

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

PROPAGAZIONE DI CRICCHE DI FATICA VICINO ALLA SOGLIA ΔK_{TH} IN UN ACCIAIO PERLITICO PER ROTAIE FERROVIARIE.



Relatore:

Prof. Roberto Doglione

Candidato:

Francesco Samà

Anno accademico 2018/2019

INDICE

ABSTRACT	1
1 INTRODUZIONE.....	3
1.1 LA MECCANICA DELLA FRATTURA LINEARE ELASTICA (MFLE)	3
1.2 APPROCCIO MFLE IN CASO STATICO	4
1.3 LA MFLE A FATICA - LA LEGGE DI PARIS	10
1.4 TEORIA DELL'INTEGRALE J	15
1.5 IL FENOMENO DEL "CRACK CLOSURE"	18
1.6 UNO SGUARDO PIU' DETTAGLIATO AL ΔK_{TH}	21
1.6.1 IL MODELLO DI SOGLIA LEGATO AL FENOMENO DI "CRACK CLOSURE"	22
1.6.2 IL MODELLO DI SOGLIA A DUE CRITERI.....	24
1.6.3 MICROMECCANISMI VICINO ALLA SOGLIA	25
1.7 FRATTURA MISTA.....	26
2 DETERMINAZIONE DEL VALORE DI SOGLIA ΔK_{th}	28
2.1 METODOLOGIA USATA E MATERIALE	28
2.2 DESCRIZIONE PROCEDURA PER IL RAGGIUNGIMENTO ΔK_{th}	35
2.3 RISULTATI OTTENUTI.....	37
2.3.1 PROVINO 342-2 - R=0,5	37
2.3.2 PROVINO 342-1 - R=0,2	40
2.3.3 PROVINO 336-2 - R=0,1	42
2.3.4 PROVINO 291-1 - R=0,85.....	44
2.3.5 PROVINO 291-2 - R=0,7.....	46
2.3.6 PROVINO 339-1- R=0,9.....	48
2.3.7 PROVINO 315-1 E 339-2 - R=0,30.....	50
2.4 CORRELAZIONE R - ΔK_{th}	54
3 METODO DEL POTENTIAL DROP	56
3.1 ISOLAMENTO ELETTRICO DEI PROVINI	56
3.2 SETUP DEI MACCHINARI E PROCEDURA	59
4 EVIDENZA SPERIMENTALE DEL FENOMENO "CRACK CLOSURE".....	66
4.1 CARICO DI CHIUSURA E CEDEVOLEZZA.....	66

4.2	LA TECNICA DELLA CORRELAZIONE IMMAGINE DIGITALE	68
4.3	ALLA RICERCA DI KOP E Δ KEFF.....	69
4.4	RISULTATI OTTENUTI.....	71
4.4.1	PROVINO 342-2 - R=0,5	71
4.4.2	PROVINO 336-2 - R=0,1	77
4.4.3	PROVINO 291-1 - R=0,85.....	82
4.4.4	PROVINO 315-1 - R=0,3	88
4.4.5	PROVINO 342-1 - R=0,2	93
4.4.6	PROVINO 291-2 - R=0,7.....	98
4.4.7	PROVINO 339-1 - R=0,9	103
4.5	OSSERVAZIONI	108
5	MISURAZIONE DELLA TENACITA' A FRATTURA KIC.....	109
5.1	METODOLOGIA DI PROVA	109
5.1.1	SCELTA DEI PROVINI	109
5.1.2	PRECRICCATURA	110
5.1.3	ESECUZIONE DELLA PROVA	111
5.2	RISULTATI OTTENUTI.....	114
5.2.1	PROVINO 315-1	114
5.2.2	PROVINO 291-1.....	116
5.2.3	PROVINO 228-4	119
5.3	OSSERVAZIONI	122
6	METALLOGRAFIA.....	124
6.1	TECNICA UTILIZZATA	124
6.2	RISULTATI OTTENUTI.....	126
7	CONCLUSIONI.....	133
	RINGRAZIAMENTI	134
	BIBLIOGRAFIA.....	135

ABSTRACT

Il lavoro di tesi in esame si è occupato dell'analisi di propagazione di cricche di fatica vicino al valore di soglia per un acciaio eutettoidico per rotaie di binari ferroviari con microstruttura perlitica.

Per realizzare il lavoro sono stati utilizzati campioni a flessione del tipo "SENB" ricavati da rotaie non esercite prodotte all'acciaieria di Piombino. Le prove sono state condotte con una macchina di prova servoidraulica universale MTS FlexTest SE, sottoponendo i provini a rapporti di carico R differenti al fine di misurare il valore di soglia di propagazione, seguendo la procedura indicata da normativa ASTM E647 ^[4].

Si sono utilizzate varie tecniche per l'analisi delle fessure, tra cui metodo ottico, metodo del potential drop, metodo della correlazione immagine digitale, prove di cedevolezza ed esame frattografico.

Lo scopo del lavoro è stato quello di affermare o confutare le teorie in letteratura riguardo alla propagazione nei pressi della soglia per questo specifico acciaio.

Il primo metodo, il metodo ottico, è stato utilizzato per la misurazione della lunghezza di cricca e analisi metallografica dei campioni, per osservare la morfologia delle cricche e riscontrare determinati fenomeni, quali ad esempio i fenomeni di propagazione mista.

Il secondo metodo denominato del "potential drop" è stato messo a punto ed adoperato esclusivamente per la misura della lunghezza di cricca, servendosi di un generatore di corrente continua, di un amplificatore di segnale e di un sistema per la ricezione di quest'ultimo per misurare la differenza di potenziale nei pressi della cricca e associarla, via via che essa cresceva, ad una nuova lunghezza di cricca, permettendo letture precise e veloci.

Il terzo metodo, che si serve di una tecnica di correlazione immagine digitale, è stato usato per aver un dettagliato riscontro dei campi di spostamento nei pressi della zona criccata con lo scopo di ottenere una conferma della presenza di fenomeni di chiusura e osservare come la cricca si deforma durante l'applicazione dei carichi.

Il quarto metodo, che si serve di un estensimetro CLIP GAGE, è stato adoperato per analizzare il comportamento elastico del materiale e per l'individuazione di fenomeni di chiusura.

I risultati ottenuti hanno portato a conclusioni in parte coerenti con le tesi in letteratura, in parte in contrasto, segno che ci sia ancora molto da lavorare in questo campo.

1 INTRODUZIONE

Ai fini dell'elaborazione della seguente introduzione, sono state adoperate diverse fonti, quali le slide del corso tenuto da Antonio Gugliotta "Costruzione di macchine" ^[1] e il libro Fracture Mechanics di T.L. Anderson ^[2].

1.1 LA MECCANICA DELLA FRATTURA LINEARE ELASTICA (MFLE)

Nell'approccio classico alla progettazione di componenti, la struttura del materiale è considerata come priva di difetti.

Lo stato di tensione risultante sul componente viene quindi confrontato con uno o più parametri riferiti alla resistenza del materiale (limite elastico per una progettazione statica, resistenza a fatica per una verifica dinamica) scalati di un arbitrario coefficiente di sicurezza, e, se la resistenza del materiale è maggiore dello stato di tensione calcolato, allora il componente è tecnicamente sicuro.

Questo approccio tuttavia si è rivelato spesso inadeguato nel caso di alcune rotture di componenti assoggettati a carichi ben al di sotto di quello di progetto.

Successive analisi di tali componenti hanno poi rivelato che la rottura fosse partita in zone di saldature che presentavano difetti o discontinuità.



Figura 1.1 - Assile ferroviario rotto, disastro di Viareggio, 2009

La **Figura 1.1** mostra come la rottura dell'assile sia partita da un punto interno, quindi invisibile ad una ispezione puramente visiva. La propagazione del difetto è andata avanti in maniera stabile sino a quando, a seguito di alcuni motivi che andremo ad indagare successivamente, ha propagato instabilmente, portando a risultati catastrofici.

Nella progettazione moderna di componenti è accettato che siano presenti dei difetti, siano essi derivati da saldature, processo di produzione o lavorazioni meccaniche, piuttosto che l'ambiente in cui è solito dover operare il componente.

La MFLE si pone quindi come obiettivo, nota la dimensione dei difetti presenti in una struttura, di valutare l'importanza di tali difetti e di stabilire un periodo di crescita in cui il difetto propagherà in maniera stabile.

1.2 APPROCCIO MFLE IN CASO STATICO

Le origini della MFLE risalgono al 1921, quando Griffith provò a trovare una correlazione energetica per la rottura fragile nel vetro. Riferendosi ad una lastra piana infinita con difetto al centro egli scrisse:

$$U = U_0 - U_a + U_\gamma$$

Dove:

- U = Energia potenziale elastica.
- U_0 = Energia potenziale elastica della lastra in assenza di difetto.
- U_a = Decremento di energia potenziale elastica dovuto alla presenza del difetto.
- U_γ = Incremento di energia superficiale dovuta alla formazione delle superfici del difetto.

La condizione di equilibrio rispetto all'estensione del difetto si trova uguagliando a zero la derivata prima dell'energia totale potenziale elastica, ovvero:

$$\frac{\partial U}{\partial a} = 0$$

Ed essendo U_0 indipendente dalla dimensione del difetto, tale espressione porta a:

$$\frac{\partial U_a}{\partial a} = \frac{\partial U_\gamma}{\partial a}$$

U_a per il caso in esame può avere due espressioni, a seconda che il campione si trovi in uno stato di deformazione piana o tensione piana.

$$U_a = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad T.P.$$

$$U_a = \frac{\pi \sigma^2 a (1 - \nu^2)}{E} \quad D.P.$$

Dove:

- E = modulo elastico del materiale.
- a = lunghezza del difetto.
- σ = carico remoto.
- ν = modulo di Poisson.

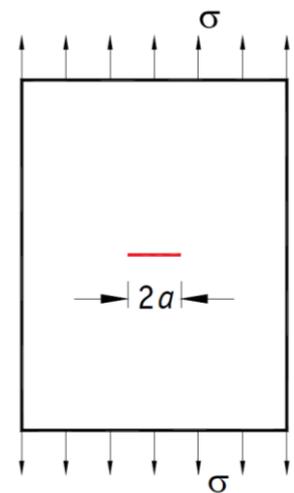


Figura 1.2- Rappresentazione schematica della lastra piana infinita, con difetto passante, sollecitata a trazione da un carico remoto.

Il termine $\frac{\partial U_a}{\partial a}$ prende il nome di *strain energy release rate*, cioè l'energia di deformazione elastica liberata per unità di avanzamento del difetto e viene indicato con G .

U_γ nel caso di materiali fragili, avrà un'espressione del tipo:

$$U_\gamma = 2a\gamma_e$$

Dove:

- a = lunghezza del difetto.
- γ_e = energia superficiale specifica del materiale.

Il termine $\frac{\partial U_\gamma}{\partial a}$ prende il nome di *resistenza all'avanzamento*, cioè l'energia richiesta per produrre un avanzamento da del difetto e viene indicata con R . Per i materiali fragili può essere ritenuta costante.

Si avrà quindi propagazione quando:

$$G \geq R$$

Nella **Figura 1.3** sono rappresentati gli andamenti in funzione di a di tutte le grandezze descritte sino ad ora. Come si può notare, oltre un certo valore di a la propagazione del difetto è favorita energeticamente.

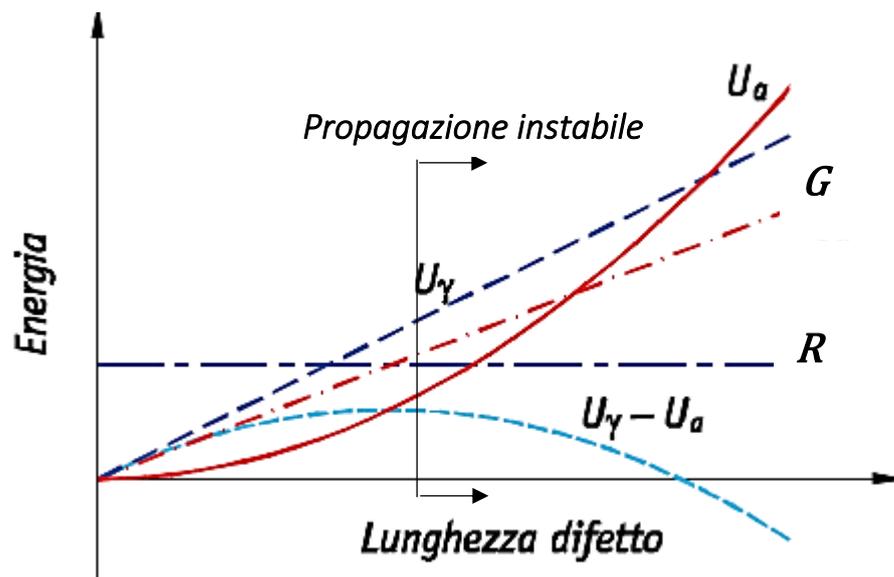


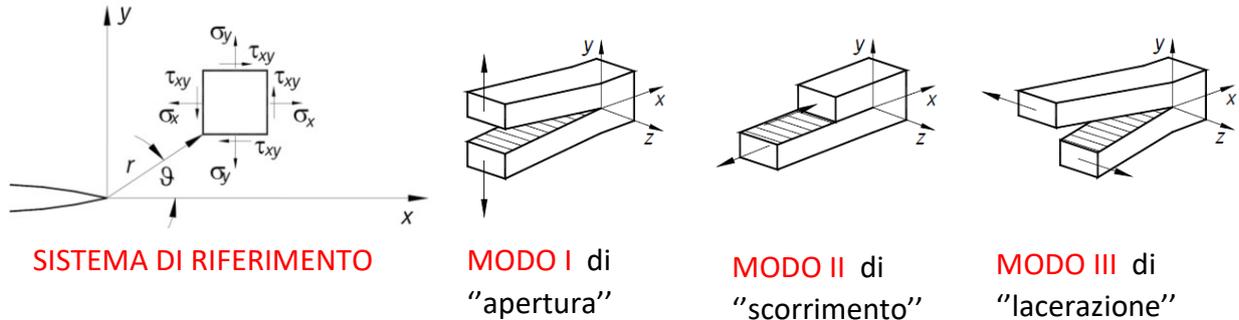
Figura 1.3- Andamento energetico in funzione di a

Successivamente Orowan e Irwin (1948) estesero la teoria per applicazioni su materiale non propriamente fragili, come i metalli, tenendo conto di una certa zona plastica all'apice del difetto. Tale estensione venne applicata aggiungendo un termine $2a\gamma_p$, corrispondente all'energia plastica all'apice del difetto, all'espressione di U_γ .

Tale termine aggiuntivo venne ritenuto costante, e questo si traduce nel considerare che l'energia richiesta per deformazione plastica all'apice del difetto fosse la stessa per ogni incremento da , ipotesi sufficientemente veritiera in uno stato di deformazione piana in campo elastico.

Irwin quindi nel 1957, anche grazie alla modellizzazione dello stato di tensione all'apice del difetto ottenute da Westergaard, sviluppò la teoria in forma organica introducendo il concetto di "Fattore di intensificazione delle tensioni".

Lo stato di tensione all'apice del difetto, secondo la teoria di Westergaard, si basa su 3 modi diversi di separazione delle superfici.



Le formulazioni risultanti quindi, per esempio per il **Modo I** sono:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\vartheta}{2}\right)\right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\vartheta}{2}\right)\right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\vartheta}{2}\right) \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \tau_{xz} = \tau_{yz}\end{aligned}$$

Genericamente quindi per il modo più comune, il **Modo I**:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta)$$

Questo porta ad un risultato importante: la distribuzione di tensioni è la stessa in tutti i componenti soggetti al Modo I di deformazione.

Il termine **K_I** è quindi l'unico parametro che influenza l'intensità del campo di tensioni e può essere quindi definito come "fattore di intensificazione delle tensioni". Analogamente vale per i Modi II e III, che avranno rispettivamente **K_{II}** e **K_{III}**.

Dall'analisi dimensionale si deduce che **K_I** deve avere le dimensioni di una tensione per la radice quadrata di una dimensione caratteristica. È stato verificato sperimentalmente che tale dimensione caratteristica sia la lunghezza della cricca **a**.

Quindi in generale si può scrivere:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

Con:

- **Y** = Fattore di forma adimensionale. Tiene conto della forma del difetto, del tipo di sollecitazione e dalla geometria del componente.
- **σ** = Tensione nominale remota agente in direzione normale al componente.
- **a** = Lunghezza del difetto

C'è da precisare che applicando qui la Meccanica della Frattura **Lineare Elastica**, lo stato di tensione all'apice del difetto deve essere principalmente elastico; questo si traduce, nei materiali duttili, ad avere una zona plasticizzata all'apice del difetto sufficientemente piccola.

Inizialmente e sino al 2005 si pensava che, affinché K_{Ic} fosse rappresentativo dello stato di tensione all'apice della cricca fosse necessario uno spessore minimo, valutato in questo modo:

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Dove:

- B = spessore del componente
- K_{Ic} = fattore delle intensificazioni delle tensioni critico, è una costante del materiale se si è in uno stato di deformazione piana; alternativamente è funzione dello spessore (lo è in un determinato range di temperatura e ad una velocità di deformazione definita).
- σ_{SN} = Tensione di snervamento del materiale.

Il limite sullo spessore minimo del provino nasce da ricerche sorte negli anni '60 e condotte dalla NASA al fine di cercare di valutare la tenacità a frattura in materiali altoresistenziali. Analizzando infatti l'andamento delle tensioni secondo Westergaard, rispetto alla distanza all'apice della cricca, per $r=0$, $\sigma = \infty$. Questo è naturalmente impossibile, poiché i materiali metallici esibiscono un comportamento plastico, pertanto, superata una certa soglia in termini di tensione, si formerà necessariamente una zona plasticizzata all'apice dell'intaglio.

I risultati a cui arrivarono in quegli anni furono che il valore di K_{Ic} diventava una costante oltre certi valori di spessore del componente. La spiegazione fu che lo stato di tensione nei componenti più spessi fosse principalmente di deformazione piana, mentre in quelli più sottili era prevalente quello di tensione piana. Avere uno stato di deformazione piana, porta, come vedremo tra poco, ad avere una zona plasticizzata all'apice della cricca molto più piccola che in stato di tensione piana; avere una zona plasticizzata piccola all'apice del difetto, o una condizione di "small scale yielding", porta a fare in modo che la Meccanica della Frattura Lineare Elastica sia valida e descriva sufficientemente bene lo stato di tensione in prossimità del difetto.

Con l'evoluzione del calcolo numerico computerizzato è stato possibile, tramite analisi agli elementi finiti, realizzare modelli in cui si potesse veramente vedere ciò che succedeva.

Ciò che è emerso è che a causa delle tensioni σ_{yy} molto elevate in direzione normale al piano della cricca, il materiale presso l'apice tende a contrarsi nella direzione x e z (per effetto Poisson);

Questa contrazione elastica è impedita dal materiale circostante, meno tensionato; ne consegue che presso l'apice sorgono tensioni σ_{zz} , σ_{xx} significative.

Questo porta ad avere stato tensionale triassiale all'apice della cricca che si avvicina molto alla deformazione piana, ma non è di deformazione piana pura come ipotizzato dagli studiosi NASA.

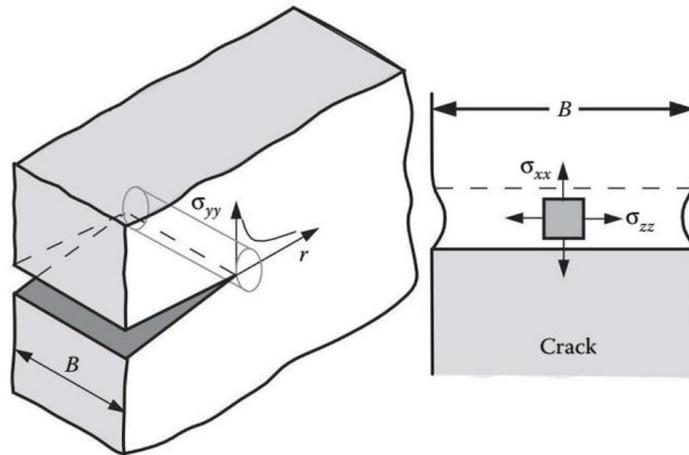


Figura 1.4- Stato tensionale triassiale all'apice della cricca. Lo stress in direzione normale alla cricca porta il materiale a contrarsi nelle altre due dimensioni, deformazioni impedito dal materiale circostante, il che porta ad avere stato di tensione risultante triassiale.

I risultati delle analisi elastoplastiche ad elementi finiti di campioni CT e SENB di sufficiente spessore dimostrano che:

- all'apice, lo stato tensionale è prossimo alla deformazione piana (salvo che sulle facce laterali),
- a distanza crescente dall'apice, lo stato tensionale si avvicina progressivamente alla tensione piana
- la distanza dall'apice, alla quale avviene la transizione, aumenta all'aumentare dello spessore B.

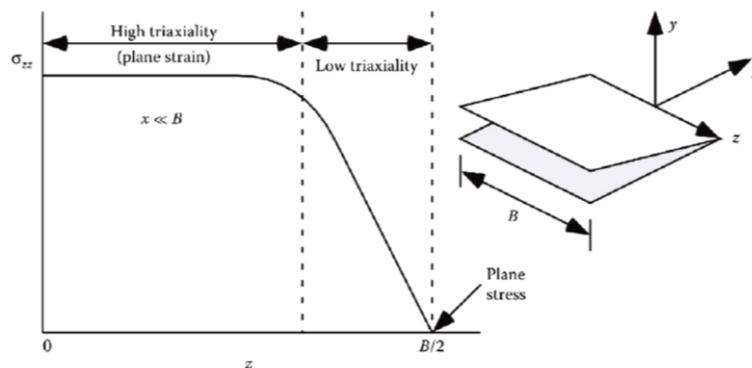


Figura 1.5 -Variazione schematica dello stress in direzione trasversale.

In un componente sottoposto ad uno stato di tensione piana $\sigma_{zz} = 0$ e le condizioni di snervamento si raggiungono quando $\sigma_{yy} = \sigma_{SN}$. Sotto queste condizioni si può ricavare che il raggio plastico all'apice della cricca sia:

$$r_{p,TP} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso invece di deformazione piana:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{yy} = \sigma_{xx} \quad \sigma_{zz} = 2\nu\sigma_{yy}$$

Questo porta ad avere che le condizioni di snervamento si hanno per:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{yy} - 2\nu\sigma_{yy} = \sigma_{SN}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_{SN}}{1 - 2\nu} \approx 3\sigma_{SN}$$

E quindi la formulazione del raggio plastico prende una formulazione del tipo:

$$r_{p,DP} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{3\sigma_{SN}} \right)^2 = \frac{1}{18\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Tuttavia, poiché come si è visto lo stato di tensione all'apice della cricca non è perfettamente di deformazione piana, Irwin ha stimato un fattore $\sqrt{3}$ moltiplicativo della tensione di snervamento. Questo porta ad avere un raggio plastico equivalente a:

$$r_{p,DP} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Questo mostra come avere uno stato di tensione molto vicino alla deformazione piana porti comunque ad avere un raggio plastico inferiore a quello di tensione piana, come già anticipato. La conclusione a cui si arriva è che K_I è sufficientemente descrittivo dello stato di tensione all'apice della cricca se ci si trova in uno stato di small scale yielding, tradotto letteralmente "snervamento su piccola scala", ovvero di zona plasticizzata all'apice della cricca molto ridotte; questa condizione è più favorevolmente verificata se lo stato di tensione è triassiale o di deformazione piana (e perciò la richiesta sullo spessore minimo in normativa), un po' meno se lo stato di tensione è di tensione piana.

Tale restrizione sullo spessore, come già detto, è stata adottata sino al 2005 per il dimensionamento dei provini destinati alla misura del K_{Ic} effettivo di un materiale in stato di deformazione piana.

