

# Controllo radiografico di getti microfusi con radiografie di riferimento ASTM E192

Sara Guelfo\*, Ombretta Motta\*\*, Mario F. Bianchi \*\*\*

*\*Avio Propulsione Aerospaziale S.p.A, Rivalta (To)*

*\*\*Avio Propulsione Aerospaziale S.p.A, Pomigliano (Na)*

*\*\*\*Bytest s.r.l., Volpiano (To)*

## SOMMARIO

In questa memoria vengono prese in considerazione le tecniche d'esame radiografico generalmente impiegate sui getti microfusi in acciaio e/o in leghe base nichel per i quali si applicano le radiografie di riferimento contenute nello standard ASTM E192.

Questo documento raccomanda l'utilizzo di parametri di esposizione definiti, che non sempre vengono applicati dalle fonderie di getti microfusi, orientate a limitare il numero di esposizioni per privilegiare il contenimento dei costi.

Questa prassi, che può essere auspicabile e tollerabile su getti microfusi di produzione con tecnica di fonderia consolidata può, però, portare a sottovalutare difettosità eventualmente presenti sui getti quando applicate in fase di sviluppo del prodotto. E' possibile, infatti, che una difettosità del getto microfuso, frettolosamente assimilata ad un livello di severità 1 ad un primo controllo, possa, con ulteriori radiografie di approfondimento, risultare assimilabile a livelli di severità superiori.

Nella presente memoria, a fronte della scelta di alcune tecniche radiografiche di getti microfusi in acciaio e/o in leghe base nichel, vengono analizzati i parametri di esposizione, e viene verificata sperimentalmente la variazione di contrasto radiografico in funzione di valori di tensione crescenti; inoltre vengono proposte le linee guida da seguire per limitare la possibilità di sottovalutazione delle difettosità eventualmente presenti sui getti microfusi in acciaio o in leghe base nichel.

## Introduzione

Il processo di microfusione (investment casting), spesso noto anche come processo a cera persa, fin dal 5000 a.C. è stato impiegato come tecnica per creare non solo oggetti di uso comune ma anche artistici (arte egizia, azteca e rinascimentale con Benvenuto Cellini - Perseo e Medusa).

La peculiarità di questa tecnica è la possibilità di ottenere componenti *near net shape* con qualunque tipo di metallo colabile.

Il processo può essere suddiviso nei seguenti stadi:

1. Creazione della forma metallica riprodotte il negativo del pezzo desiderato;
2. Iniezione della cera nella forma metallica attraverso il processo di injection moulding in modo da ottenere una copia precisa del pezzo desiderato (figura 1a);
3. Assemblaggio dei pezzi in cera intorno a un canale di colata (anch'esso in cera) in modo da creare una struttura a grappolo o albero (figura 1b);
4. Ricoprimento del grappolo con strati ceramici refrattari successivi che sostengono la forma e la rivestono completamente con strati alternati di slurry ceramico e polvere ceramica estremamente fine (figura 1c, d);
5. Prima essiccazione del guscio refrattario creato;
6. Eliminazione della cera attraverso autoclave (figura 1e);
7. Completa cottura dei gusci refrattari (figura 1f);
8. Riempimento dei gusci con il metallo fuso (figura 1g) secondo il processo di colata più adatto: gravità, sorgente, centrifuga, sotto vuoto, bassa pressione, etc.;
9. Dopo solidificazione del materiale, eliminazione del refrattario residuo sulla superficie del grappolo, distacco dei pezzi dal bastone di colata (figura 1h);
10. Sbavatura e ulteriori trattamenti secondari dove necessari.

Nonostante la realizzazione di componenti con questa tecnica avvenga con tempi non trascurabili dell'ordine di decine di ore, le applicazioni abbracciano molteplici settori, quali gioielleria, campo biomedico (protesi dentali e di arti), aeronautica (turbine, componenti motoristici), etc.

