

F. DE PASCALIS, M. NACUCCHI, D. MARSEGLIA

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Tecnologie e Processi dei Materiali per la Sostenibilità
Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie
per Applicazioni Sostenibili
Centro Ricerche di Brindisi

ANALISI DI POROSITÀ DI POLIMERI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO (CFRP) MEDIANTE MICRO-TOMOGRAFIA A RAGGI X

RT/2017/37/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. DE PASCALIS, M. NACUCCHI, D. MARSEGLIA

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Tecnologie e Processi dei Materiali per la Sostenibilità
Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie
per Applicazioni Sostenibili
Centro Ricerche di Brindisi

ANALISI DI POROSITÀ DI POLIMERI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO (CFRP) MEDIANTE MICRO-TOMOGRAFIA A RAGGI X

RT/2017/37/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

ANALISI DI POROSITÀ DI POLIMERI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO (CFRP) MEDIANTE MICRO-TOMOGRAFIA A RAGGI X

F. De Pascalis, M. Nacucchi, D. Marseglia

Riassunto

In diversi settori industriali, tra cui il settore aeronautico, navale e automobilistico si assiste ad un sempre più massiccio impiego di componenti basati su matrici polimeriche rinforzate con fibre di carbonio (CFRP). Sono materiali che rivestono, dunque, una notevole importanza grazie alla loro caratteristica rigidità e all'elevato rapporto resistenza-peso. Le proprietà e caratteristiche di tali polimeri, però, sono strettamente correlate al loro livello di porosità; generalmente, livelli di porosità superiori al 2-4% del volume totale non sono conformi alla realizzazione di parti strutturali di velivoli aeronautici. La tecnica standard per eseguire controlli e misure di porosità su CFRP è quella dei test ad ultrasuoni. Questo metodo d'indagine richiede una notevole esperienza da parte dell'operatore e molto spesso genera risultati di difficile interpretazione. In questo report mostriamo come l'utilizzo della micro-tomografia ai raggi X in combinazione con un software di visualizzazione 3D risulti essere uno strumento dall'enorme potenziale nell'analisi e caratterizzazione dei campioni CFRP. In particolare, a partire dai dataset tomografici, è possibile mediante tecniche di elaborazione di immagini riuscire ad effettuare una indagine dettagliata della porosità interna di questi materiali riuscendo a caratterizzarne la distribuzione dei pori. Mostreremo inoltre come esista una risoluzione ottimale per l'analisi di porosità, dove la qualità delle immagini ha un massimo e l'incertezza sull'individuazione dei pori un minimo.

Parole chiave: CFRP, Tomografia X, elaborazione digitale delle immagini, porosità.

Abstract

In many industrial sectors, including the aeronautical, naval and auto-motive fields, there is a growing use of components based on carbon fiber reinforced polymer (CFRP). These materials are therefore of great importance thanks to their stiffness and high resistance-to-weight ratio. The properties and characteristics of such polymers, however, are closely related to their porosity. Generally, porosity levels greater than 2-4% of the total volume do not conform to the construction of structural parts of aeronautical vehicles. The standard technique to check CFRP porosity or measure it, is the ultrasonic attenuation. This methodology requires a remarkable experience for the operator and very often its results are of difficult interpretation. This report will show how an X-ray micro-tomographic investigation made with the help of 3D visualization software is a suitable tool for analyzing and characterizing CFRP components. In particular, it will be shown how starting from the tomographic data set and by using image processing techniques, it is possible to carry out a thorough microstructural investigation of these materials and to characterize their internal porosity accurately. The existence of an optimal resolution for porosity analysis, where image quality is high and uncertainty about pore detection is minimal will also be demonstrated.

Key words: CFRP, X-ray tomography, digital image processing, porosity.

INDICE

1. INTRODUZIONE	7
2. CAMPIONI ANALIZZATI	7
3. MICRO-TOMOGRAFIA A RAGGI X	8
4. ANALISI DEI DATASET TOMOGRAFICI	10
4.1 Segmentazione e calcolo della porosità	10
4.2 Ricostruzione dei pori e loro struttura interna	16
5. CONCLUSIONI	18
RINGRAZIAMENTI	18
BIBLIOGRAFIA	19

1. INTRODUZIONE

In diversi settori industriali, tra cui il settore aeronautico, navale e auto-motive si assiste ad un sempre più massiccio impiego di componenti basati su matrici polimeriche rinforzate con fibre di carbonio. Sono materiali che rivestono dunque una notevole importanza grazie alla loro caratteristica rigidità e all'elevato rapporto resistenza-peso. L'analisi e lo studio della porosità di compositi CFRP è un argomento topico per le applicazioni e gli usi pratici di questi materiali in quanto esiste una relazione diretta tra porosità e proprietà meccaniche, come ad esempio la resistenza agli sforzi. I test ultrasonici costituiscono il metodo d'indagine non distruttiva più comunemente usato per le misure di porosità, essendoci una proporzionalità diretta tra attenuazione e livello di porosità. Occorre, però, considerare che tali coefficienti di attenuazione dipendono non solo dalla porosità interna, ma anche dalla forma e distribuzione dei pori e dalla eventuale presenza di altre impurità. Ciò può portare a significativi errori di misura.

In questo report mostriamo come una indagine micro-tomografica in combinazione con un software di visualizzazione 3D (Avizo Fire) risulti essere uno strumento dall'enorme potenziale nell'analisi e caratterizzazione dei campioni CFRP. La tomografia computerizzata ad alta risoluzione è divenuta un potente strumento di indagine che sfruttando il potere penetrante dei raggi X consente di ottenere informazioni complete non solo sulla superficie del campione, ma anche sulla sua struttura e morfologia interna. Questo lavoro fornisce indicazioni riguardo l'ottimizzazione dei parametri del sistema tomografico per effettuare analisi specifiche su campioni di materiale composito rinforzato da fibre di carbonio. Particolare attenzione è stata posta, inoltre, sulla scelta degli algoritmi di post-processing necessari per estrapolare i corretti valori di porosità. L'algoritmo finale è stato basato su tecniche di filtraggio passa basso e di segmentazione dedotte da una sintesi dei più recenti lavori proposti in letteratura, con l'intento di minimizzare l'errore e l'incertezza della misura.

