "WELDING"
- IL TC 54 "UNFIRED PRESSURE VESSELS"
- IL TC 135 "STEEL STRUCTURES"
- IL TC 138 "NON DESTRUCTIVE TESTING"

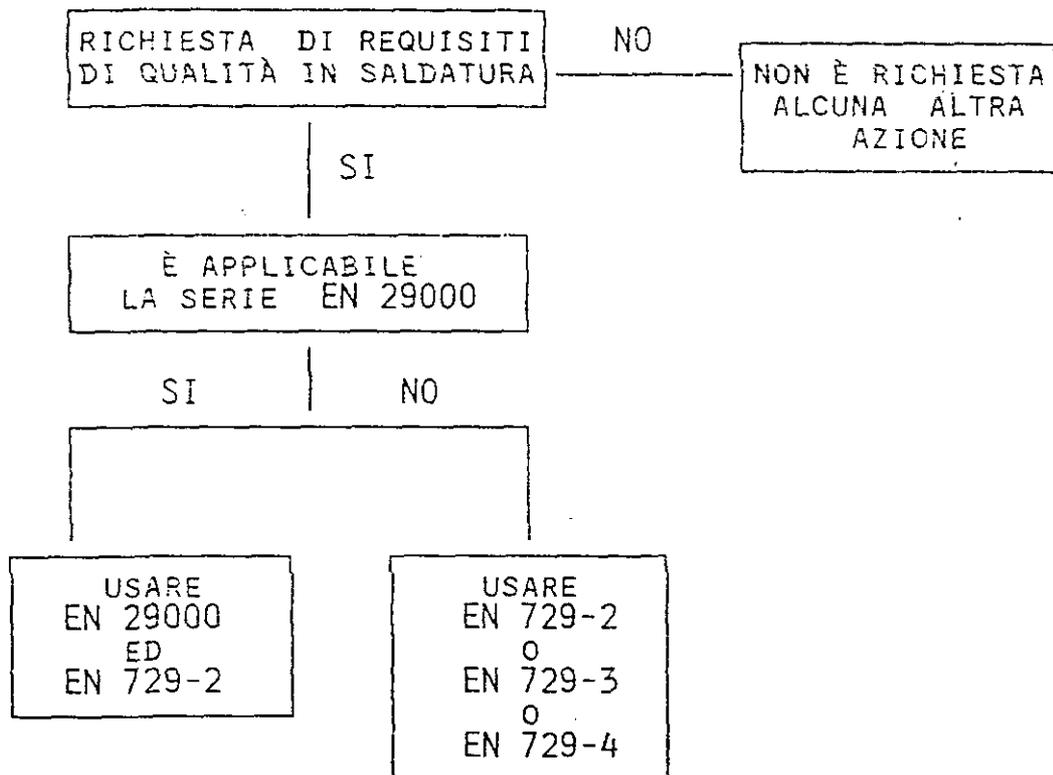
IN PARTICOLARE IL COMITATO TECNICO 121, DIRETTAMENTE INTERESSATO ALLA SALDATURA, HA PREPARATO A TUTT'OGGI CIRCA 30 NORME EUROPEE, MENTRE OLTRE 130 PROGETTI DI NORMA SONO IN ELABORAZIONE, IN DIVERSI STADI DI AVANZAMENTO.

FRA LE NORME EUROPEE DISPONIBILI, ASSUME IMPORTANZA RILEVANTE LA EN 729 "QUALITY REQUIREMENTS FOR WELDING", CHE SI RIFERISCE AI COSTRUTTORI CHE UTILIZZANO LA SALDATURA COME MEZZO RILEVANTE DI FABBRICAZIONE DEI LORO PRODOTTI; SCOPO PRINCIPALE DI QUESTA NORMA È DI AUMENTARE IL LIVELLO DI FIDUCIA NEI CONFRONTI DELLA QUALITÀ DI UN PRODOTTO SALDATO, AUMENTANDO LA CREDIBILITÀ DEL COSTRUTTORE.

