

7° CONVEGNO NAZIONALE ASSOCIAZIONE DISEGNO DI MACCHINE
Trento, 2 - 4 Ottobre 1991

ELABORAZIONE DIGITALE DI IMMAGINI RX DI SALDATURE

Andrea Bracciali, Monica Carfagni, Marco Poggi

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali
Universita' degli Studi di Firenze

RIASSUNTO

Nel presente lavoro sono state affrontate le problematiche relative alla costruzione degli algoritmi necessari alla gestione di un sistema automatico di diagnostica della saldatura basato sull'analisi digitale dell'immagine radiografica. Tale sistema deve fornire al responsabile di controllo un rapporto sulla presenza di eventuali difetti nel cordone, sulle loro dimensioni, locazioni, orientazioni e, soprattutto, sulla tipologia alla quale appartengono. L'immagine e' stata inizialmente elaborata al fine di migliorarne la leggibilita', quindi e' stata effettuata la scelta, l'affinazione ed in qualche caso l'ideazione dei procedimenti di estrazione delle caratteristiche geometriche necessarie alla classificazione dei difetti.

ABSTRACT

This work describes the construction of algorithms for an automatic welding diagnostic system based on the digital analysis of radiographic images. The system must provide the operator with a report on welding seam defects, including the size, location, orientation, and type of defect(s). After initial processing of the image to improve legibility, the procedures for extracting the geometric characteristics required in defect classification are selected, fine-tuned, and, in some cases, developed.

1. INTRODUZIONE

La saldatura e' certamente fondamentale tra i procedimenti atti ad effettuare un collegamento fisso tra elementi metallici. Nei casi in cui sia necessario garantire con elevato grado di sicurezza l'affidabilita' del collegamento, anche a fronte di un aggravio dei costi, si rende indispensabile l'applicazione di un adeguato controllo non distruttivo.

Nel caso dei controlli con raggi X, caso affrontato nel presente lavoro, l'esame dell'immagine RX e la conseguente delibera di accettazione o rifiuto della giunzione in essa contenuta non risultano attualmente automatizzate. Questo comporta che al variare del livello di attenzione o di capacita' dell'operatore anche il controllo puo' subire una variazione nella sua affidabilita'.

E' stata quindi messa a punto una struttura software in grado di offrire una diagnosi della saldatura in modo affidabile, in tempi accettabili e con architettura aperta ed adattabile secondo le necessita'.

Al fine di poter sviluppare le soluzioni proposte e quindi di verificarne le caratteristiche, si e' utilizzata una stazione sperimentale incentrata su di un personal computer, dotato di appropriata scheda grafica, in grado di interfacciarsi con una telecamera e quindi di digitalizzare le immagini di lastre radiografiche da essa acquisite.

2. TRASFORMAZIONE DELL'IMMAGINE

L'immagine radiografica della saldatura, cosi' come appare dopo la sua digitalizzazione, risulta certamente leggibile dal punto di vista dell'osservatore umano ma non altrettanto da quello di un sistema automatico che necessita di una accurata elaborazione dell'immagine per poterla valutare correttamente. Infatti a differenza dell'occhio umano che distingue dalla radiografia con relativa semplicita' la geometria del difetto di saldatura anche quando lo sfondo su cui esso e' situato e' assai eterogeneo fino quasi a confondercisi, un sistema automatico ha bisogno di trovare il difetto ben distinto dallo sfondo: da cio' nasce l'esigenza di elaborare l'immagine in successive fasi di filtratura, fino ad ottenere la binarizzazione dell'immagine ovvero la sua riduzione a due soli livelli di grigio. In particolare il nero e' stato associato al difetto, un grigio medio allo sfondo ed infine, come verra' descritto in seguito, il bianco al contorno del difetto stesso.

In fig.1 e' visibile come appare una radiografia sul monitor di controllo del sistema sperimentale dopo la

digitalizzazione. In fig.2 e' visibile la stessa immagine dopo che ha subito tutte le elaborazioni: la zona nera e' la difettosita', visibile nella fig.1, ora maggiormente evidente su uno sfondo perfettamente omogeneo.

2.1. Fasi della trasformazione

Le immagini vengono inizialmente digitalizzate, cioe' trasformate in un insieme ordinato di numeri ognuno dei quali e' associato ad un punto sullo schermo ed il cui valore rappresenta il livello di luminosita' o, meglio, il livello di grigio del punto.



