

UTILIZZO DELLA TOMOGRAFIA IN LUCE DI SINCROTRONE PER LA RICOSTRUZIONE 3D DI CRICCHE

F. Cosmi¹, A. Cristofori², L. Mancini³, R. Tovo², G. Tromba³, M. Volpone⁴

¹Department of Mechanical Engineering, University of Trieste, Trieste (Italy)

²Department of Engineering, University of Ferrara, Ferrara (Italy)

³Sincrotrone Trieste, Basovizza, Trieste (Italy)

⁴Istituto Italiano Saldatura, Genova, (Italy)

E-mail: cosmi@units.it

SOMMARIO

Lo sviluppo di tecniche di previsione di durata a fatica multiassiale è strettamente legato ad una migliore comprensione quantitativa del processo di nascita della cricca ed in particolare della geometria del difetto. In questo lavoro vengono presentati i risultati ottenuti nella ricostruzione di cricche di fatica multiassiale utilizzando la tecnica della tomografia in luce di sincrotrone.

La tecnica impiegata ha consentito la ricostruzione 3D e la misura delle caratteristiche geometriche delle cricche sviluppate in provini soggetti a fatica flessione-torsionale.

I modelli ottenuti potranno inoltre essere impiegati come dati in ingresso per analisi con metodi numerici.

1. INTRODUZIONE

Le numerose differenze in letteratura nell'approccio al problema dell'insorgenza della cricca di fatica sono alla base delle diverse filosofie di progettazione utilizzate dall'industria [1-3]. Lo sviluppo di tecniche che consentano una sempre più precisa previsione della durata di un organo meccanico soggetto a fatica multiassiale è strettamente legato ad una migliore comprensione quantitativa del processo di nascita della cricca ed in particolare della geometria del difetto.

I metodi convenzionali utilizzati a questo scopo sono distruttivi o non possiedono una sufficiente risoluzione (radiografie convenzionali, tecniche ultrasonografiche).

Le tecniche di imaging che utilizzano la luce di sincrotrone, invece, uniscono una buona penetrazione del materiale ad un'elevata risoluzione spaziale e risultano quindi particolarmente interessanti.

Negli ultimi anni le radiazioni di sincrotrone sono state utilizzate per misure di tensioni residue [4,5], e primi studi su nucleazione di cricche sono stati condotti da Ludwig, Marrow, Babout e Buffière [6-10] presso l'European Synchrotron Radiation Facility di Grenoble (Francia). I primi risultati ottenuti nell'analisi di difetti in giunti saldati mediante FSW e le tecniche di imaging in contrasto di fase applicate sono stati descritti in [11].

Scopo di questo lavoro è quello di presentare i risultati ottenuti nella ricostruzione di cricche di fatica multiassiale in provini in Al 5083 H321 mediante micro-CT con luce di sincrotrone presso la beamline SYRMEP (Elettra, Trieste).

2. MATERIALE E METODO

2.1. Campioni

Sono stati utilizzati 6 provini in Al 5083 H321 appositamente realizzati, la cui geometria è illustrata in Fig.1. I campioni sono stati sottoposti presso l'Università di Ferrara a diversi livelli di sollecitazione affaticante di flesso-torsione in fase mediante l'apparecchiatura illustrata in Fig.1, azionata da una macchina idraulica ITALSIGMA FPF 20kN. Le prove di fatica sono state interrotte al 7% di caduta di rigidità, e successivamente i campioni criccati sono stati tomografati.

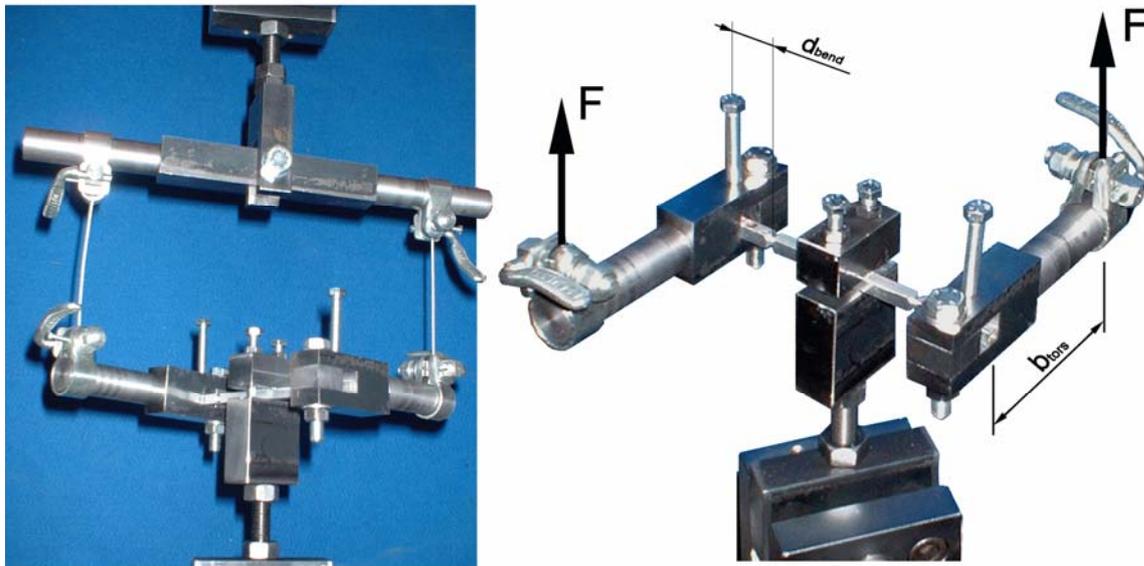
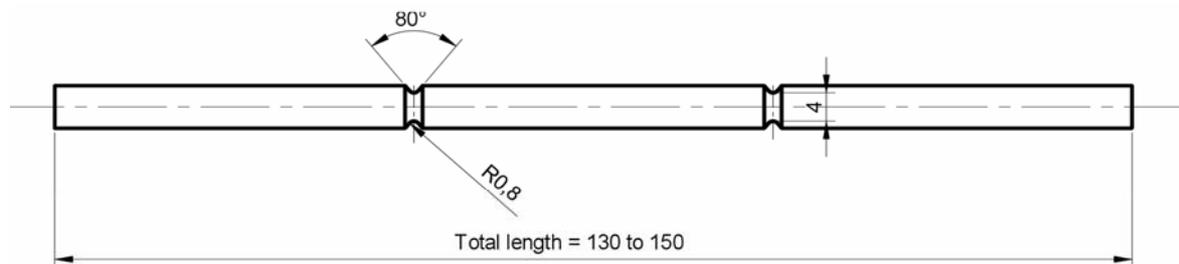