A CONFRONTO CON LA SERIE DELLE EN 29000, CHE RIGUARDA I SISTEMI DI QUALITÀ IN GENERALE, LA EN 729 RIVOLGE LA PROPRIA ATTENZIONE ALLE ATTIVITÀ SPECIFICHE DELLA REALIZZAZIONE DI UNA COSTRUZIONE SALDATA, ESPLICITANDO IN MODO ESAUSTIVO I PUNTI 4.9.2. (EN 29001) E 4.8.2. (EN 29002), PER QUANTO RIGUARDA IL PROCESSO SPECIALE "SALDATURA". I LIVELLI DI QUALITÀ CONSIDERATI DALLA EN 729 SONO TRE E CORRISPONDONO AL RISPETTO DI RICHIESTE DEFINITE, IN ORDINE DECRESCENTE, DI:

- COMPREHENSIVE QUALITY (EN 729 - PART 2) (*)
- STANDARD QUALITY (EN 729 - PART 3)
- ELEMENTARY QUALITY (EN 729 - PART 4)

QUESTE RICHIESTE RIGUARDANO TUTTE LE OPERAZIONI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, DAL "CONTRACT REVIEW" ALLA "FINAL INSPECTION", DALLA "TRACEABILITY" AI "QUALITY RECORDS". LA EN 729 PUÒ ESSERE UTILIZZATA, PERTANTO, QUALE PARTE INTEGRANTE, SPECIFICA PER IL SETTORE DELLE COSTRUZIONI SALDATE, DELLA SERIE DELLE EN 29000 O COME RIFERIMENTO AUTONOMO, QUANDO SI RITIENE NON APPLICABILE LA SERIE DELLE EN 29000 O QUANDO LA SALDATURA È ELEMENTO PREDOMINANTE DEL PROCESSO PRODUTTIVO. LO SCHEMA SEGUENTE MOSTRA, IN FORMA GRAFICA, QUANTO PRECEDENTEMENTE INDICATO:



(*) LA PARTE 1 DELLA EN 729 INDICA I PRINCIPI GENERALI A CUI FANNO RIFERIMENTO LE SUCCESSIVE PARTI 2, 3 E 4.

COSTITUENDO UN RIFERIMENTO "QUADRO", LA EN 729 RICHIAMA ALTRE NORME. PER QUANTO RIGUARDA, AD ESEMPIO, LA QUALIFICAZIONE E CERTIFICAZIONE DEI SALDATORI È RICHIAMATA LA EN 287 "APPROVAL TESTING OF WELDER - FUSION WELDING", DI CUI SONO ATTUALMENTE DISPONIBILI LE PARTI RELATIVE AGLI ACCIAI ED ALL'ALLUMINIO E SUE LEGHE, MENTRE SONO IN ELABORAZIONE LE PARTI RELATIVE AD ALTRE LEGHE SPECIALI (QUALI IL NICHEL E LE SUE LEGHE, IL RAME E LE SUE LEGHE, IL TITANIO E LE SUE LEGHE) NONCHÈ LE PARTI RELATIVE A PROCESSI DI SALDATURA NON PER FUSIONE.

DIVERSAMENTE DALLE NORME UNI CHE RIGUARDANO LA CERTIFICAZIONE DEI SALDATORI, LA EN 287 PREVEDE L'ELABORAZIONE E L'APPROVAZIONE DI UNA SPECIFICA DI SALDATURA SULLA BASE DELLA QUALE SONO EFFETTUATE LE PROVE PRATICHE DEI SALDATORI. DA QUESTO PUNTO DI VISTA, PERTANTO, LA EN 287 APPROSSIMA LA FILOSOFIA APPLICATA DALLA SEZIONE IX DEL CODICE ASME.

LE MODALITÀ DI QUALIFICAZIONE E CERTIFICAZIONE DEI PROCESSI DI SALDATURA SONO DESCRITTE DALLA EN 288 "SPECIFICATION AND QUALIFICATION OF WELDING PROCEDURES FOR METALLIC MATERIALS ANCH'ESSE RICHIESTE DALLA EN 729.

LA EN 288 INTRODUCE ALCUNI ELEMENTI NUOVI, RISPETTO ALL'ATTUALE SITUAZIONE NORMATIVA ITALIANA, CHE CONSISTONO SOPRATTUTTO NELLA POSSIBILITÀ DI QUALIFICARE E CERTIFICARE I PROCESSI DI SALDATURA CON MODALITÀ CHE NON SEMPRE PREVEDONO LA REALIZZAZIONE DEL TRADIZIONALE SAGGIO SALDATO; IN PARTICOLARE SONO INDICATE CINQUE POSSIBILITÀ DI QUALIFICAZIONE, OVVERO MEDIANTE:

- PREVIOUS WELDING EXPERIENCE (EN 288 - PART 6) (*)
- APPROVED WELDING CONSUMABLE (EN 288 - PART 5)
- WELDING PROCEDURE TEST (EN 288 - PART 3-4)
- STANDARD WELDING PROCEDURE (EN 288 - PART 7)
- PREPRODUCTION WELDING TEST (EN 288 - PART 8)

LA SCELTA DELLA O DELLE POSSIBILITÀ DI QUALIFICAZIONE DEI PROCESSI DI SALDATURA È O SARÀ INDICATA NELLE SINGOLE NORME DI PRODOTTO.