Fig.1. - Immagini radiografiche prima dell'elaborazione.

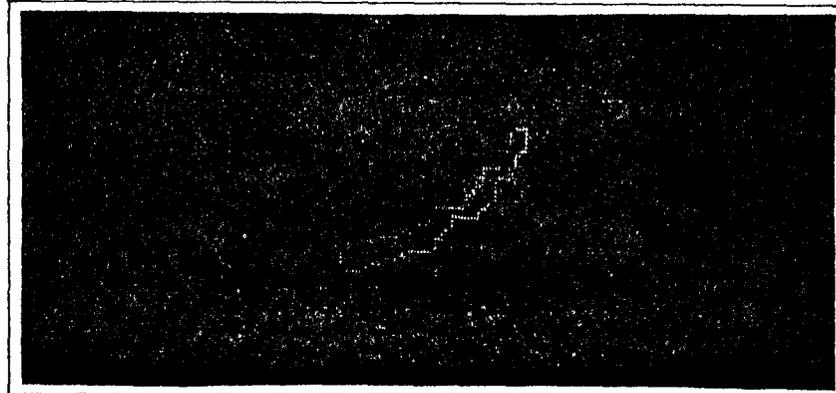


Fig.2. - Immagini radiografiche dopo l'elaborazione.

Ipotizzando di lavorare sempre su saldature a sviluppo lineare, ipotesi non particolarmente limitativa, e' stata effettuata l'elaborazione dell'immagine lavorando su sezioni del cordone tra loro parallele e normali all'asse geometrico del cordone stesso.

La prima operazione effettuata per trasformare l'immagine e' stata quella di prefiltratura al fine di regolarizzare la funzione di grigio riducendone la "rumorosita'". L'algoritmo opera sezione per sezione lungo una colonna immagine calcolando il nuovo valore in un punto come valore medio dei valori esistenti nella stessa ordinata e nelle due confinanti.

Successivamente e' stato sviluppato ed applicato un algoritmo per la determinazione dei contorni del cordone. Questa fase deve essere necessariamente eseguita prima della filtratura vera e propria, che renderebbe impossibile la successiva individuazione dei bordi del cordone, e dopo la prefiltratura, visto che anche questa routine risente della presenza di rumore. Il procedimento, come per la precedente prefiltratura e come la filtratura che esamineremo piu' avanti, e' basato su una operazione di sogliatura [1] effettuata sezione per sezione. Le coordinate dei punti trovati vengono quindi salvate in una matrice utilizzata nelle successive fasi di elaborazione grafica.

Alla fase successiva di filtratura e' affidato il compito di eliminare dall'immagine la funzione di background che descrive la forma del cordone, in modo da ottenere uno sfondo omogeneo su cui siano visibili solo i difetti. Questo deve essere effettuato senza alterare la geometria dei difetti e quindi senza disturbare il riconoscimento. La funzione sfondo e' stata valutata con un procedimento di interpolazione utilizzando una famiglia di curve dette B-spline [4].

Infine l'immagine elaborata viene binarizzata. L'uso di una sola soglia per la binarizzazione dell'immagine si puo' rilevare insufficiente, visto che l'immagine risultante dalle operazioni precedenti non e' immune da disturbi. Infatti un valore di soglia eccessivamente alto permetterebbe con sicurezza la discriminazione tra il difetto ed i disturbi, che non raggiungono mai lo stesso livello di grigio, pero' disturberebbe la geometria dello stesso, contraendolo significativamente. Al contrario un valore troppo basso non altererebbe la geometria del difetto pero' non eliminerebbe neppure alcuni difetti. Per questo si operano due distinte sogliature: inizialmente si applica un livello di soglia elevato per distinguere i difetti e successivamente, solo nell'intorno di essi, si utilizza un livello di soglia inferiore.

3. CARATTERIZZAZIONE DEI DIFETTI

3.1. Estrazione del contorno

Le procedure per ottenere l'estrazione dei contorni sono numerose; il risultato pero' deve sempre essere quello di memorizzare, all'interno di una matrice, le coordinate dei punti di confine tra la regione interna e quella esterna del difetto.

Una di esse, utilizzabile nel caso specifico, si fonda sul fatto che i punti di contorno sono gli unici punti dell'immagine binarizzata in cui il valore della funzione gradiente e' diverso dallo zero.