Figura 1: Geometria dei campioni e apparecchiatura utilizzata

2.2. Acquisizione dati

La linea SYRMEP, dedicata alle applicazioni di imaging, utilizza il fascio laminare uscente da uno dei magneti curvanti di ELETTRA e, grazie alle sue particolari caratteristiche di brillantezza e coerenza, consente l'impiego delle tecniche radiografiche a contrasto di fase e quindi di ottenere tomografie con risoluzioni spaziali elevate anche per questa applicazione, in cui l'immagine radiografica tradizionale, per assorbimento, non avrebbe contrasto sufficiente ad evidenziare la cricca [12,13].

Ruotando il campione nel fascio, viene ottenuta una sequenza di radiografie da cui si possono ricostruire, mediante appositi algoritmi, le immagini tomografiche del campione, dette slices, corrispondenti a sezioni perpendicolari all'asse del provino. Impilandole una sull'altra si ottiene la matrice volumetrica del coefficiente di attenuazione lineare del campione. Particolari accorgimenti sono stati adottati per la rimozione degli artefatti da ricostruzione e per la riduzione del rumore nell'immagine finale. Dalla matrice volumetrica del coefficiente di attenuazione del campione si è quindi ottenuta l'immagine ricostruita della zona interessata dalla cricca applicando algoritmi del tipo Marching Cube modificati. Sono state utilizzate due diverse ottiche, una con risoluzione 1 pixel = 14 μm , l'altra ad alta risoluzione, 1 pixel = 4 μm . La Fig.2 illustra il set-up sperimentale.

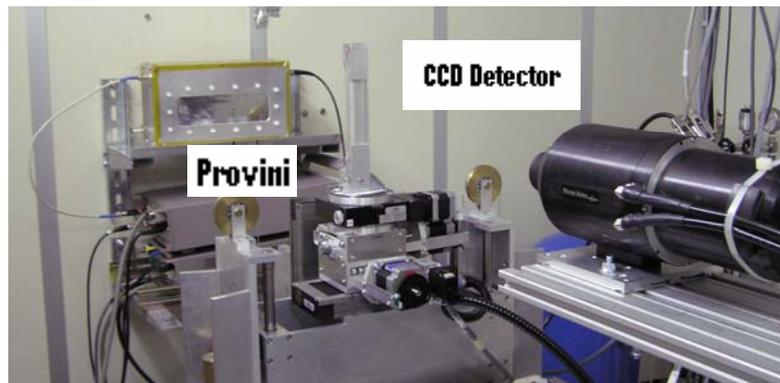


Figura 2: Il set-up tomografico presso la beamline SYRMEP

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Provino P1

La prova del provino P1 è stata interrotta dopo 160.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 98$ MPa, $\sigma_m = 153$ MPa, $\tau_a = 70$ MPa, $\tau_m = 109$ MPa. L'ottica utilizzata per l'acquisizione ha una risoluzione di 4 μm . L'osservazione della superficie esterna presenta tre cricche. La cricca principale, nella zona centrale di Fig.3, ha una lunghezza di circa 3 mm, le altre inferiori ai 500 μm . Sulla superficie, la cricca risulta formata essenzialmente da tratti lineari.

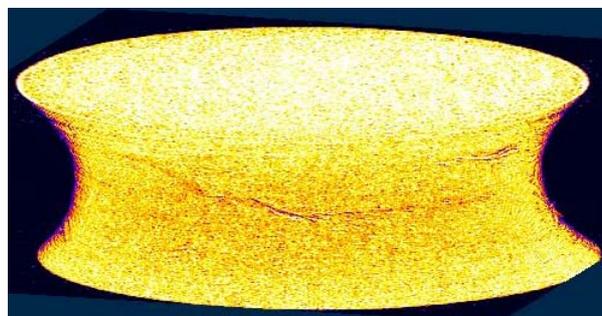


Figura 3: Ricostruzione del provino P1

La geometria della cricca sulla superficie del provino è definita in Fig.4. I due tratti inclinati, da cui probabilmente la cricca è nucleata, sono inclinati rispetto all'asse del provino di 63° e 65° . Considerando il circolo di Mohr relativo alla condizione di carico, il piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime risulta praticamente coincidente, essendo inclinato di 62° rispetto all'asse del provino.