Per alcuni materiali molto duttili tuttavia tale valore di B risulta eccessivo, soprattutto per i carichi in fase di prova richiesti per la propagazione della cricca (si tratta di centinaia di kN richiesti), non alla portata di tutte le macchine di prova. Per tali categorie di materiali sono state formulate altre teorie come quella dell'integrale J piuttosto che quella CTOD.

Nel caso invece di un acciaio C80 come quello in esame in questo lavoro di tesi, gli spessori minimi richiesti sono nell'intorno dei 20 mm, è quindi molto probabile che K_{Ic} sia realmente rappresentativo delle condizioni di criticità nel dominio della MFLE.

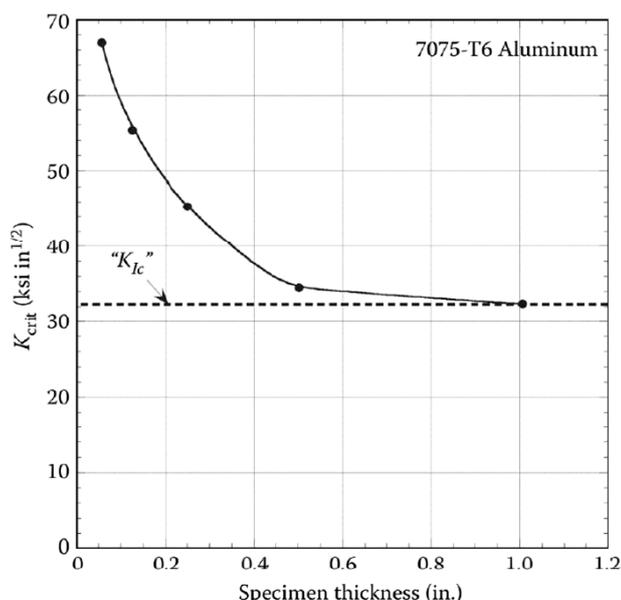


Figura 1.6 – Evidenza sperimentale: per spessori crescenti del provino, e quindi stato di tensione all'apice della cricca sempre più vicino a quello di deformazione piana, il valore di rottura K_{Ic} decresce e diventa una costante del materiale. Per spessori inferiori il valore della tenacità a frattura risulta più alto a causa della formazione di "labbra di taglio".

1.3 LA MFLE A FATICA – LA LEGGE DI PARIS

La progettazione classica a fatica si basa generalmente sui diagrammi di Wohler e di Smith, limitando il livello di tensioni al di sotto di un determinato valore (limite di fatica per progettazioni a vita “infinita”, resistenza a termine per progettazioni a vita “limitata”), nell’ipotesi che nel componente non siano presenti difetti. Tuttavia, questo approccio non descrive in maniera sufficientemente adeguata il fenomeno della fatica dalla fase di innesco e crescita dei difetti sino al collasso strutturale del componente.

Queste procedure “classiche” possono essere riviste e correlate alla Meccanica della Frattura Lineare Elastica che descrive il comportamento del difetto nella fase subcritica, fase che per giunta descrive una percentuale significativa del periodo di vita utile del componente e prevede quando la propagazione della cricca diventa instabile, ovvero la fase critica.

La curva $\sigma - N$ che descrive il comportamento a fatica del materiale è riferito ad un ciclo alternosimmetrico ($R=-1$).

Nella Meccanica della Frattura invece i dati vengono solitamente ricavati con $R=0$; si fa infatti l’ipotesi che un carico di compressione non contribuisca a far propagare la cricca, quanto più a chiuderla, ipotesi sperimentalmente verificata se l’ampiezza di carico è costante. Non è altrettanto vera se l’ampiezza del carico è variabile.

La **Figura 1.7** descrive il comportamento dello stesso materiale, con stessa lunghezza di cricca iniziale, sottoposto a cicli di carico ad ampiezza costante diversi.

Si può notare che un aumento di tensione aumenta la velocità di propagazione del difetto e diminuisce sia la durata a fatica che la lunghezza del difetto al momento della rottura.

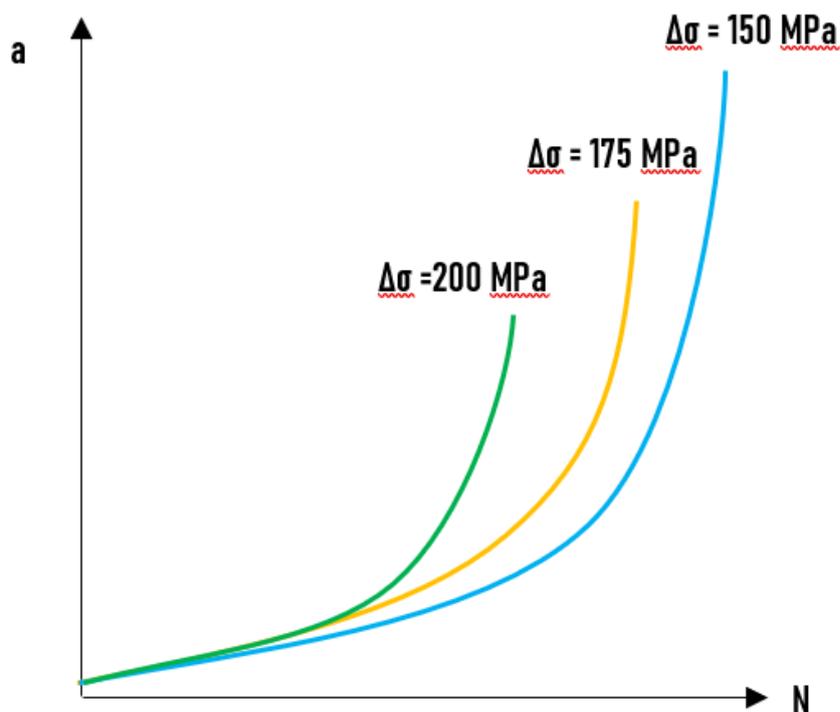


Figura 1.7 – Crescita del difetto al variare della sollecitazione applicata.

La **Figura 1.8** descrive il comportamento dello stesso materiale, con diversa lunghezza di cricca iniziale, sottoposto a cicli di carico ad ampiezza costante uguali.

Si può notare che un aumento della lunghezza di cricca iniziale riduce la vita a fatica del componente, ma la lunghezza finale della cricca al momento della rottura rimane la stessa per tutti e tre i componenti.

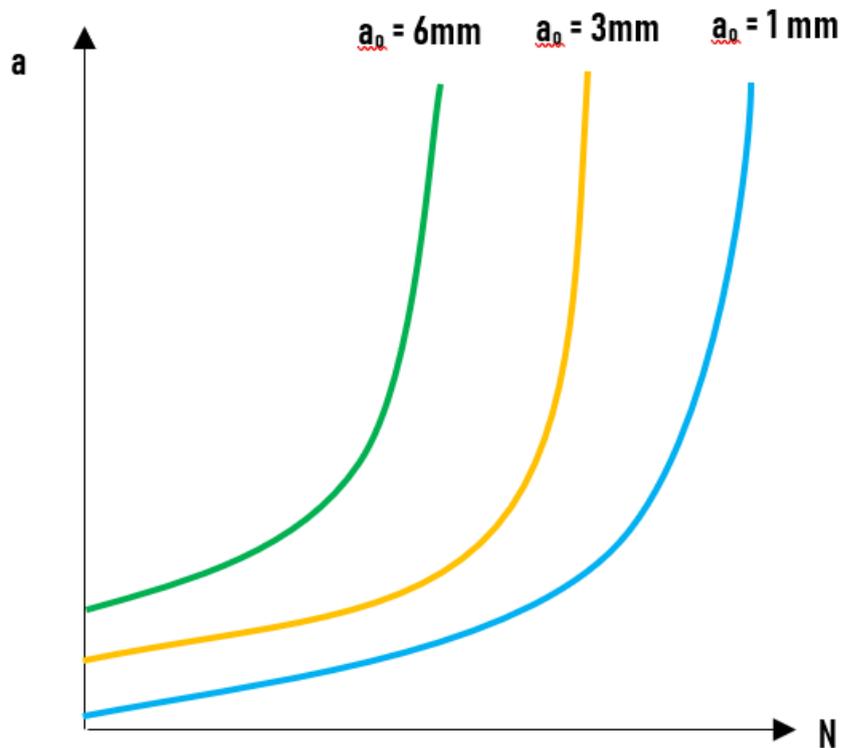


Figura 1.8 - Crescita del difetto al variare della lunghezza iniziale del medesimo

Da un'analisi dei grafici soprastanti si può quindi ricavare che la crescita del difetto in funzione del numero di cicli è funzione di:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$$

Nota quindi la curva di propagazione, è possibile ricavare il diagramma $\frac{da}{dN} - \Delta K$ nel seguente modo: dato un punto p sulla curva di propagazione $a-N$, il punto P equivalente nel diagramma

$\frac{da}{dN} - \Delta K$ sarà valutato considerando quale sia la derivata di a rispetto N in p nel diagramma $a - N$ e ΔK sarà valutato come segue:

$$\Delta K_p = Y\Delta\sigma\sqrt{a_p}$$

Come illustrato nelle **Figure 1.9a** e **1.9b**.

Un risultato ben più interessante è che svolgendo questa operazione per tutti i punti sulla curva di propagazione e per diverse curve di propagazione, tutti i punti risultano essere appartenenti alla stessa retta nel diagramma doppio logaritmico $\frac{da}{dN} - \Delta K$ come messo in evidenza dalla **Figura 1.9c**.

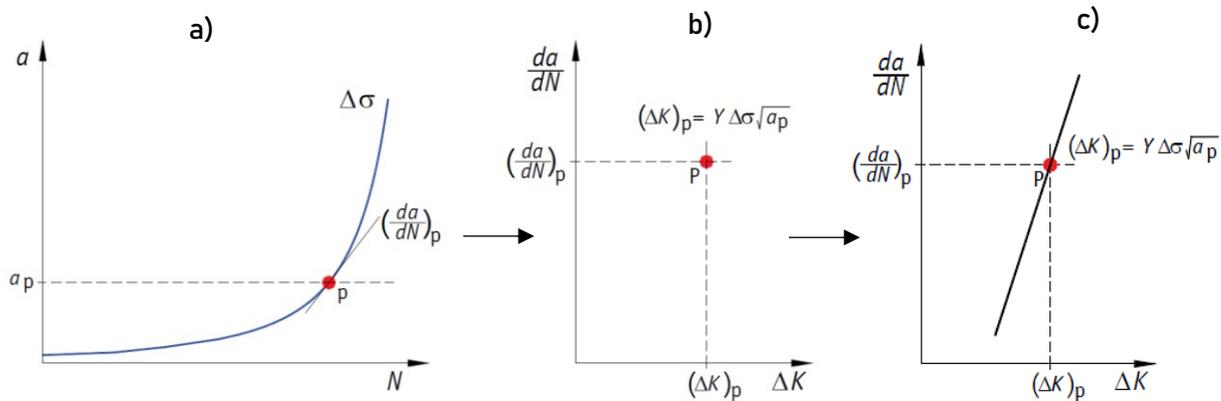


Figura 1.9 - Risultato della procedura descritta sopra

La prima persona a mettere in luce questo comportamento fu Paris nel 1963, formulando la nota legge di propagazione del difetto, valida per carichi ad ampiezza costante:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad [1.1]$$

Dove:

- C = parametro tipico del materiale, funzione del rapporto di carico R e da altre variabili come ad esempio le condizioni ambientali.
- m = pendenza della curva $da/dN - \Delta K$, anch'essa dipendente da R e da altre variabili secondarie, analogamente a C .

Come già specificato nel **Paragrafo 1.2**, il campo di tensioni all'apice del difetto è solo funzione del fattore di intensificazione delle tensioni. Pertanto, se due difetti nello stesso materiale hanno lo stesso fattore di intensificazione delle tensioni allora le due distribuzioni di tensioni all'apice del difetto sono uguali.

Di conseguenza se il ΔK è lo stesso, la velocità di propagazione è la stessa a parità di materiale e pertanto la legge di Paris rappresenta il comportamento del materiale in qualsiasi caso.

Può essere quindi utilizzata per ricavare, mediante integrazione, curve di propagazione del difetto in componente soggetti a diversi livelli di carico e con difetti differenti.

La legge di Paris così descritta è valida a patto che il fattore di intensificazione nei calcoli sia sufficientemente piccolo in modo che la zona plastica all'apice del difetto sia ridotta e sia applicabile la MFLE.

La legge di Paris non rappresenta completamente ciò che sperimentalmente si ottiene. La curva $\frac{da}{dN} - \Delta K$ ha una tipica forma ad “S” e può essere suddivisa in tre regioni della **Figura 1.10**:

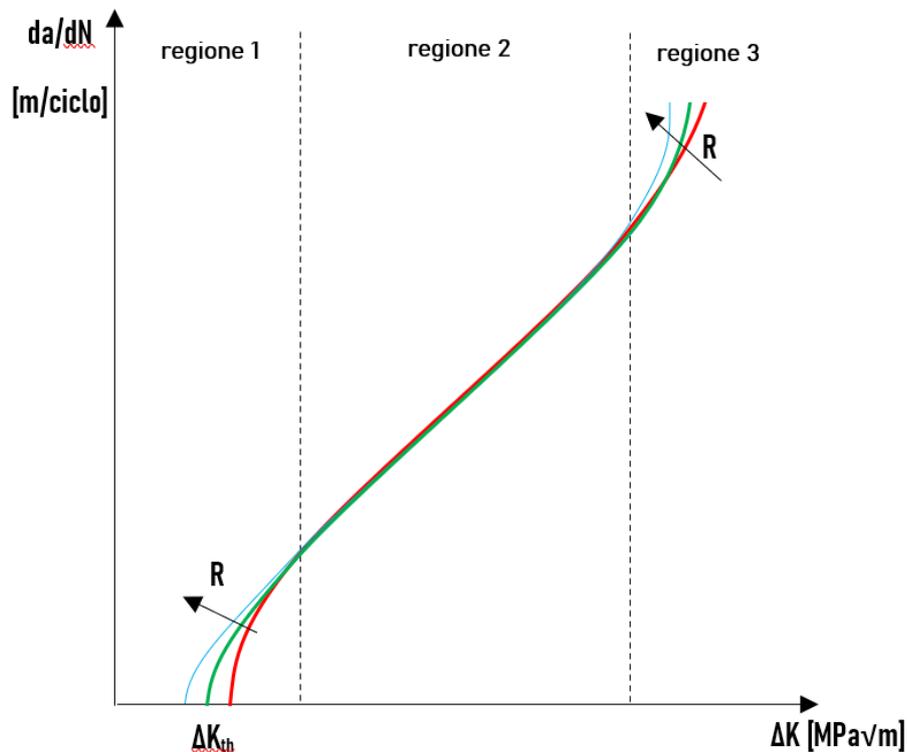


Figura 1.10 - Rappresentazione tipica di una curva da/dN sperimentale

- **Regione 1** : Nella regione 1 si evidenzia che la crescita del difetto non inizia fino a quando non si raggiunge un valore di soglia ΔK_{th} . Tale valore è influenzato dal valore di R ed in particolare, maggiore è R, minore sarà il valore di soglia per cui si inizia ad apprezzare una crescita del difetto. Tale valore è di solito una percentuale di K_{IC} .
- **Regione 2** : in questa regione è effettivamente valida la legge di Paris, con una relazione lineare fra $\log(da/dN)$ e $\log(\Delta K)$. Come si può vedere c'è poca influenza del rapporto di carico R.
- **Regione 3** : corrisponde alla transizione dalla crescita stabile alla propagazione instabile del difetto; si può individuare in tale regione un valore limite K_I di solito dell'ordine di K_{IC} ; quando il $K_{I_{max}}$ raggiunge il valore limite K_{IC} si ha propagazione instabile del difetto. Questa regione è principalmente controllata dalla tenacità a frattura K_{IC} . Con R crescente tale valore limite decresce.

Questo progetto di tesi si occuperà quindi di determinare in maniera più precisa i meccanismi che intervengono nel materiale per valori di ΔK prossimi a ΔK_{th} .

Paris ed Erdogan apparentemente furono i primi a scoprire la legge di potenza per la crescita della frattura da fatica nella Regione II.

Proposero un esponente di 4, valore in linea con i loro dati sperimentali. Studi successivi negli ultimi tre decenni, tuttavia, hanno dimostrato che m può variare da 2 a 4 per la maggior parte dei metalli in assenza di un ambiente corrosivo.

Numerosi ricercatori hanno sviluppato equazioni che modellano in tutto o in parte l'andamento $da/dN - \Delta K$. La maggior parte di queste equazioni sono empiriche, sebbene alcune siano basate su considerazioni fisiche.

Klesnil e Lukas hanno modificato l'**Equazione 1.1** per tener conto del valore di soglia:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad [1.2]$$

Numerose equazioni tentano di descrivere l'intera curva di crescita della cricca, tenendo conto sia della soglia che del comportamento della Regione III. La maggior parte di tali relazioni presuppone che il materiale entri nella Regione III nel momento in cui si verifica che K_{max} in esercizio si approssimi a K_{Ic} , anche se questa ipotesi non sembra avere solidi riscontri sperimentali. L'espressione più comune per descrivere la crescita delle cricche di fatica in tutte e tre le regioni fu sviluppata dalla NASA e pubblicata per la prima volta da Forman e Mettu.

Questa equazione, in una forma leggermente semplificata, ha la seguente espressione:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \frac{1 - (\Delta K_{th}/\Delta K)^p}{1 - (K_{max}/K_c)^q} \quad [1.3]$$

dove C, m, p e q sono costanti materiali. A valori di ΔK intermedi dove $\Delta K \gg \Delta K_{th}$, e $K_{max} \ll K_c$, l'**Equazione 1.3** si riduce all'**Equazione 1.1**.

Pertanto, i valori C e m per le **Equazioni 1.1** e **1.3** sono equivalenti.

Ognuna di queste equazioni può essere integrata per ottenere una previsione della vita a fatica. La più generale di queste espressioni contiene sei costanti di materiale: C, m, p, q, K_c e ΔK_{th} .

Per un dato materiale, la velocità di crescita della cricca a fatica dipende solo dai parametri di carico ΔK e R, almeno secondo le **Equazioni da 1.1 a 1.3**. Pertanto, tutte le espressioni precedenti assumono che ci sia la stessa distribuzione di tensioni nella zona di crescita della cricca; nessuna di queste equazioni tiene conto in qualche modo della dipendenza dalla storia di carico, quindi esse sono strettamente valide solo per applicazioni a carico costante (o tensione costante). Alcune di queste formule, tuttavia, sono state sviluppate pensando a carichi ad ampiezza variabile.

Sebbene ci siano molte situazioni in cui assumere la similitudine della storia di carico è una buona approssimazione per carichi ad ampiezza variabile, si deve comunque sempre tenere presente gli effetti potenziali che una particolare storia di carico può generare. La legge di Miner, molto valida per storie di carico random, sottostima la durata del componente per storie Lo-Hi, mentre la sovrastima per storie Hi-Lo.

Le leggi sopra esposte si riferiscono inoltre a campi tensione principalmente elastici. Di seguito verrà trattata brevemente la teoria dell'integrale J, teoria più adatta a descrivere la crescita di cricche in campo principalmente plastico.

1.4 TEORIA DELL'INTEGRALE J

Dowling e Begley hanno applicato la teoria dell'integrale J alla crescita delle cricche di fatica in condizioni di plasticità non più su piccola scala all'apice della cricca in cui K non è più valido e non descrive più accuratamente lo stato di tensione all'apice della cricca.

Sono riusciti a correlare i dati sperimentali con una legge di potenza, analoga alla legge di Paris, dove però il parametro che domina è J.

Tale legge ha la forma:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta J^m$$

Le costanti C ed m hanno lo stesso significato che hanno per la legge di Paris.

J è un parametro, analogo a K che descrive più accuratamente lo stato di tensione all'apice della cricca qualora il campo di tensioni non sia principalmente elastico ma anche plastico.

La sua definizione nasce da una considerazione di comportamento del materiale elastico non lineare anziché elastico lineare, secondo una legge di correlazione tensioni deformazioni nel campo plastico alla Ramberg-Osgood. Il materiale percorre la curva in blu in in **Figura 1.11** entrambe le direzioni; questo implica l'assunzione che le deformazioni plastiche siano reversibili (comportamento che in realtà non è verificato), e rappresenta un primo superamento delle limitazioni del comportamento elastico.

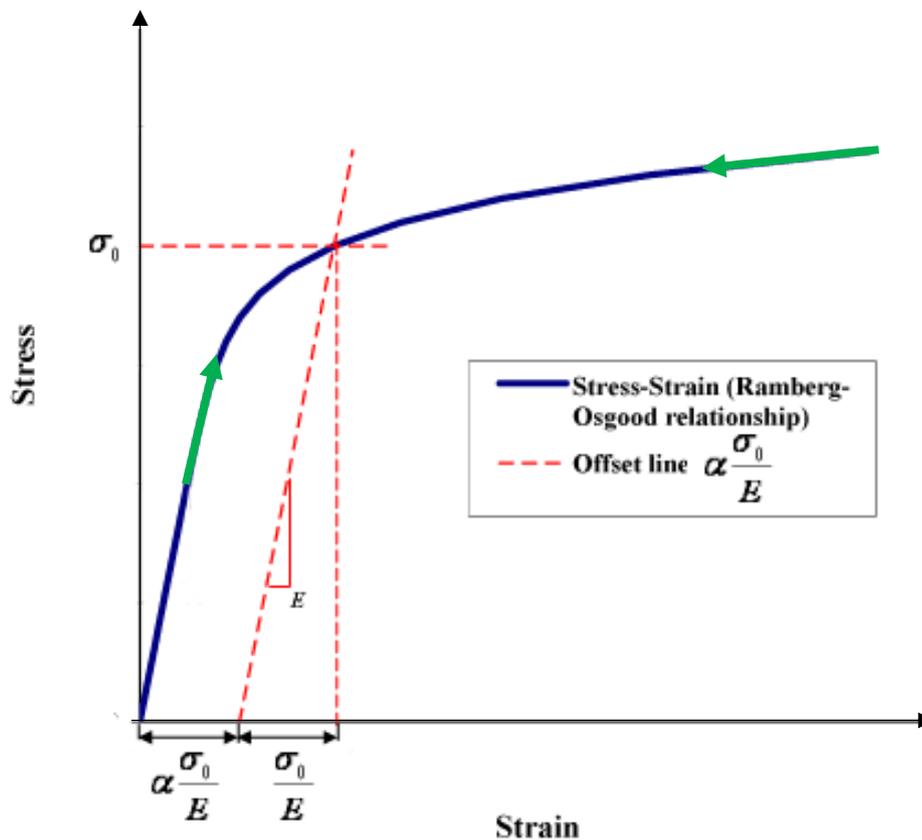


Figura 1.11- Curva di flusso plastico in trazione monoassiale.

Ciò che è descritto in **Figura 1.11** risponde alla seguente formulazione matematica:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n$$

Dove:

- ε è la deformazione
- σ è la tensione.
- E è il modulo di Young.
- K, n sono costanti che dipendono dal materiale considerato.

Il primo termine, σ/E è un termine che tiene conto della componente elastica della deformazione, mentre il secondo termine $K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n$ tiene conto della componente plastica, con K ed n che descrivono il comportamento di incrudimento del materiale.