I motivi di questa scelta sono da cercarsi negli innumerevoli vantaggi che la tecnica offre:

- grande libertà di forma dei componenti (da semplici a complessi);
- ripetibilità delle forme;
- grande scelta di leghe metalliche;
- buona finitura superficiale allo stato colato (*as-cast*);
- riduzione dei costi delle lavorazioni meccaniche secondarie;
- creazione veloce di modelli attraverso la tecnica del *rapid prototyping*

In particolare, l'assenza di una linea di divisione nello stampo evita altresì il problema della variazione dimensionale lungo la stessa. I principali limiti del processo risiedono nel peso massimo dei getti ottenibili, individuabile intorno ai 20-25 kg, anche se la maggior parte non supera i 5 kg e nell'elevato costo degli stampi.

Dal punto di vista metallurgico, il processo è applicabile a tutte le leghe purché facilmente fondibili e colabili. Inoltre esso permette di ottenere lo stretto controllo di una serie di proprietà metallurgiche quali la dimensione e l'orientamento del grano e la direzione di solidificazione, tutte caratteristiche che risultano avere una stretta correlazione con le proprietà meccaniche<sup>[1,2]</sup>.

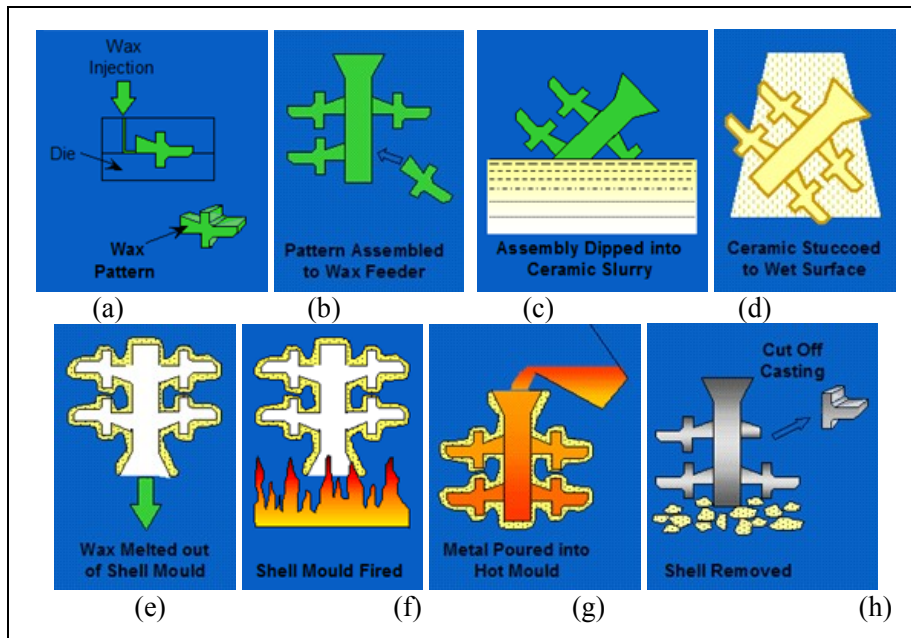


Figura 1: fasi del processo di investment casting

I difetti riscontrabili nei getti prodotti con il processo di investment casting possono essere suddivisi in tre tipologie a seconda della fase produttiva in cui si sono generati:

1. difetti legati alla creazione della forma in cera (cavità, ritiri, fratture della forma)
2. difetti legati alla preparazione e cottura dei gusci ceramici
3. difetti metallurgici creati durante la colata e successiva solidificazione del metallo fuso (porosità da gas e da ritiro - figura 2 -, inclusioni di materiale ceramico proveniente dal guscio).

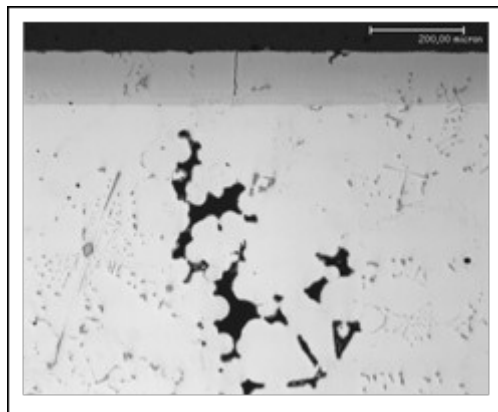


Figura 2: Microritiri dendritici su materiale per pale 3° stadio (materiale base Ni-Co)