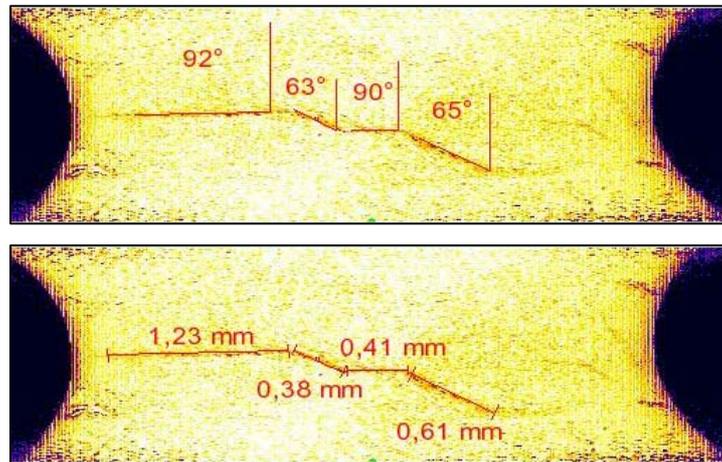


Figura 4: *Il set-up tomografico presso la beamline SYRMEP*

La modalità di propagazione della cricca all'interno del provino è visibile nella sezione assiale, riportata in Fig.5.

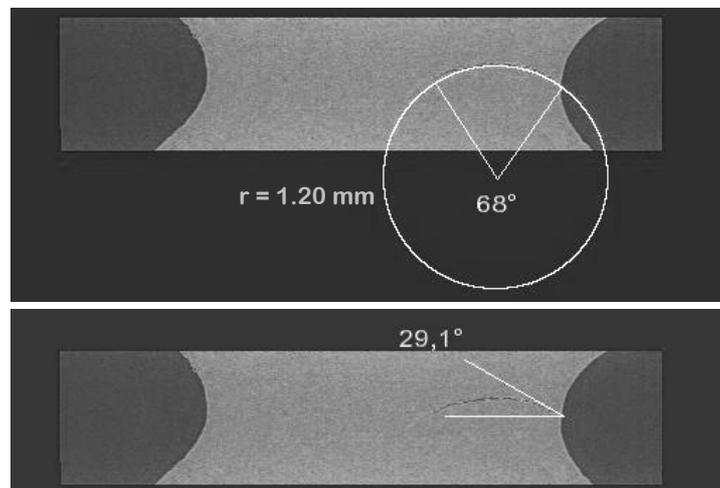


Figura 5: *Sezione passante per l'asse del provino P1*

Prendendo in considerazione le slices, dalle quali la ricostruzione 3D è stata ottenuta, si può osservare l'andamento della cricca nelle diverse sezioni del provino.

In Fig.6 sono successivamente riportate le sezioni poste a -0.70 mm , -0.42 mm, 0 mm e $+0.42$ mm da quella di minor diametro.

Si può notare che la cricca si propaga dalla superficie verso l'interno con un angolo rispetto alla direzione radiale di 32.5° nella prima slice, 23.6° nella seconda , circa 0° nella sezione media e torna a 33.7° nella quarta slices.

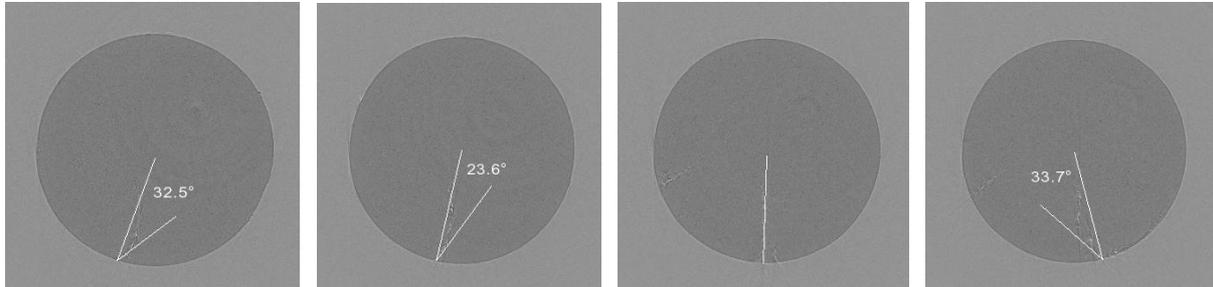


Figura 6: Slices rispettivamente a -0.70 mm , -0.42 mm , 0 mm e $+0.42\text{ mm}$ dalla sezione di minor diametro.

3.2. Provino P3_L2

La prova del provino P3_L2 è stata interrotta dopo 277.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 68\text{ MPa}$, $\sigma_m = 82\text{ MPa}$, $\tau_a = 77\text{ MPa}$, $\tau_m = 93\text{ MPa}$.

Per l'acquisizione è stata utilizzata l'ottica da $14\text{ }\mu\text{m}$ di risoluzione.

Il provino P3_L2 presenta una cricca sulla superficie, di dimensioni alquanto contenute, pari a 0.66 mm , inclinata di 51° rispetto all'asse del campione, Fig.7. Questo valore è molto vicino a quello dell'inclinazione del piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime, pari a 57° .