Introducendo il limite elastico del materiale σ_0 , e definendo un nuovo parametro α , che è relazionato con K nel seguente modo:

$$\alpha = K \left(\frac{\sigma_0}{E} \right)^{n-1}$$

Si può riscrivere la legge nella forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1}$$

Ritornando all'integrale J, ne sono state date tre definizioni:

1. J è una estensione in campo elasto plastico dello *strain energy release rate* G.
2. J è definito come un integrale, con la seguente formulazione:

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dS \right)$$

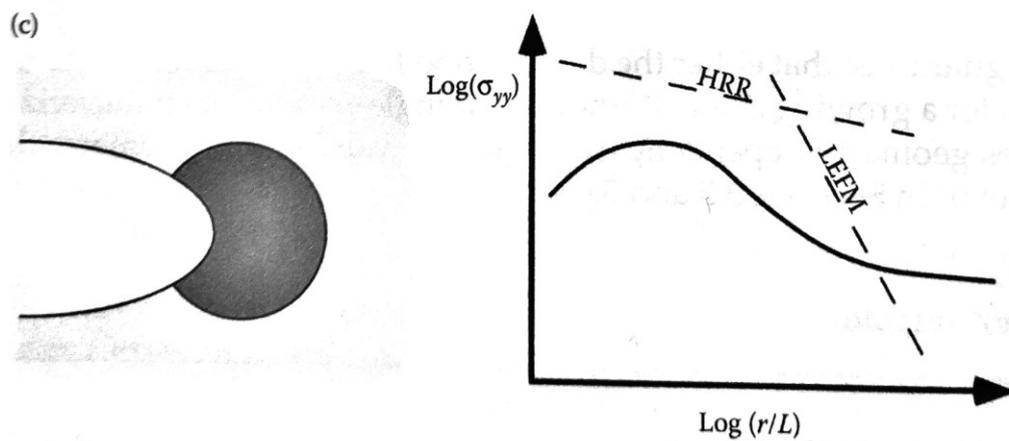
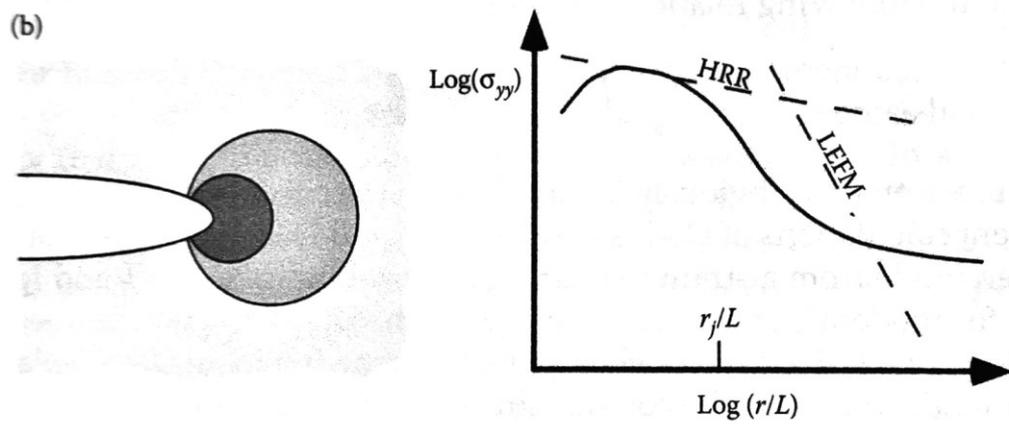
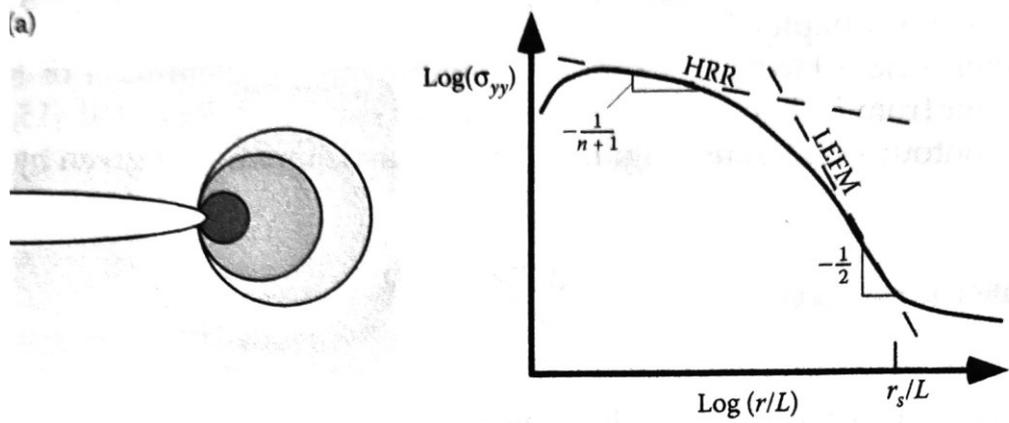
Con:

- w = lavoro per unità di volume
 - t_i = traction
 - Γ = percorso chiuso che include l'apice del difetto.
3. J è definito come quel parametro che descrive in maniera esaustiva lo stato di tensione all'apice della cricca, nei limiti del modello elastico non lineare.

La **Figura 1.12** mette in correlazione la descrizione dello stato di tensione secondo J e K.

J (indicato sulla **Figura 1.12** come HRR) è sufficientemente descrittivo se la deformazione all'apice della cricca non è troppo elevata; la zona in cui J è valido viene detta J-dominata.

K invece è valido solo nelle zone dove lo stato di tensione è principalmente elastico. Sarà quindi presente una zona K-dominata.



Legend:

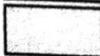
-  Large strain region
-  J -dominated zone
-  K -dominated zone
-  No single-parameter characterization

Figura 1.12 – Rappresentazione grafiche delle zone K -dominate e J -dominate. Small scale yielding (a), condizioni elasto plastiche (b), large-scale-yielding (c).

1.5 IL FENOMENO DEL "CRACK CLOSURE"

Un fenomeno scoperto da Elber nel 1970 portò a decenni di ricerca su un fenomeno noto come "crack closure". Lui notò una anomalia nella misura di cedevolezza di molti campioni per prove di fatica che la **Figura 1.13a** descrive. Ad alti carichi la rigidezza dei campioni era coerente con quella descritta dalle formule per provini fratturati ma per carichi più bassi la rigidezza era molto più vicina a quella di un provino non criccato.

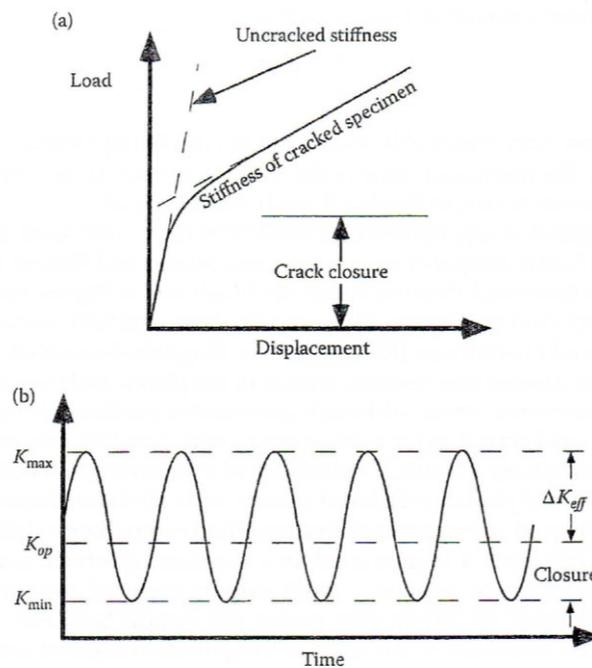


Figura 1.13- Descrizione del fenomeno di crack closure. Le facce della cricca sono in contatto a carichi positivi (a) portando a un valore di ΔK minore di quello applicato e pari a ΔK_{eff} (b).

Elber ipotizzò che questo cambiamento nella rigidezza fosse dovuto al contatto tra superfici di frattura (cioè chiusura della cricca) a carichi bassi ma maggiori di zero.

Elber postulò anche che la chiusura della cricca diminuiva il tasso di crescita della cricca di fatica riducendo l'effettivo valore del fattore di intensificazione degli sforzi. La **Figura 1.13b** illustra il concetto. Quando il campione viene caricato ciclicamente tra K_{max} e K_{min} le facce della cricca sono in contatto al di sotto di K_{op} , il valore di K per cui si apre la cricca. Elber ipotizzò che la porzione di ciclo inferiore a K_{op} non contribuisce alla crescita delle cricche di fatica perché non porta a una variazione della tensione all'apice della cricca.

Ha quindi definito un valore di K efficace alla propagazione come segue:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$$

E dato che solo una porzione di K è efficace alla propagazione, Elber ha anche proposto una modifica della legge di Paris come segue:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad [1.4]$$

L'Equazione 1.4 ha avuto un ragionevole successo nel correlare i dati sulla crescita delle cricche di fatica ai vari rapporti di carico R . Il valore numerico della costante materiale C è diverso nelle **Equazioni 1.1 e 1.4** se la chiusura avviene nella Regione II, cioè $\Delta K_{eff} < \Delta K$.

Dalla scoperta di Elber, numerosi ricercatori hanno confermato l'esistenza del fenomeno di *crack closure*.

Suresh e Ritchie hanno identificato cinque meccanismi di chiusura delle cricche di fatica, illustrati nella **Figura 1.14**.

La chiusura indotta da plasticità residua, **Figura 1.14a**, deriva da deformazioni plastiche residue all'apice della cricca.

Budiansky e Hutchinson hanno applicato il modello di Dugdale - Barenblatt per la correlazione dello stato di tensione all'apice della cricca, il quale ha mostrato che deformazioni plastiche residue portano le facce della cricca a rimanere chiuse anche se sottoposte a uno stato di tensione positivo.

Un certo numero di ricercatori ha successivamente studiato la chiusura indotta da plasticità con analisi 2D agli elementi finiti.

In particolare, Jack e Knott hanno eseguito un esperimento che ha fornito prove convincenti dell'esistenza del fenomeno.

Essi hanno precriccato un campione standard e successivamente, attraverso un processo di elettroerosione, hanno rimosso una piccola quantità di materiale dalla cricca prolungandone la lunghezza fino a 0,5 mm oltre l'apice originale. Quando hanno riposizionato il campione nella macchina di prova, il tasso di crescita della cricca è aumentato di un ordine di grandezza rispetto alle misure precedenti. Hanno concluso che la deformazione plastica residua stava causando la chiusura e la riduzione del tasso di crescita della cricca e che il tasso di crescita della cricca è cresciuto a causa della presenza di sollecitazioni residue di compressione nella zona plastica, rimossa mediante lavorazione meccanica.

La chiusura indotta da rugosità, illustrata in **Figura 1.14b**, è influenzata dalla microstruttura. Sebbene le cricche di fatica si propagano in Modo I su scala globale, deflessioni dovute all'eterogeneità microstrutturale possono portare a condizioni di propagazione miste a livello microscopico. Quando il percorso della cricca si discosta dal piano di simmetria del Modo I, la cricca è soggetta alla propagazione secondo Modo II, come mostra la **Figura 1.14b**. Questi spostamenti causano disallineamenti tra la faccia superiore e inferiore della cricca, che a sua volta provoca il contatto delle facce della cricca con un carico positivo. I materiali a grana grossa di solito producono un grado di rugosità superficiale maggiore in presenza di carichi affaticanti e conseguentemente generano maggiori forze di chiusura.

La chiusura indotta da ossido, **Figura 1.14c**, è solitamente associata a un ambiente aggressivo. Detriti di ossido o altri prodotti di corrosione rimangono incastrati tra le facce della cricca e ne impediscono l'apertura.

La chiusura della cricca può anche essere dovuta all'introduzione di un fluido viscoso, come mostra la **Figura 1.14d**.

Il fluido agisce come un cuneo tra le facce della cricca, un po' come avviene in presenza di ossido. Una trasformazione martensitica indotta da stress all'apice della cricca può portare a una zona in cui sono presenti stress residui di compressione, che bloccano la crescita della cricca.

L'importanza relativa dei vari meccanismi di chiusura dipende dalla microstruttura, resistenza allo snervamento e l'ambiente in cui si trova il componente.

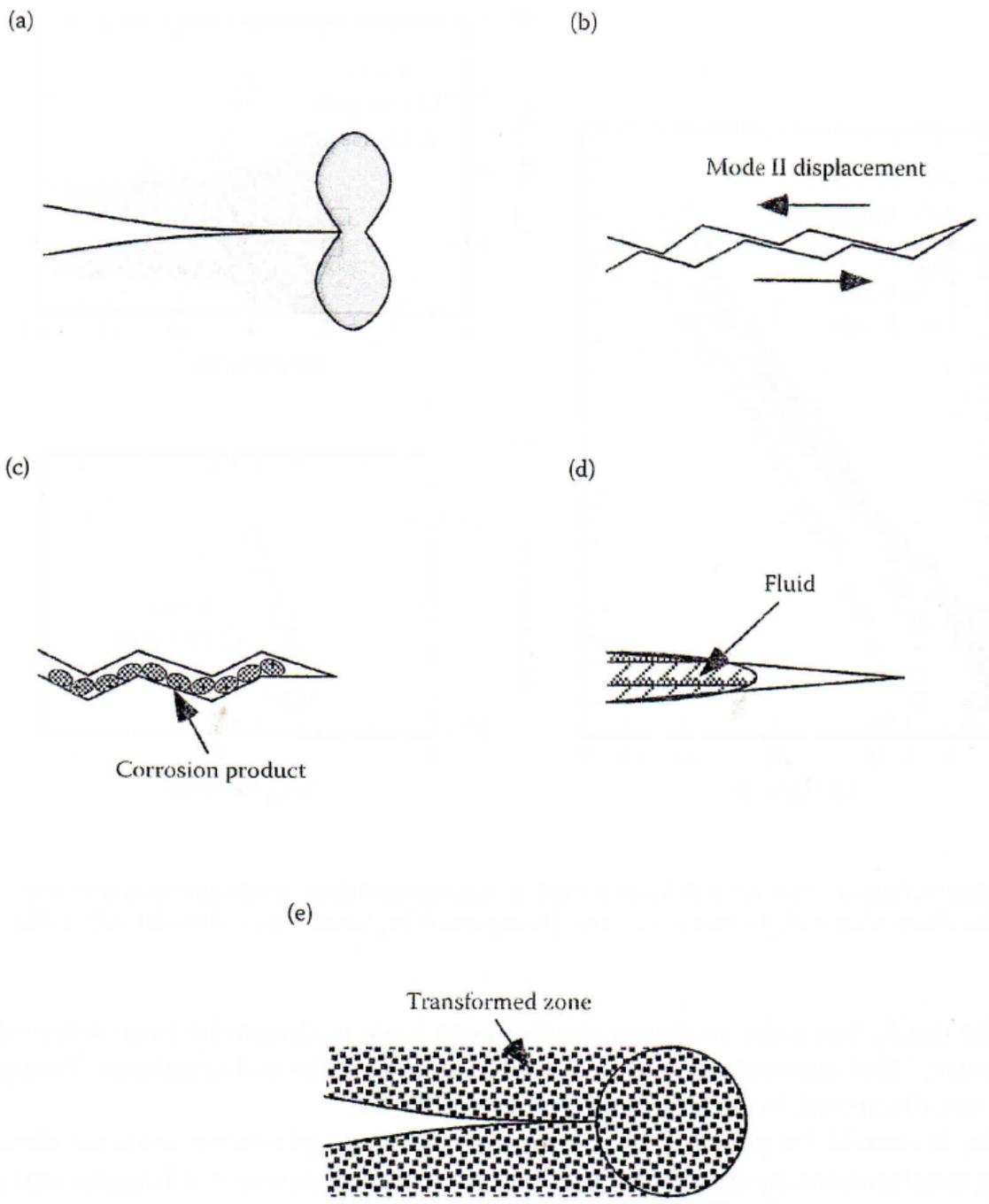


Figura 1.14- Meccanismi di chiusura delle cricche di fatica nei metalli: (a) chiusura indotta da plasticità, (b) chiusura indotta da rugosità, (c) chiusura indotta da ossido, (d) chiusura indotta da un fluido viscoso e (e) chiusura indotta da trasformazione.

(Da Suresh, S., Ritchie, R.O., *Int. Metall. Rev.*, 29, 445-476, 1984.)

1.6 UNO SGUARDO PIU' DETTAGLIATO AL ΔK_{th}

Il valore della variazione del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia, il ΔK_{th} , è il punto al di sotto del quale non si apprezzano crescite della lunghezza di una cricca di fatica.

Le misurazioni sperimentali della soglia sono di solito svolte con procedure a carico decrescente, in cui il ΔK viene gradualmente ridotto fino a quando la velocità di crescita della cricca non raggiunge un valore molto piccolo.

In queste prove viene mantenuto costante o il valore di K_{max} o di R , mentre il ΔK decresce. Il modo in cui viene svolta la prova può influenzare di molto i risultati; questo discorso verrà approfondito nel capitolo successivo al **Paragrafo 2.2** intitolato "Procedura a ΔK decrescente".

La maggior parte degli esperti ritiene che la soglia sia composta da due componenti: una componente di soglia vista come proprietà intrinseca del materiale e una componente estrinseca funzione del carico a cui è soggetto il componente, come il rapporto di carico R .

Il meccanismo preciso riguardante la soglia intrinseca non è stato ancora stabilito, ma diversi ricercatori hanno sviluppato modelli basati sulle emissioni di dislocazioni dall'apice della cricca o blocco delle bande di scorrimento da parte dei bordi del grano.

La maggior parte dei ricercatori ritengono tuttavia che gli effetti del rapporto R sul valore di soglia siano collegati al fenomeno del "crack closure".

C'è un'opinione di minoranza nella comunità della fatica che crede invece che il fenomeno di "crack closure" giochi un ruolo marginale nel comportamento a fatica vicino alla soglia. Credono infatti nell'esistenza di due soglie intrinseche: una soglia su ΔK e una soglia su K_{max} .

Entrambi i punti di vista trovano supporto nei dati pubblicati. Mentre l'evidenza empirica supporta una soglia K_{max} , tale soglia è anche coerente con la spiegazione del fenomeno di crack closure.

La risposta su chi abbia ragione risiede nelle misure di chiusura della cricca.

Cioè, solo svolgendo misure di chiusura della cricca si può correlare in che modo R influisca sul valore ΔK_{th} .

Sfortunatamente, questo problema è ancora irrisolto poiché le misure di chiusura tradizionali sono notoriamente disperse e incoerenti. Ci sono esempi in letteratura dove i ricercatori provano a correlare gli effetti del rapporto R in ΔK_{th} con misurazioni di chiusura della cricca, senza grossi risultati, spinti a volte anche dalla manipolazione dei dati per ottenere il risultato voluto.

Fino a quando non si darà una stringente definizione di chiusura ed annessa procedura di misura, i risultati saranno ambigui.

Note le problematiche annesse alla misura e alla determinazione di questo valore di soglia, andiamo ora ad analizzare i due modelli ad oggi esistenti sul valore di ΔK_{th} .

1.6.1 IL MODELLO DI SOGLIA LEGATO AL FENOMENO DI "CRACK CLOSURE"

La **Figura 1.15** illustra schematicamente l'effetto del "crack closure" sul valore di soglia a fatica ΔK_{th} .

Supponiamo che un determinato materiale abbia un valore di soglia intrinseca ΔK_{th}^* , e che K_{op} sia anch'esso una costante del materiale e quindi indipendente dal rapporto R .

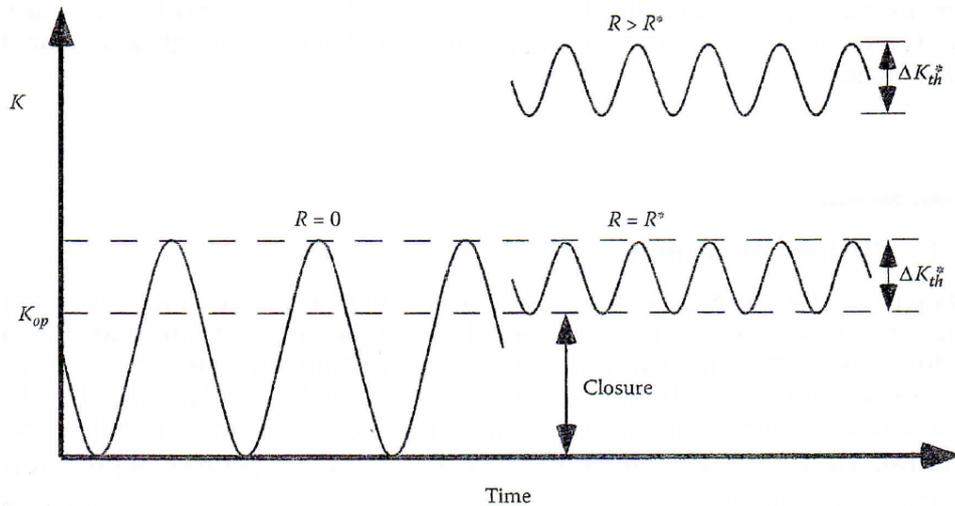


Figura 1.15 -Illustrazione schematica della relazione fra fenomeno di "crack closure" e il rapporto R , considerando K_{op} costante.

La relazione tra il valore di soglia apparente ΔK_{th} e la soglia intrinseca è data da:

$$U \Delta K_{th} = \Delta K_{th}^* \quad [1.5]$$

Con:

$$U = \min \left[\left(\frac{1}{1-R} - \frac{K_{op}}{\Delta K_{th}} \right), 1 \right] \quad [1.6]$$

Combinando la **1.5** e la **1.6** si ottiene:

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} (K_{op} + \Delta K_{th}^*)(1 - R) & R \leq R^* \\ \Delta K_{th}^* & R > R^* \end{cases} \quad [1.7]$$

Dove R^* è il rapporto di carico per cui non sono apprezzabili fenomeni di chiusura, come illustrato da **Figura 1.15**. R^* si ottiene come:

$$R^* = 1 - \frac{\Delta K_{th}^*}{K_{op} + \Delta K_{th}^*}$$

La **Figura 1.16** è un diagramma schematico dell'Equazione **1.6**.

Questa espressione prevede che il valore di soglia ΔK_{th} decresca linearmente con R per valori inferiori di R^* e sia una costante con rapporti di carico maggiori di R^* .

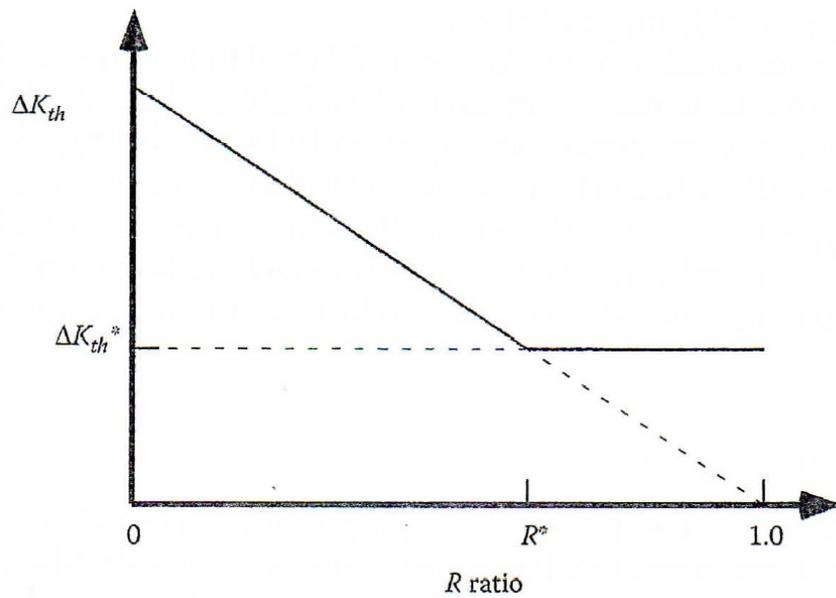


Figura 1.16 - Correlazione fra ΔK_{th} ed R

La **Figura 1.17** è un diagramma dei dati di soglia effettivi per una varietà di acciai. L'**Equazione 1.7** sembra fornire un'ottima descrizione dei dati. Per la maggior parte degli acciai su questo diagramma, R^* sembra essere intorno a 0,8 e ΔK_{th}^* tra 2 e 3 MPa \sqrt{m} .