Questa tecnica e' estremamente valida nell'individuare i contorni ma non considera i contorni di ogni singolo difetto come facenti parte di una stessa entita'; i punti del contorno vengono quindi memorizzati in modo non logicamente ordinato imponendo una elaborazione successiva per raggruppare i punti rilevati difetto per difetto e per disporli, all'interno del gruppo di cui fanno parte, secondo una logica di ordinamento sequenziale.

Per evitare problemi di questo tipo si e' preferito utilizzare un procedimento di "seguitura di contorno" [5].

Il seguatore di contorno e' un "cursore" delle dimensioni di un pixel che si muove autonomamente sul campo dell'immagine, compiendo inizialmente una scansione dell'immagine alla ricerca di un punto nero appartenente ad un difetto. Quando cio' accade il cursore modifica il suo comportamento: compie una rotazione a sinistra e trasla di un pixel. Se il punto successivo appartiene ancora al difetto allora gira ancora a sinistra, se invece non vi appartiene allora gira a destra (fig.3). In questo modo il cursore tocca tutti i punti del contorno ruotando intorno al difetto in senso orario fino a tornare al punto di partenza. Vengono via via memorizzati su una matrice i punti del contorno con cui e' venuto in contatto in sequenza il cursore.

Questo algoritmo presenta il pregio della semplicita' ma deve essere controllato poiche', sotto determinate condizioni geometriche, esso puo' tralasciare dettagli della figura. Di questo ci si puo' rendere conto osservando la fig.4: si nota che il seguatore non entra nell'elemento in basso a destra. Nella fig.3 invece questo non accade; la differenza consiste solo nel fatto che e' variata la direzione di ingresso nell'area del difetto.

Le procedure da attuare per migliorare questo aspetto dell'algoritmo sono due: la prima consiste nell'imporre al seguatore di considerare nel suo moto tutti i punti in cui non entrerebbe spontaneamente; la procedura alternativa e' quella di far percorrere al cursore il contorno della figura piu' di una volta e, ogni volta, variare la direzione di ingresso del cursore. A completamento di questa procedura,

si rende necessaria la stesura della matrice di contorno combinando in modo geometricamente logico le singole matrici di contorno ottenute per ogni percorrenza.

Non si e' comunque dimostrato necessario, nelle applicazioni in esame, implementare alcuna di queste procedure poiche' il tipo di contorno da seguire presenta generalmente un andamento tale da non creare problemi di questo tipo.

Come si puo' notare nelle fig.3 e fig.4, il sequitore puo' passare piu' di una volta sui punti di contorno, risultando cosi' una loro multipla registrazione sulla matrice di contorno; e' stata quindi implementata una routine di eliminazione dei punti ridondanti.

Il livello di grigio di tutti i pixel del contorno cosi' determinato e' stato portato al colore bianco; questa variazione presenta una effettiva utilita' per i successivi algoritmi di caratterizzazione geometrica i quali non dovranno rileggere l'intera matrice di contorno ogni volta che sara' necessario sapere se un punto appartiene al contorno oppure no; sara' sufficiente leggere il livello di grigio che gli e' associato. In fig.2 e' visibile il contorno dei difetti.

3.2. Localizzazione dei difetti

La localizzazione del difetto puo' essere associata alle coordinate del suo centro, cosi' valutate:

Xc = Σi (Xi)/Nc Yc = Σi (Yi)/Nc (1)

con Nc pari al numero di punti del contorno e Xi, Yi coordinate del generico punto di contorno Pi.

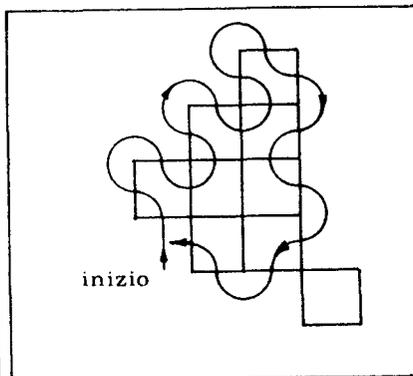
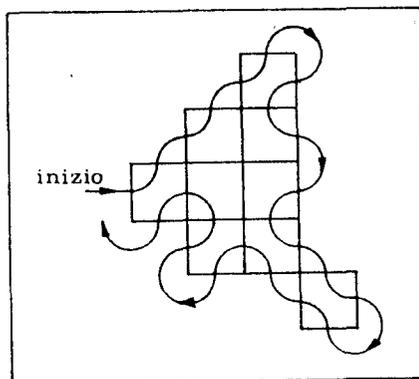


Fig.3. - Primo percorso del cursore.