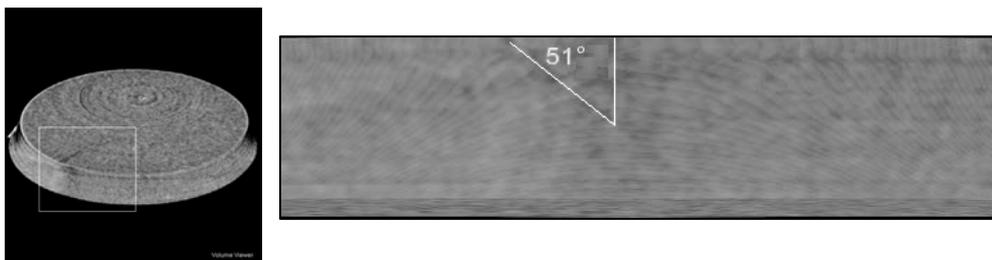


Figura 7: Provino P3_L2 – ricostruzione e ingrandimento nella zona della cricca.

Le caratteristiche geometriche della cricca, nella direzione di propagazione verso l'interno del campione, sono state misurate in una sezione passante per l'asse del provino (Fig.8).

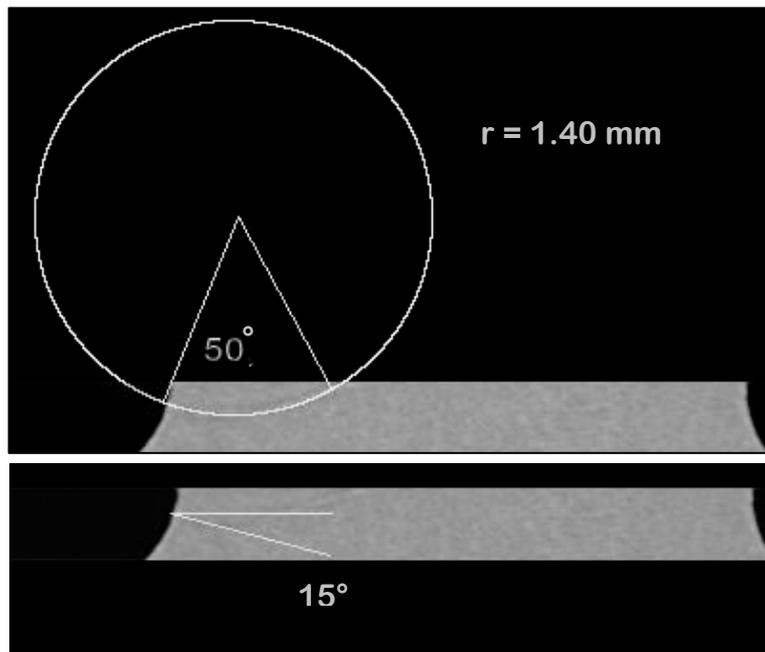


Figura 8: Sezione passante per l'asse del provino P3_L2.

3.3. Provino P4

La prova del provino P4 è stata interrotta dopo 277.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 69$ MPa, $\sigma_m = 95$ MPa, $\tau_a = 69$ MPa, $\tau_m = 95$ MPa. Per l'acquisizione è stata utilizzata l'ottica da $14 \mu\text{m}$ di risoluzione.

Anche in questo caso la superficie presenta due cricche, lunghe 0.72 mm e 0.64 mm (Fig.9). La cricca di dimensioni maggiori risulta inclinata di 56° rispetto all'asse del campione, mentre l'inclinazione del piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime è pari a 58° .

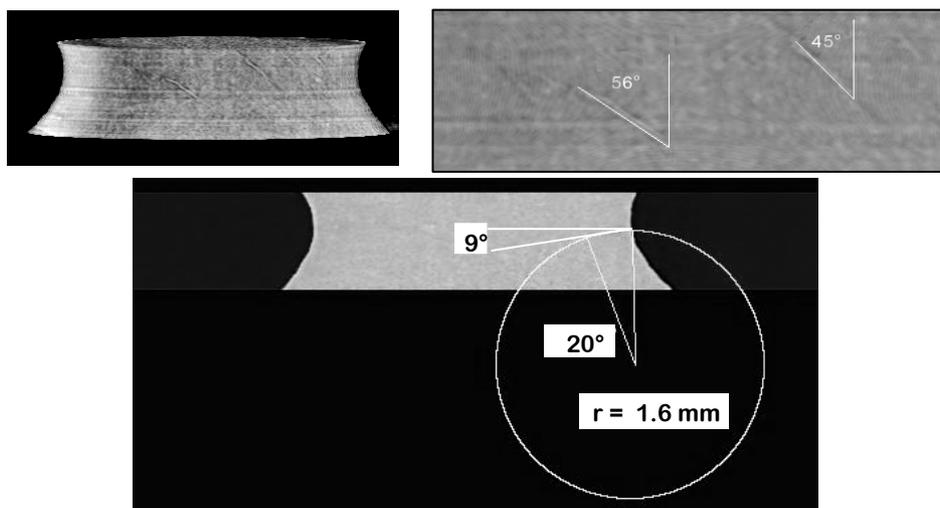


Figura 9: Provino P4 – ricostruzione, ingrandimento nella zona delle cricche e dimensioni nella sezione passante per l'asse del provino.

Nell'analisi delle slices ricostruite il difetto è individuabile con qualche difficoltà. E' tuttavia interessante notare che l'inclinazione della parte più superficiale della cricca rispetto alla direzione radiale nella zona centrale del campione si conferma sui valori riportati in precedenza (Fig.10).

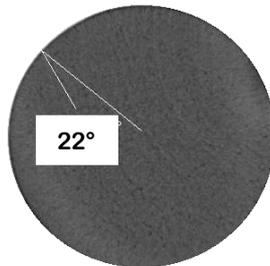


Figura 10: Tomografia nella zona centrale del provino P4.