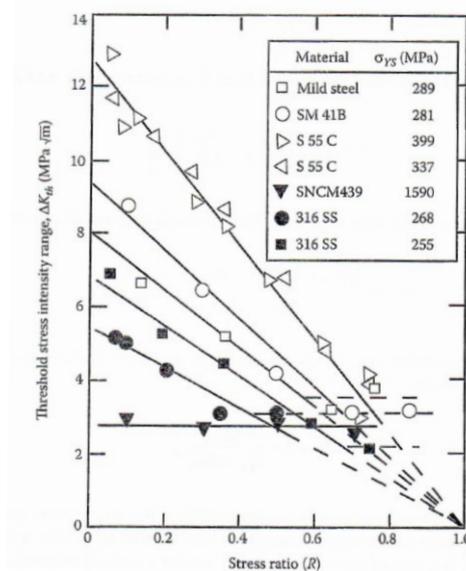


Figura 1.17- Effetto del rapporto R sul valore di ΔK_{th} per vari acciai. (Da Tanaka, K., Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 1020, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 151-183, 1989.)

1.6.2 IL MODELLO DI SOGLIA A DUE CRITERI

Vasudevan e i suoi colleghi hanno proposto un modo alternativo di considerare il comportamento vicino alla soglia. Essi sostengono che ci siano due soglie intrinseche, una su ΔK e una su K_{max} .

Credono che nessuna delle due soglie sia associata alla chiusura. Piuttosto, sostengono che la soglia K_{max} rifletta il livello minimo del fattore di intensificazione degli sforzi che debba necessariamente essere raggiunto all'apice della cricca per notare un danno, ed è una proprietà intrinseca del materiale.

Essi sottolineano che il loro approccio è analogo al diagramma di Goodman per le curve S-N, dove la durata a fatica è una funzione sia dell'ampiezza di sollecitazione che della tensione media.

La **Figura 1.18** è un'illustrazione schematica del concetto di soglia a due criteri. I due valori di soglia, sull'intensità dello stress ciclico, ΔK_{th}^* , e l'intensità massima del fattore di intensificazione degli sforzi K_{max}^* formano una curva a L. Entrambe le soglie devono essere superate affinché si verifichi la crescita delle cricche, secondo questo modello.

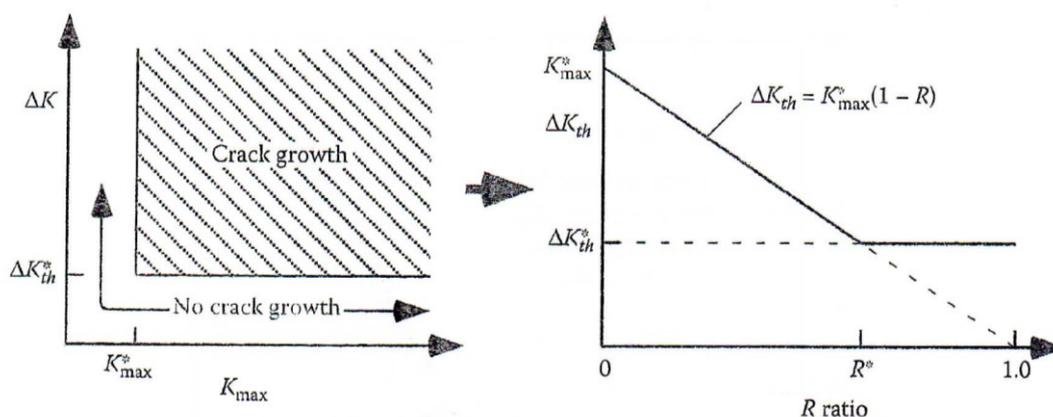


Figura 1.18 - Schematizzazione del modello di soglia a due criteri.

Facendo riferimento al lato destro della **Figura 1.18**, tale andamento può essere descritto matematicamente come:

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} K_{max}^*(1 - R) & R \leq R^* \\ \Delta K_{th}^* & R > R^* \end{cases}$$

Pertanto, l'esistenza di soglie sia per K_{max} che per ΔK è del tutto coerente con l'argomentazione sul fenomeno della chiusura. Se gli effetti del rapporto R sulla soglia misurata sono, infatti, il risultato della chiusura della cricca, allora la soglia su K_{max} è semplicemente la somma della K di apertura e della soglia ΔK intrinseca:

$$K_{max}^* = K_{op} + \Delta K_{th}^*$$

Nonostante ciò, Vasudevan e Sadananda sostengono che il K_{max}^* sia una proprietà intrinseca del materiale, non il risultato del fenomeno di "crack closure".

Questo punto di vista è in contrasto con il consenso degli esperti di fatica.

1.6.3 MICROMECCANISMI VICINO ALLA SOGLIA

La superficie di frattura che deriva dalla fatica vicino alla soglia ha sovente un aspetto piatto e sfaccettato che assomiglia a una superficie di clivaggio.

Apparentemente la cricca segue specifici piani cristallografici e cambia direzione quando incontra un ostacolo come un bordo di grano.

Il tasso di crescita della cricca di fatica in questa regione è sensibile alla dimensione del grano, in parte perché le microstrutture a grana grossa producono superfici ruvide e chiusura indotta dalla rugosità.

La dimensione del grano può anche influenzare la soglia intrinseca in alcuni casi.

Il modello per ΔK_{th}^* descritto sull' *International Journal of Fracture* nell'articolo intitolato "Fatigue growth threshold of small cracks" scritto da Tanaka, K., Akiniwa, Y., Yamashita, M., afferma che la soglia si verifica quando i bordi di grano bloccano le bande di scorrimento e impediscono loro di propagarsi nel grano adiacente.

Questo apparentemente succede quando la dimensione della zona plastica è approssimativamente uguale al diametro medio dei grani, il che suggerisce la seguente relazione fra ΔK_{th}^* e dimensione del grano:

$$\sqrt{d} = A \frac{\Delta K_{th}^*}{\sigma_{SN}}$$

Dove:

- d è la dimensione media del grano cristallino.
- A è una costante.
- ΔK_{th}^* è la soglia intrinseca del materiale.
- σ_{SN} è il valore di snervamento del materiale, considerato costante.

Così definito, il valore di soglia intrinseca ΔK_{th}^* cresce con il crescere del diametro del grano cristallino.

La legge di Hall-Petch, tuttavia, prevede che σ_{SN} non rimanga costante al variare di d , ma che decresca con l'aumentare di quest'ultimo:

$$\sigma_{SN} = \sigma_i + k_y d^{-0.5}$$

Di conseguenza, la dipendenza dalla dimensione del grano della resistenza allo snervamento compensa in parte la tendenza della soglia intrinseca ad aumentare con l'ingrossamento del grano.

1.7 FRATTURA MISTA

Quando due o più modi si presentano, la formulazione dello strain energy release rate mette in evidenza che i singoli modi sono additivi, assumendo crescite simili per ogni modo.

Si può ricavare una formulazione dello strain energy release rate del tipo:

$$G = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu}$$

Con:

- K_I, K_{II}, K_{III} i fattori di intensificazione degli sforzi per i 3 modi di apertura della cricca.
- E' è un modulo elastico pari ad E per tensione piana e pari a $E/(1-\nu^2)$ per deformazione piana
- μ è il modulo di taglio pari a $E/[2(1+\nu)]$

La **Figura 1.19** illustra uno scenario tipico di una cricca inclinata. Quando si verifica frattura, la cricca tende a propagare in direzione ortogonale allo stress applicato; se ciò accade, la propagazione mista diventa una propagazione a Modo I. Una cricca che propaga segue il percorso di minima resistenza (o quello di massima forza) e non ha bisogno di limitarsi al suo piano iniziale. Se il materiale è isotropo e omogeneo, la cricca propagherà in modo da massimizzare l'energia di rilascio.

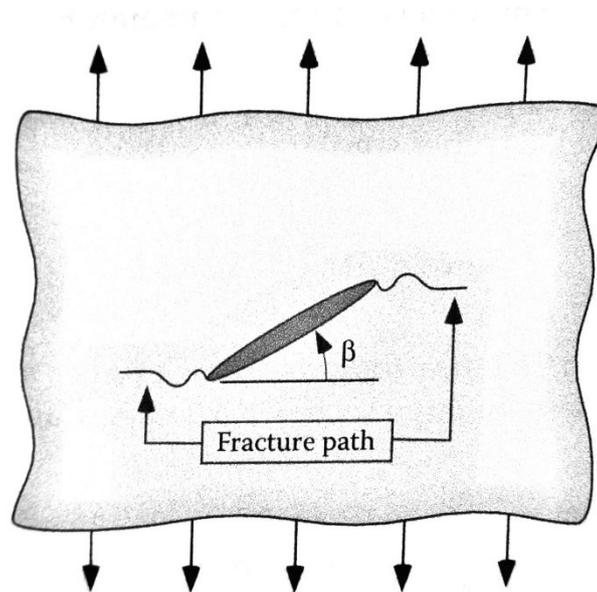


Figura 1.19 – Tipica propagazione di una cricca che non propaga perfettamente in maniera ortogonale al carico normale applicato. Una morfologia di questo tipo indica una propagazione mista di Modo I e Modo II, tuttavia la cricca tende poi a propagare normalmente al carico applicato, risultando in Modo I puro.

Tutto ciò si traduce in un problema di propagazione su due piani differenti.

Analizzando le formulazioni delle tensioni di Westergaard rispetto ad ogni Modo di propagare, i relativi fattori di intensificazione degli sforzi, si ottiene una formulazione di G che è funzione di un angolo α , angolo che l'apice della cricca, nel sistema di riferimento locale descritto in **Figura 1.20**, forma con il piano di propagazione della cricca, e dei relativi fattori di intensificazione degli sforzi rispetto ai 2 Modi di propagazione presi in considerazione.

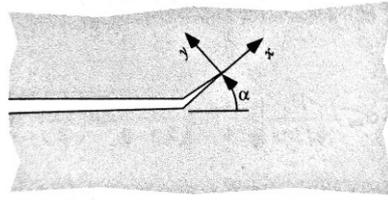


Figura 1.20 - Sistema di riferimento locale.

Questo porta ad avere un andamento di G del tipo descritto in Figura 1.21.

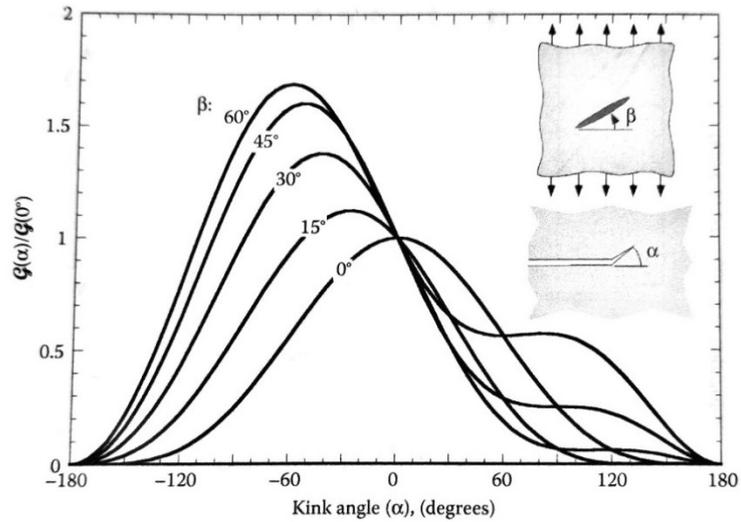


Figura 1.21 - Andamento del tasso di rilascio di energia elastica al variare dell'angolo α .

Il punto in cui si raggiunge il massimo di $G(\alpha)$ per ogni β , è il punto in cui il valore di k_I è massimo e k_{II} è pari a 0. k_I e k_{II} sono i fattori di intensificazione degli sforzi dell'apice di cricca, diversi da quello macroscopico della cricca stessa.

Questo implica che inizialmente la propagazione inizia con un angolo che è diverso da quello perpendicolare all'applicazione del carico remoto (linea tratteggiata nella Figura 1.22) e che se il K_{max} varia e di conseguenza la funzione $G(\alpha)$, o la microstruttura localmente cambia, necessariamente la cricca propagerà in maniera mista.

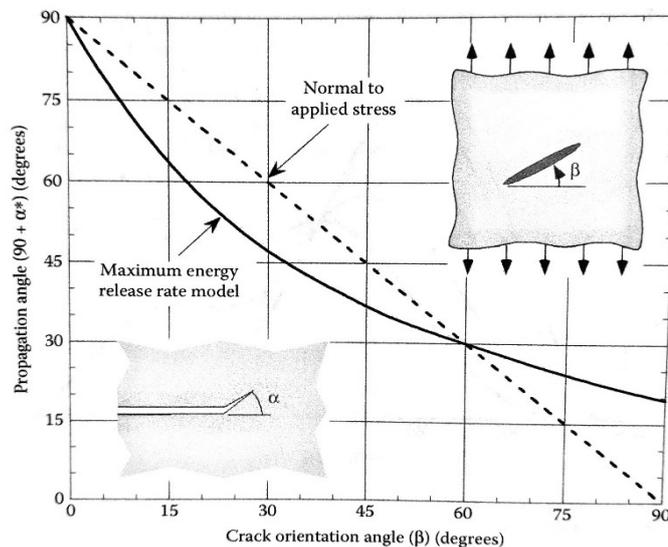


Figura 1.22 - Propagazione ottimale per una cricca orientata ad un determinato angolo β rispetto l'asse di stress

2 DETERMINAZIONE DEL VALORE DI SOGLIA ΔK_{th}

2.1 METODOLOGIA USATA E MATERIALE

Al fine di ottenere il valore di soglia ai vari rapporti di carico R, definito come:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

sono stati adoperati dei provini SENB ricavati da rotaie non esercite provenienti dall'acciaieria di Piombino.

La **Figura 2.1** riporta la direzione per cui sono stati ricavati i provini (L-S). La prima lettera indica la direzione normale al piano della cricca, cioè la direzione del carico applicato, la seconda lettera la direzione in cui ci si aspetta la cricca propagarsi.

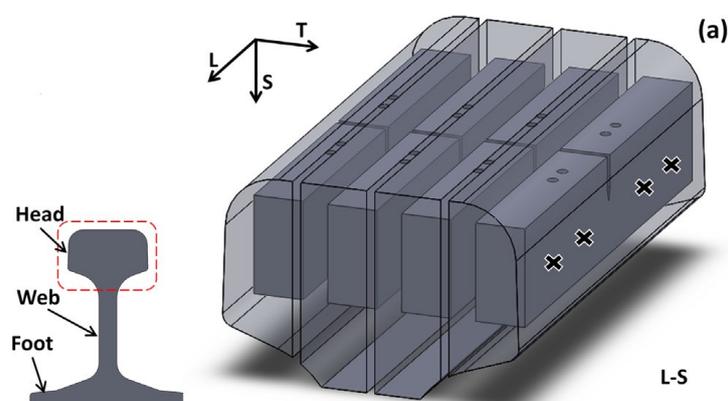


Figura 2.1 – I provini sono stati ricavati con orientazione L-S.

I provini utilizzati hanno la seguente geometria, descritta in **Figura 2.2**:

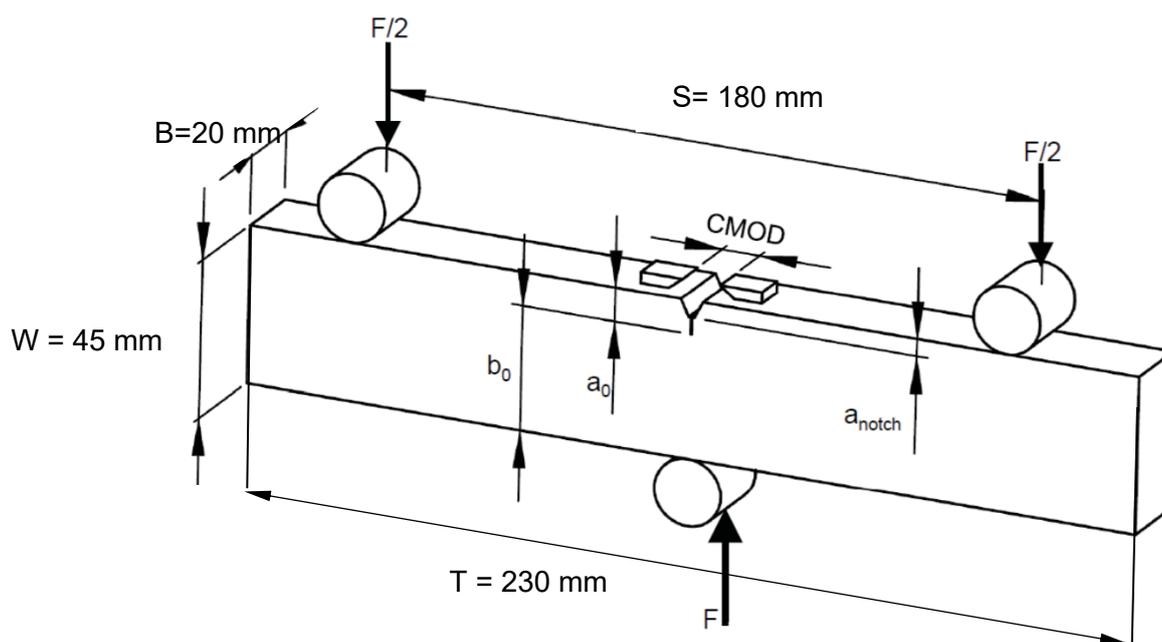


Figura 2.2 – Geometria del provino utilizzato.

Il materiale con cui i provini sono realizzati è un acciaio C80, un acciaio eutetoidico con microstruttura perlitica.

Le normative a cui ci si è riferiti sono state la ASTM E399 [3] e la ASTM E647[4]. In particolare, la ASTM E399 [3], prevede che vengano rispettate le seguenti richieste sulle dimensioni, illustrate in Figura 2.3.

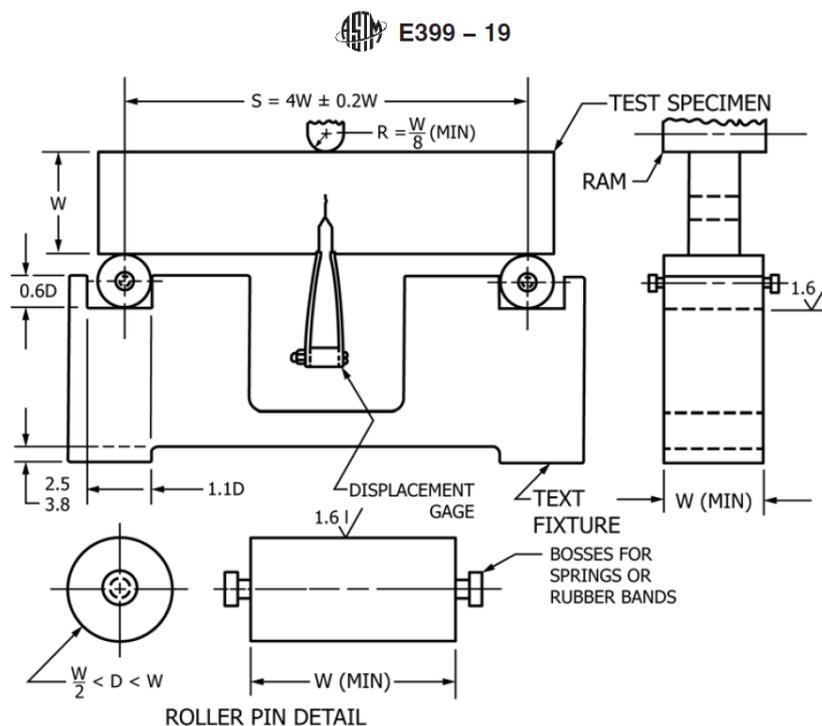


Figura 2.3 - Dimensioni richieste per il provino SENB secondo normativa ASTM E399.

In particolare, per quanto riguarda i cilindri attraverso cui si applica la forza, la normativa prevede che, indicando con D il diametro del cilindro:

$$\frac{W}{2} < D < W$$

Nel nostro caso:

$$22,5 \text{ mm} < D < 45 \text{ mm}$$

Per i cilindri attraverso cui si applica $F/2$.

$$D_{min} = \frac{W}{4} = 12,125 \text{ mm}$$

Per il cilindro superiore, attraverso cui viene trasmessa la forza F .

Note le dimensioni minime e massime necessarie, è stata scelta la stessa dimensione del diametro dei cilindri sia per quanto riguarda quelli trasmettenti la forza $F/2$ sia per quanto riguarda quelli trasmettenti la forza F , pari a 25 mm e ricavati da una colonna per stampi in acciaio C50 temprata e rettificata. A tali cilindri sono poi stati incollati con della colla cianoacrilica le borchie necessarie per il fissaggio delle bande elastiche in gomma.

Analogamente è stato fatto per il montaggio delle alette necessarie per le misure successive di cedevolezza e CMOD o COD per la determinazione di K_{lc} .

Per eseguirle è stato usato un estensimetro a molletta modello 632.03 denominato di tipo Clip on Gage e prodotto da MTS.

Tali estensimetri sono progettati per essere sensibili all'apertura della cricca.

Il COD è tarato per avere lo zero quando la distanza fra le alette è pari a 6mm, pertanto nella custodia di quest'ultimo è fornito anche un distanziatore fine a facilitare il montaggio delle alette. La **Figura 2.4** rappresenta sia il Clip on Gage che il distanziatore di cui si è appena discusso.



Figura 2.4 – Clip on Gage

Il macchinario utilizzato per le prove è una macchina di prova servoidraulica universale MTS FlexTest SE dotata dei moduli necessari per le prove di flessione a 3 punti.

Il software di gestione di tale macchina prevede svariate configurazioni di sollecitazione del provino, sia in controllo di spostamento sia in controllo di carico, e la forma d'onda con cui si vuole gravare il provino come funzioni sinusoidali, a rampa o a gradino, per citarne alcune.

La frequenza massima che il macchinario è in grado di raggiungere è di 100 Hz, tuttavia tutte le prove sono state condotte ad una frequenza di 50 Hz.

La cella di carico montata durante le prove era una cella da 100 kN, nonostante ciò il massimo del valore di carico che si è raggiunto durante le prove è stato di 18 kN.

Si è deciso di procedere alla ricerca del valore di soglia applicando ai provini una sollecitazione in controllo di carico e optando per una funzione temporale a forma sinusoidale smorzata: nei primi cicli di carico l'ampiezza aumenta gradualmente da zero e raggiunge il valore nominale in un centinaio di cicli circa; il valore nominale è poi mantenuto per tutta la prova. Solo quando questa giugue al termine, l'ampiezza della sinusoide di carico si smorza gradualmente fino a valore nullo.

La **Figura 2.5** descrive la schermata tipica del programma di gestione del macchinario, in particolare per uno dei cicli di sollecitazione a cui è stato sottoposto il provino con rapporto di carico $R=0,5$.