(*) LE PARTI 1 E 2 DELLA EN 288 INDICANO I PRINCIPI GENERALI A CUI FANNO RIFERIMENTO LE SUCCESSIVE PARTI 3,4,5,6,7 E 8.

DELLA EN 288 SONO ATTUALMENTE DISPONIBILI LE PARTI RELATIVE AGLI ACCIAI ED ALL'ALLUMINIO E SUE LEGHE CON LE MODALITÀ DI QUALIFICAZIONE "WELDING PROCEDURE TEST"; LE ALTRE PARTI SONO IN AVANZATA FASE DI ELABORAZIONE.

PER QUANTO CONCERNE IL PERSONALE PREPOSTO ALLA GESTIONE TECNICA DEL PROCESSO PRODUTTIVO, LA EN 729 FA RIFERIMENTO ALLA EN 719 "WELDING COORDINATION - TASK AND RESPONSABILITY", IL CUI ARGOMENTO D'INTERESSE È TRATTATO IN DETTAGLIO NEL PARAGRAFO SUCCESSIVO.

LA QUALIFICAZIONE E LA CERTIFICAZIONE DEGLI OPERATORI DEI CONTROLLI NON DISTRUTTIVI SONO DESCRITTE, INFINE, NELLA EN 473 "QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF NDT PERSONNEL - GENERAL PRINCIPLES"; QUESTA NORMA, ELABORATA DAL TC 138 "NON DESTRUCTIVE TESTING" (A DIFFERENZA DELLE PRECEDENTI NORME MENZIONATE, CHE SONO STATE PREPARATE DAL CEN TC 121), PROPONE CONDIZIONI SOSTANZIALMENTE ANALOGHE A QUELLE PREVISTE DALLA NORMATIVA ITALIANA MESSA A PUNTO DAL CICPND.

SULLA BASE DELL'ADOZIONE, NEL PROCESSO PRODUTTIVO, DI DIFFERENTI LIVELLI DI QUALITÀ, I GIÀ MENZIONATI COMITATI TECNICI 54 (UNFIRED PRESSURE VESSELS) E 135 (STEEL STRUCTURES) STANNO ATTUALMENTE ELABORANDO CRITERI PER LA QUALIFICAZIONE DEI COSTRUTTORI. TALI CRITERI DOVREBBERO METTERE IN RELAZIONE LA COMPLESSITÀ DELLA COSTRUZIONE SALDATA ED IL LIVELLO DI QUALITÀ RICHiesto CON LA QUALIFICAZIONE ATTRIBUITA AL COSTRUTTORE.

IN CONCLUSIONE, È IMPORTANTE EVIDENZIARE CHE IL FATTORE INNOVATIVO PREPONDERANTE DELL'ATTIVITÀ DI NORMAZIONE SVOLTA DAL CEN NON È DA ATTRIBUIRSI A QUALCHE CONDIZIONE SPECIFICA, BENSÌ ALL'INSIEME DELLE NORME CHE, COSTITUENDO UN MODERNO "CORPUS" OMOGENEO ED INTEGRATO, ASSUME UN INDISPENSABILE VALORE DI RIFERIMENTO PER TUTTE LE FUTURE ATTIVITÀ DI FABBRICAZIONE.

2. LE FIGURE PROFESSIONALI

NELLA NUOVA ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO CIASCUNO, IN QUALUNQUE POSIZIONE NELL'AMBITO DEL PROCESSO PRODUTTIVO, SARÀ TENUTO A DIMOSTRARE DI ESSERE IN GRADO DI SVOLGERE I PROPRI COMPITI IN MODO CORRETTO.

RISULTA PERTANTO NECESSARIA UNA CERTIFICAZIONE DELLE SPECIFICHE FIGURE PROFESSIONALI, RICONOSCIUTA DA TUTTE LE PARTI INTERESSATE.

CON RIFERIMENTO AL SETTORE SPECIFICO DELLA SALDATURA, È POSSIBILE DIVIDERE LE NASCENTI FIGURE PROFESSIONALI EUROPEE IN DUE GRUPPI: IL PRIMO CARATTERIZZATO DA UN LIVELLO D'ISTRUZIONE, STRETTAMENTE LEGATO A SPECIFICHE CONOSCENZE (EDUCATIONAL LEVELS); IL SECONDO DEFINITO DA MANSIONI, PER LO SVOLGIMENTO DELLE QUALI VIENE RICHiesta ANCHE UNA SPECIFICA ESPERIENZA (JOB FUNCTIONS).