3.4. Provino P6_2

La prova del provino P6_2 è stata interrotta dopo 281.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 170$ MPa, $\sigma_m = 351$ MPa, $\tau_a = 94$ MPa, $\tau_m = 193$ MPa. L'inclinazione del piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime rispetto all'asse del campione è pari a 66° .

L'ottica utilizzata per l'acquisizione ha una risoluzione di $14 \mu\text{m}$.

Il provino P6_2 presenta una cricca molto estesa, di forma estremamente irregolare. La cricca risulta perfettamente individuabile anche nelle slices (Fig.11). E' comunque un esempio di notevole interesse che dà l'idea della potenza di questo metodo di indagine.

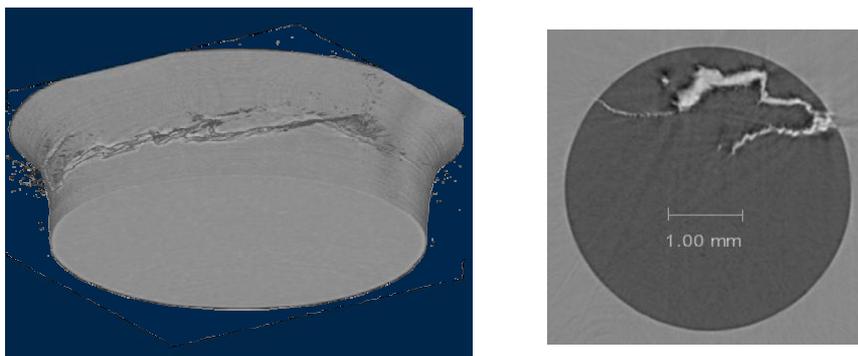


Figura 11: Provino P6_2 – ricostruzione e slice nella zona della cricca.

Nelle immagini successive, in cui sono riportate le due principali proiezioni ortogonali del provino in esame, la superficie del campione è stata resa trasparente per permettere la visualizzazione della cricca (Fig.12).

Sulla superficie, la cricca si presenta particolarmente estesa ed ha direzione ortogonale all'asse del campione.

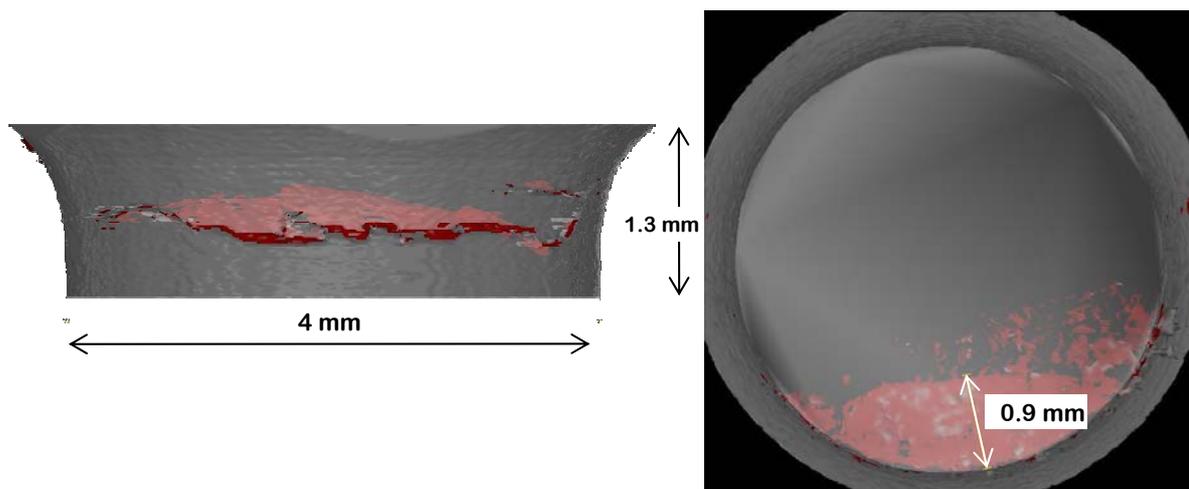


Figura 12: *Proiezioni ortogonali del provino P6_2.*

Le caratteristiche geometriche della cricca nella direzione di propagazione verso l'interno del campione sono state misurate in una sezione passante per l'asse del provino (Fig.13).

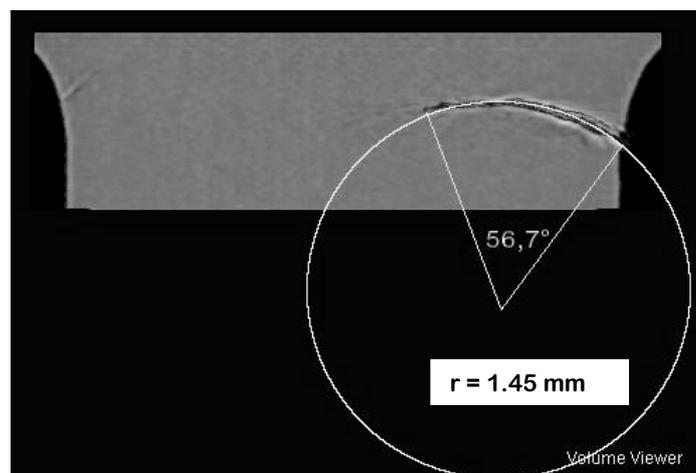


Figura 13: *Sezione passante per l'asse del provino P6_2.*

Il risultato della ricostruzione della sola cricca, ottenuta segmentando solo la regione interessata dal difetto, è riportato in Fig.14.