Fig.4. - Secondo percorso del cursore.

3.3. Area del difetto

Per la valutazione dell'area del difetto si utilizza un procedimento di conteggio dei pixel compresi all'interno del contorno. Partendo da ciascun punto di esso, il sistema muove il suo puntatore in direzione verticale verso il basso. Se il puntatore individua subito un punto di sfondo, allora il punto di contorno dal quale e' partito e' situato nella parte bassa dell'immagine: il contatore dell'area non viene incrementato ed il puntatore passa al punto successivo del contorno. Se invece il puntatore incontra un punto nero il contatore dell'area viene incrementato ed il puntatore compie ancora un altro passo verso il basso. Il moto del puntatore si arresta quando il punto successivo viene ad essere un punto di contorno; se ci sono ancora punti del contorno partendo dai quali non ha ancora effettuato la scansione, ricomincia da quello successivo, altrimenti ferma il procedimento.

3.4. Fattore di forma

Le prime caratteristiche della geometria del difetto sinora estratte sono sufficienti alla valutazione di un parametro che puo' assumere un certo rilievo nel riconoscimento della tipologia a cui ascrivere il difetto.

Tale parametro, detto fattore di forma Ff, fornisce un'indicazione della geometria della difettosita'. La definizione adottata e' la seguente:

Ff = 2 (NI + Nc) / (Nc * Σi [(Xi-Xc)^2 + (Yi-Yc)^2]) (2)

dove NI e' il numero di punti interni al contorno.

Secondo questa definizione una circonferenza ha un fattore di forma tendente all'unita', infatti in termini piu' generali:

Ff = 2 Area / (Perimetro * Σi (distanza del punto i dal centro)) (3)

Quindi un valore del fattore di forma tendente allo zero implica una figura di bassa estensione superficiale ma grande perimetro ovvero una figura allungata; se all'opposto il fattore di forma assume valori maggiori allora la figura e' caratterizzata da una forma piu' arrotondata.

3.5. Asse Maggiore

Quale asse maggiore del difetto viene considerato quello passante per la coppia di punti del contorno che hanno

distanza maggiore tra di loro rispetto a qualunque altra coppia di punti (PA e PB di fig.5). Una volta trovata questa coppia di punti e' semplice trovare il coefficiente angolare della retta che li congiunge.
 Per le geometrie che si possono usualmente incontrare nell'analisi delle radiografie delle saldature questo asse rappresenta abbastanza bene l'asse di maggior sviluppo geometrico del difetto.

3.6. Dimensioni principali

Una dimensione caratteristica del difetto e' proprio la distanza tra i due punti che definiscono l'asse maggiore. Il calcolo dell'ingombro della difettosita' sulla direzione normale a quella precedentemente trovata e' invece suddiviso in due fasi separate. Prima e' necessario ruotare le componenti della matrice di contorno in modo tale che al primo posto si trovino gli indici del punto PA ed al posto K-esimo, con K compreso nell'intervallo [2,Np], si trovino quegli del punto PB.
 Riferendosi alla fig.5, si definisce P_i^* il punto di intersezione tra la normale all'asse per il generico punto di contorno P_i e l'asse del difetto.
 Tra tutte le distanze misurate tra i vari P_i ed i relativi P_i^* , per ogni semipiano vengono misurate le massime e quindi queste vengono sommate tra loro. Tale valore risultante e' evidentemente il cercato secondo ingombro del difetto.

3.7. Gli spessori del difetto

A conclusione della fase di estrazione delle caratteristiche geometriche si e' ritenuto necessario sviluppare un algoritmo in grado di fornire una indicazione dell'andamento degli spessori all'interno del difetto.
 Quello dello spessore di una figura geometrica e' un concetto apparentemente immediato e privo di ambiguita' ma in verita' cosi' non e' apparso quando e' stato affrontato il problema dell'ideazione degli algoritmi per la sua rilevazione. E' stata quindi fissata una definizione di questa grandezza: si definisce spessore di una figura nel punto P (fig.6) del contorno come la lunghezza del segmento che congiunge P con un secondo punto P' scelto in modo tale che gli angoli che il segmento forma con le rette tangenti al contorno nei due punti siano uguali. Da questa definizione discende che per ogni punto puo' non esistere l'unicita' dello spessore.
 Secondo questa definizione e' stato sviluppato l'algoritmo per la determinazione dello spessore: per ogni punto del contorno viene determinata la retta di ricerca normale al contorno stesso e quindi si ricerca il segmento congiungente