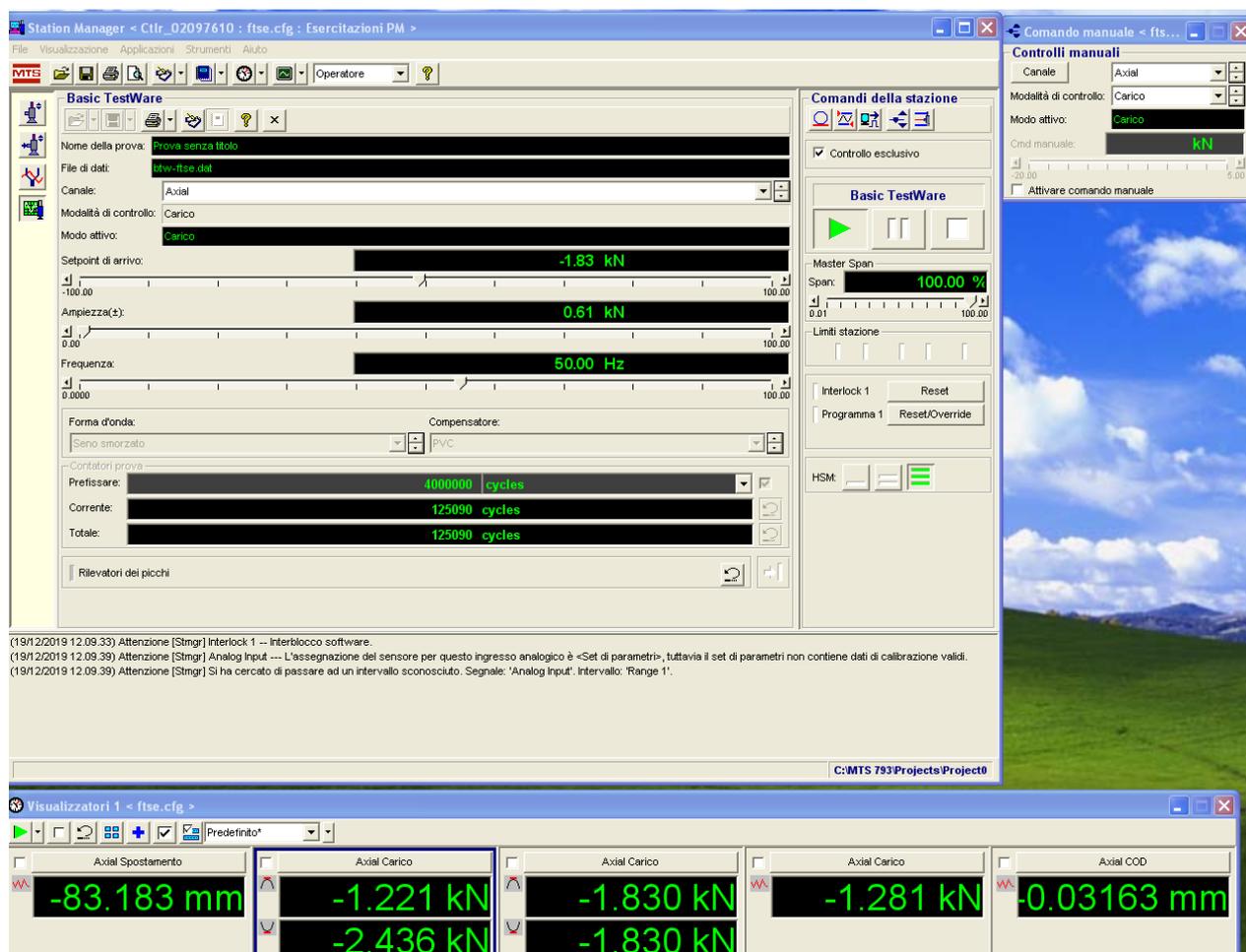


Figura 2.5 – Schermata del programma di gestione MTS Flextest SE

Attraverso il programma si setta il valore medio della sinusoide, indicato come “Setpoint di arrivo” in **Figura 2.5**, e la semiampiezza indicata come “Ampiezza” sempre nella medesima figura.

Leggermente più in basso si setta il numero di cicli a cui si vuole sottoporre il provino e la frequenza di applicazione del carico.

La finestra “Visualizzatori” serve a tenere d’occhio i parametri e valutare l’eventuale presenza di anomalie.

Di seguito si riporta la **Figura 2.6** che raffigura la sinusoide a cui i provini sono stati sottoposti. Variandone l’ampiezza e il carico medio è possibile variare R.

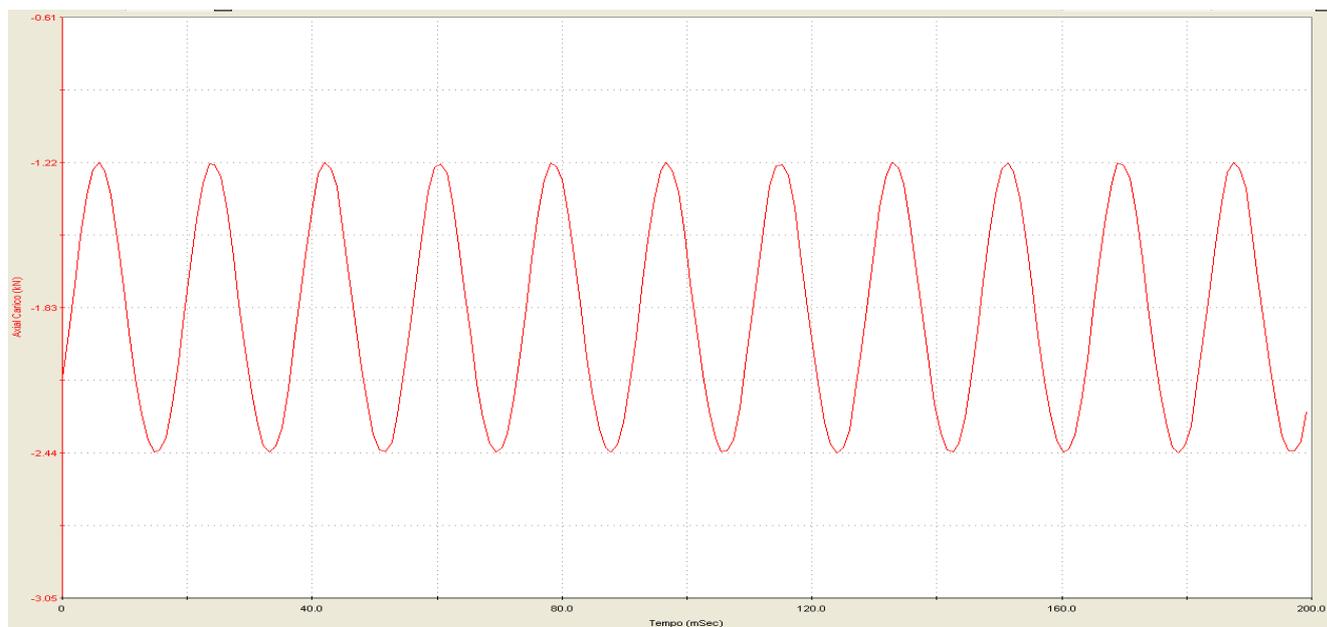


Figura 2.6 - Sinusoide di carico dei provini

Per ogni provino utilizzato, essendo presenti due facce in cui fosse possibile misurare l’avanzamento e la lunghezza della cricca, è stata data una denominazione dei lati in cui avveniva la misurazione; in particolare la denominazione adoperata è di tipo alfabetico, Lato A e Lato B.

La misurazione della lunghezza di cricca con il metodo ottico è quindi una media della misurazione avvenuta su ogni lato. La **Figura 2.7** rappresenta un provino, in cui si evidenzia la presenza di alette e la dicitura “Lato A”.

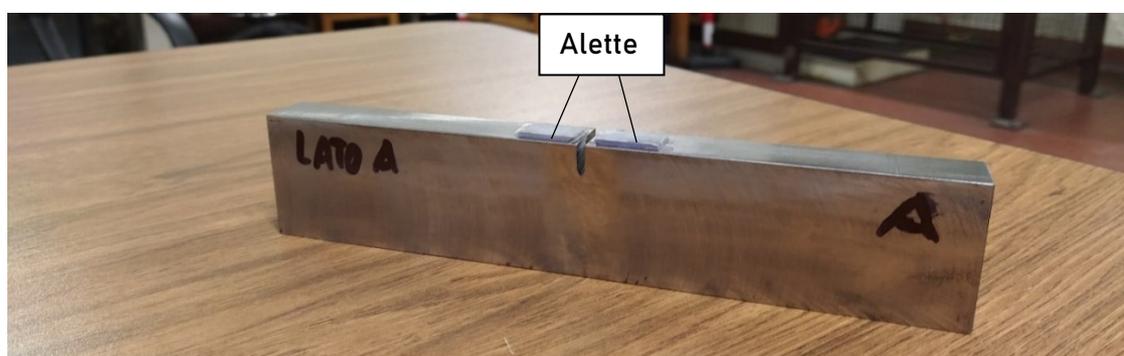


Figura 2.7 - Provino 228-4, usato per la misurazione del K_{IC}. Si noti la presenza di alette e la dicitura "Lato A" necessaria per monitorare l'avanzamento per ogni lato e mettere in evidenza eventuali anomalie.

Noto il carico di prova, selezionato il tipo di provino e individuato quale sia il lato A piuttosto che quello B, assicurarsi che le spine cilindriche siano nella posizione corretta, che la traversa inferiore sia allineata con quella superiore, è possibile eseguire le prove.

La trasmissione del carico al provino avviene, come già detto, attraverso dei cilindri. In particolare, i cilindri inferiori ricevono il carico dalla traversa inferiore, mobile con una forma d'onda determinata.

La traversa superiore invece risulta essere fissa, di conseguenza la risultante di carico trasmessa al provino mediante il cilindro superiore non è altro che la reazione del macchinario alla sollecitazione proveniente dalla traversa inferiore.

La **Figura 2.8** descrive un layout tipico di prova.

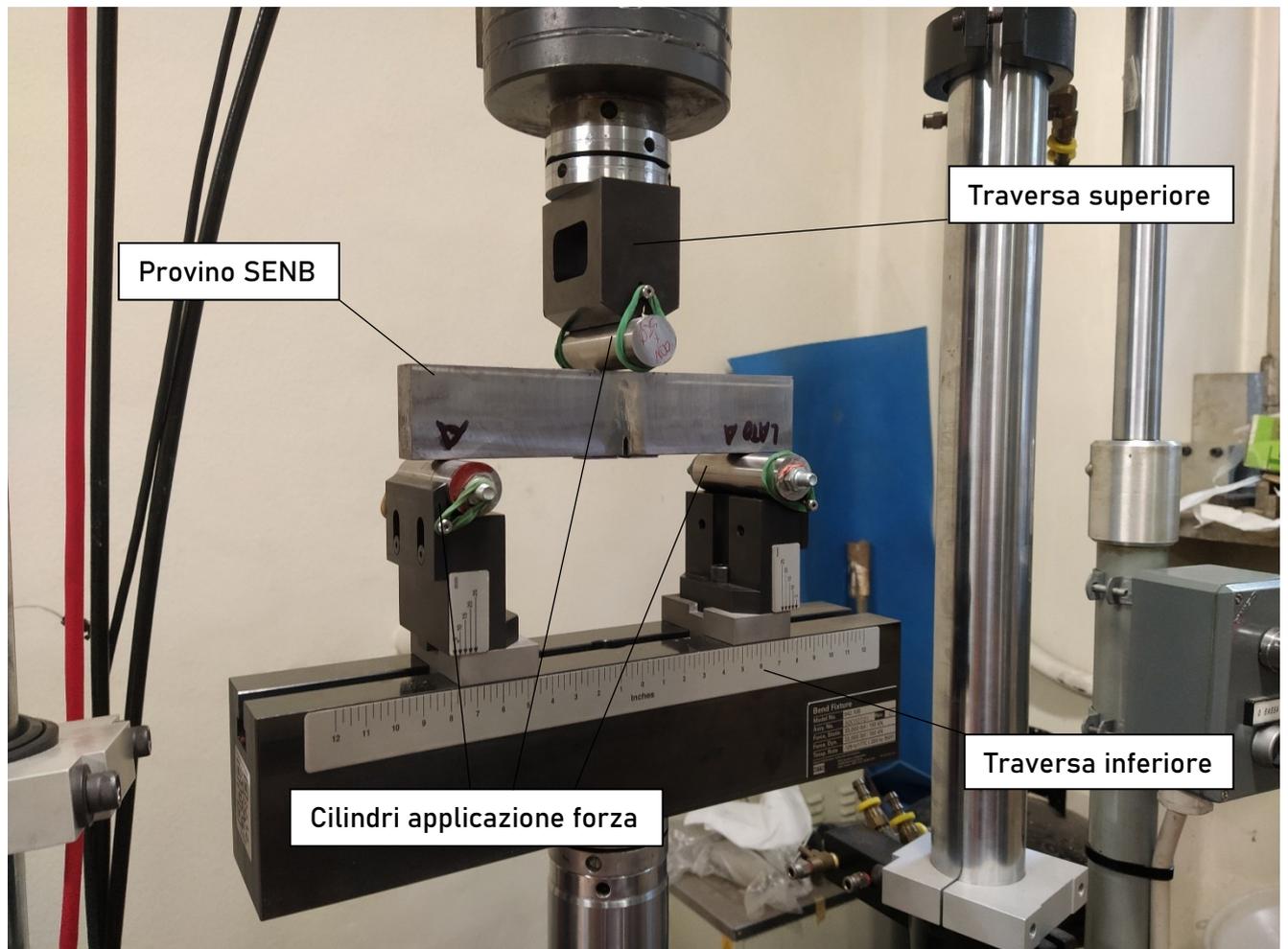


Figura 2.8 - Layout tipico di prova.

Successivamente all'applicazione del blocco di carico, è stato necessario valutare la lunghezza della cricca in modo da capire in primis il valore di K raggiunto e in secundis se ci fosse stata propagazione stabile o meno.

Per misurare la lunghezza di cricca sono state utilizzate due tecniche. La prima tecnica prevede un metodo di tipo "ottico" in cui la lunghezza di cricca viene valutata in superficie mediante l'utilizzo di un microscopio ottico dotato di tavola micrometrica.

Segnandosi le coordinate dei riferimenti da cui parte la misurazione della cricca, e aggiornando man mano le coordinate dell'apice della cricca, è possibile valutarne la lunghezza e la crescita.

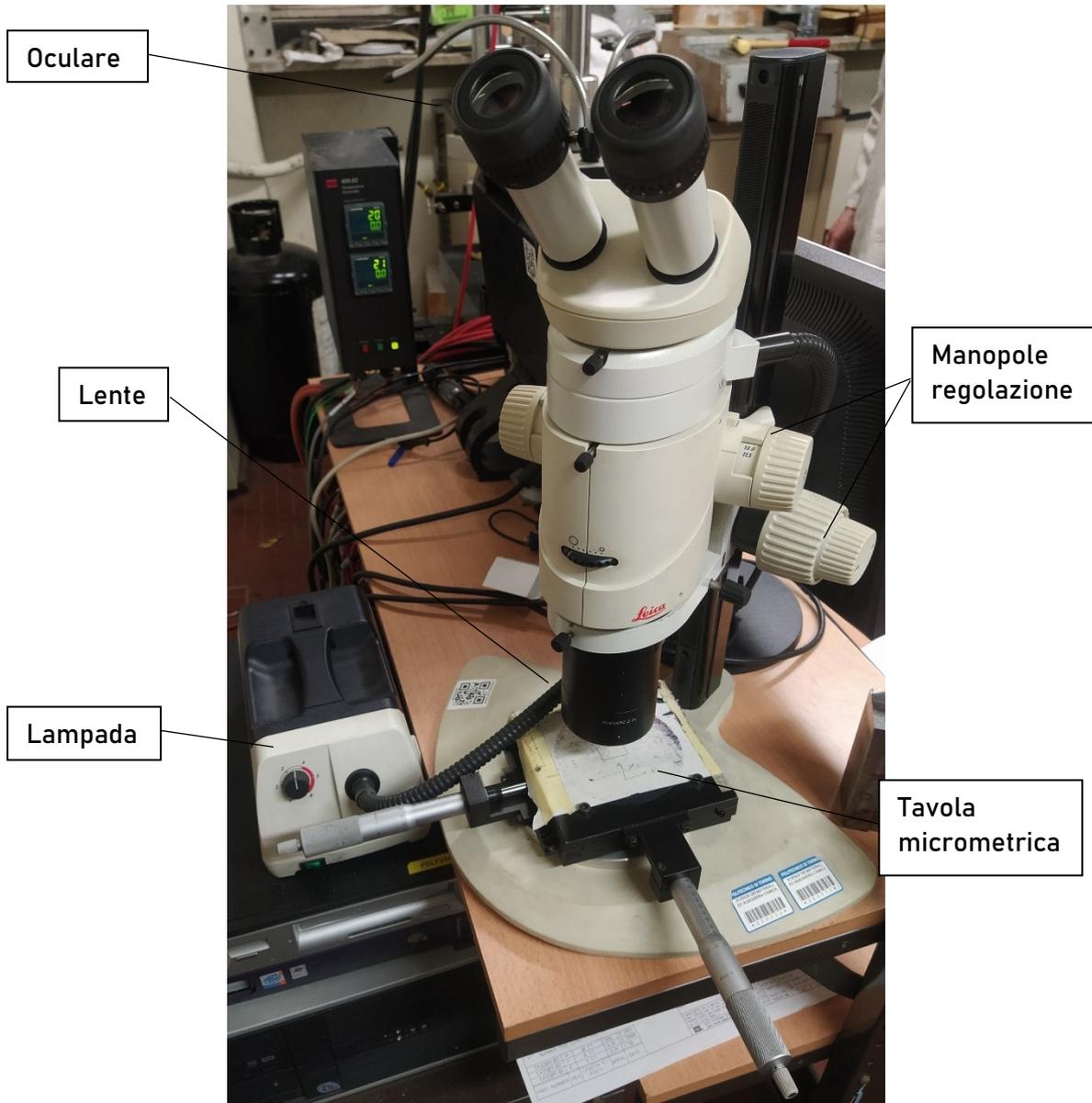


Figura 2.9 - Microscopio ottico utilizzato

Il secondo metodo utilizzato, il metodo del Potential Drop, sarà discusso nel capitolo successivo.

2.2 DESCRIZIONE PROCEDURA PER IL RAGGIUNGIMENTO ΔK_{th}

Lo *Standard Test Method for Measurements of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM E647^[4], descrive come determinare da/dN in funzione di ΔK attraverso procedure sperimentali.

La cricca cresce attraverso carichi ciclici e K_{min} , K_{max} e la lunghezza di cricca sono monitorati durante i test. La normativa prevede che il comportamento del materiale durante il test sia predominantemente elastico; questo richiede che il legamento residuo risulti essere:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Dove:

- W è l'altezza del provino pari a 45mm.
- a è la lunghezza della cricca raggiunta a fine prova.
- K_{max} è il massimo valore del fattore di intensificazione degli sforzi raggiunto durante l'ultimo set di carico.
- σ_{SN} è il valore del carico di snervamento del materiale pari a 730 MPa.

Non sono richieste particolari specifiche sullo spessore del campione.

Questa procedura è spesso applicata su fogli sottili di leghe per applicazioni aerospaziali.

Tuttavia, i parametri a fatica del materiale possono esserlo, quindi è necessario che lo spessore del provino sia uguale a quello del componente d'interesse.

Tutti i campioni devono essere precriccati; il K_{max} alla fine della procedura di fatica non deve essere maggiore del K_{max} a inizio procedura in modo da non innescare effetti di ritardo che influenzerebbero la velocità di crescita della cricca.

Durante il test la lunghezza di cricca deve essere misurata periodicamente. Le metodologie di misura possono essere quella ottica, cedevolezza e il metodo del potential drop.

L'ASTM Standard E647^[4] sottolinea due tipi di test a fatica:

- Test ad ampiezza di carico costante dove K incrementa.
- Test a K decrescente.

Nel secondo caso l'ampiezza di carico decresce per ottenere un K decrescente.

La procedura a K crescente si adatta se si vuole andare a misurare lunghezze di cricca maggiori di 10^{-8} m/ciclo.

Nel caso di lavoro, volendo invece andare ad analizzare il comportamento vicino al valore di soglia si è usata la seconda procedura. Di solito in una procedura a K decrescente è mantenuto costante o il K_{max} o il rapporto di carico R , mentre ΔK decresce. I due approcci tuttavia portano a risultati diversi, a causa del diverso comportamento del materiale al variar di R specie nella zona di soglia. A causa degli effetti di ritardo che potrebbero potenzialmente innescarsi, ASTM E647^[4] prevede che il gradiente di K sia riportato come segue:

$$G = \frac{1}{K_{max}} \frac{dK_{max}}{da}$$

La procedura a K decrescente è più propensa a creare effetti di ritardo perché i cicli precedenti hanno prodotto zone plastiche più ampie che possono ritardare la lunghezza di cricca.

La normativa ASTM^[4] raccomanda che G sia più grande di 0.08 mm^{-1} in un test a K -decrescente.

Tuttavia, è anche previsto che il carico massimo non possa decrescere di una quantità maggiore del 10% del carico massimo precedentemente applicato. È consigliato inoltre un avanzamento $\Delta a_{min}=0.5\text{mm}$.

Successivamente il carico decrescerà fino a quando il valore da/dN non raggiunge il valore di 10^{-10} m/ciclo o inferiore.

Ciò che prevede la norma è per la ricerca di ogni punto sul ginocchio della curva di Paris e per una corretta caratterizzazione del tratto lineare. Essendo lo scopo di questo lavoro di tesi raggiungere e caratterizzare quale sia il valore di soglia di propagazione al variare di R , spesso la curva teorica si scosterà un poco da quella reale; questo comunque non invalida le prove e i risultati ottenuti.

2.3 RISULTATI OTTENUTI

2.3.1 PROVINO 342-2 – R=0,5

Il primo test è stato condotto sul provino denominato “342-2”. Il provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Inizialmente quindi è stato valutato se i dati a disposizione, specie quelli sulla lunghezza di cricca, sul carico applicato e su che K si generasse nel provino fossero corretti.

Verificato ciò, il test è proceduto come secondo quanto indicato dalla normativa. È stata usata la tecnica a K decrescente, la quale si presta meglio nel descrivere il comportamento del materiale vicino alla soglia. Il rapporto di carico R è stato mantenuto costante e pari a 0,5.

Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	ΔK_N [MPa · \sqrt{m}]	a_N [mm]	P_{min} [kN]	P_{max} [kN]	ΔP [kN]	a_{eff} [mm]	N	ΔK [MPa · \sqrt{m}]	da/dN $\frac{m}{ciclo}$
1	19,7058	26,18	-5,90	-11,80	-5,90	26,190	3000	19,36	8,67E-08
2	18,9331	26,56	-5,64	-11,27	-5,64	26,580	4000	19,018	9,75E-08
3	18,1907	26,99	-5,35	-10,69	-5,35	27,020	5000	18,68	8,80E-08
4	17,4775	27,46	-4,93	-9,86	-4,93	27,400	4300	17,85	8,84E-08
5	16,7922	27,95	-4,40	-8,80	-4,40	27,490	3500	16,26	2,57E-08
6	16,1337	28,44	-4,00	-8,00	-4,00	27,580	8000	14,91	1,13E-08
7	15,5011	28,93	-3,60	-7,20	-3,60	27,680	15000	13,53	6,67E-09
8	14,8933	29,43	-3,24	-6,48	-3,24	27,850	30000	12,24	5,67E-09
9	14,3093	29,93	-2,92	-5,83	-2,92	28,07	40200	11,28	5,47E-09
10	13,7483	30,43	-2,67	-5,34	-2,67	28,11	29000	10,45	1,38E-09
11	13,2092	30,93	-2,67	-5,34	-2,67	28,72	20000	10,76	3,05E-08
12	12,6912	31,43	-2,40	-4,80	-2,40	28,83	80000	10	1,37E-09
13	12,1936	31,93	-2,00	-4,00	-2,00	29,36	290000	8,59	1,83E-09
14	11,7155	32,43	-1,70	-3,40	-1,70	29,82	100000	7,67	4,60E-09
15	11,2561	32,93	-1,50	-3,00	-1,50	29,92	100000	6,96	1,00E-09
16	10,8148	33,43	-1,35	-2,70	-1,35	30,42	200000	6,45	2,50E-09
17	10,3907	33,93	-1,22	-2,44	-1,22	30,44	1000000	6	1,00E-12

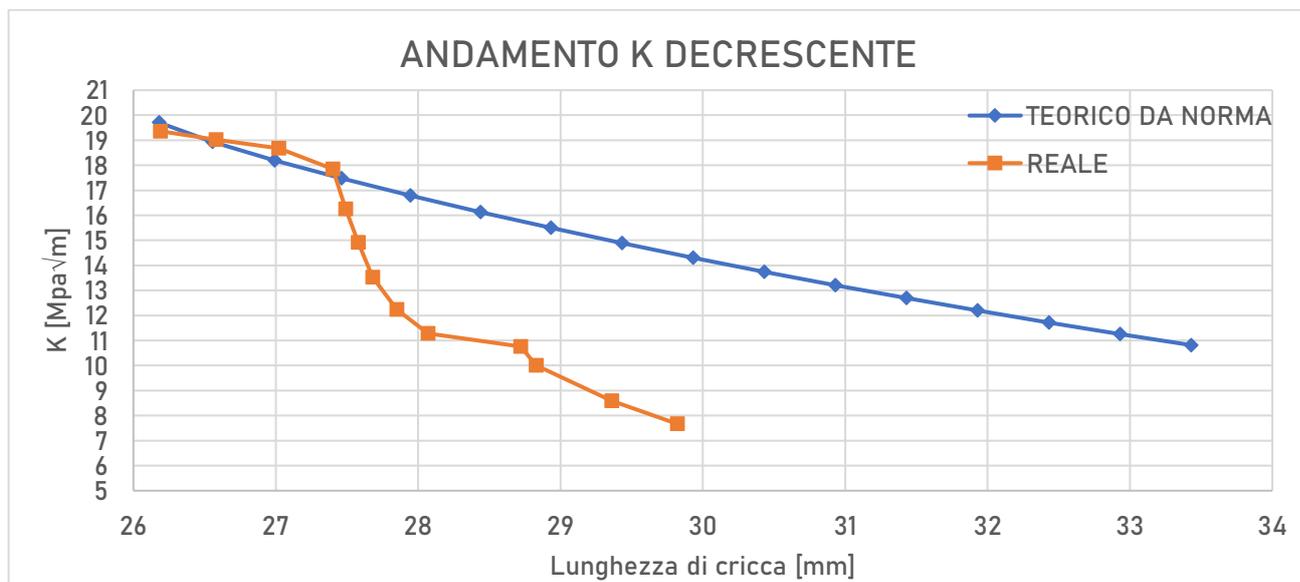
Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la seguente formula, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

$$\Delta K_N = \Delta K_o \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_o)]}$$

Dove:

- ΔK_o è il valore di ΔK finale ottenuto nella fase di precricatura.
- C è il gradiente di decrescita del ΔK . In questo caso $C = -0.08 \text{ mm}^{-1}$.
- a_f è la lunghezza finale di cricca che si vuole ottenere, in questo caso è stata considerata la crescita minima prevista da normativa pari a 0,5 mm.
- a_o è la lunghezza di cricca allo slot di carico precedente.
- ΔK_N corrisponde al valore di ΔK che si deve realizzare affinché si abbia un gradiente di decrescita C pari al valore scelto.

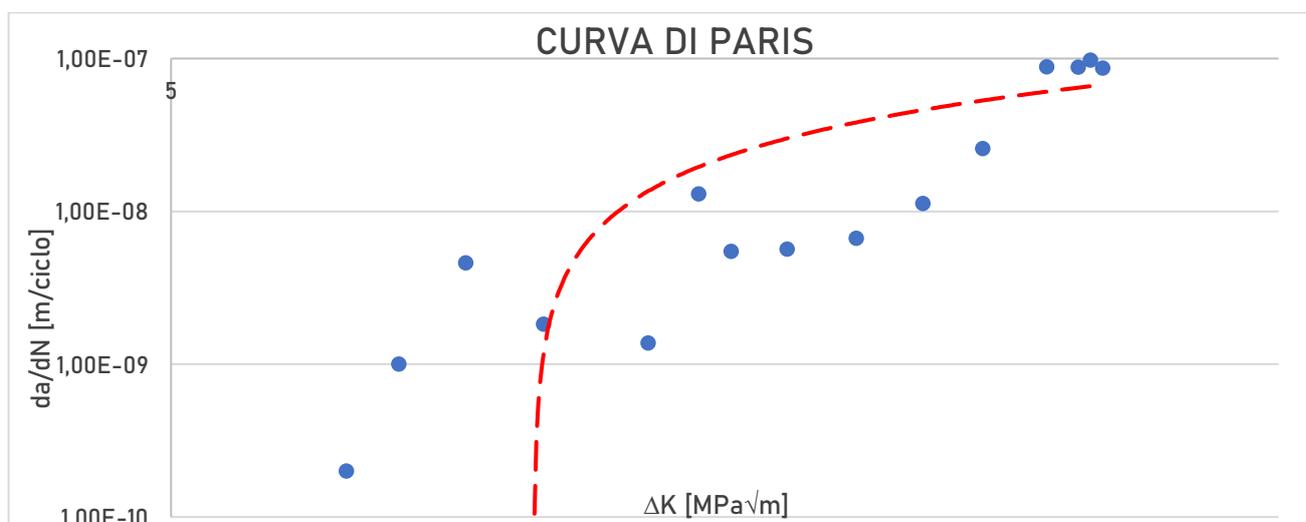
Qui di seguito è riportata una versione grafica dei risultati riportati nella tabella precedente.



Come si può notare inizialmente la curva teorica (curva blu) è stata seguita dal materiale (curva arancione), dopo di che, a causa dell'entrata del materiale nella **Regione 1**, K è crollato e la lunghezza di cricca invece è cresciuta di molto poco per ogni set di carico.

Tra il blocco 10 e quello 11 si può notare un lieve incremento del K. Probabilmente in questa fase si sono innescati degli effetti di ritardo che ci hanno portato a pensare che la cricca non avesse propagato a sufficienza, decidendo quindi di mantenere il carico costante per il blocco successivo al fine di ottenere un incremento della lunghezza di cricca minimo di 0,5 mm ma ottenendo un incremento ben più grande.

Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



In blu sono riportati i valori di da/dN ottenuti sperimentalmente, in rosso invece è riportata la linea di tendenza di tali valori. Come si nota tale curva descrive un ginocchio tipico della **Regione 1**.

Il numero dei cicli da eseguire al fine di ottenere la crescita di cricca minima prevista è stato previsto usando la formula di Paris. Le costanti del materiale sono state trovate mediante regressione lineare dei dati ottenuti durante la fase di precricatura. I risultati ottenuti sono:

- $C = 2,48 \cdot 10^{-12} \frac{MPa}{\sqrt{m}} \cdot ciclo$
- $m = 3,48$

La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è :

$$\Delta K_{th} = 6 MPa \cdot \sqrt{m}$$

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 30,44) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{12}{730} \right)^2$$
$$14,56 \geq 0,344$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.3.2 PROVINO 342-1 – R=0,2

Il secondo test è stato condotto sul provino denominato “342-2”. Anche questo provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Analogamente a quanto fatto per il “342-1” è stata verificata la veridicità dei dati a disposizione e seguita la storia di carico a K decrescente.

Il rapporto di carico R, in questo caso, è stato mantenuto costante e pari a 0,2.

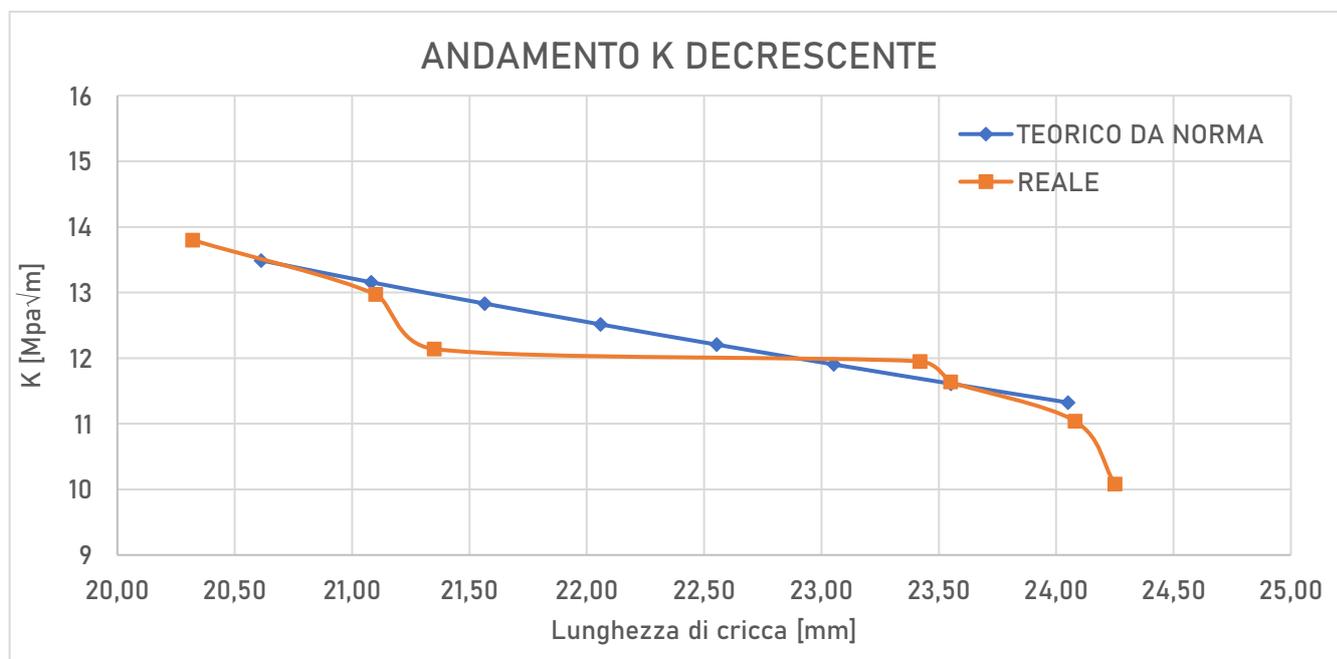
Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	ΔK_N [MPa · \sqrt{m}]	aN[mm]	P _{min} [kN]	P _{max} [kN]	ΔP [kN]	a _{eff} [mm]	N	ΔK [MPa · \sqrt{m}]	da/dN $\frac{m}{ciclo}$
1	13,1563	21,08	-8,100	-1,620	6,480	20,320	70000	13,8	3,86E-09
2	12,8315	21,57	-7,300	-1,460	5,840	21,100	150000	12,97	5,20E-09
3	12,5147	22,06	-6,600	-1,320	5,280	21,350	80000	12,14	3,13E-09
4	12,2057	22,55	-6,000	-1,200	4,800	23,420	450000	11,95	4,60E-09
5	11,9043	23,05	-5,400	-1,080	4,320	23,550	200000	11,64	6,50E-10
6	11,6104	23,55	-5,000	-1,000	4,000	24,08	200000	11,04	2,65E-09
7	11,3238	24,05	-4,5	-0,900	3,600	24,25	1000000	10,08	1E-12

Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e C che ha assunto un valore pari a 0,05 mm⁻¹.

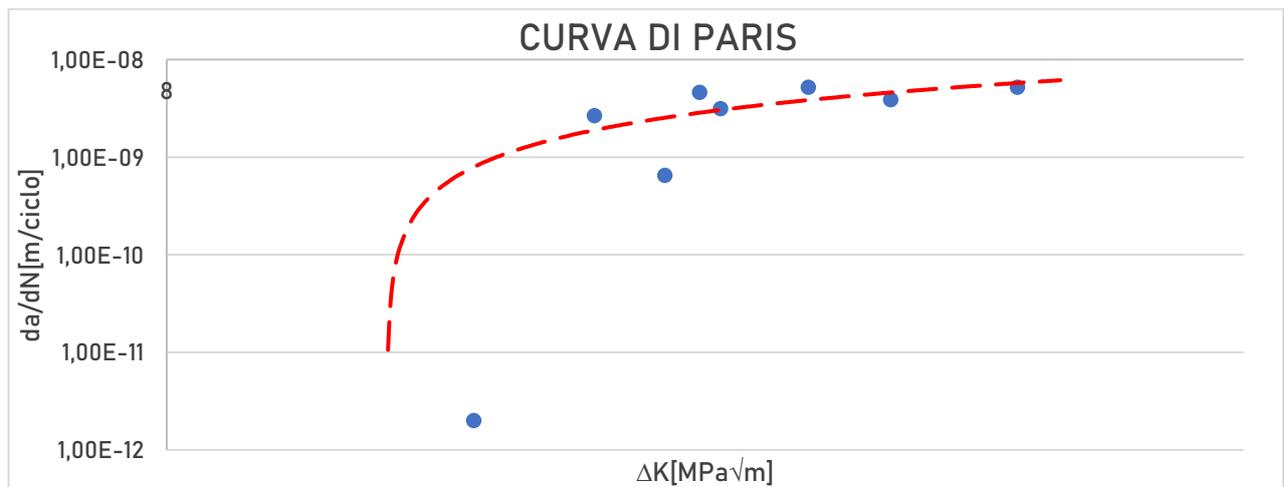


In questo caso il provino ha effettivamente seguito molto meglio che nel caso precedente la curva prescritta da normativa. Tuttavia, c'è da notare che tra il blocco 3 e il blocco 4 la cricca ha subito un notevole allungamento (2mm) ma con un ΔK circa costante.

Questo fenomeno è probabilmente avvenuto poiché in questa fase parte di cricca ha propagato sottopelle, non permettendo la sua visualizzazione in superficie (in questa fase le misure sono state fatte con il metodo ottico tradizionale, tramite un microscopio e una tavola micrometrica). Questo ha portato ad una stima dei cicli necessari per l'avanzamento fallace, dettata da una sottostima della lunghezza di cricca e portando ad una sovrastima di questi ultimi.

Una ulteriore possibilità è che si siano innescati dei fenomeni di ritardo, che quindi inizialmente abbiano rallentato la cricca portando a pensare che fosse ferma e alla sovrastima dei cicli necessari per la propagazione.

Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



In blu sono riportati i valori di da/dN ottenuti sperimentalmente, in rosso invece è riportata la linea di tendenza di tali valori. Come si nota tale curva descrive un ginocchio tipico della **Regione 1**.

La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo]. Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è:

$$\Delta K_{th} = 10,06 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 24) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{12,6}{730} \right)^2$$

$$21 \geq 0,379$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.3.3 PROVINO 336-2 – R=0,1

Il terzo test è stato condotto sul provino denominato “336-2”. Anche questo provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Analogamente a quanto fatto per i precedenti provini è stata verificata la veridicità dei dati a disposizione e seguita la storia di carico a K decrescente.

Il rapporto di carico R, in questo caso, è stato mantenuto costante e pari a 0,1.

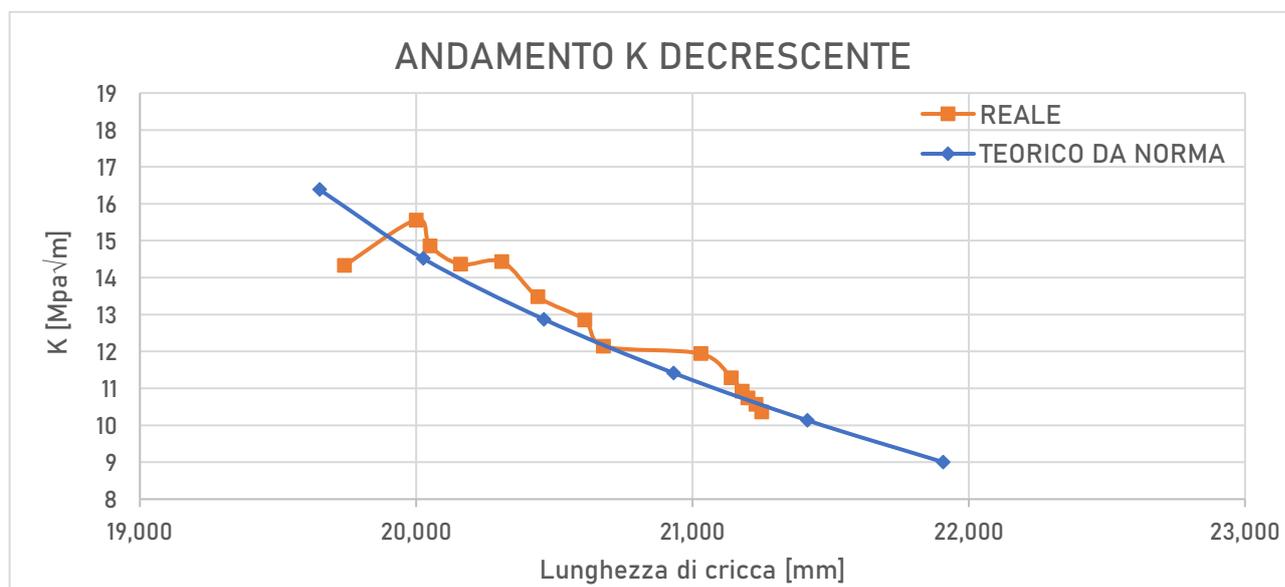
Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	$\Delta K_N [MPa \cdot \sqrt{m}]$	$a_N [mm]$	$P_{min} [kN]$	$P_{max} [kN]$	$\Delta P [kN]$	$a_{eff} [mm]$	N	$\Delta K [MPa \cdot \sqrt{m}]$	$da/dN \frac{m}{ciclo}$
1	14,4744	19,48	-12,600	-5,000	7,600	19,740	5000	14,33	1,02E-07
2	14,0614	19,86	-11,340	-4,000	7,340	20,000	15000	15,56	1,73E-08
3	13,6606	20,29	-10,000	-3,000	7,000	20,050	10000	14,86	5,00E-09
4	13,2717	20,76	-9,000	-2,000	7,000	20,160	20000	14,36	5,50E-09
5	12,8942	21,25	-8,000	-1,300	6,700	20,310	40000	14,43	3,75E-09
6	12,5279	21,74	-7,200	-1,000	6,200	20,440	60000	13,48	2,17E-09
7	12,1724	22,23	-6,500	-0,650	5,850	20,610	100000	12,85	1,70E-09
8	11,8274	22,73	-6,100	-0,610	5,490	20,678	100000	12,14	6,80E-10
9	11,4927	23,23	-5,900	-0,590	5,310	21,03	200000	11,94	1,76E-09
10	11,1678	23,73	-5,5	-0,550	4,950	21,14	200000	11,29	5,50E-10
11	10,8525	24,23	-5,3	-0,530	4,770	21,18	700000	10,92	5,71E-11
12	10,5465	24,73	-5,2	-0,520	4,680	21,2	300000	10,74	6,67E-11
13	10,2496	25,23	-5,1	-0,510	4,590	21,23	300000	10,564	1,00E-10
14	9,96147	25,73	-5	-0,500	4,500	21,25	1000000	10,36	1,00E-12

Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

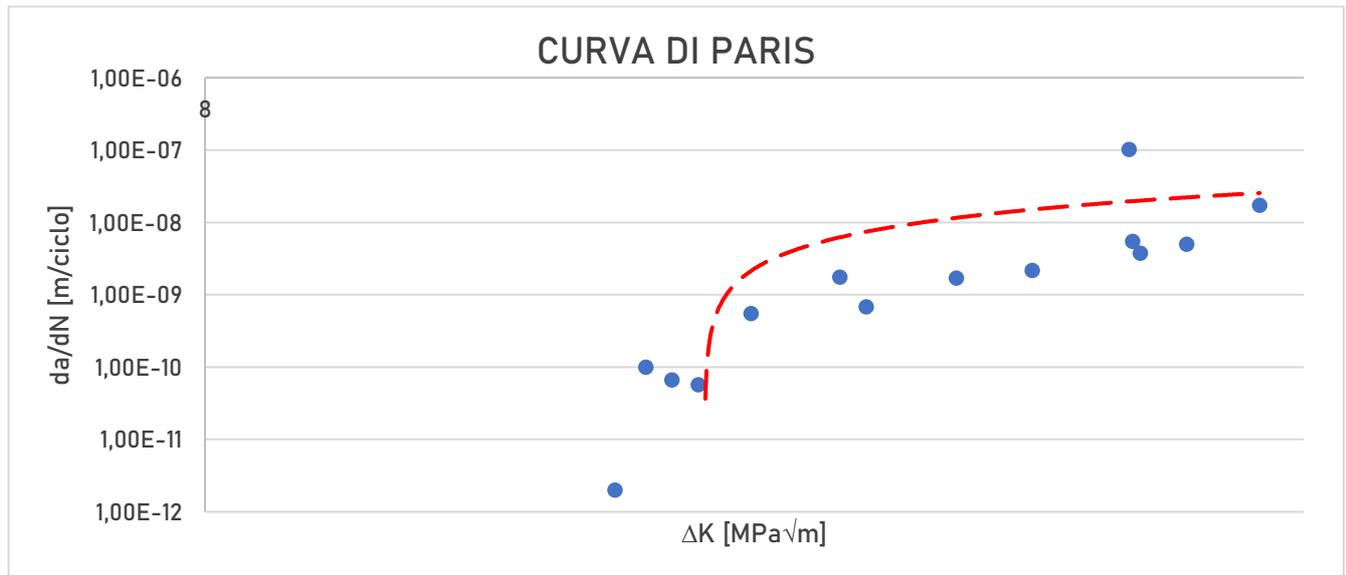
$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e C che ha assunto un valore pari a $0,08 \text{ mm}^{-1}$.



Inizialmente la prova è stata condotta con R via via decrescenti poiché il rapporto di carico in fase di precricatura era 0,5, troppo distante da quello obiettivo pari a 0,1. Al fine di limitare i transitori dovuti ai fenomeni di ritardo è stata quindi scelta questa procedura. Dopo 6 blocchi, il rapporto di carico è stato portato effettivamente a 0,1.

Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



In blu sono riportati i valori di da/dN ottenuti sperimentalmente, in rosso invece è riportata la linea di tendenza di tali valori. Come si nota tale curva descrive un ginocchio tipico della **Regione 1**.

La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è:

$$\Delta K_{th} = 10,36 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 21,25) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{11,52}{730} \right)^2$$

$$23,75 \geq 0,3215$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.3.4 PROVINO 291-1 – R=0,85

Il quarto test è stato condotto sul provino denominato “291-1”. Anche questo provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Analogamente a quanto fatto per i precedenti provini è stata verificata la veridicità dei dati a disposizione e seguita la storia di carico a K decrescente.

Il rapporto di carico R, in questo caso, è stato variato progressivamente da R=0,5 sino a 0,85; è stato invece mantenuto costante il valore di K_{max} , pari a 20MPa√m, per evitare fenomeni di ritardo.