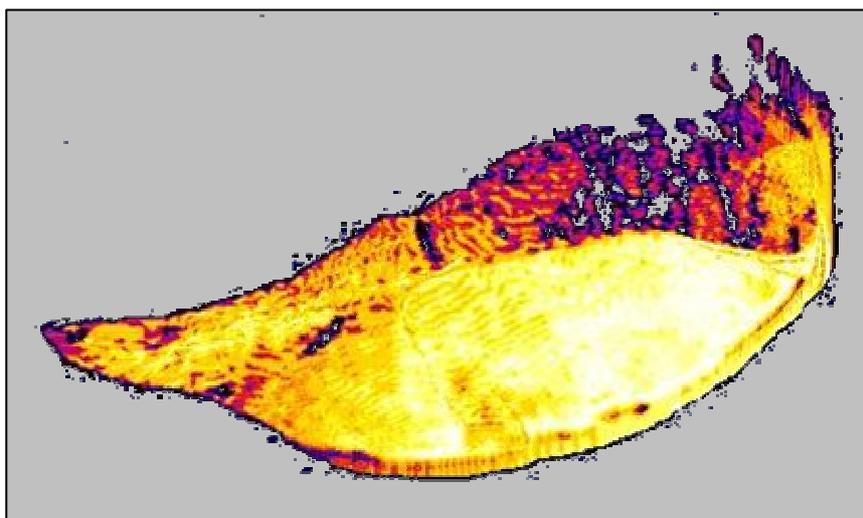


Figura 14: Ricostruzione della cricca del provino P6_2.

3.5. Provino P7_bis

La prova del provino P7_bis è stata interrotta dopo 64.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 262$ MPa, $\sigma_m = 303$ MPa, $\tau_a = 151$ MPa, $\tau_m = 175$ MPa. L'inclinazione del piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime è pari a 65° .

Per l'acquisizione è stata utilizzata l'ottica da $14 \mu\text{m}$ di risoluzione.

La cricca, ben visibile sulla superficie e piuttosto estesa, risulta costituita di 3 tratti pressoché lineari (Fig.15). Il tratto centrale, che si estende per 0.24 mm, è inclinato di 63° rispetto all'asse del provino, gli altri due tratti sono inclinati di 68° (lunghezza 0.68 mm) e 53° (lunghezza 0.80 mm).

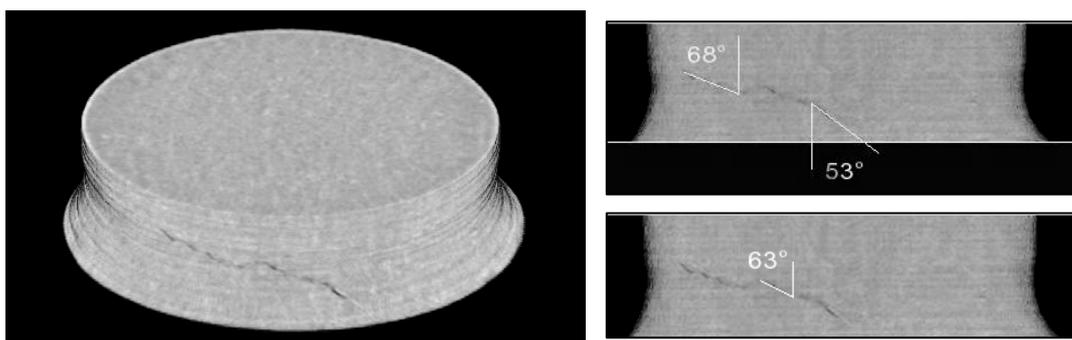


Figura 15: Ricostruzione del provino P7_bis e particolare della zona della cricca.

Passando ad analizzare le slices, si può osservare come la cricca sia ben visibile e presenti un'inclinazione rispetto alla direzione radiale nella parte più vicina alla superficie. Questa caratteristica è riscontrabile in Fig.16, dove sono riportate le slices situate rispettivamente a -0.14 mm, -0.056 mm, nella sezione di minor diametro nella zona intagliata e a $+0.14$ mm.

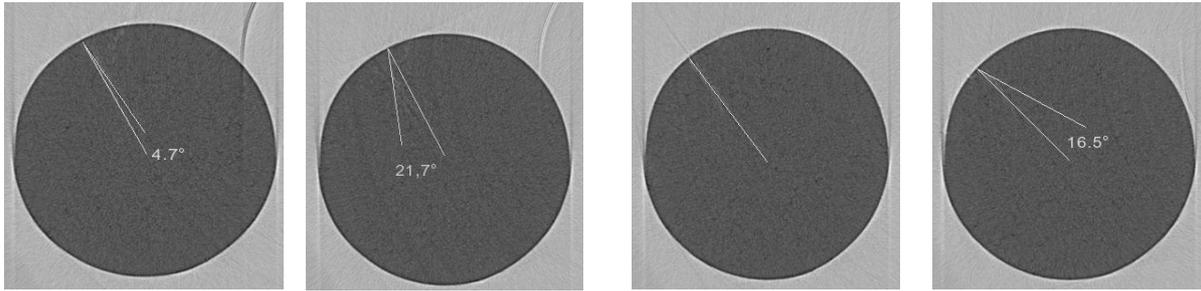


Figura 16: Slices rispettivamente a -0.14 mm, -0.056 mm, 0 mm e $+0.14$ mm dalla sezione di minor diametro.