Molti dei difetti sopracitati sono individuabili tramite l'esame radiografico e identificabili tramite l'uso di radiografie di riferimento che, per getti non in lega leggera, sono raccolte nella norma ASTM E192-04. Essa descrive le varie tipologie di discontinuità riscontrabili ed è accompagnata da una raccolta di radiografie utili, oltre che per il riconoscimento del tipo di difetto, anche per l'attribuzione del rispettivo livello di severità. In particolare, sono riportati, in ordine crescente, otto livelli di severità per discontinuità del tipo porosità da gas, ritiri e eterogeneità microstrutturali ed altre anomalie generalmente non riconosciute come discontinuità metallurgiche. La tabella 1 descrive i tipi di discontinuità rilevabili sulle lastre radiografiche riportando la stessa terminologia indicata sulla norma. I riferimenti radiografici riguardano spessori che vanno da 1/8 a 3/8 pollici<sup>[3]</sup>.

Tabella 1: tipi di discontinuità rilevabili nei getti secondo la norma ASTM E192<sup>[3]</sup>

Tipo di discontinuità		Descrizione
<i>Gas</i>	<i>gas holes</i>	Inclusioni di densità radiografica elevata, tondeggianti aggregate o con distribuzione casuale nel getto, normalmente dovute a gas intrappolato durante la colata o nel processo di saldatura
<i>Shrinkage</i>	<i>cavity</i>	Area di ritiro con confini ben definiti e normalmente ramificata
	<i>sponge</i>	Area di ritiro diffuso costituita da diverse cavità a densità radiografica elevata e aspetto di materiale poroso
	<i>dendritic</i>	Area di ritiro costituita da diverse indicazioni lineari singole sottili o piccole cavità allungate con alto grado di densità radiografica e generalmente separate tra loro
	<i>filamentary</i>	Ritiro lineare e generalmente ramificato
<i>Foreign Material</i>	<i>less dense</i>	Inclusioni di densità radiografica maggiore del materiale base
	<i>more dense</i>	Inclusioni di densità radiografica minore del materiale base
<i>Discrete Discontinuities</i>	<i>hot tears</i>	Cricche a caldo che si formano durante la solidificazione
	<i>cold cracks</i>	Cricche che si formano dopo la solidificazione
	<i>cold shut</i>	Indicazione lineare che si genera quando due flussi di materiale liquido vengono a contatto ma si solidificano in tempi differenti
	<i>misruns</i>	Mancanze di fusione
	<i>core shift</i>	Spostamento delle anime
<i>Defective Mold</i>	<i>mold buckle positive</i>	Indicazioni dovute a tracce delle motte - densità radiografica bassa
	<i>mold buckle negative</i>	Indicazioni dovute a tracce delle motte - densità radiografica alta
<i>Diffraction Pattern</i>	<i>columnar</i>	Numero più o meno significativo di indicazioni lineari, tutte più chiare o più scure dell'area circostante, dovute a diffrazione del grano
	<i>mottled</i>	Numero più o meno significativo di indicazioni tondeggianti, tutte più chiare o più scure dell'area circostante, dovute a diffrazione del grano

Nonostante ci siano norme che standardizzano i criteri di controllo radiografico per i getti, non sempre le tecniche radiografiche utilizzate per l'ispezione di un componente (ad es. in acciaio/lega Ni microfuso) risultano ottimali nella scelta dei parametri di processo. Nello specifico, il problema principale è la definizione della tensione da applicare (utilizzando un tubo radiogeno) al fine di ottenere un'esposizione contrastata per un'adeguata individuazione delle eventuali indicazioni presenti sul getto.

Lo scopo di questo lavoro è quello di evidenziare l'effetto della tensione di esposizione applicata al circuito del tubo radiogeno sui parametri che identificano la qualità dell'immagine, in special modo il contrasto.

## Parte sperimentale

Nella prima parte del presente lavoro sono state raccolte differenti tecniche radiografiche realizzate su componenti in acciaio/lega Ni di spessori di parete 1/8" (fino 1/4") prodotti con la tecnica dell'investment casting. Tali tecniche sono state suddivise in base alla localizzazione del laboratorio in cui sono state realizzate. Nel grafico di figura 3 i quadrati rappresentano i dati di esposizione provenienti da aziende europee mentre i tondi rappresentano i dati provenienti dalle aziende americane. Sono anche riportate le rette rappresentanti le esposizioni consigliate dalle norme ASTM E192 (tra 130 e 250kV per gli spessori riportati) e ASTM E2104<sup>[4]</sup> (come ASTM E192 più una tolleranza del 15%).