2. CAMPIONI ANALIZZATI

In questo studio sono stati presi in considerazione tre campioni CFRP con una superficie planare di circa $5 \times 5 \text{ cm}^2$, caratterizzati da medesima matrice polimerica ma con differenti spessori (da 1.6 a 6 mm) e diverse distribuzioni e orientamenti delle fibre. Inoltre i tre campioni sono stati acquisiti a diversi ingrandimenti (da 2.5x a 10x) in modo da studiare come la misura di porosità possa essere influenzata dalla risoluzione tomografica adottata. Dato che il volume della porzione di oggetto ripreso dalla CT è inversamente proporzionale alla risoluzione, per rendere il confronto tra le varie misure più attendibile, abbiamo deciso di esaminare per ogni campione solo una zona centrale di circa 1 cm^2 (vedi fig.1) corrispondente alla massima area acquisibile con il maggiore ingrandimento tra quelli proposti. Per chiarezza, identificheremo i tre campioni con le sigle C1.57-n, C2.1-n e C6.08-n. La cifra numerica indica lo spessore in mm, mentre con n, variabile da 5 a 20, indicheremo invece la risoluzione nominale in μm con cui l'oggetto è stato acquisito.

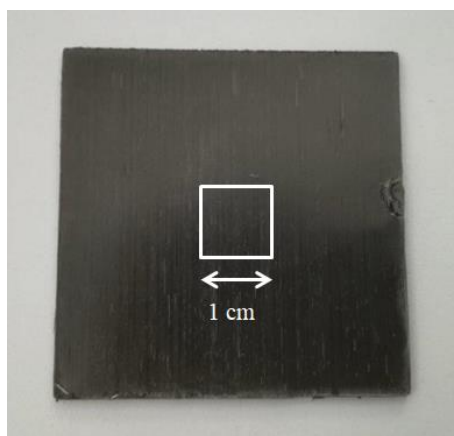


Figura 1: campione CFRP

3. MICRO-TOMOGRAFIA A RAGGI X

L'analisi della porosità interna dei compositi è avvenuta utilizzando il sistema tomografico ad alta risoluzione GE Phoenix Nanotom s (fig.2). Il nano-tomografo è dotato di un tubo a raggi X a nano-fuoco con tensione massima di 180KV e potenza di 15W, e di un sofisticato detector piano Hamamatsu composto da 2300x2300 pixels, con un pixel pitch, P , pari a 50 μm .

I campioni analizzati e il detector sono stati posizionati ad opportuna distanza dal tubo, (rispettivamente indicata come FOD o FDD) in modo tale da ottenere differenti ingrandimenti geometrici $M = \text{FDD}/\text{FOD}$ (da 2.5 a 10 volte) e di conseguenza risoluzioni variabili (P/M) da 20 μm a 5 μm .

La tensione di accelerazione e la corrente elettronica (90KV e 150 μA) sono stati impostati per rispettare lo standard ISO 15708-3 [1] che suggerisce un rapporto ($I_{\min}/I_{\max}$) tra il valore di trasmissione minimo e massimo attorno al 14%, al fine di ottimizzare contrasto e qualità radiografica. Inoltre per migliorare il rapporto segnale rumore (SNR), associato ad ogni proiezione, ogni radiografia registrata è stata la media di quattro acquisizioni. Il rapporto SNR è stato valutato selezionando una regione dello sfondo dell'immagine radiografica (area di intensità uniforme, corrispondente ad una zona contenente solo aria) ed effettuando il rapporto tra il valore medio e la deviazione standard dei valori di intensità appartenenti a tale regione.

Per ogni scansione sono state registrate 1800 radiografie, con un passo angolare di 12 primi d'arco; il tempo totale di acquisizione è stato di circa 2h.

Tutti i parametri strumentali della scansione sono riportati nella tabella 1.

L'intero stack radiografico è stato elaborato mediante il software proprietario GE Datos|x al fine di generare le sezioni virtuali trasversali e la ricostruzione 3D dell'oggetto acquisito (fig.3).

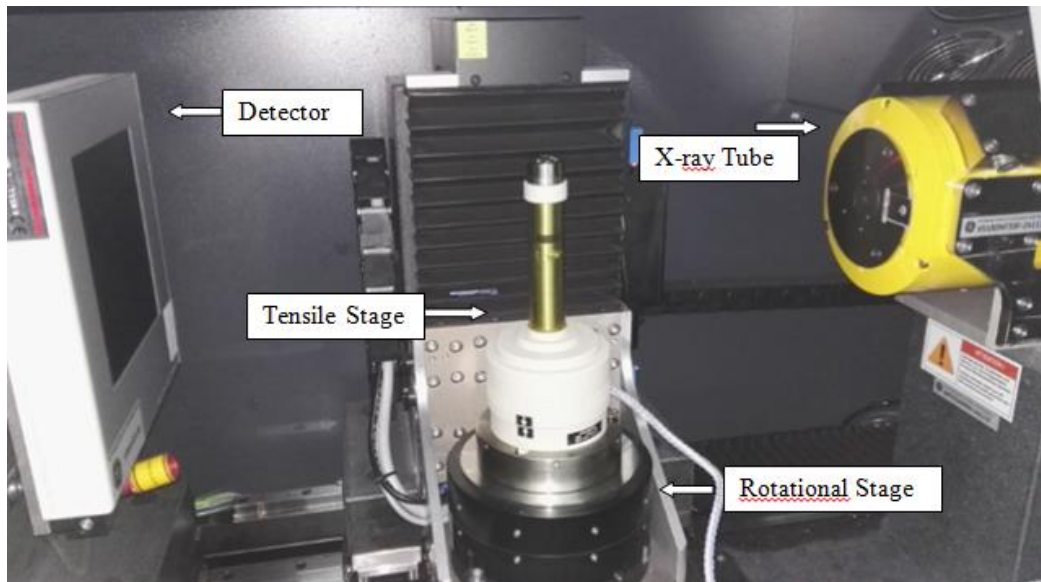
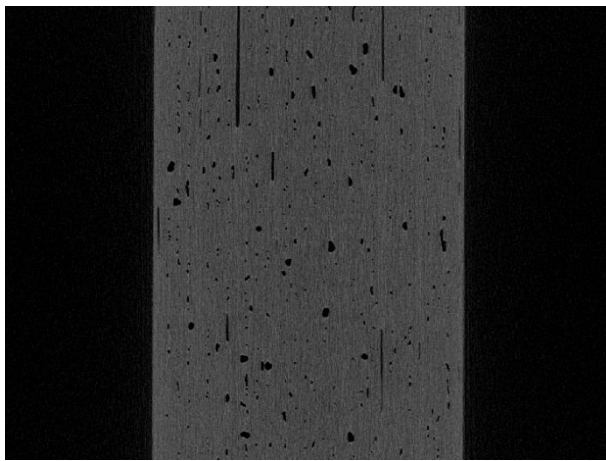