3.6. Provino P8

La prova del provino P8 è stata interrotta dopo 1.910.000 cicli. Le ampiezze e componenti medie normali e tangenziali delle sollecitazioni nominali sono rispettivamente: $\sigma_a = 148$ MPa, $\sigma_m = 203$ MPa, $\tau_a = 148$ MPa, $\tau_m = 203$ MPa. L'inclinazione del piano su cui agiscono le tensioni nominali principali massime è pari a 58° .

L'ottica utilizzata per l'acquisizione ha una risoluzione di $4 \mu\text{m}$.

Il provino P8 presenta una cricca ben visibile, grazie all'ottica utilizzata, ed ha la morfologia tipica delle cricche ottenute per la tipologia dei provini analizzati, come visibile in Fig. 17.

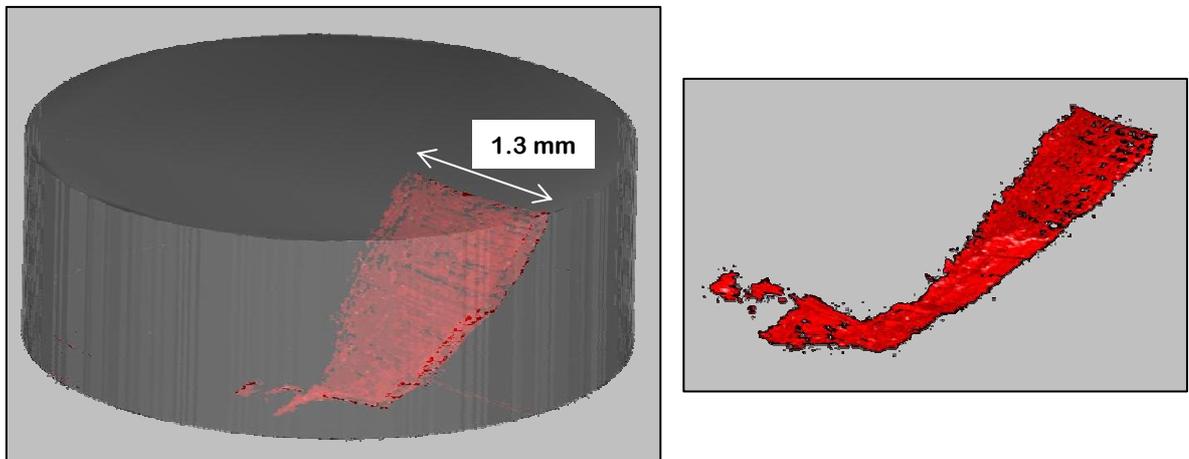


Figura 17: Ricostruzione del provino P8 e della cricca.

Sulla superficie, la cricca risulta costituita da 4 tratti le cui dimensioni ed inclinazioni rispetto all'asse del provino sono riportate in Fig. 18.

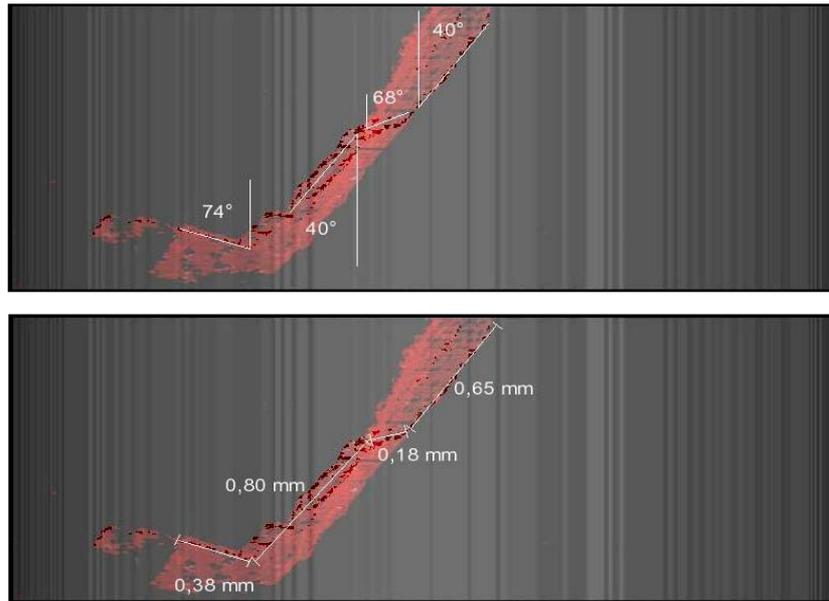


Figura 18: Geometria della cricca sulla superficie del provino P8.

Osservando lo sviluppo della cricca nelle slices, in questo caso si può notare come la cricca non si propaghi in direzione radiale ma mantenga con questa una deviazione che cambia da sezione a sezione. Nella zona centrale la cricca nel primo tratto presenta un'inclinazione rispetto alla direzione radiale molto elevata, 43° per poi assumere una direzione pressoché rettilinea con un angolo di 11° (Fig.19). Anche l'analisi della sezione passante per l'asse del provino (normale quindi alla slice) individua una discontinuità.