due punti consecutivi del contorno che abbia un punto di intersezione con la retta di ricerca. Vengono valutati quindi gli angoli che tale retta forma con le tangenti ai punti del contorno intersecati. Se gli angoli sono uguali viene valutato lo spessore come distanza tra i due punti, altrimenti si procede iterativamente fino a determinare quale inclinazione, differente da quella a 90 gradi impostata nella prima ricerca, e' necessario dare alla retta di ricerca perche' il suo angolo "di arrivo" sia molto prossimo a quello "di partenza".
 Una volta determinata la retta che soddisfa la definizione viene valutato lo spessore come distanza tra i due punti dove la retta interseca il contorno e questo viene memorizzato in un vettore.
 In pratica per consentire la procedura descritta e' necessario approssimare il contorno del difetto con una curva spezzata chiusa formata da segmenti lineari che congiungono tra loro i punti consecutivi del contorno. Appare adesso nella sua importanza il fatto che si abbia una matrice di contorno i cui elementi sono ordinati secondo logica sequenziale: il fatto che gli indici di due elementi siano consecutivi implica che il segmento che li congiunge ha, con buona approssimazione, il significato fisico di porzione di contorno.
 E' stato necessario dotare l'algoritmo descritto di molti controlli ed alternative di flusso al fine di metterlo in grado di gestire con sicurezza situazioni potenzialmente critiche per il suo funzionamento.
 Il primo controllo che viene effettuato e' la valutazione della differenza tra gli angoli "di arrivo" nei due punti estremi del segmento intersecato dalla retta di ricerca. Se tale differenza cambia segno allora all'interno del segmento la soluzione ottimale esiste: il problema si riduce alla soluzione di una equazione di primo grado con variabile dipendente la differenza tra gli angoli.

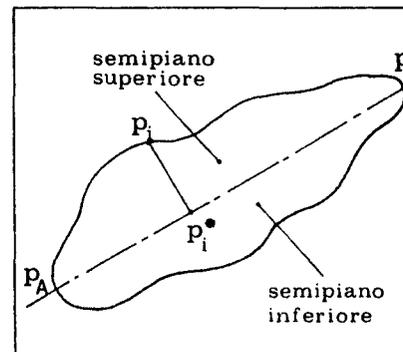


Fig.5 - Asse maggiore.

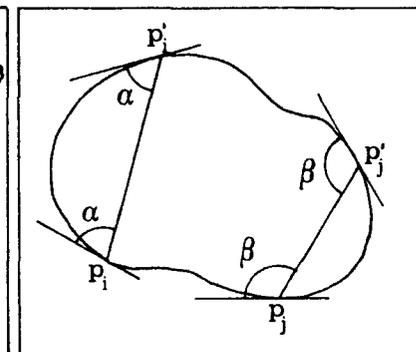


Fig.6. - Spessori del difetto.

Se invece ai due estremi la differenza angolare assume lo stesso segno, la soluzione non puo' essere contenuta all'interno del segmentino stesso e l'algoritmo provvede a muovere il punto di arrivo della retta di ricerca sul punto mediano del segmentino confinante a quello di prima ricerca. Poiche' il contorno e' una spezzata chiusa ogni segmento ne ha due confinanti: la scelta di quello in cui viene effettuata la successiva fase di ricerca dipende da quale degli estremi del primo segmentino ha dato risultato migliore. Una volta effettuata questa scelta l'iterazione prosegue fino a quando non viene trovato il punto ottimo da cui calcolare lo spessore.

Altri controlli sono necessari sulla orientazione di rette e segmenti poiche' il programma non deve soffrire della loro eventuale inclinazione perfettamente orizzontale o verticale: per simili casi l'algoritmo deve contemplare una appropriata alternativa di flusso.

E' stato implementato inoltre un controllo al fine di evitare che la retta di ricerca "rimbalzi" alternativamente da un segmento a quello confinante e viceversa: in tal caso viene scelto il punto che garantisce il valore migliore e si arresta l'iterazione.

Vengono comunque esonerati dall'essere sottoposti a questo segmento di programma i difetti di dimensioni eccessivamente piccole per i quali i risultati del calcolo degli spessori potrebbero non essere significativi della realta' geometrica del difetto.