CIRCA IL PRIMO GRUPPO, L'EFW (EUROPEAN WELDING FEDERATION) HA STABILITO UN PROGETTO DI CERTIFICAZIONE, ARTICOLATO SU QUATTRO LIVELLI D'ISTRUZIONE AL DI SOPRA DELLA FIGURA DI SALDATORE; SI TRATTA, PARTENDO DAL LIVELLO PIÙ ELEVATO, DELLE FIGURE SEGUENTI:

- EUROPEAN WELDING ENGINEER (EWE)
- EUROPEAN WELDING TECHNOLOGIST (EWT)
- EUROPEAN WELDING SPECIALIST (EWS)
- EUROPEAN WELDING PRACTITIONER (EWP)

PER OGNUNO DI QUESTI LIVELLI È PREVISTA UNA SPECIFICA "GUIDELINE", PREPARATA DAL COMITATO "WELDING PERSONNEL" DELL'EFW, CONTENENTE I REQUISITI PER LA FORMAZIONE E L'ACCESSO ALLA STESSA, LE MODALITÀ PER L'ESAME DI QUALIFICAZIONE ED I REQUISITI PER LA CERTIFICAZIONE.

LE "GUIDELINES" RELATIVE ALL'EWE, ALL'EWT E ALL'EWS SONO GIÀ STATE EMESSE; QUELLA RELATIVA ALL'EWP È IN AVANZATO STATO DI PREPARAZIONE.

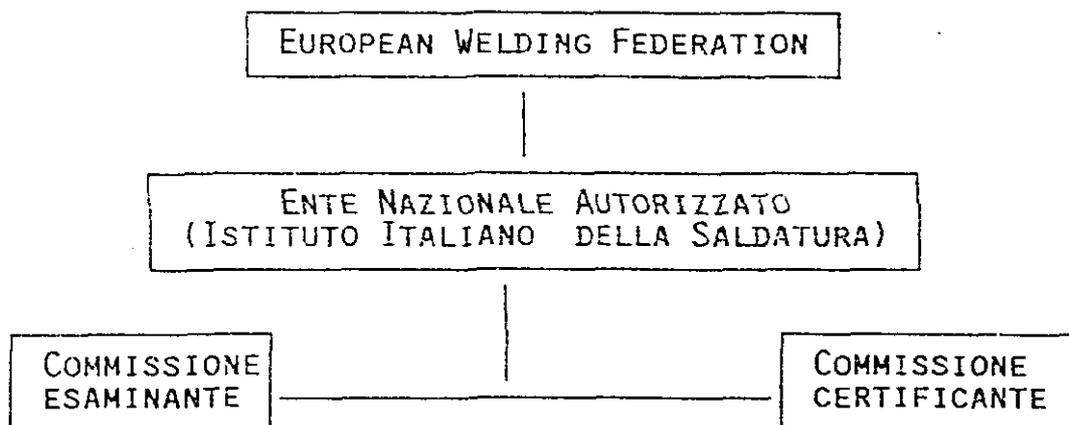
PER IL CONSEGUIMENTO DELLA CERTIFICAZIONE EUROPEA, RELATIVAMENTE AD UNA DELLE FIGURE SOPRA MENZIONATE, È NECESSARIO SUPERARE UN ESAME DOPO AVER PARTECIPATO A CORSI SPECIFICI, IL CONTENUTO DEI QUALI È SCHEMATICAMENTE RIPORTATO NEL PROSPETTO SEGUENTE:

ORE DI INSEGNAMENTO	EWE	EWT	EWS	EWP
CORSI TEORICI				
1. PROCEDIMENTI DI SALDATURA ED APPARECCHIATURE	102	80	45	26
2. MATERIALI E LORO COMPORTAMENTO IN SALDATURA	110	80	45	24
3. COSTRUZIONE E PROGETTAZIONE	64	40	22	12
4. FABBRICAZIONE ED ASPETTI APPLICATIVI	110	80	50	36
TOTALE PARZIALE	386	280	162	100
ADDESTRAMENTO PRATICO	60	60	60	0
TOTALE GENERALE	446	340	222	100

L'AMMISSIONE A QUESTI CORSI RICHIEDE CONOSCENZE SCIENTIFICHE E/O TECNICHE DI CARATTERE GENERALE, DIVERSIFICATE IN FUNZIONE DELLO SPECIFICO LIVELLO DI FORMAZIONE IN SALDATURA; IN PARTICOLARE:

- PER L'EWE È RICHiesto IL DIPLOMA O LA LAUREA IN INGEGNERIA;
- PER L'EWT È RICHiesto IL DIPLOMA TECNICO DI SCUOLA MEDIA SUPERIORE;
- PER L'EWS È RICHiesta UNA QUALIFICA PROFESSIONALE OPPURE LA QUALIFICA EWP;
- PER L'EWP È RICHiesta LA QUALIFICA PER ALMENO UN PROCESSO DI SALDATURA.