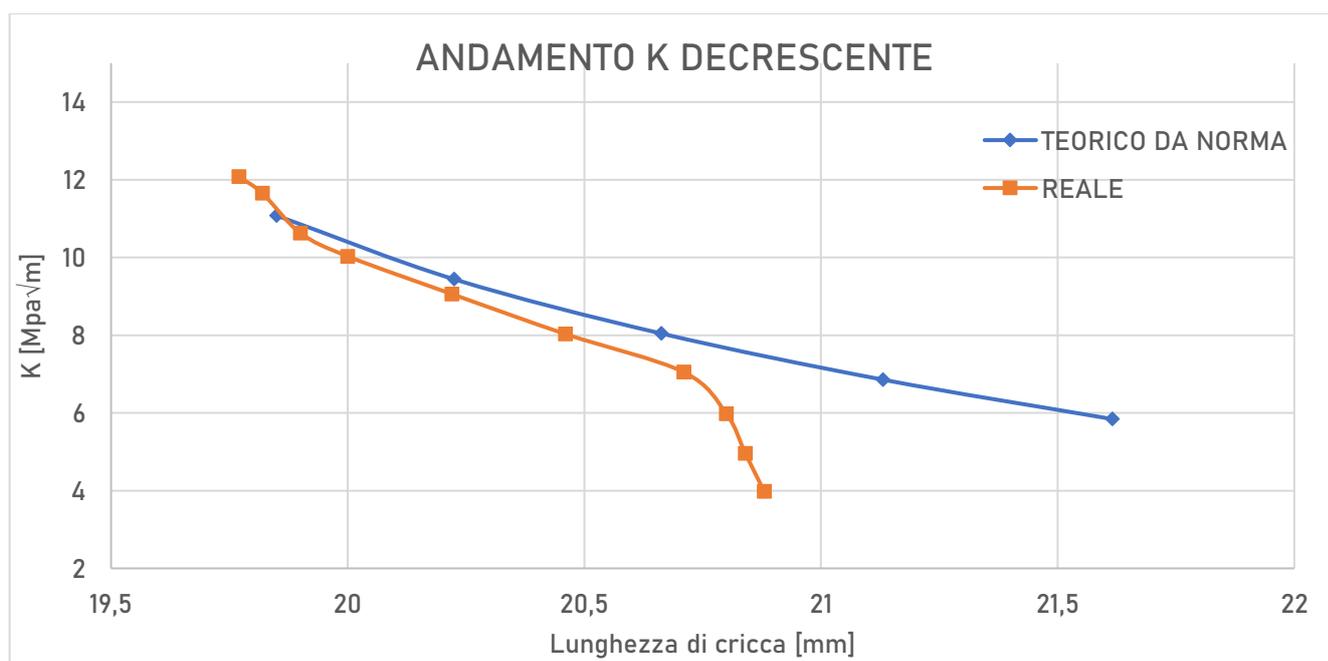
Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	ΔK_N [MPa · √m]	a_N [mm]	P_{min} [kN]	P_{max} [kN]	ΔP [kN]	a_{eff} [mm]	N	ΔK [MPa · √m]	da/dN $\frac{m}{ciclo}$
1	11,0779	19,85	-12,600	6,300	18,900	19,770	10000	13,08	1,70E-08
2	9,43994	20,23	-11,300	-5,650	5,650	19,820	20000	11,65	2,50E-09
3	8,04418	20,66	-10,200	-5,100	5,100	19,900	40000	10,63	2,00E-09
4	6,8548	21,13	-9,500	-4,750	4,750	20,000	30000	10,03	3,33E-09
5	5,84128	21,62	-9,440	-5,192	4,248	20,220	40000	9,06	5,50E-09
6	4,97761	22,11	-9,250	-5,550	3,700	20,460	80000	8,03	3,00E-09
7	4,24164	22,60	-9,150	-5,948	3,203	20,710	100000	7,05	2,50E-09
8	3,61448	23,10	-8,950	-6,265	2,685	20,800	100000	5,98	9,00E-10
9	3,08006	23,60	-8,880	-6,660	2,220	20,84	150000	4,96	2,67E-10
10	2,62465	24,10	-8,88	-7,104	1,776	20,88	200000	3,98	2,00E-10
11	2,23658	24,60	-8,88	-7,548	1,332	20,89	1000000	2,989	1,00E-12

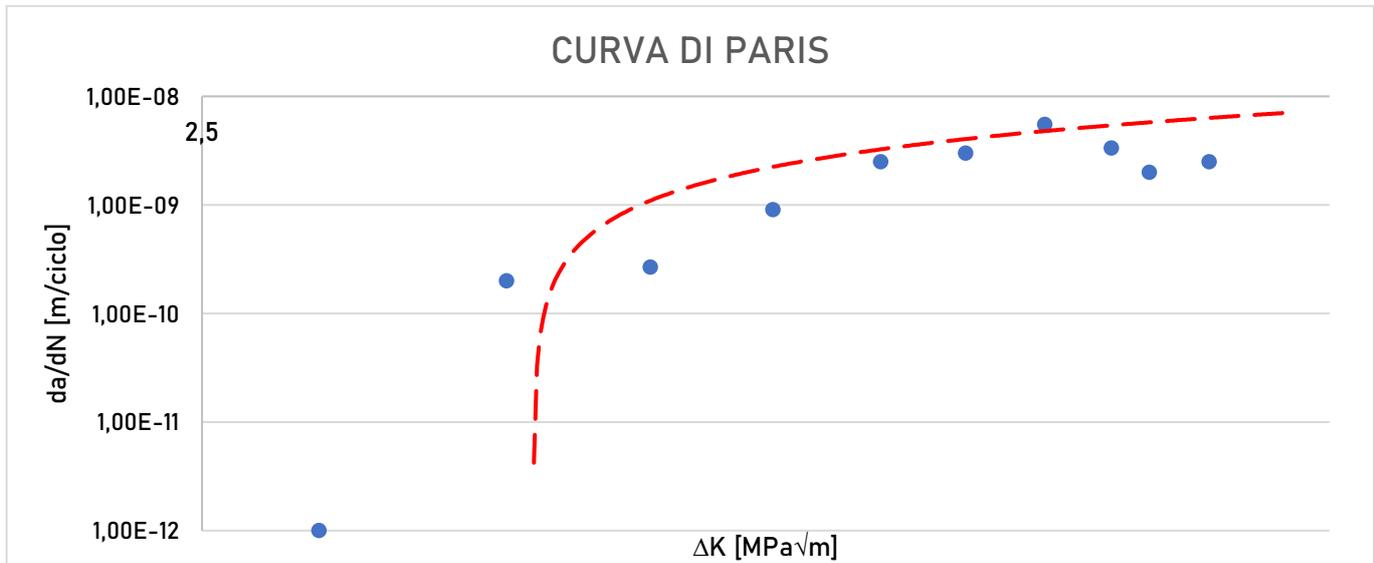
Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e C che ha assunto un valore pari a 0,08 mm⁻¹.



Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è:

$$\Delta K_{th} = 3 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Un valore di soglia così basso potrebbe essere giustificato dal fatto che, con rapporti di carico via via più alti, le facce della cricca sono sempre più distanti e i fenomeni di chiusura si verificano con una probabilità molto più bassa.

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 20,9) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{20}{730} \right)^2$$

$$24,10 \geq 0,955$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.3.5 PROVINO 291-2 – R=0,7

Il quinto test è stato condotto sul provino denominato “291-2”. Anche questo provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Analogamente a quanto fatto per i precedenti provini è stata verificata la veridicità dei dati a disposizione e seguita la storia di carico a K decrescente.

Il rapporto di carico R, in questo caso è stato mantenuto costante e pari a R=0,7.

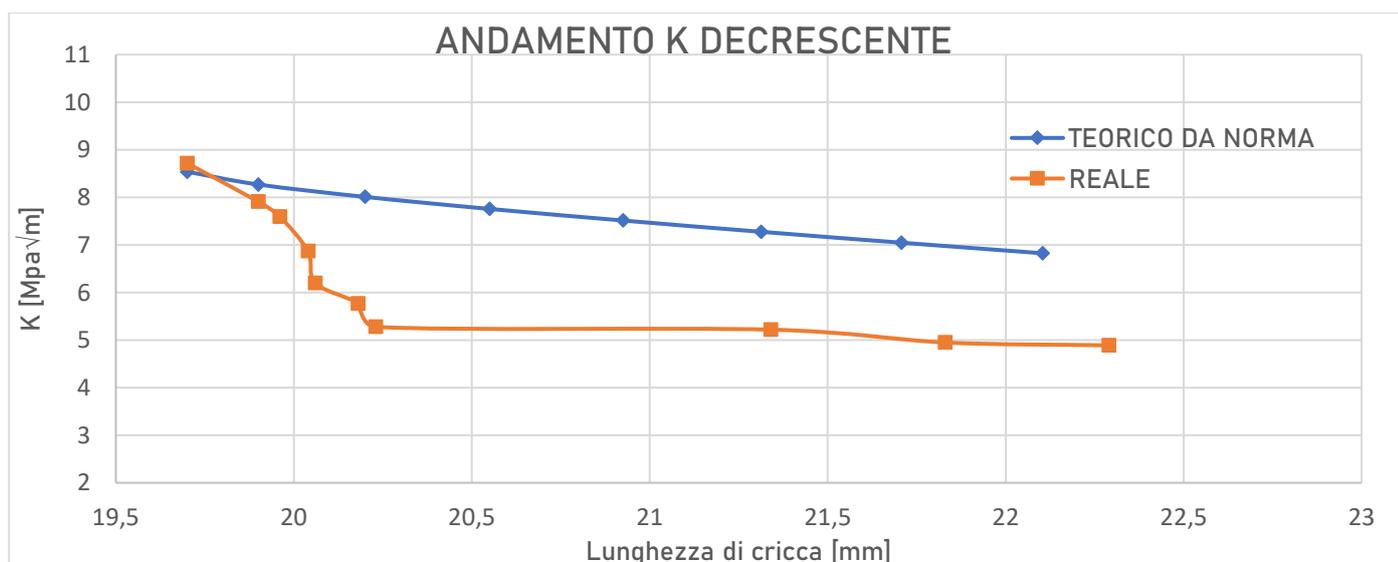
Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	ΔK_N [MPa · \sqrt{m}]	a_N [mm]	P_{min} [kN]	P_{max} [kN]	ΔP [kN]	a_{eff} [mm]	N	ΔK [MPa · \sqrt{m}]	da/dN $\frac{m}{ciclo}$
1	7,72731	19,9	-14,000	-9,800	4,200	19,700	20000	8,72	0,00E+00
2	6,99196	20,20	-12,600	-8,820	3,780	19,900	25000	7,91	8,00E-09
3	6,32659	20,55	-12,000	-8,400	3,600	19,960	50000	7,6	1,20E-09
4	5,72453	20,93	-10,800	-7,560	3,240	20,040	165000	6,87	4,85E-10
5	5,17977	21,31	-9,720	-6,804	2,916	20,060	250000	6,2	8,00E-11
6	4,68685	21,71	-9,000	-6,300	2,700	20,180	600000	5,77	2,00E-10
7	4,24084	22,10	-8,200	-5,740	2,460	20,230	1200000	5,28	4,17E-11
8	3,83727	22,50	-7,800	-5,460	2,340	21,340	5000000	5,22	2,22E-10
9	3,4721	22,90	-7,000	-4,900	2,100	21,83	800000	4,95	6,12E-10
10	3,14169	23,30	-6,7	-4,690	2,010	22,29	6000000	4,89	7,67E-11
11	2,84272	23,70	-6	-4,200	1,800	22,30	10000000	4,46	1,00E-12

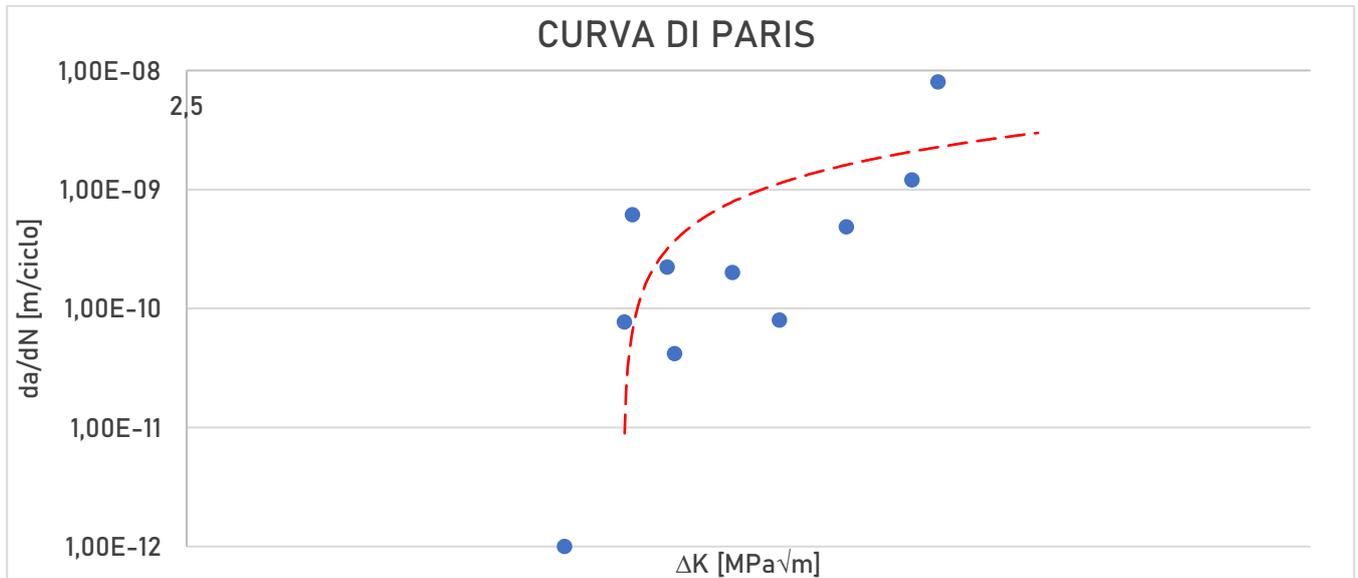
Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e C che ha assunto un valore pari a $0,08 \text{ mm}^{-1}$.



Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è:

$$\Delta K_{th} = 4,46 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

In questo caso si trova un valore di soglia leggermente più alto che nel caso precedente con $R=0,85$, compatibilmente con i dati trovati in letteratura.

Tuttavia, il valore di soglia che si trova è il secondo più basso fra tutti i provini e ciò potrebbe essere dovuto, analogamente al provino 291-1, alla minore probabilità del verificarsi di fenomeni di chiusura.

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 22,30) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{14,85}{730} \right)^2$$

$$22,7 \geq 0,5269$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.3.6 PROVINO 339-1- R=0,9

Il sesto test è stato condotto sul provino denominato "339-1". Anche questo provino risultava già precriccato e la storia di carico era nota. Analogamente a quanto fatto per i precedenti provini è stata verificata la veridicità dei dati a disposizione e seguita la storia di carico a K decrescente.

Il rapporto di carico R, in questo caso è stato mantenuto costante e pari a R=0,9.

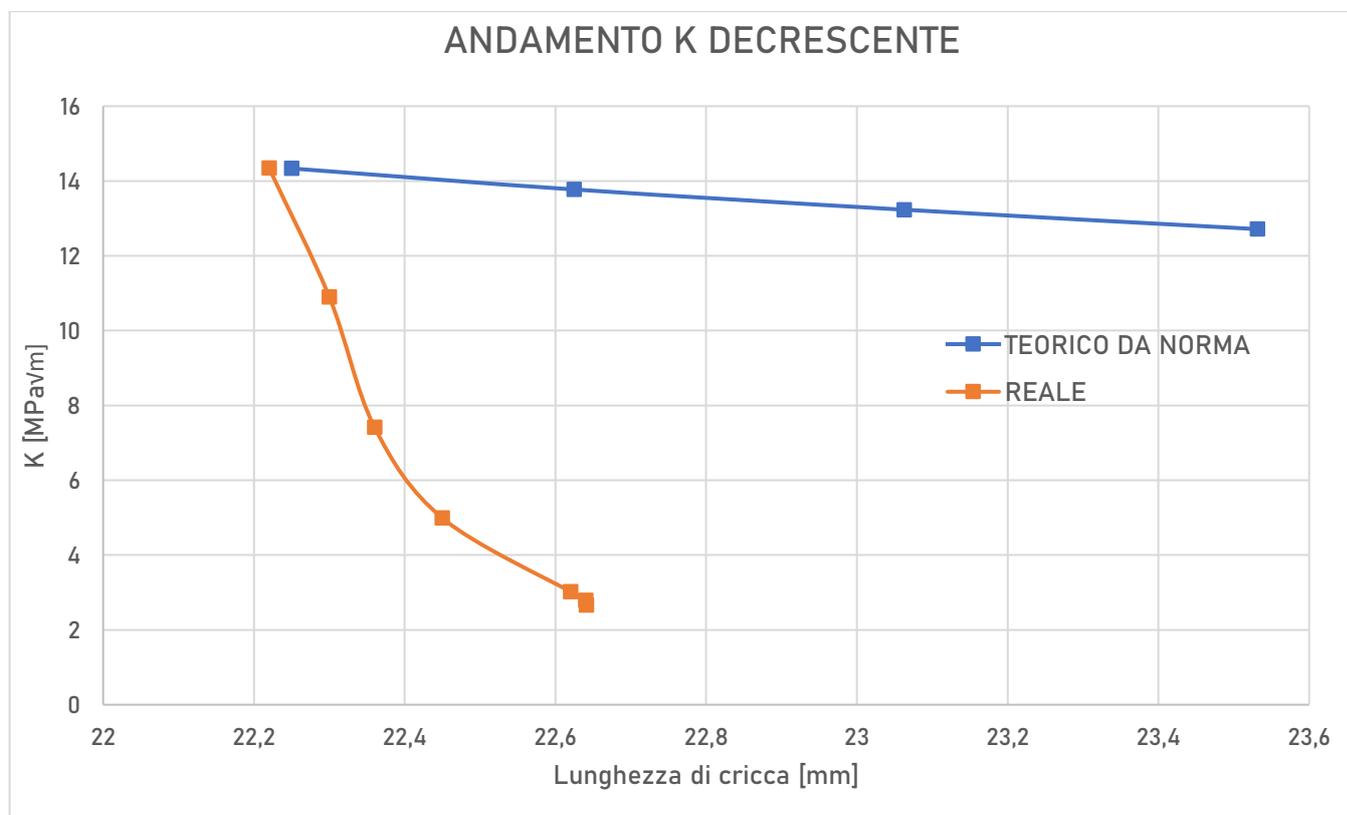
Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

Blocco	ΔK_N [MPa · \sqrt{m}]	a_N [mm]	P_{min} [kN]	P_{max} [kN]	ΔP [kN]	a_{eff} [mm]	N	ΔK [MPa · \sqrt{m}]	da/dN $\frac{m}{ciclo}$
1	14,335	22,25	-10,800	-6,500	4,300	22,22	10000	10,9	2,20E-08
2	13,7729	22,63	-10,000	-7,000	3,000	22,36	90000	7,42	1,56E-09
3	13,2329	23,06	-10,000	-8,000	2,000	22,45	100000	4,99	9,00E-10
4	12,714	23,53	-12,000	-10,80	1,200	22,62	100000	3,02	1,70E-09
5	12,2155	24,02	-11,000	-9,900	1,100	22,64	50000	2,79	4,00E-10
6	11,7365	24,51	-10,500	-9,500	1,000	22,64	10000000	2,66	1,00E-13

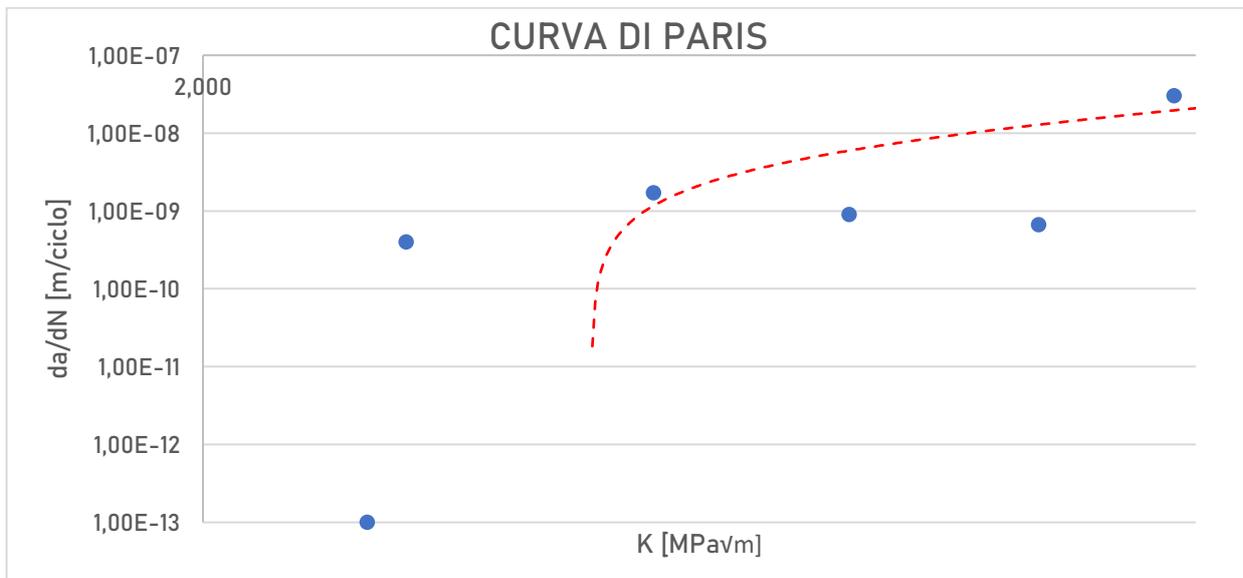
Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e C che ha assunto un valore pari a 0.08 mm^{-1} .



Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-13}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato è:

$$\Delta K_{th} = 2,66 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

In questo caso si trova un valore di soglia leggermente più basso che nel caso a R=0,85. Questo materiale quindi, a differenza di ciò che si ritrova in letteratura, ha un valore di soglia sempre decrescente all'aumentare di R.

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disequaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

$$(45 - 22,64) \geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{26,16}{730} \right)^2$$

$$22,36 \geq 1,635$$

La disequaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida

2.3.7 PROVINO 315-1 E 339-2 – R=0,30

Per questo rapporto di carico la ricerca del valore di soglia è stata più ardua. Infatti, il primo provino sottoposto a rapporti di carico R=0,30, il 339-2, messo a lavorare una intera notte a quello che si pensava essere il suo valore di soglia, pari a **8,2 MPavm**, al mattino seguente fu trovato così:

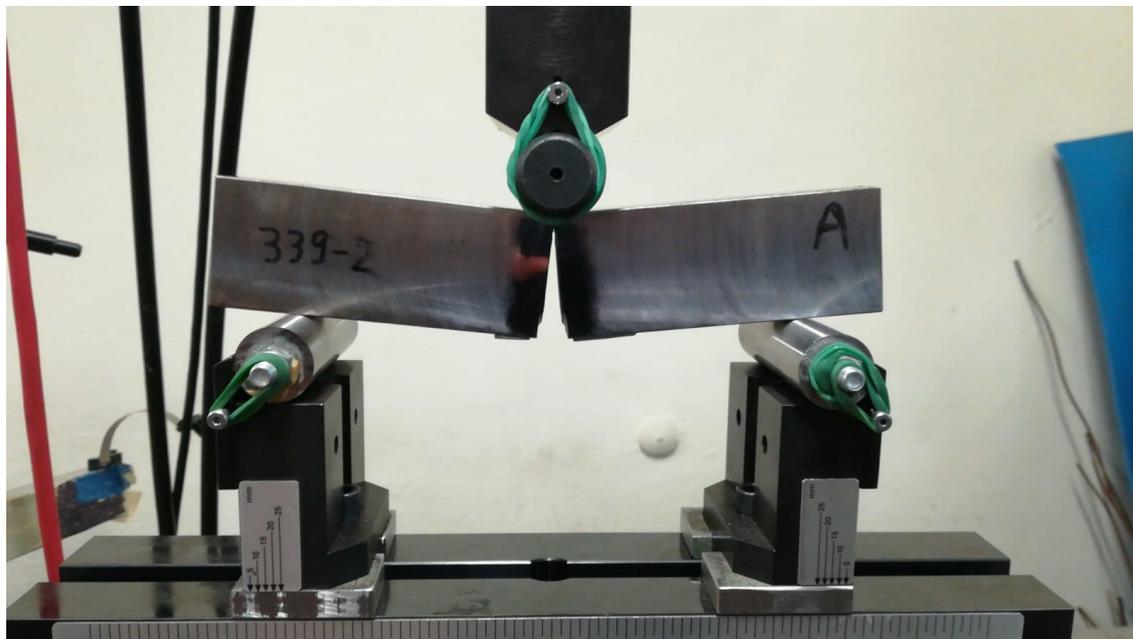


Figura 2.10- Provino 339-2 rotto, ceduto per fatica durante la notte.

L'ipotesi più probabile di tale fenomeno è un mal funzionamento del macchinario. Se infatti il ciclo di carico avrebbe dovuto avere come carico massimo 5 kN, il software di gestione durante la notte ha registrato un carico massimo di 12 kN.