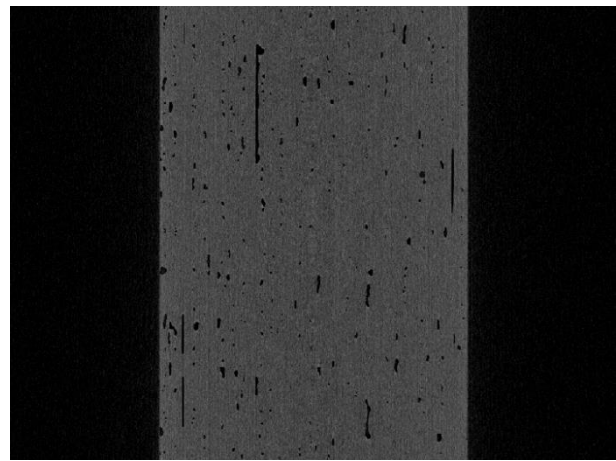
Figura 1: Nanotom-s CT e suoi componenti principali.

Sample C2.1 (2.1mm)						
M	FOD	FDD	Voltage (KV)	Current (μ A)	I_{min}/I_{max} %	SNR
5	30	300	90	150	13.0	266.3
10	60	300	90	150	14.7	269.3
15	90	300	90	150	14.0	271.0
20	120	300	90	150	14.7	271.5
Sample C1.57 (1.57mm)						
M	FOD	FDD	Voltage (KV)	Current (μ A)	I_{min}/I_{max} %	SNR
5	30	300	90	150	14.2	263.2
10	60	300	90	150	14.6	270.7
15	90	300	90	150	15.2	271.7
20	120	300	90	150	16.1	280.5
Sample C6.08 (6.08mm)						
M	FOD	FDD	Voltage (KV)	Current (μ A)	I_{min}/I_{max} %	SNR
5	30	300	90	150	13.4	257.8
10	60	300	90	150	12.8	275.3
15	90	300	90	150	12.6	274.5
20	120	300	90	150	13.4	276.9

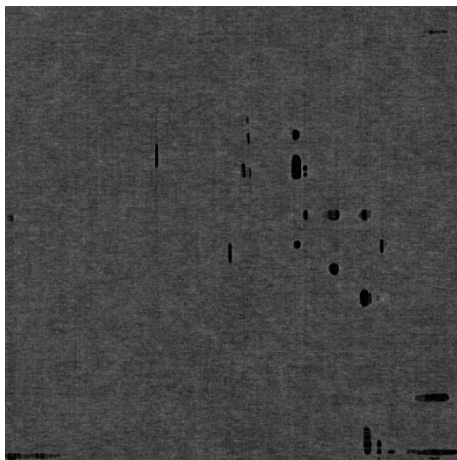
Tabella 1: condizioni sperimentali



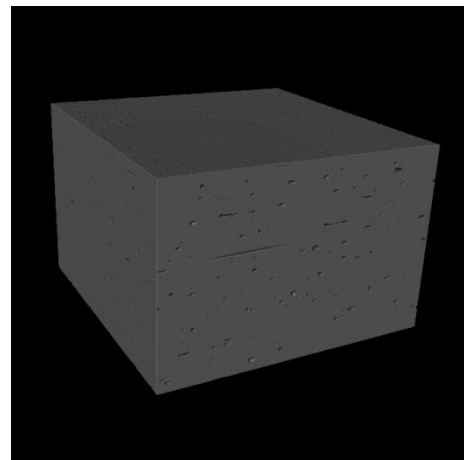
Sezione yz



Sezione xz



Sezione xy



3D

Figura 3: sezioni trasversali del campione C6.08-10 e ricostruzione 3D

4. ANALISI DEI DATASET TOMOGRAFICI

4.1. Segmentazione e calcolo della porosità

La fase più delicata del processo di calcolo della porosità consiste nella scelta della soglia per la binarizzazione dell'immagine (thresholding) che consente di separare i pori dal resto del materiale (matrice polimerica e fibre). Nel nostro caso il valore di soglia è stato scelto analizzando l'istogramma dei valori di intensità dell'intero data-set.

Kastner e Plank [2,3] nel loro lavoro hanno proposto differenti algoritmi di selezione della soglia basati sullo studio dell'istogramma delle intensità. Rao e coll. [4] hanno dimostrato che sono possibili risultati affidabili nella stima della porosità utilizzando la segmentazione tramite il metodo "airbus". Questo metodo richiede, però, un campione non poroso di riferimento o una porzione dello stesso priva di vuoti. Nel nostro caso il materiale esaminato presenta una distribuzione uniforme di pori che non consente l'individuazione di un'area senza pori di dimensione adeguata. Pertanto, la segmentazione airbus non può essere applicata.

Generalmente gli istogrammi dei data-set CFRP mostrano un andamento bimodale. Come riportato da Reiter e coll. [5], in questi casi si può adottare un criterio di scelta che minimizza l'errore dovuto al presenza di falsi positivi o negativi insiti nel processo di binarizzazione [6]. L'articolo [5] riporta inoltre il confronto rispetto

ad altri metodi come otsu [7] o iso50 [2] per un'ampia gamma di distribuzioni bimodali. Nella figura 4 è mostrato l'andamento della funzione criterio $j(T)$ proposta da Kittler [6] e la relativa scelta del valore di soglia (in corrispondenza del punto di minimo) calcolato analizzando l'istogramma del campione C2.1-5.