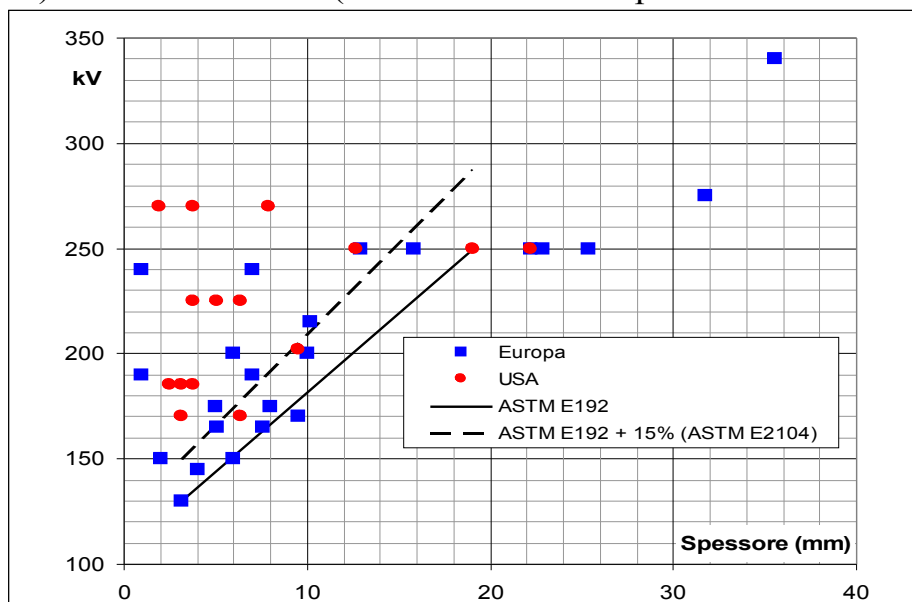


Figura 3: grafico della tensione applicata vs spessore della parete del getto

Tendenzialmente, i dati di provenienza americana sono sempre al di sopra delle rette di riferimento mentre quasi tutti i dati europei sono concentrati sulle rette stesse. Poiché una radiografia deve garantire una densità della zona da ispezionare tale da permetterne la lettura per mezzo di visori e poiché l'annerimento è conferito dalla combinazione del parametro tensione ed esposizione [mA\*secondo], quando uno dei due parametri aumenta l'altro deve diminuire. Nel caso in esame è possibile che con l'aumentare dei kV, a parità di spessore di parete, sia diminuito il tempo di esposizione in quanto la corrente del circuito radiogeno dipende dall'impianto utilizzato e, in generale, non ha un così ampio intervallo di variazione come lo possono avere gli altri due parametri.

Nella seconda parte dello studio effettuato sono state condotte differenti esposizioni (tabella 2) su blocchi e penetrametri Fe tipo ASTM (Fe.05, Fe.07, Fe.10, Fe.12, Fe.15, Fe.20) e tipo MIL (5) a diverse tensioni (da 130 a 275kV) in modo da ottenere la stessa densità (circa 2.15) sui due penetrametri di riferimento (Fe.12 e 5MIL) – tabella 3.

Tabella 2: parametri espositivi utilizzati

<b>Esposizione</b>	<b>dff [mm]</b>	<b>kV</b>	<b>mA</b>	<b>min</b>	<b>filtri</b>	<b>schermi</b>
<b>130</b>	1800	130	6	1,70		0,027 F/B
<b>130*</b>	1800	130	6	2,10		0,10 F/0,15B
<b>160</b>	1800	160	3	0,60		0,027 F/B
<b>160*</b>	1800	160	3	0,50		0,10 F/0,15B
<b>200*</b>	1800	200	3	1,00		0,10 F/0,15B
<b>250*</b>	1800	250	3	1,50		0,10 F/0,15B
<b>250f</b>	1800	250	3	2,00	0,3 Pb	0,10 F/0,15B
<b>275*</b>	1800	275	3	1,50		0,10 F/0,15B
<b>275f</b>	1800	275	3	1,20	0,3 Pb	0,10 F/0,15B