4. CLASSIFICAZIONE DEI DIFETTI

All'ultimo algoritmo sviluppato e' affidata la responsabilita' di attribuire ad ogni elemento difettoso la sua natura e quindi quello di scrivere il rapporto conclusivo da sottoporre all'attenzione del tecnico NDT.

La principale difficolta' nella sua progettazione consiste nel fatto che tale algoritmo non puo' prescindere dallo specifico bagaglio di conoscenze e dall'esperienza del tecnico responsabile del controllo non distruttivo. Per questo motivo, durante lo svolgimento del lavoro si sono avuti contatti con enti e persone quotidianamente coinvolte con problematiche di NDT radiometallografiche su saldature. Poiche' pero' ogni impresa utilizza standards qualitativi diversi si e' ritenuto importante sviluppare un algoritmo adattabile alle specifiche esigenze.

Comunque, al fine di testare il software progettato, e' stata implementata una semplice ma generale base di conoscenza per la classificazione del difetto costituita dalle norme UNI 7278-74. Sulla base di tale norme e' stato sviluppato l'algoritmo di classificazione, in grado di

riconoscere cricche, incollature, mancanze di penetrazione, inclusioni di ossido, incisioni marginali esterne od interne, tarli, soffiature, pori e inclusioni di tungsteno. L'algoritmo con cui si arriva ad un riconoscimento del difetto e' definibile come algoritmo decisionale "ad albero" [3], nel quale cioe' il sistema confronta la cognizione che ha del difetto in esame con una serie di alternative logiche tramite le quali si arriva ad un "ramo terminale" corrispondente ad una precisa tipologia di difetto.

In fig.7 e' tracciato uno schema del diagramma di flusso utilizzato in cui vengono delineate fasi delle quali puo' essere necessario chiarire il funzionamento.

Una prima discriminazione e' quella tra difetti "chiari" e difetti "scuri", che porta subito all'eventuale riconoscimento della presenza di intrusioni di particelle metalliche maggiormente radiopache, come il tungsteno, assai frequenti nelle metodologie di saldatura TIG.

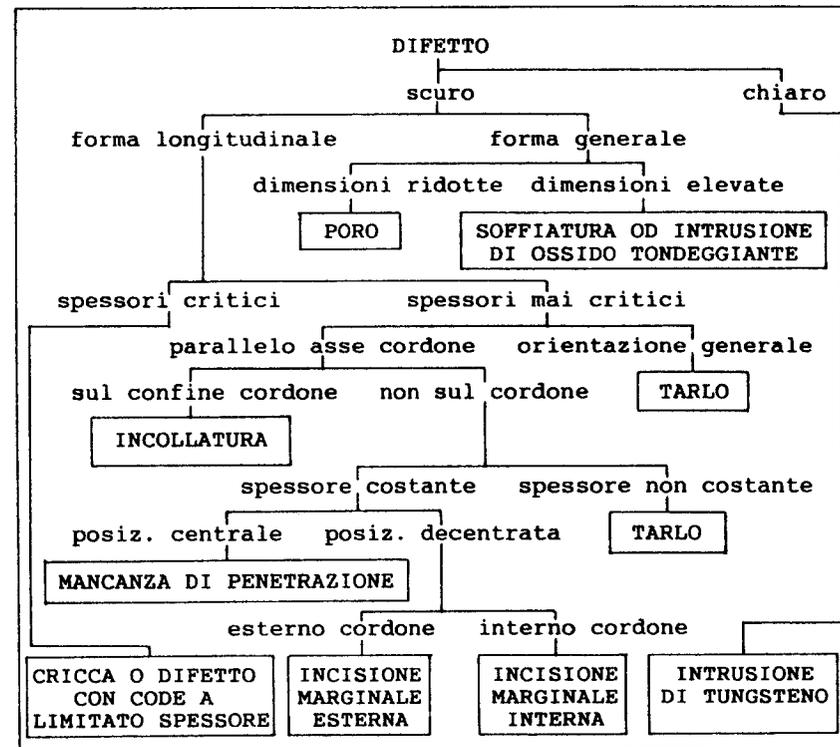


Fig.7. - Diagramma di flusso.

Seguendo il ramo dei difetti scuri, una ulteriore discriminazione che viene compiuta e' tra difetti allungati e difetti a forma piu' generale. Questa suddivisione e' suggerita dalle norme UNI nei termini seguenti: un difetto si dice allungato se la sua lunghezza non supera il millimetro e mezzo ed il rapporto tra la lunghezza e la larghezza non e' inferiore a tre [2,3].