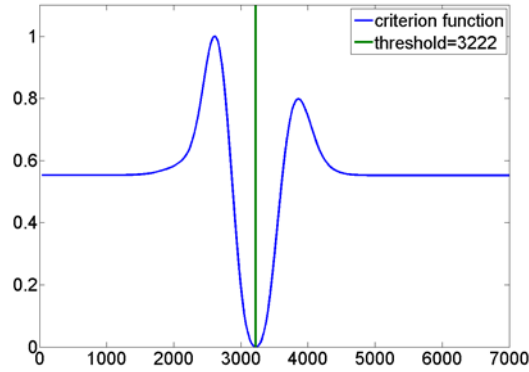


Figura 4: funzione criterio di Kittler

Nelle figura 5 sono riportate delle immagini riguardanti una piccola regione (ROI) del campione C2.1 alle diverse risoluzioni, mentre la figura 6 mostra i relativi istogrammi. Si può facilmente notare come al diminuire della voxel size aumentino nitidezza e contrasto ma nello stesso tempo anche la presenza del rumore, il “pixel noise” è infatti quantificabile con la seguente formula [8]:

$$\sigma_{pn} = \frac{K * \pi * M}{P * \sqrt{I * N_{img} * t * N_{avg}}}$$

Dove:

- K: costante dipendente dal tipo di algoritmo di ricostruzione (generalmente $k=0.23$)
- P: pixel size in mm^2 (nel nostro caso $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$)
- M: ingrandimento
- I: corrente elettronica in mA
- t: tempo di integrazione in sec.
- N_{img} : numero di proiezioni
- N_{avg} : numero di radiografie mediate per proiezione

La maggior presenza di rumore ad alti ingrandimenti si manifesta nella conformazione dell'istogramma; dalla figura 6 si può osservare infatti, come all'aumentare della risoluzione aumenti anche la zona di sovrapposizione tra le due gaussiane.

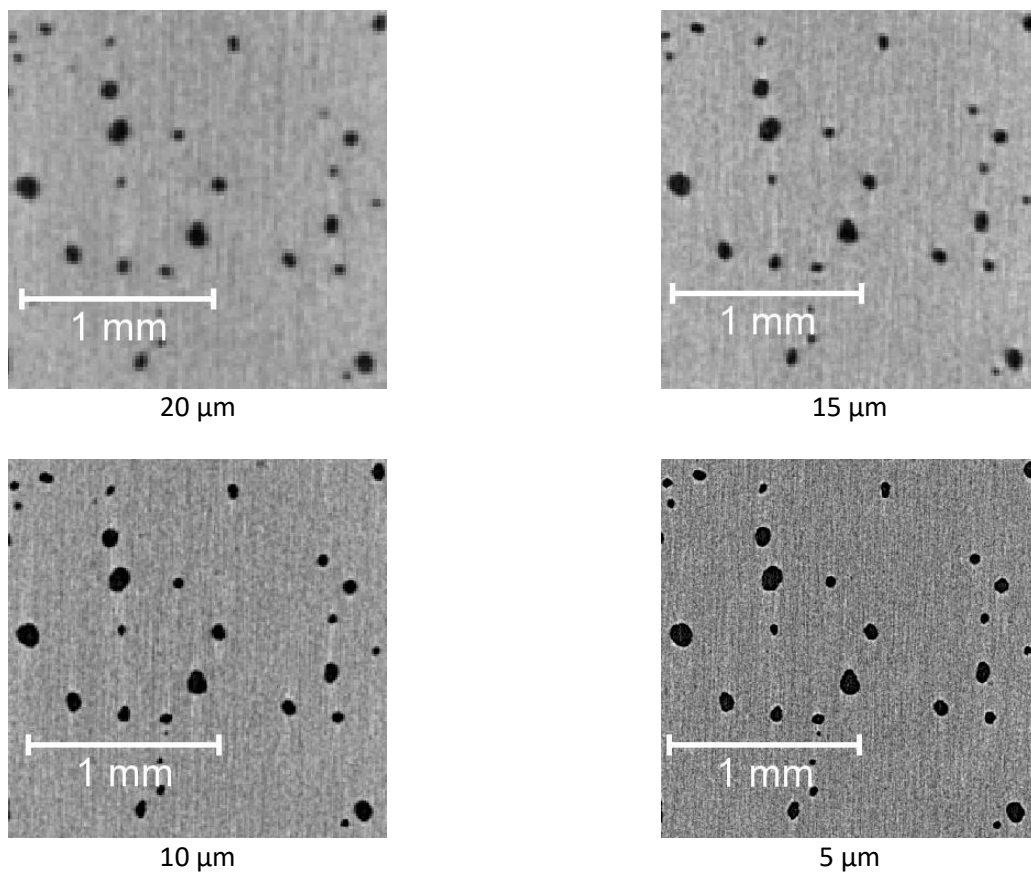


Figura 5: ROI del campione C2.1 acquisito a diverse risoluzioni

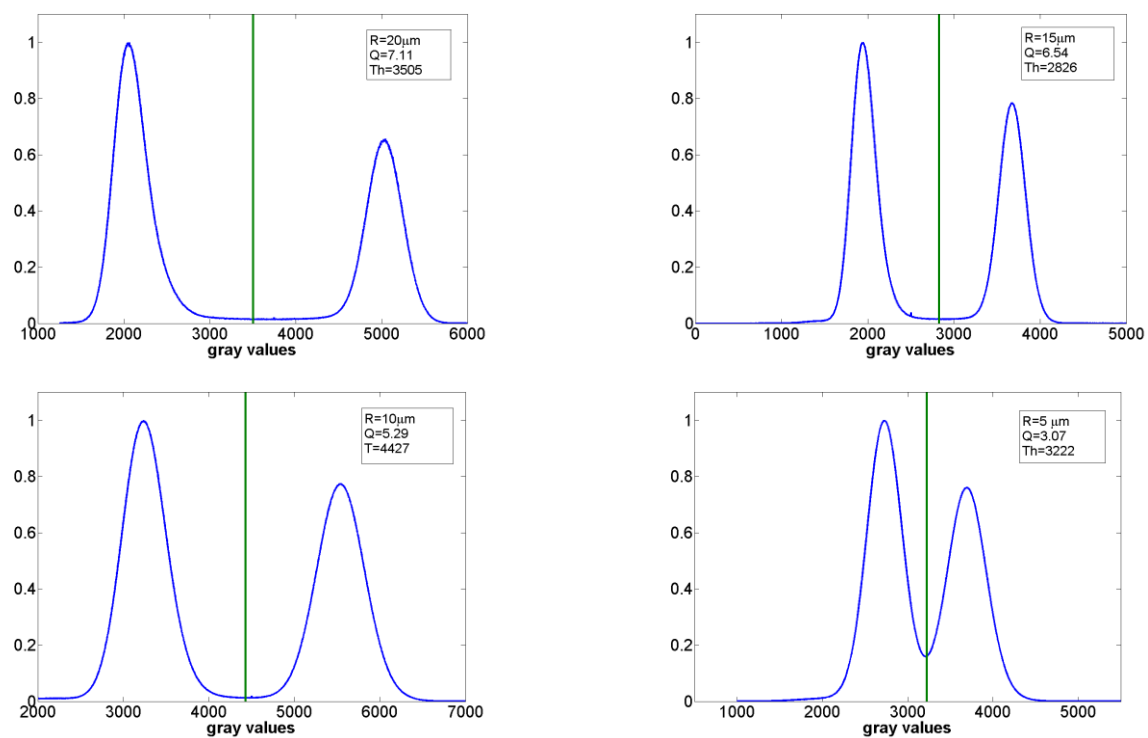


Figura 6: istogrammi di C2.1 acquisito a differenti risoluzioni, posizionamento della di soglia tramite criterio di Kittler e indicazione del parametro Q.