NELL'INTENTO DI RAGGIUNGERE UNA COMPLETA ARMONIZZAZIONE ED UN MUTUO RICONOSCIMENTO FRA I PAESI MEMBRI, IL PROGETTO DELL'EFW RICHIEDE CHE TUTTE LE ATTIVITÀ RIGUARDANTI SIA I CORSI CHE I RELATIVI ESAMI E CERTIFICAZIONI SIANO GESTITI DA UN ENTE NAZIONALE AUTORIZZATO (IN ITALIA È L'ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA) (*). QUESTO ENTE DEVE AVER CONSEGUITO L'APPROVAZIONE DA PARTE DELL'EFW, SULLA BASE DI UN AUDIT COMPLETO E SEVERO CON RIFERIMENTO AD UN REGOLAMENTO PRESTABILITO DALL'EFW STESSO; COME RISULTA DALLO SCHEMA SOTTO RIPORTATO.



(*) L'ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA HA OTTENUTO LO "STATUS" DI ENTE NAZIONALE AUTORIZZATO NEL NOVEMBRE DEL 1993.

ATTUALMENTE LE CERTIFICAZIONI DI CEWE E DI CEWT VENGONO ATTRIBUITE AUTOMATICAMENTE ALL'ATTO DEL RILASCIO DELLA QUALIFICAZIONE INIZIALE DI EWE ED EWT. IL MANTENIMENTO NELL'ALBO RELATIVO SARÀ SUBORDINATO ALLA PRESENTAZIONE, DA PARTE DELL'INTERESSATO, DI UNA ADEGUATA DOCUMENTAZIONE ATTESTANTE LA CONTINUITÀ DEL SUO COINVOLGIMENTO NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI SALDATE, A SCADENZE TRIENNALI.

QUESTE FIGURE AVRANNO PERTANTO UN DOPPIO RICONOSCIMENTO; QUELLO DELL'EUROPEAN WELDING FEDERATION ATTRAVERSO L'IIS (NELLA SUA VESTE DI ENTE NAZIONALE AUTORIZZATO) E QUELLO DELL'EUROPEAN ACCREDITATION AND CERTIFICATION COUNCIL (AEC), ATTRAVERSO IL SINCERT, DAL QUALE L'IIS È STATO ACCREDITATO QUALE ENTE CERTIFICANTE, ANCHE NEL SETTORE "PERSONALE", NEL SETTEMBRE 1994.

IN QUESTO MODO SI REALIZZERÀ PER QUESTI TECNICI ALTAMENTE SPECIALIZZATI, CHE SVOLGONO UN RUOLO FONDAMENTALE NEL PROCESSO PRODUTTIVO, IL PIÙ AMPIO RICONOSCIMENTO SIA A LIVELLO NAZIONALE CHE INTERNAZIONALE.

PER QUANTO RIGUARDA IL SECONDO GRUPPO DI FIGURE PROFESSIONALI, QUELLO CONNESSO CON MANSIONI SPECIFICHE, È AL MOMENTO POSSIBILE RICONOSCERE LE DUE FIGURE SEGUENTI:

- WELDING COORDINATOR
- ISPETTORE DI SALDATURA

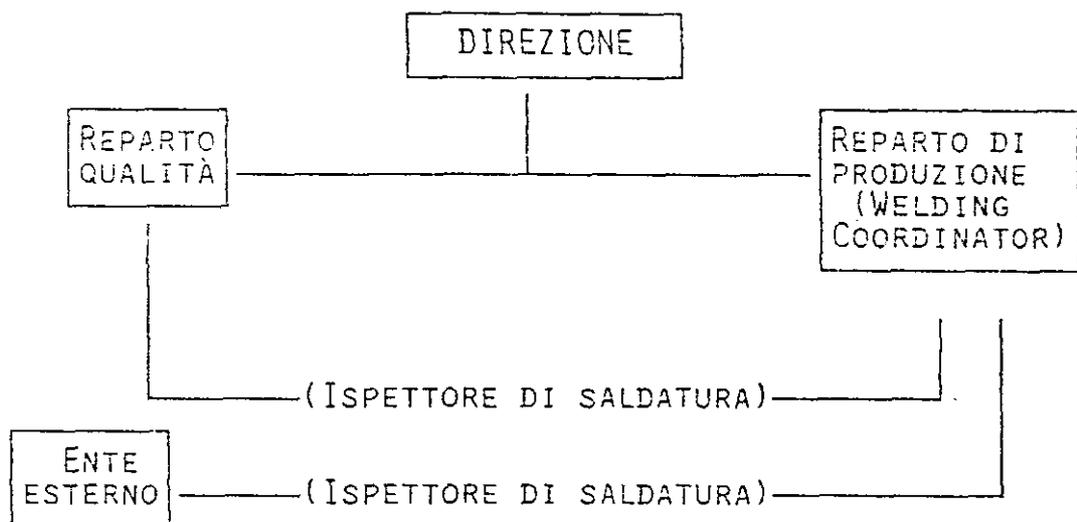
PER QUANTO RIGUARDA IL WELDING COORDINATOR, LA GIÀ CITATA EN 719 PROPOSTA DALLA SC 2 DEL CEN TC 121, HA OTTENUTO L'APPROVAZIONE FINALE DA PARTE DELLE DELEGAZIONI RAPPRESENTATIVE DEI PAESI CEE ED EFTA. CON RIFERIMENTO ALLA SUDETTA NORMA EN, AL WELDING COORDINATOR SONO CONFERITE RESPONSABILITÀ NELL'ORGANIZZAZIONE DELLA PRODUZIONE PER LE ATTIVITÀ RIGUARDANTI LA SALDATURA; LA SUA CONOSCENZA E COMPETENZA DEVE ESSERE DIMOSTRATA ATTRAVERSO ADDESTRAMENTO, FORMAZIONE E RELATIVA ESPERIENZA LAVORATIVA.

IL COSTRUTTORE NOMINA IL WELDING COORDINATOR IN RIFERIMENTO AD UNO DEI SEGUENTI LIVELLI DI CONOSCENZA, RICHIESTI DALLA NATURA E COMPLESSITÀ DELL'ATTIVITÀ PRODUTTIVA:

- WELDING COORDINATOR DI LIVELLO 1: APPROFONDATA CONOSCENZA TECNICA (PIANIFICAZIONE, REALIZZAZIONE, SUPERVISIONE E COLLAUDO) PER OGNI GENERE DI MANSIONE E RESPONSABILITÀ NEI PROCESSI DI SALDATURA; UN EWE CON UN'ESPERIENZA DI ALMENO 3 ANNI VIENE RITENUTO IDONEO (COME ESPLICITAMENTE INDICATO NELL'ALLEGATO A ALLA STESSA NORMA);

- WELDING COORDINATOR DI LIVELLO 2: SPECIFICA CONOSCENZA TECNICA (PIANIFICAZIONE, REALIZZAZIONE, SUPERVISIONE E COLLAUDO) PER MANSIONI E RESPONSABILITÀ NEI PROCESSI DI SALDATURA IN UN DETERMINATO SETTORE; UN EWT CON UN'ESPERIENZA DI ALMENO 3 ANNI VIENE RITENUTO IDONEO (COME ESPPLICITAMENTE INDICATO NELL'ALLEGATO A ALLA STESSA NORMA)
- WELDING COORDINATOR DI LIVELLO 3: CONOSCENZA TECNICA DI BASE (PIANIFICAZIONE, REALIZZAZIONE, SUPERVISIONE E COLLAUDO) PER MANSIONI E RESPONSABILITÀ IN UN LIMITATO SETTORE; UN EWS CON UN'ESPERIENZA DI ALMENO 3 ANNI VIENE CONSIDERATO IDONEO (COME ESPPLICITAMENTE INDICATO NELL'ALLEGATO A ALLA STESSA NORMA).

MENTRE IL WELDING COORDINATOR AGISCE NEL REPARTO DI PRODUZIONE, L'ISPETTORE DI SALDATURA OPERA NEL REPARTO QUALITÀ OD APPARTIENE AD UN ENTE ESTERNO.



PER QUANTO RIGUARDA L'ISPETTORE DI SALDATURA, A COMINCIARE DAL 1990, IN ARMONIA CON I PROPRI COMPITI ISTITUZIONALI E PER VENIRE INCONTRO ALLE ESIGENZE DELL'INDUSTRIA ITALIANA, L'IIS HA DECISO DI ORGANIZZARE UNO SCHEMA DI CERTIFICAZIONE RIGUARDANTE IL PERSONALE ATTIVO NEL SETTORE DELL'ISPEZIONE DELLE COSTRUZIONI SALDATE.

IL REGOLAMENTO DI CERTIFICAZIONE DELL'IIS È STATO ELABORATO SULLA BASE DI UNA GUIDA MESSA A PUNTO NEL 1989 DAGLI ISTITUTI DI SALDATURA EUROPEI, MEMBRI DELL'EUROPEAN COUNCIL FOR COOPERATION IN WELDING (ECCW), TRASFORMATOSI NEL 1992 IN EUROPEAN WELDING FEDERATION (EWF).