Per i difetti a carattere allungato segue una routine che ha lo scopo di evidenziarne l'eventuale attribuibilita' alla classe delle cricche o dei difetti che presentano appendici a bassissimo spessore. Difetti di questo tipo sono generalmente inaccettabili e comportano il rifiuto del giunto testato.

La routine si accerta prima che il valore del fattore di forma non sia inferiore a quello che viene scelto come soglia. Non e' pero' detto che un difetto che manifesta appendici o pericolose estensioni filamentose possa essere denunciato come tale dal suo fattore di forma: viene effettuato allora uno studio dello spessore del difetto. Se il difetto presenta uno spessore inferiore ad una soglia ammessa per cinque o piu' punti consecutivi del contorno, allora viene segnalato come "cricca o difetto con code a limitato spessore" all'operatore responsabile. A monte di questa fase il vettore spessore ha gia' subito una procedura di mediatura anti-rumore simile a quella che ha subito l'immagine, riducendo la possibilita' di false segnalazioni. La scelta che il sistema deve ulteriormente compiere, nel caso che il difetto non si sia rivelato una cricca, e' se il difetto ha il suo asse di maggior sviluppo parallelo all'asse della saldatura: nel caso che cio' non sia vero esso viene diagnosticato come tarlo. Nel caso invece che lo sia, il sistema controlla se lo spessore della difettosita' si mantiene costante lungo la sua lunghezza: se questo non avviene il difetto viene catalogato come tarlo o come incollatura se la sua posizione e' proprio sul confine del cordone (altro difetto generalmente tale da far rifiutare il collegamento saldato).

Nel caso in cui lo spessore si dimostri piuttosto costante il sistema ricerca quale sia la posizione del centro del difetto: se il difetto e' centrale al cordone allora viene considerato come una mancanza di penetrazione. A seconda della posizione che altrimenti gli viene attribuita esso viene diagnosticato come incisione marginale interna o esterna.

Vediamo ora quali sono le scelte che il sistema puo' compiere nel caso di difetti a carattere tondeggiante o generale. Se il diametro del difetto, dove il diametro va inteso con la necessaria elasticita' nel caso di forme non rigorosamente circolari, e' inferiore al millimetro, allora al difetto viene attribuita la classificazione di poro. Se questo non avviene allora il difetto viene diagnosticato come una soffiatura o come una inclusione di ossido,

tipologie, al fine della valutazione della qualita' del giunto, trattate con metro comune.

5. CONCLUSIONI

Ogni algoritmo proposto e' stato convertito in programma eseguibile e quindi implementato sulla stazione diagnostica sperimentale usata. Questo ha inizialmente permesso una prima verifica ed affinazione degli algoritmi, grazie alla loro applicazione ad un vasto campione di difetti "simulati" ed infine al loro collaudo funzionale mediante elaborazione di reali segmenti radiografici.

Per fare questo sono state utilizzate immagini radiografiche che, con i vari difetti in esse contenuti, hanno rappresentato un valido banco prova del sistema sviluppato. Il software ha dato ottimi risultati dimostrando la validita' degli algoritmi: nessun difetto e' scomparso in fase di filtratura ed ogni difetto e' stato riconosciuto correttamente secondo la definizione UNI.

Al profilarsi della disponibilita' di strutture hardware sempre piu' potenti, un sistema automatico di diagnostica del tipo ipotizzato assumerà sempre maggiore interesse: si potranno quindi sviluppare e potenziare gli algoritmi qui esposti che hanno comunque dimostrato di poter certamente rappresentare una risposta ai vari problemi sollevati dalle particolarita' dell'argomento in oggetto.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1] Monica Carfagni, Paolo Citti, "Automatic image processing and recognition for diagnosing mechanical systems", Proceedings of International Condition Monitoring Conference, Atlanta (Georgia), 1988.
- 2] A. Gilardoni, A. Orsini, "NDT Handbook", Gilardoni, Mandello Lario (Como), 1981.
- 3] Norme UNI 7278-74, "Gradi di difettosita' nelle saldature testa a testa riferiti al controllo radiografico", Milano, 1974.
- 4] W.K. Giloi, "Interactive computer graphics", Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey), 1987.
- 5] R.O. Duda, P.E. Hart, "Pattern classification and scene analysis", John Wiley, New York, 1973.