Oltre a σ_{pn} esistono altri parametri statistici per quantificare la qualità del data-set acquisito. Il rapporto segnale rumore ($SNR=\mu_f/\sigma_f$), il rapporto contrasto rumore ($CNR=|\mu_f-\mu_b|/\sigma_f$) [9] e il parametro di qualità $Q=|\mu_f-\mu_b|/\sqrt{(\sigma_f^2+\sigma_b^2)}$ [5]. I valori di μ_f , σ_f , μ_b , σ_b , rappresentano medie e scarto quadratico medio dei valori di intensità relativi ai pixel di foreground (materiale) o background (vuoti) identificati a valle del processo di thresholding.

In particolare CNR descrive la capacità di distinguere pixel appartenenti ai vuoti all'interno di una zona di foreground.

In una distribuzione bimodale, la distanza tra i due picchi è proporzionale al contrasto tra le due fasi, mentre la larghezza delle gaussiane è direttamente proporzionale alla presenza di rumore o artefatti (image and motion blurring, partial volume effect, ring artifacts, beam hardening). Come indicato da Reiter, Q, a differenza del rapporto CNR, è calcolato sulla base dell'intero istogramma prendendo in considerazione la larghezza di entrambe le "campane" attraverso la stima delle rispettive varianze. I valori di Q sono riportati nella tabella sottostante.

	20 μm	15 μm	10 μm	5 μm
C6.08	7.18	6.34	4.78	2.26
C2.1	7.04	6,54	5.29	3.07
C1.57	5.58	5.94	5.11	3.23

Tabella 3: Valore del parametro Q.

Come previsto, si nota una diminuzione del parametro all'aumentare dell'ingrandimento (proporzionale alla risoluzione), con l'eccezione del campione C1.57 che tra i 20 e i 15 μm denota un leggero incremento del livello di contrasto. Questo è probabilmente dovuto al fatto che il campione C1.57 è caratterizzato da pori di dimensione maggiore rispetto agli altri campioni. Gli "edge" dei pori sono spesso sede di "partial volume artifacts" nei data-set tomografici, tale artefatto rende più accentuata la varianza delle due fasi e di conseguenza abbassa il valore di Q.

Quando la risoluzione migliora il semplice processo di segmentazione non è efficace in quanto esiste una alta probabilità d'errore (zona di sovrapposizione delle curve gaussiane). In questi casi è necessario pre-filtrare il dato prima della fase di binarizzazione.

Il filtro Anisotropico Diffusivo (ADF) è una delle tecniche di de-noising più utilizzate nel campo dell'elaborazione delle immagini. Al contrario di altri filtri di tipo passa basso è infatti in grado di attenuare notevolmente il livello di rumore preservando al tempo stesso la struttura e conformazione dei bordi. La performance e l'efficacia del filtro dipendono essenzialmente dalla scelta dei valori di alcuni parametri, tra cui la soglia sul valore del gradiente (GT), il numero di iterazioni e la funzione di diffusione (conduttanza)

utilizzata. In letteratura esistono differenti implementazioni del filtro anisotropico; in questo articolo è stata utilizzata una versione modificata [10] del metodo classico proposto da Perona-Malik [11]. Esso si basa sulla seguente equazione:

$$Img_{i,j,k}^{n+1} = Img_{i,j,k}^n (1 - \gamma \sum_{m=1}^6 G_m) + \gamma (G_1 Img_{i-1,j,k}^n + G_2 Img_{i+1,j,k}^n + G_3 Img_{i,j-1,k}^n + G_4 Img_{i,j+1,k}^n + G_5 Img_{i,j,k-1}^n + G_6 Img_{i,j,k+1}^n)$$

Dove $img_{i,j,k}^{n+1}$ denota il valore di intensità del voxel (i,j,k) nell'iterazione n+1, γ è una costante il cui valore è impostato ad 1/6, e G_m è il coefficiente di diffusione. G_m dipende dal valore del gradiente dell'immagine (ΔI), in particolare, $G_m=1$ se $\Delta I < GT$, 0 altrimenti. Riassumendo, l'effetto del filtro è quello di assegnare un nuovo valore al voxel corrente; per far ciò confronta il valore corrente con quello dei sei vicini, se la differenza è al di sotto di una certa soglia (impostata dall'operatore) allora il valore del pixel "vicino" viene incluso nel calcolo della media (diffusione). E' quindi estremamente importante stabilire dei corretti criteri per la scelta della soglia GT e del numero di iterazioni. In particolare, GT è il parametro che stabilisce la separazione tra i gradienti che sono associati a rumore da quelli che definiscono invece gli "edge" (segnale). Differenti metodi di scelta di GT sono stati proposti [12-15]. Tutti questi criteri si basano su approcci di tipo euristico, nei quali la scelta spesso viene affidata all'esperienza dell'operatore. Interessante è il criterio descritto da Canny [13], esso fissa la soglia ad un valore corrispondente al 90% dell'integrale dell'istogramma dei valori di intensità associati al gradiente dell'immagine. Seguendo questo punto di vista e considerando il fatto che dai nostri data-set è possibile ricavare il valore della varianza associata al background (facendo l'ipotesi che il rumore non sia correlato con il segnale e che sia normalmente distribuito in tutto il tomogramma) GT è stato impostato ad un valore pari a $4\sigma_b$. La varianza esprime infatti, alternativamente al gradiente, una misura dell'ampiezza delle variazioni di intensità contenute nell'immagine. In una condizione ideale il background dovrebbe essere esente da variazioni di intensità (zona di intensità uniforme), pertanto la maggior parte delle variazioni riscontrate possono essere associabili a rumore. In una gaussiana infatti:

$$P\{\mu - 2,00 \sigma < X < \mu + 2,00 \sigma\} = 95\%.$$

Anche per la definizione nel numero di iterazioni (stopping time) sono state descritte diverse soluzioni [16-18]. Molte di esse, però, partono dall'assunzione di conoscere a priori una versione dell'immagine priva di rumore (immagine di riferimento), e pertanto non sono utili nel nostro caso. Bazan [19] ha osservato che la correlazione tra l'immagine filtrata e quella originale tende a decrescere all'aumentare del numero di iterazioni sino a raggiungere un valore costante, per cui suggerisce di utilizzare come criterio di stop l'iterazione nella quale la derivata seconda della funzione di correlazione presenta un punto di massimo (punto di massima concavità). Questo criterio si è però rilevato inefficace sui nostri tomogrammi, fornendo una sottostima nel numero utile di iterazioni (generalmente il punto con concavità massima si verifica subito dopo la prima iterazione). L'applicazione del filtro ADF tende a modificare l'aspetto dell'istogramma, in particolare dopo ogni iterazione i due picchi tendono ad allontanarsi mentre la larghezza delle gaussiane si

riduce (vedi fig. 7) aumentando il valore del parametro di contrasto Q . E' stato quindi, deciso di iterare il filtro sul data-set rumoroso (ad alta risoluzione) il numero di volte necessario ad ottenere un valore di Q comparabile con quello dei tomogrammi a bassa risoluzione (maggiore di 5). In particolare, sono state effettuate 3 iterazioni per i campioni C2.1-5 e C1.57-5, e 10 iterazioni per il campione C6.08-5. Il maggior numero di iterazioni necessario su quest'ultimo è giustificato da una maggiore presenza di rumore. Il campione C6.08 è infatti caratterizzato da uno spessore più grande che rende la ricostruzione 3D più sensibile ad eventuali artefatti (beam hardening). Come si può notare dalla figura 7, ora le gaussiane appaiono più distanti e strette facilitando la scelta della soglia di separazione.

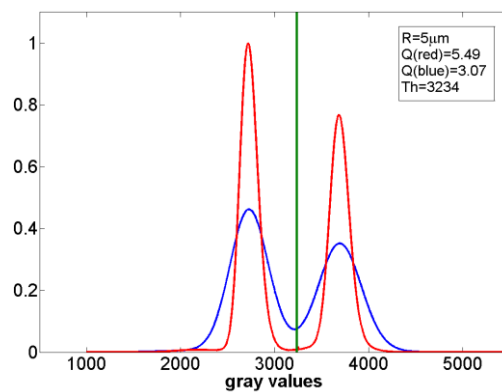


Figura 7: Effetto del filtro sull'andamento dell'istogramma; in blu l'istogramma del data-set prima dell'applicazione del filtro.

Nelle figure seguenti mostriamo come l'effetto del filtro (fig. 8c) sia quello di ripulire l'immagine originale (fig. 8a) dal rumore, evitando una sovrastima del valore di porosità in seguito al processo di binarizzazione (fig. 8b e 8d). I valori finali di porosità ottenuti, calcolando il rapporto tra il volume dell'insieme dei pori ed il volume totale della regione di polimero esaminata, sono riportati nella tabella 4. Si può osservare come la porosità rilevata tende a crescere all'aumentare della risoluzione; questo è comprensibile dato che con un maggior ingrandimento e di conseguenza un contrasto migliore si possono identificare anche i micro-pori più piccoli. Sotto i $10\mu\text{m}$ comincia a pesare, però, l'effetto del rumore che rende necessario pre-filtrare il dato prima della fase di segmentazione. Il filtro a sua volta deve essere scelto opportunamente onde eliminare il rumore e contemporaneamente non generare artefatti che possono portare a erronee valutazioni della porosità.

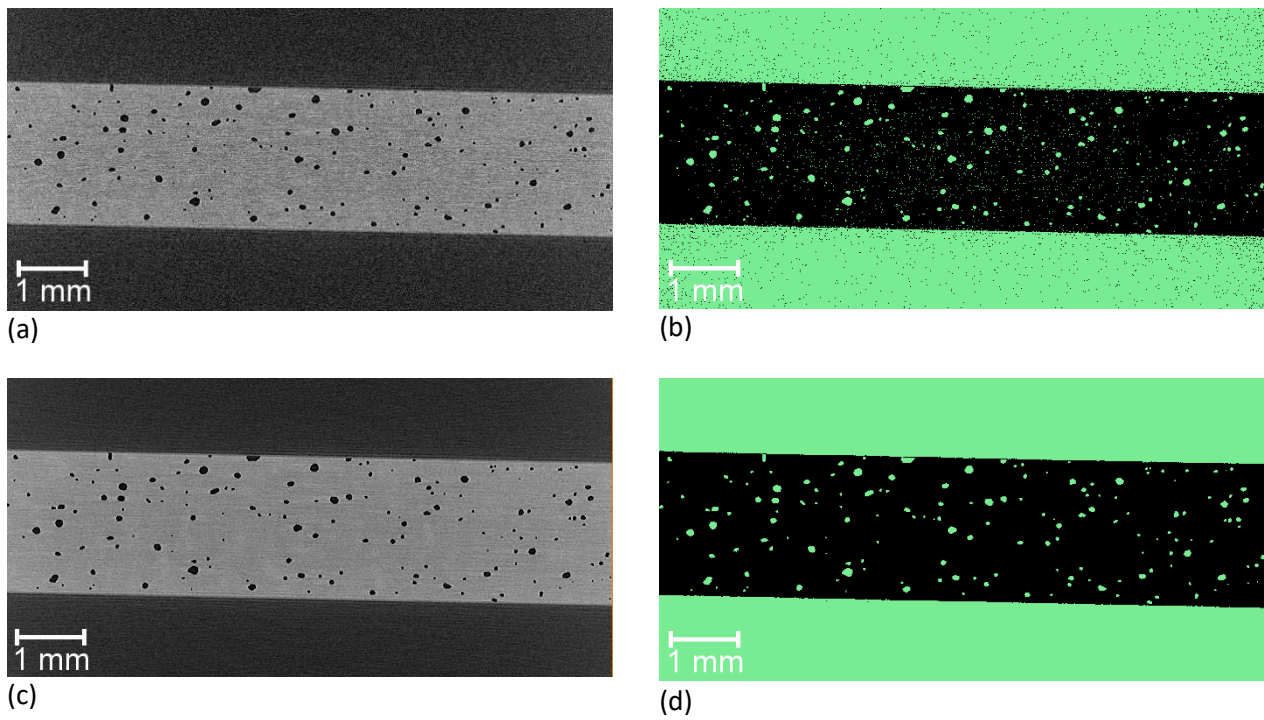


Figura 8: Slice tomografiche e processi di segmentazione prima (a,b) e dopo (c,d) l'applicazione del filtro ADF