LO SCHEMA DI CERTIFICAZIONE PREVEDE TRE LIVELLI DI QUALIFICAZIONE, CHE PARTENDO DAL LIVELLO PIÙ ELEVATO SONO:

- ISPETTORE DI SALDATURA DI LIVELLO 3
- ISPETTORE DI SALDATURA DI LIVELLO 2
- ISPETTORE DI SALDATURA DI LIVELLO 1

LA CERTIFICAZIONE È OTTENUTA, CON RIFERIMENTO AL LIVELLO DI SCOLARITÀ DEL CANDIDATO, TRAMITE ESAME E VERIFICA, DA PARTE DELLA COMMISSIONE DI CERTIFICAZIONE DELL'ISTITUTO, DEL CURRICOLO PROFESSIONALE DEL CANDIDATO STESSO E DELLA DOCUMENTAZIONE TECNICA PRESENTATA A DIMOSTRAZIONE DELL'ESPERIENZA ACQUISITA NEL SETTORE DELL'ISPEZIONE NELLE COSTRUZIONI SALDATE.

AD OGGI, L'IIS HA RILASCIATO CIRCA 250 CERTIFICATI DI ISPETTORE DI SALDATURA AI LIVELLI 3, 2 ED 1.

QUESTI CERTIFICATI, RIFERENDOSI AD UNA ATTIVITÀ LAVORATIVA SPECIFICA (JOB FUNCTION), SONO VALIDI PER UN PERIODO DI TRE ANNI; ALLA FINE DI TALE PERIODO ESSI DEVONO ESSERE RINNOVATI MEDIANTE PRESENTAZIONE DI ADEGUATA DOCUMENTAZIONE RELATIVA AL PERIODO STESSO.

ATTUALMENTE L'EFW STA PORTANDO A TERMINE, PROBABILMENTE ENTRO LA PRIMAVERA DEL 1995, UNO SCHEMA DI FORMAZIONE DI QUESTA FIGURA PROFESSIONALE, PIÙ AVANZATO; IN ARMONIA ANCHE CON QUANTO REALIZZATO PER LE FIGURE PROFESSIONALI PRECEDENTEMENTE MENZIONATE (EWE, EWT, EWS, EWP).

IL PROGETTO DI "GUIDELINE" RIGUARDANTE L'EUROPEAN WELDING INSPECTOR (EWI) PREVEDE QUATTRO LIVELLI DI SPECIALIZZAZIONE RIPORTATI DI SEGUITO IN ORDINE DECRESCENTE:

- EUROPEAN WELDING INSPECTOR LEVEL 1;
- EUROPEAN WELDING INSPECTOR LEVEL 2;
- EUROPEAN WELDING INSPECTOR LEVEL 3;
- EUROPEAN WELDING INSPECTOR LEVEL 4.

SONO STATI PREVISTI DUE PERCORSI PER LA CERTIFICAZIONE:

- IL PRIMO, PARTENDO DAL LIVELLO D'ISTRUZIONE TECNICA RICHiesto, PREVEDE UN ACCESSO DIRETTO AI CORSI (DIVERSIFICATI IN FUNZIONE DEL LIVELLO RICHiesto) DI EUROPEAN WELDING INSPECTORS;
- IL SECONDO PERCORSO PREVEDE L'INTEGRAZIONE DI UNA PREESISTENTE QUALIFICA DI EWE, EWT, EWS ED EWP CON CORSI SPECIFICI DI ISPEZIONE DELLE SALDATURE.

COME PER L'EWE, L'EWT, L'EWS, L'EWP ANCHE PER L'EUROPEAN WELDING INSPECTOR, TUTTE LE ATTIVITÀ RELATIVE ALLA QUALIFICA E LA CERTIFICAZIONE SARANNO GESTITE DALL'ENTE NAZIONALE AUTORIZZATO.

ANCHE PER QUANTO RIGUARDA GLI EUROPEAN WELDING INSPECTORS, INFINE, L'IIS POTRÀ EMETTERE CERTIFICAZIONI SULLA BASE DI NORME TRANSITORIE (NEL CASO SPECIFICO L'ATTUALE REGOLAMENTO DELL'IIS RELATIVO ALL'ISPETTORE DI SALDATURA), APPROVATE DALL'EFW. INOLTRE L'IIS RICHIEDERÀ AL SINCERT L'ESTENSIONE DELL'ACCREDITAMENTO ANCHE PER QUESTE FIGURE PROFESSIONALI; E CIÒ AL FINE DI ISTITUIRE UN ALBO I CUI ISCRITTI POTRANNO USUFRUIRE SIA DEL RICONOSCIMENTO DELL'EFW (TRAMITE L'IIS) SIA DEL RICONOSCIMENTO DELL'AEC (TRAMITE IL SINCERT).