Tabella 3: densità ottenute sui penetrametri alle diverse condizioni di esposizione

<b>Esposizione</b>	<b>Penetrametri</b>						
	<b>.05</b>	<b>.07</b>	<b>.10</b>	<b>.12</b>	<b>5</b>	<b>.15</b>	<b>.20</b>
	<b>1,2954 mm</b>	<b>1,9431 mm</b>	<b>2,5908 mm</b>	<b>3,2385 mm</b>	<b>3,302 mm</b>	<b>3,8862 mm</b>	<b>5,1816 mm</b>
<b>130</b>		3,66	2,75	2,19	2,13	1,69	1,13
<b>130*</b>		3,36	2,57	2,06	2,00	1,61	1,11
<b>160</b>		3,24	2,55	2,10	2,06	1,72	1,22
<b>160*</b>		3,15	2,52	2,10	2,05	1,71	1,25
<b>200*</b>	3,65	2,95	2,44	2,10	2,07	1,80	1,40
<b>250*</b>	3,53	2,92	2,47	2,17	2,14	1,89	1,51
<b>250f</b>	2,99	2,65	2,36	2,13	2,12	1,95	1,64
<b>275*</b>	3,55	2,97	2,54	2,25	2,22	1,99	1,61
<b>275f</b>	2,95	2,64	2,39	2,22	2,19	2,02	1,72

Combinando i dati sopra riportati si è ottenuto il grafico di figura 4. Si nota che le curve, per costruzione, si posizionano nell'intorno del valore di densità 2.15 per spessori di circa 3 mm. Le condizioni 130\*, 160 e 160\* sono equivalenti per spessori inferiori ai 3 mm cos' come avviene per i gruppi 200\*-250\*-275\* e per 250f-275f. In ogni caso entrambe le esposizioni condotte a 130 kV portano ad ottenere il massimo di contrasto ottenibile (maggiore pendenza delle curve).

Per ribadire l'importanza del contrasto sulla qualità radiografica è stato condotto un confronto del profilo dei grigi lungo la retta che collega i 3 fori dei penetrametro Fe.12 nelle varie condizioni riportate in tabella 2 con il penetrametro presente sulle tavole di riferimento della norma ASTM E192. Se la qualità radiografica voluta è del tipo 1T si nota che, per lo spessore di parete considerato, può essere ottenuta solamente applicando tensioni massime intorno a 160 kV e lo stesso avviene se la qualità radiografica voluta è quella standard (2T). Il foro 4T è ben distinguibile solo fino al massimo 200kV. è da ribadire il fatto che un occhio abituato alla lettura delle lastre sa dove ricercare i fori sugli indicatori di qualità ma che con l'aumentare della tensione applicata al circuito tali fori non sono risolti ma appaiono di difficile distinzione.