	20 (μm)	15(μm)	10 (μm)	5 (μm)
C6.08	1.32%	1.89%	2.30%	2.35%
C2.1	2.40%	2.81%	2.83%	2.67%
C1.57	7.20%	8.27%	8.81%	8.60%

Tabella 4: Valore di porosità rilevati

4.2. Ricostruzione dei pori e loro struttura interna

Uno dei vantaggi che offre la tomografia in confronto ad altri metodi diagnostici è la capacità di ricostruire in 3D le strutture interne dell'oggetto in esame. È quindi possibile classificare i pori interni individualmente e per ciascuno di essi calcolare aree e volumi. La figura seguente Mostra gli istogrammi del volume dei pori e la ricostruzione in volume rendering dei 100 pori più grandi per ogni campione (risoluzione 10 μm). Si nota facilmente come il campione C1.57 è caratterizzato da pori con un volume medio 5 volte più grande rispetto agli altri campioni. Un'altra informazione utile che può essere derivata dalla CT è la disposizione geometrica dei pori. Si può osservare che, mentre nel campione C2.1 i pori sono disposti ortogonalmente al piano xy, nei campioni C6.08 e C1.57 siano orientati longitudinalmente, trasversalmente e a 45° rispetto al piano xy.

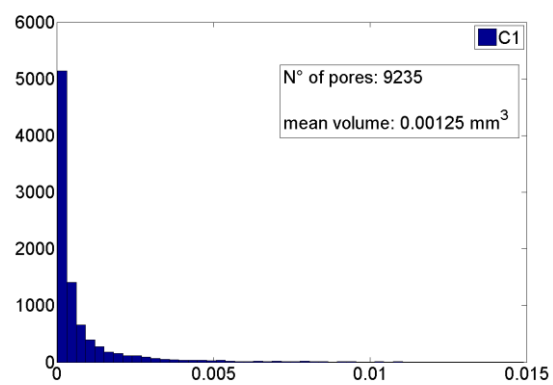
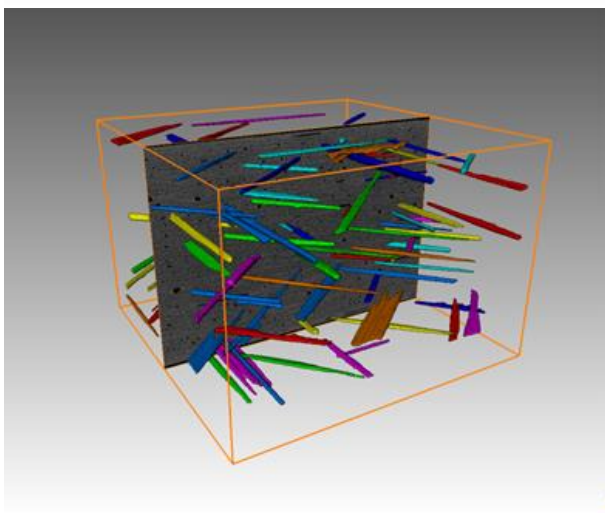
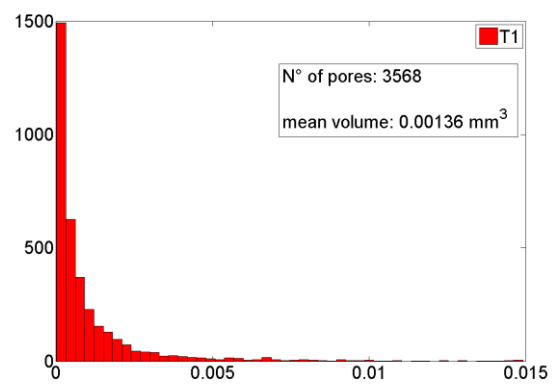
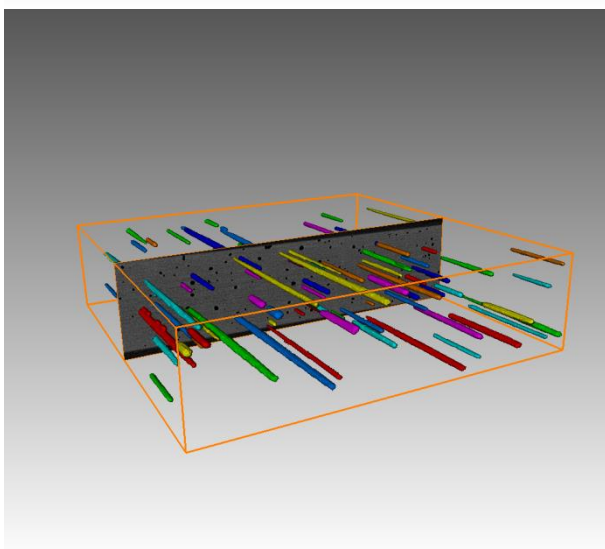
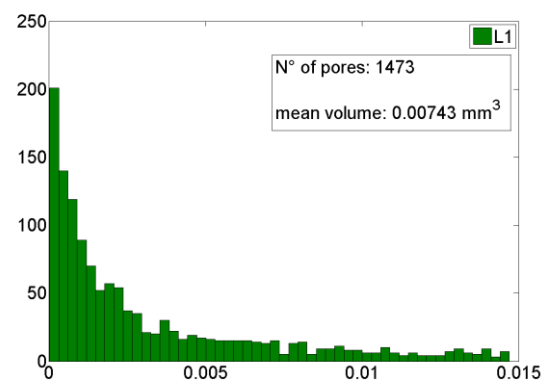
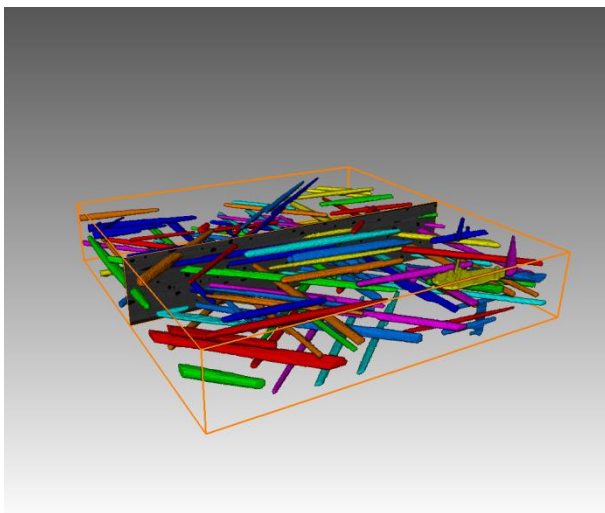