4. CONCLUSIONE

NEL 1994, DOPO LA CADUTA DELLE PRINCIPALI BARRIERE EUROPEE ALLA LIBERA CIRCOLAZIONE DELLE MERCI, DEI SERVIZI, DEI CAPITALI E DELLE PERSONE, È OPPORTUNO INTERROGARSI SULLE PROSPETTIVE DELLA COSTRUZIONE SALDATA NEL PROSSIMO MILLENNIO.

DOPO CIRCA OTTOMILA ANNI DI APPLICAZIONE, LA TECNOLOGIA DI SALDATURA SI PREPARA A RACCOGLIERE LA SFIDA DI ULTERIORI PERFEZIONAMENTI TECNOLOGICI E DI SENSIBILI PROGRESSI ORGANIZZATIVI.

DI TUTTO RIGUARDO SI PRESENTA L'IMPATTO SULLA NOSTRA INDUSTRIA DELLA NORMATIVA EUROPEA EN (CHE ASSUMERÀ IN ITALIA LA DENOMINAZIONE UNI-EN), CON PARTICOLARE RIGUARDO AGLI ASPETTI TECNICO-ORGANIZZATIVI SU CUI INCIDERÀ PROFONDAMENTE LA EN 729 "QUALITY REQUIREMENTS IN WELDING".

QUESTI POCCHI ANNI CHE ANCORA CI SEPARANO DAL DUEMILA COSTITUISCONO UN TEMPO DI RIFLESSIONE E DI AZIONE, MA SOPRATTUTTO DI GRANDI OPPORTUNITÀ PER I SISTEMI INDUSTRIALI IN GRADO DI AFFRONTARE LA SFIDA.

BIBLIOGRAFIA

- (1) COSTA G. E SCASSO M.: "CERTIFICAZIONE DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 6/1989, PP. 569-572.
- (2) COSTA G. E SCASSO M.: "REQUISITI PER LA CERTIFICAZIONE DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA DI LIVELLO 3". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 2/1990, PP. 129-134.
- (3) COSTA G. E SCASSO M.: "MODALITÀ PER LA CERTIFICAZIONE DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA DI LIVELLO 1 E 2". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 6/1990, PP. 571-577.
- (4) "ELENCO DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA CERTIFICATI". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 2/1991, PP. 125-128.
- (5) COSTA G. ET AL.: "IL RUOLO DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA NEL CONTROLLO DELLE COSTRUZIONI SALDATE E LORO CERTIFICAZIONE - ELENCO DEGLI ISPETTORI CERTIFICATI". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 2/1992, PP. 137-143.
- (6) COSTA G.: "LA QUALITÀ NEGLI UOMINI DELLA SALDATURA". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 1/1993, PP. 49-50.
- (7) ECCW WG-1-24: "ECCW GUIDELINE FOR QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF WELDING INSPECTORS".
- (8) IIS: "REGOLAMENTO PER LA CERTIFICAZIONE DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA". CERT 35/93, PARTI 1÷4, ALLEGATI 1÷4.
- (9) EWF: "EUROPEAN WELDING ENGINEER - EWF GUIDELINE, MINIMUM REQUIREMENTS FOR THE EDUCATION". EWF-01-409-92.
- (10) EWF: "EUROPEAN WELDING TECHNOLOGIST- EWF GUIDELINE, MINIMUM REQUIREMENTS FOR THE EDUCATION". EWF-01-410-92.
- (11) COSTA G. E GIORGI S.: "CERTIFICAZIONE DELLE NUOVE FIGURE PROFESSIONALI EUROPEE EWE E EWT DELL' EUROPEAN WELDING FEDERATION - ELENCO DEGLI ISPETTORI DI SALDATURA CERTIFICATI". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 3/1993, PP. 247-254.

- (12) GIORGI S.: "ELENCO DELLE FIGURE PROFESSIONALI CERTIFICATE: EWE ED EWT DELL'EUROPEAN WELDING FEDERATION, ISPETTORI DI SALDATURA DELL'ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA". RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA, N. 2/1994, PP. 187-196.
- (13) EWF "EUROPEAN WELDING SPECIALIST - EWF GUIDELINE, MINIMUM REQUIREMENTS FOR THE EDUCATION". EWF-02-411-93.
- (14) EWF "EUROPEAN WELDING PRACTITIONER - EWF GUIDELINE, MINIMUM REQUIREMENTS FOR THE EDUCATION". EWF-DRAFT JULY 1994.