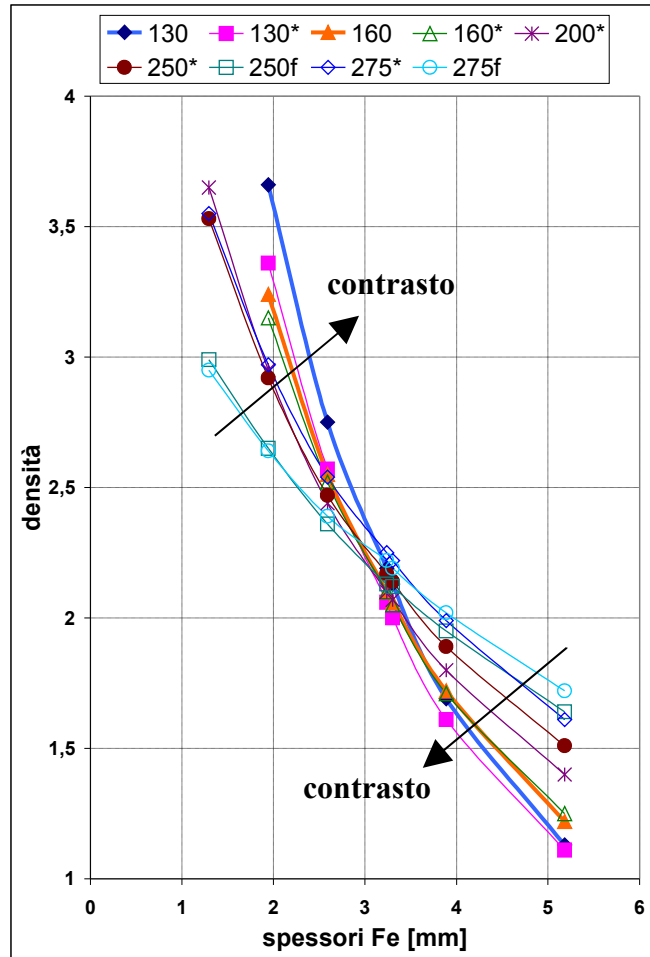


Figura 4: grafico esposizioni su penetrametri

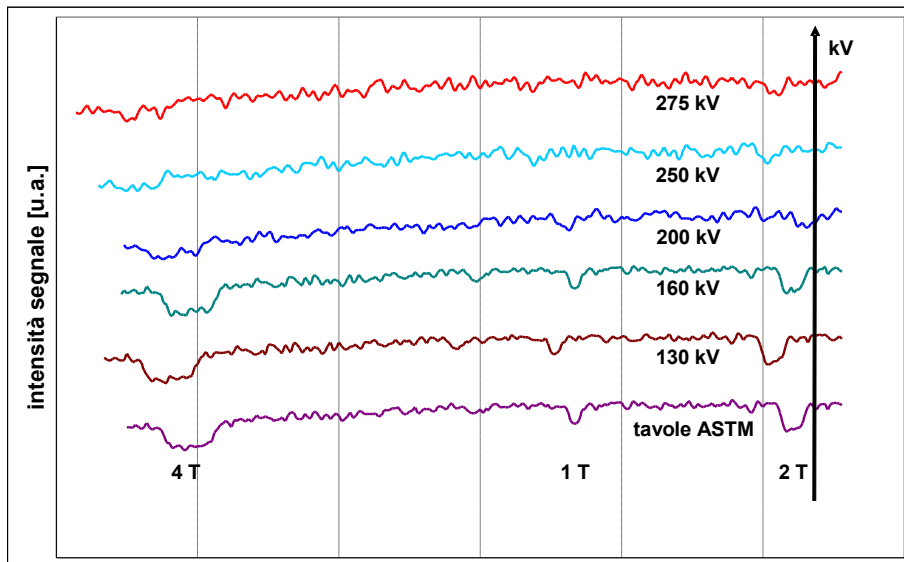


Figura 5: confronto profilo di grigi fori penetrametro Fe.12 a diverse esposizioni

A ribadire il concetto sopra esposto è stato condotto un ulteriore confronto fra diverse condizioni di esposizione radiografica su un componente microfuso in lega Ni contenente difettologie note (microritiri). La figura 6 mostra la stessa porzione di componente radiografata a 130 kV (a) e a 250 kV (b). Le due zone distinte con il cerchio e con il rettangolo presentano ritiri i cui contorni risultano ben distinguibili nella prima radiografia mentre appaiono sfumati nella seconda, effetto della perdita di contrasto.