Figura 9: Ricostruzione 3D dei pori e relativi istogrammi

5. CONCLUSIONI

In questo studio è stato dimostrato come la micro-tomografia possa essere un valido strumento, alternativo alla tecnica non distruttiva standard (ultrasuoni), per una caratterizzazione completa di componenti realizzati in materiale composito rinforzato con fibre di carbonio. Inoltre, è stato presentato un metodo di segmentazione dei data-set tomografici basato sulla binarizzazione dell'immagine tramite *thresholding*. La soglia è stata selezionata adottando il criterio del minimo errore proposto da Kittler. Le misure sono state eseguite acquisendo i campioni con diverse risoluzioni (*voxel size*) al fine di valutare se tale parametro influenzava il risultato della misura stessa. E' emerso che l'aumento della risoluzione consente di rilevare la conformazione dei pori in maniera più netta, cioè con un maggiore contrasto rispetto allo sfondo intorno, rendendo la valutazione della porosità più affidabile. Superato un certo limite di dettaglio (sotto i 10 μm) si avverte, però, una forte presenza di rumore che se non trattato causa generalmente una sovrastima del valore di porosità. In questi casi è necessario effettuare un filtraggio passa basso del data-set prima della fase di segmentazione. A tale proposito, in questo lavoro è stata proposta una particolare implementazione del filtro anisotropico, che ha il vantaggio di attenuare il rumore e gli artefatti senza però deteriorare la visibilità di bordi e dettagli nelle immagini. E' stato dimostrato, inoltre, che i vantaggi della CT non sono solo limitati alla misura della porosità. Tale strumento consente, infatti, di visualizzare le dimensioni, la forma e la posizione dei pori e di altri difetti come le impurità e le inclusioni all'interno del composito. Nel caso di campioni di grandi dimensioni, la tomografia computerizzata a raggi X può diventare complementare agli ultrasuoni e, grazie alla migliore risoluzione ottenibile, essere usata per calibrare questa tecnica mediante provini realizzati ad hoc.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano esprimere il loro più sentito ringraziamento all'Ing. Giuseppe Buccoliero del CETMA per aver gentilmente fornito i campioni per questo studio e per gli utili chiarimenti e suggerimenti dati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO 15708:2002, Non-destructive testing - Radiation methods - Computed tomography; part 2 chapter 7.3.1

- [2] Evaluation of CFRP-Reference Samples for Porosity made by Drilling and Comparison with Industrial Porosity Samples by Means of Quantitative X-ray Computed Tomography; B. Plank, G. Rao, J. Kastner; 7th International Symposium on NDT in Aerospace (2015)

- [3] Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography; Johann Kastner, Bernhard Plank, Dietmar Salaberger, Jakov Sekelja; 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, (2010)

- [4] Comparison of different segmentation methods for porosity evaluation in CFRP-reference samples with real porosity samples; Guruprasad Rao, Bernhard Plank, Johann Kastner; 6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, (2016)

- [5] Evaluation of a histogram-based image quality measure for X-ray computed tomography; Michael Reiter, Daniel Weiß, Christian Gusenbauer, Marco Erler, Christoph Kuhn, Stefan Kasperl, Johann Kastner; 5th Conference on Industrial Computed Tomography (2014)

- [6] Minimum error thresholding; J. Kittler, J. Illingworth; Pattern Recognition, vol. 19, n° 1, pp. 41-47, (1986)

- [7] A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms; Nobuyuki Otsu; Automatica, vol. 11, n° 285-296, pp. 23-27, (1975)

- [8] Investigation on the influence of image quality in X-ray CT metrology; P. Muller, J. Hiller, A. Cantatore, M. Bartscher, L. De Chiffre; 4th International Conference on Industrial Computed Tomography (2012)

- [9] Evaluation of transmission based image quality optimization for X-Ray computed tomography; Michael Reiter, Michael Krumm, Stefan Kasperl, Christoph Kuhn, Marco Erler, Daniel Weiß, Christoph Heinzl, Christian Gusenbauer, Johann Kastner; 4th International Conference on Industrial Computed Tomography (2012)

- [10] Constrained sintering of glass films: Microstructure evolution assessed through synchrotron computed microtomography; D. Bernard, O. Guillon, N. Combaret, E. Plougonven; Acta Materialia, vol. 59, n° 16, pp. 6228-6238, (2011)

- [11] Scale space and edge detection using anisotropic diffusion; P. Perona, J. Malik; IEEE Transactions on Image Processing vol. 12, pp. 629-639, (1990).
- [12] On the choice of the parameters for anisotropic diffusion in image processing; C. Tsotsios, M. Petrou; Pattern recognition, (2012)
- [13] A computational approach to edge detection; J. Canny; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence; pp. 679-698, (1986)
- [14] Robust anisotropic diffusion; M.J. Black, G. Sapiro, D. Marimont, D. Heeger; IEEE Transactions on Image Processing, vol. 7, n° 3, pp. 421-432, (1998).
- [15] Estimating the gradient threshold in the Perona–Malik equation; F. Voci, S. Eiho, N. Sugimoto, H. Sekiguchi; IEEE Signal Processing Magazine, vol. 21, pp. 39-46, (2004)
- [16] Coherence-enhancing diffusion filtering; J. Weickert; International Journal on Computer Vision, vol. 31, pp. 111-127, (1999).
- [17] Selection of optimal stopping time for nonlinear diffusion filtering; P. Mra'zek, M. Navara; International Journal of Computer Vision, vol. 52, pp.189-203, (2003)
- [18] Nonlinear scale space with spatially varying stopping time; G. Gilboa; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 2175-2187, (2008)
- [19] Image smoothing and edge detection by nonlinear diffusion and bilateral filter; C. Bazan, P. Blomgren; ACSESS proceedings (2008)

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
novembre 2017