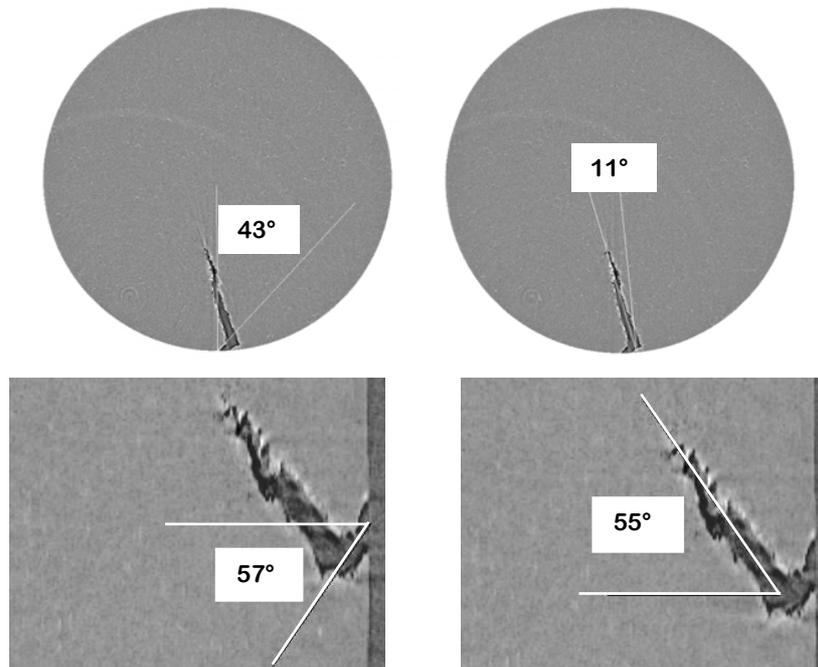


Figura 19: Slice nella zona centrale e sezione passante per l'asse del provino P8.

In Fig.20 sono riportate le slices a -0.7 mm e $+0.7$ mm rispetto alla sezione di minor diametro.

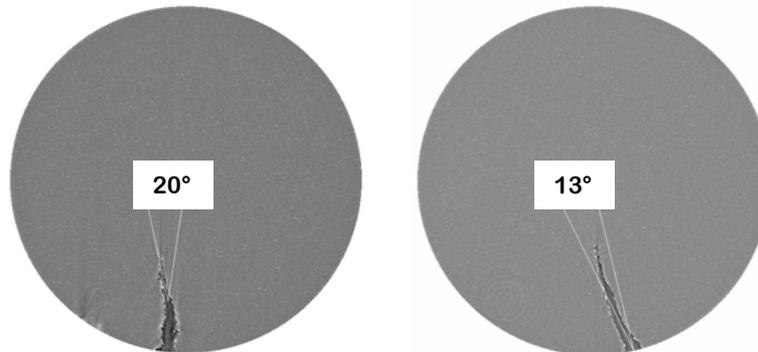


Figura 20: Slices a -0.7 mm e $+0.7$ mm rispetto alla sezione di minor diametro.

4. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati presentati i risultati ottenuti nella ricostruzione di cricche di fatica multiassiale utilizzando la tecnica della tomografia in luce di sincrotrone.

La tecnica impiegata ha consentito la ricostruzione 3D delle cricche sviluppate in provini soggetti a fatica flessione-torsionale. All'analisi qualitativa è stato quindi possibile affiancare la misura non distruttiva dei parametri geometrici che caratterizzano l'avanzamento della cricca. I dati delle ricostruzioni 3D potranno inoltre essere impiegati come dati in ingresso per analisi con metodi numerici, allo scopo di realizzare un modello in grado di prevedere le caratteristiche di propagazione della cricca in relazione allo stato tensionale esistente all'apice della cricca stessa.

RINGRAZIAMENTI

Un grazie allo studente Fabio Daneluzzi per il contributo fornito all'elaborazione delle immagini.

Bibliografia

- [1] Wang C. H., Brown M. W. (1993) A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **16**, 1285-1298.
- [2] Quian J., Fatemi A.(1996): Mixed mode fatigue crack growth: a literature survey, *Engineering Fracture Mechanics* 55, 969-990.
- [3] Newman J.C.(1998): The merging of a fatigue and fracture mechanics concepts: a historical prospective, *Progress in Aerospace Sciences* 34, 347-390.
- [4] Zahavi E.(1996): *Fatigue design, life expectancy of machine parts*, CRC Press.
- [5] Webster P. J., et al. (2001): 'Synchrotron X-ray residual strain scanning of a friction stir weld'. *J Strain Analysis* 36, 61-70.
- [6] Stefanescu D., et al. (2004): Elastic strains around cracked cold-expanded fastener holes measured using the synchrotron X-ray diffraction technique, *J. Strain Analysis*, 39, 459-469,.

- [7] Babout L.(2003): Damage assessment in metallic structural materials using high resolution synchrotron X-ray tomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 200, 303-307.
- [8] Ludwig W., et al.(2003): Study of the interaction of a short fatigue crack with grain boundaries in cast Al alloy using X-ray microtomography, Acta Materialia 51, 585-598.
- [9] Marrow J .T., et al.(2004): High resolution X-ray tomography of short fatigue crack nucleation in austempered ductile cast iron, International Journal of Fatigue 26, 717-725.
- [10] Buffiere J.Y. (2001): Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model AL-Si7_Mg0.3 cast Al alloys, Materials Science and Engineering A316, 115-126.
- [11] Cosmi F., Cristofori A., Mancini L., Tovo R., Tromba G., Volpone M.: (2005): Preliminary investigation by synchrotron radiation of cracks and defects in AA FSW samples, Intl. Conf. ICF 11 , Torino, Italia, 20-25.03.2005
- [12] Snigirev A., et al.(1995): On the possibilities of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation, R. Sci. Instrum. 66, 5486-5492.
- [13] Kak A.C., Slaney M.(1988): Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press.