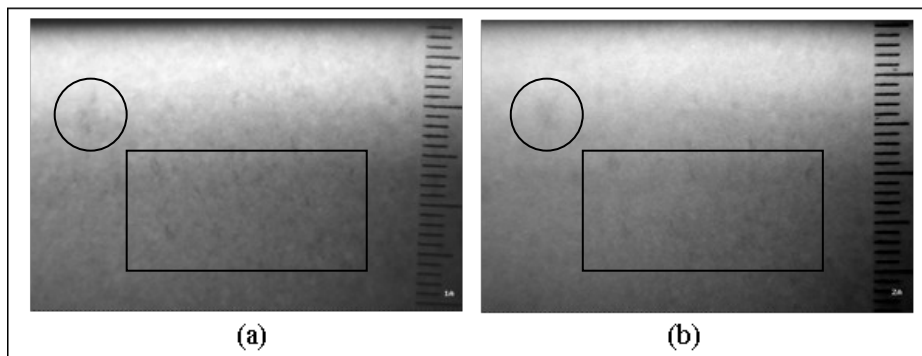
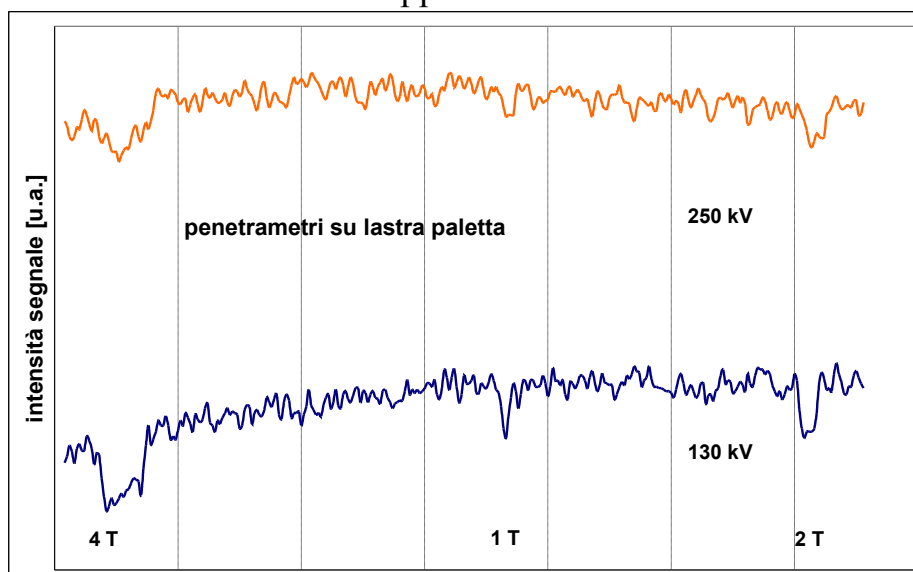


Figura 6: radiografie di ritiri su uno stesso particolare a 130 kV (a) e 250 kV (b)

La perdita di definizione dell'immagine è confermata anche dal profilo dei grigi tracciato sullo stesso penetrametro (Fe.12) presente sulla lastra radiografica del componente (figura 7) in cui i picchi che contraddistinguono i fori dell'indicatore di qualità risultano meno evidenti con l'aumentare della tensione applicata.



## Conclusioni

In questo lavoro si è cercato di evidenziare l'effetto della tensione di esposizione applicata al circuito del tubo radiogeno sui parametri che identificano la qualità dell'immagine, in special modo il contrasto.

Si è operato in quattro fasi successive: 1) raccolta parametri espositivi applicati su componenti reali microfusi in acciaio o leghe base nichel; 2) valutazione del contrasto su esposizioni di penetrametri e blocchi condotte a tensione crescente; 3) analisi del profilo dei grigi condotta sulla linea che collega i fori degli indicatori di qualità su lastre radiografiche realizzate a tensione crescente; 4) verifica dell'effetto del contrasto nell'individuazione di indicazioni su componenti reali microfusi.

Dall'analisi delle esperienze presentate risulta evidente l'importanza dell'ottenimento di una lastra radiografica ben contrastata per permettere una chiara individuazione delle eventuali discontinuità presenti nei getti microfusi. La regola generale per ottenere un buon contrasto è quella di preferire, tra le tecniche radiografiche che si possono utilizzare per le esposizioni dei componenti, quelle caratterizzate da un più basso valore di tensione. Tuttavia, come mostrano i dati riportati, quanto appena detto non è seguito in assoluto da tutti i laboratori radiografici industriali e ciò può portare sia alla non individuazione di indicazioni presenti nel getto e sia, in misura maggiore, alla non individuazione del reale livello di severità dell'indicazione individuata.



## **Bibliografia**

1. R. L. Wood, D. Von Ludwing, "Investment Castings for Engineers", 1952, Book division Reinhold Publishing Corporation, pp 9-10.
2. ASM Handbook, Casting, vol 15, ASM International 1992
3. norma ASTM E192
4. norma ASTM E2104