La cricca tuttavia, nonostante questo inconveniente, non propagava da 4 milioni di cicli secondo il metodo ottico, quindi il valore di **8,2 MPavm** era indubbiamente molto vicino alla soglia.

La **Figura 2.11** mette in evidenza la superficie di frattura del provino 339-2.

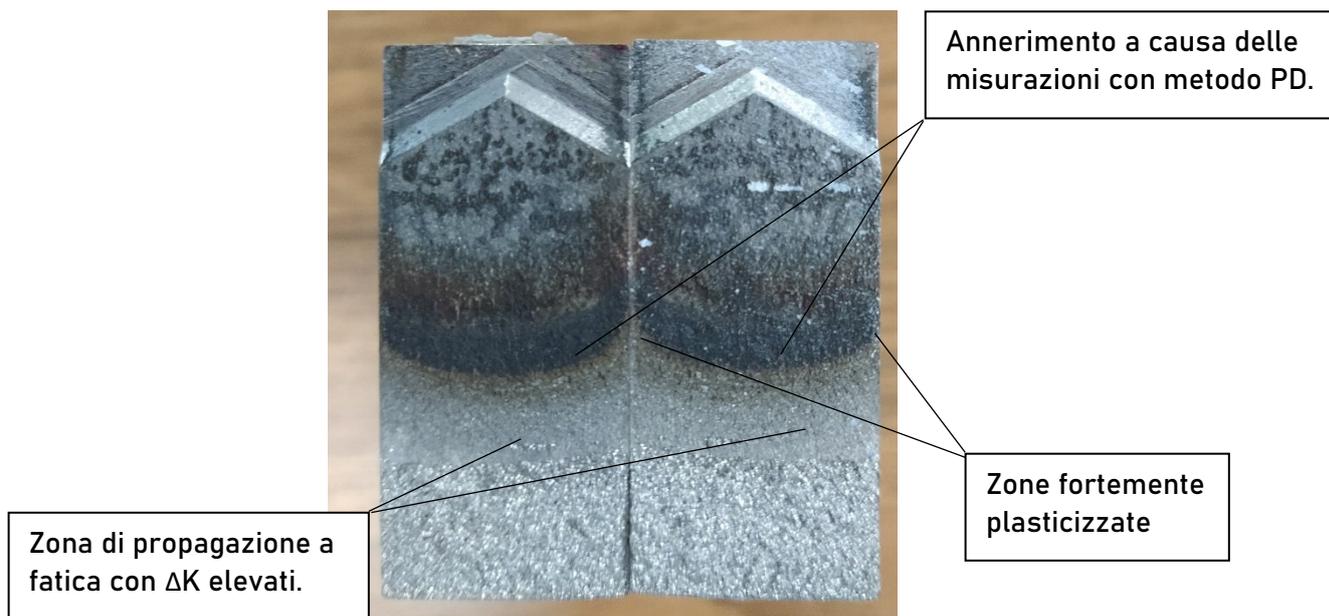


Figura 2.11 - Superficie di frattura 339-2

Guardando la **Figura 2.11**, si può notare come il metodo del Potential Drop, metodo discusso nel prossimo capitolo, annerisca le superfici, specie per un materiale come quello usato per le nostre prove la cui resistenza alla corrosione è molto bassa. A conferma dell'ipotesi di malfunzionamento della macchina ci sono due fattori. Il primo è la zona non annerita di propagazione a fatica, coerente perché durante la notte non è stata applicata corrente al provino e quindi la superficie è giusto che non si sia annerita; il secondo è la morfologia del fronte di cricca, molto arrotondato, con deformazioni plastiche evidenti in superficie, indice di un aumento repentino del carico.

Per confermare il valore di soglia del provino 339-2 si è deciso quindi di prendere il provino 315-1, altrettanto precriccato e la cui storia di carico era nota, e sottoporlo a rapporti di carico $R=0,3$ misurando la lunghezza di cricca sia con il metodo ottico, che con quello del Potential Drop.

Se inizialmente i dati sembravano essere coerenti fra i due provini, a meno di qualche minima differenza, giunti al valore di **8,2 MPavm** anche il provino 315-1 smise di registrare avanzamenti di cricca secondo il metodo ottico, ma non per il metodo del Potential Drop.

Si registrarono quindi avanzamenti di cricca solo per il metodo PD sino a valori di **K** pari a **7 MPavm**, valore per il quale la misura di potenziale sembrò essersi stabilizzata. Per la misura ottica invece la cricca non avanzò neanche di un centesimo di mm. L'ipotesi di tale scostamento fra le misure è l'entrata in gioco di fenomeni particolari e peculiari di questa lega, in particolare la facilità ad ossidarsi, e la indubbia creazione di ponti elettrici e fenomeni di microsaldatura, uniti alla presenza di fenomeni di chiusura confermati dalle analisi successive.

Qui di seguito si trova la tabella che riporta i risultati sperimentali e quelli teorici previsti da normativa:

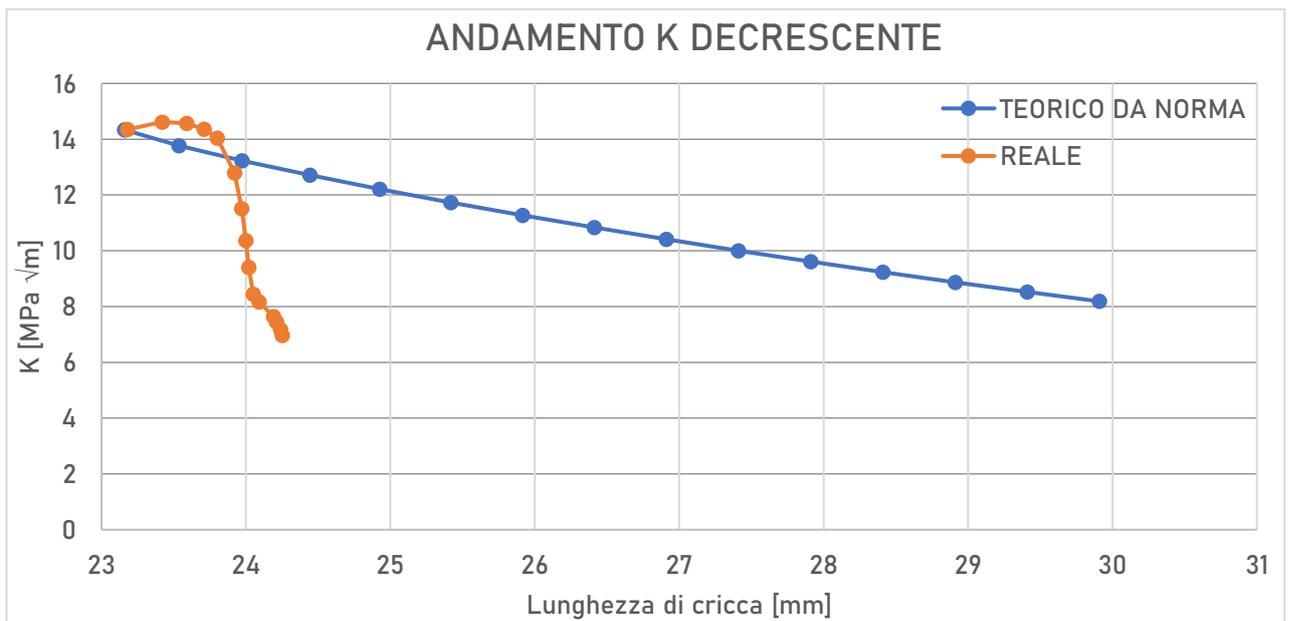
Blocco	$\Delta K_N [MPa \cdot \sqrt{m}]$	$a_N [mm]$	$P_{min} [kN]$	$P_{max} [kN]$	$\Delta P [kN]$	$a_{eff} [mm]$	N	$\Delta K [MPa \cdot \sqrt{m}]$	$da/dN \frac{m}{ciclo}$
1	14,335	23,16	-11,000	-5,500	5,500	23,18	10000,000	14,350	8,26E-07
2	13,7729	23,54	-10,000	-4,500	5,500	23,42	10000	14,62	5,10E-08
3	13,2329	23,97	-9,000	-3,600	5,400	23,59	10000	14,57	1,70E-08
4	12,714	24,44	-8,100	-2,840	5,260	23,71	10000	14,36	1,20E-08
5	12,2155	24,93	-7,300	-2,190	5,110	23,80	10000	14,04	9,00E-09
6	11,7365	25,42	-6,600	-1,980	4,620	23,92	20000	12,8	6,00E-09
7	11,2763	25,91	-5,900	-1,770	4,130	23,97	20000	11,51	2,50E-09
8	10,8341	26,41	-5,300	-1,590	3,710	24,000	30000	10,37	1,00E-09
9	10,4093	26,91	-4,800	-1,440	3,360	24,02	100000	9,41	2,00E-10
10	10,0012	27,41	-4,3	-1,290	3,010	24,05	150000	8,45	2,00E-10
11	9,60902	27,91	-4,15	-1,245	2,905	24,09	250000	8,17	1,60E-10
12	9,23225	28,41	-4	-1,200	2,800	24,19	500000	7,65	2,00E-10
13	8,87025	28,91	-3,8	-1,140	2,660	24,21	300000	7,45	6,67E-11
14	8,52244	29,41	-3,6	-1,080	2,520	24,24	250000	7,17	1,20E-10
15	8,18827	29,91	-3,5	-1,050	2,450	24,25	1000000	6,97	1,00E-12

Il valore di ΔK_N è stato ricavato con la stessa formula del provino precedente, fornita da normativa ASTM E647^[4]:

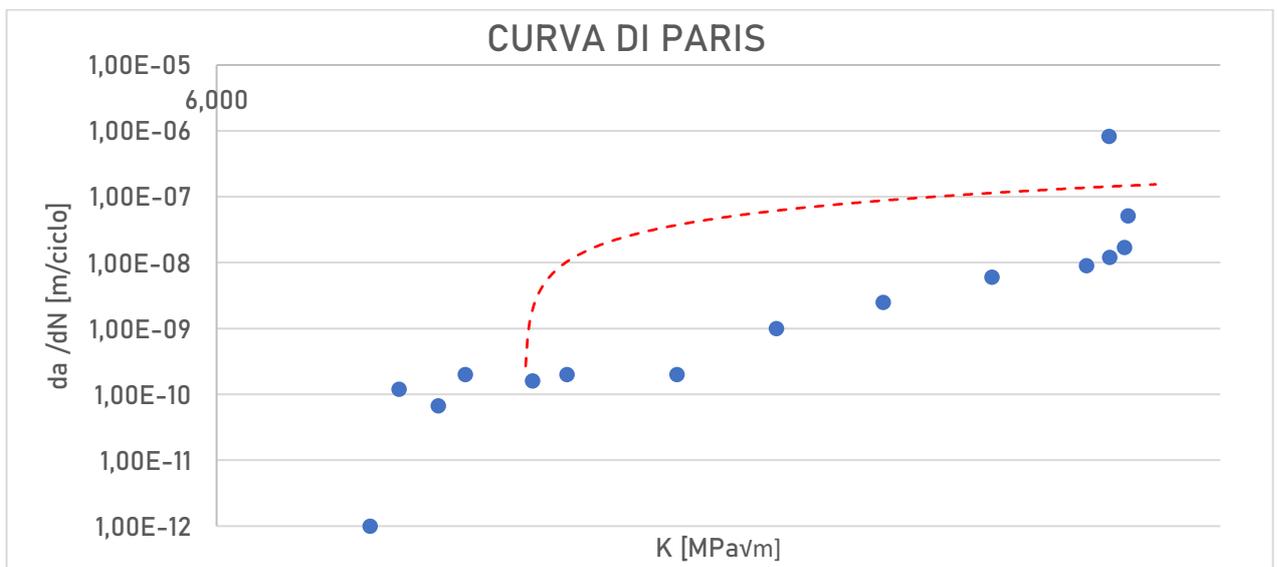
$$\Delta K_N = \Delta K_0 \cdot e^{[C \cdot (a_f - a_0)]}$$

Rispetto al provino precedente sono variati i parametri ΔK_0 e a_0 e **C** che ha assunto un valore pari a $0,08 \text{ mm}^{-1}$.

Il risultato è il seguente:



Qui di seguito è invece riportata la curva di Paris nel tratto della **Regione 1** ottenuta sperimentalmente.



La prova è stata interrotta per una velocità di crescita della cricca da/dN pari a $1 \cdot 10^{-12}$ [m/ciclo].

Con tale rapporto di carico R il valore del fattore di intensificazione degli sforzi di soglia che è stato trovato, anche in merito a ciò che è stato scritto sopra, è:

$$\Delta K_{th} = 7,6 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Valore intermedio fra ciò che è stato trovato per il fenomeno 339-2 e il valore derivante per il provino 315-1.

Per verificare che la prova sia valida è necessario sapere se il legamento residuo rispetti la disuguaglianza:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

Nel caso del provino in esame risulta:

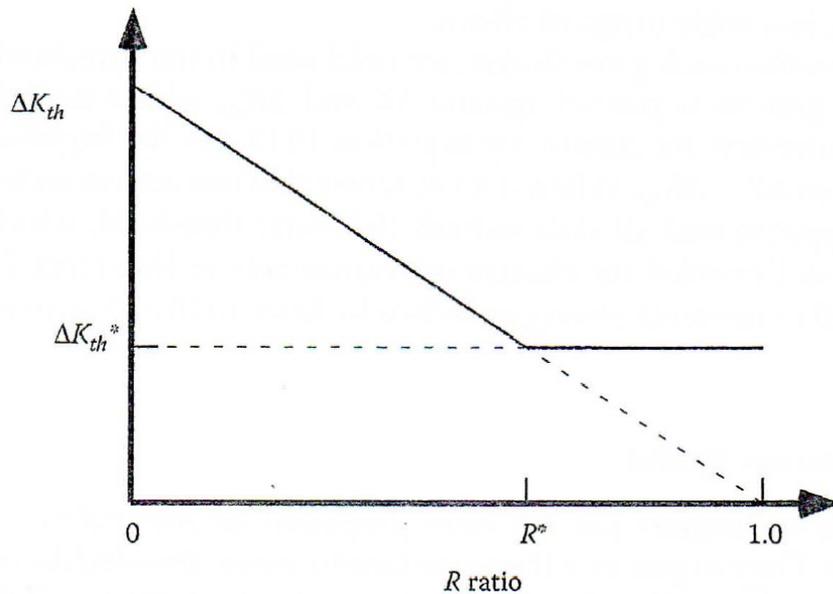
$$\begin{aligned} (45 - 24,25) &\geq 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{9,98}{730} \right)^2 \\ 20,75 &\geq 0,2379 \end{aligned}$$

La disuguaglianza risulta quindi verificata, di conseguenza la prova è da ritenersi valida.

2.4 CORRELAZIONE R - ΔK_{th}

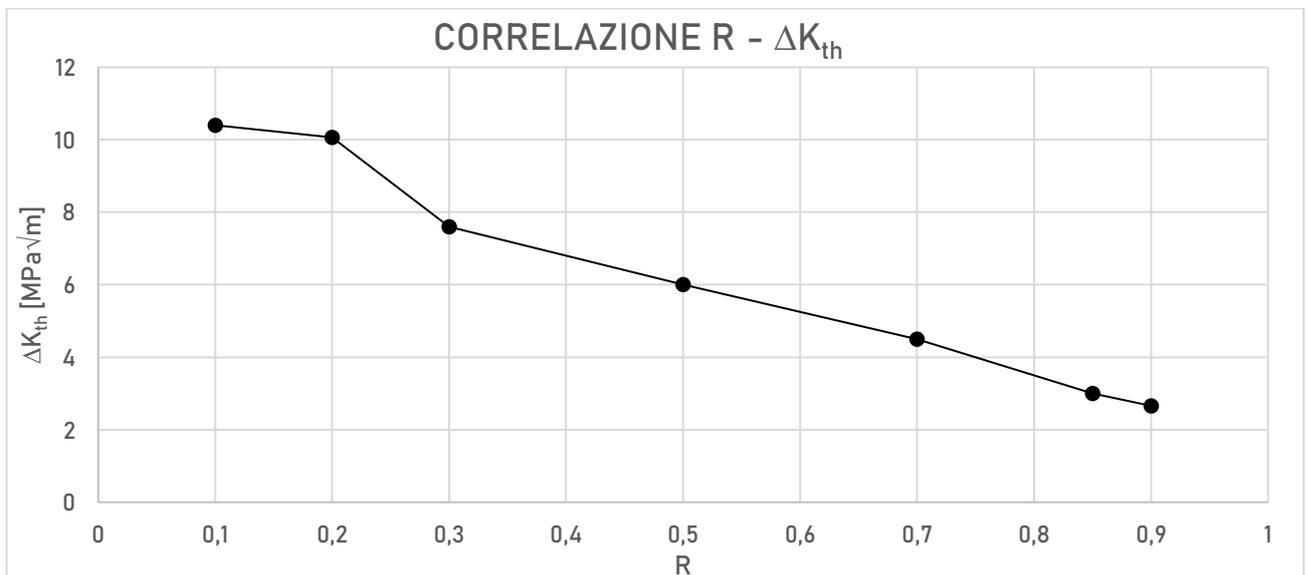
In seguito a tutte le prove svolte, ai vari rapporti di carico è ora possibile tracciare un andamento dei valori di soglia in relazione al variare di R.

Ricordando cosa la teoria a riguardo riporta:



Correlazione fra ΔK_{th} ed R secondo T.L. Anderson^[2]

I risultati ottenuti per questo materiale risultano essere:



Si può notare un andamento inizialmente poco decrescente per i rapporti di carico $R=0,1$ e $R=0,2$, dopo di che per i rapporti di carico $R=0,7 - R=0,5 - R=0,3$ via via che R cresce ΔK_{th} decresce, in particolare di una quantità quasi costante e pari a 1,5 MPa√m ogni volta che R decresce di una quantità pari a 0,2.

Per $R=0,85$ ed $R=0,9$, secondo quanto previsto da Anderson^[2], avremmo dovuto notare un appiattimento della caratteristica pari al valore di soglia intrinseco ΔK_{th}^* , ma in questo caso c'è sì un rallentamento della decrescita, ma comunque la caratteristica non "spiana".

Di seguito vengono riportati i risultati in forma tabellare, mettendo in relazione anche i risultati derivanti dalle analisi di chiusura, che saranno esplicitati meglio nel Capitolo 4.

R	ΔK_{th} [MPa \sqrt{m}]	P_{op} [kN]	K_{op} [MPa \sqrt{m}]	K_{max} [MPa \sqrt{m}]	ΔK_{th}^* [MPa \sqrt{m}]
0,1	10,36	1,49	3,45	11,51	8,15
0,2	10,05	1,59	4,5	12,59	8,08
0,3	7,60	1,64	4,60	11,41	6,25
0,5	6	1,40	6,9	12	5,1
0,7	4,46	0	0	14,85	0
0,85	3	0	0	20	0
0,9	2,66	0	0	26,62	0

Si può notare come il valore di soglia intrinseco ΔK_{th}^* sembri essere una costante per i rapporti di carico $R=0,1$ e $R=0,2$, e successivamente decresca.

È invece importante notare la poca variabilità del valore in kN del carico di apertura della cricca P_{op} che si attesta essere compreso fra:

$$1,40 \text{ kN} \leq P_{op} \leq 1,64 \text{ kN}$$

Indipendentemente dalla lunghezza di cricca. La scarsa variabilità di P_{op} fa pensare che i fenomeni di chiusura abbiano tutti la stessa morfologia per questo materiale, e le cause di questi ultimi siano per tutti i provini le stesse.

3 METODO DEL POTENTIAL DROP

3.1 ISOLAMENTO ELETTRICO DEI PROVINI

Come già visto per i cilindri usati per la determinazione del ΔK_{th} , la normativa *E399-05 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials*, sono previsti range di dimensione dei rulli da utilizzare per la flessione a tre punti, relazionata alla dimensione W del provino SENB.

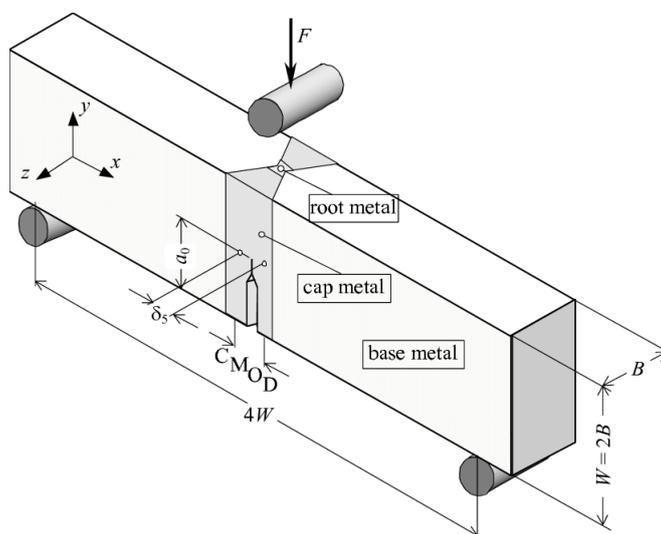


Figura 3.1 – Rappresentazione schematica della condizione di applicazione del carico per provino SENB.

In particolare, è previsto:

$$\frac{W}{2} < D < W$$

Ed essendo $W=45$ mm:

$$22,5 \text{ mm} < D < 45 \text{ mm}$$

È richiesto, al fine di non introdurre errori durante la prova, che i rulli siano sufficientemente duri, resistenti e con la migliore finitura superficiale, compatibilmente con i limiti tecnologici.

È previsto inoltre, secondo quanto previsto da normativa *ASTM E647 - 15e1 -Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates^[4]*, volendo misurare la lunghezza della cricca tramite la metodologia del Potential Drop, che sia presente un rapporto fra le resistenze elettriche tra macchina di misura e campione di almeno 10^4 o superiore.

Inizialmente la scelta del materiale per i rulli è ricaduta su acciai temprati e rettificati, non di difficile reperimento in commercio per le dimensioni richieste. Tuttavia, essi non garantiscono isolamento elettrico, necessario poiché il rapporto fra le due resistenze elettriche con rulli di questo materiale è risultato circa pari a 1. Di conseguenza la scelta è ricaduta su materiali ceramici, che rispondono a tutti i requisiti richiesti dalle normative.

Compatibilmente con la disponibilità si è optato per dei rulli in Allumina 99,7% di diametro $D=25$ mm. Essa garantisce le seguenti proprietà, descritte in **Figura 3.2**:

MATERIALI TECNOCERAMICI BETTINI		OSSIDO DI ALLUMINIO (Al ₂ O ₃)				
CODICE DEL MATERIALE		BX-6	BX-7	BX-8	BX-9	BX-2
Al ₂ O ₃	%	96,0	97,5	99,0	99,7	99,9
COLORE		Marrone	Rosa / Bianco	Bianco	Bianco	Bianco
PESO SPECIFICO	g/cm ³	3,80	3,75	3,85	3,90	3,92
ASSORBIMENTO DI H ₂ O	%	0	0	0	0	0
DUREZZA VICKERS (HV, 500g)	GPa	15,5	16,0	17,0	18,0	19,0
RESISTENZA A COMPRESIONE	MPa	2200	2300	2400	2900	2900
RESISTENZA A FLESSIONE	MPa	320	330	350	380	400
MODULO DI YOUNG (E)	GPa	310	310	340	360	400
TENACITA' ALLA FRATTURA (K _{IC})	MPa m ^{1/2}	4,0	4,0	5,0	5,2	4,9
TEMPERATURA MAX. DI IMPIEGO	°C	1300	1500	1600	1650	1600
CONDUCIBILITA' TERMICA	W / m K	25	23	30	31	30
COEFFICIENTE DI ESPANSIONE TERMICA	20°C - 400°C x 10 ⁻⁶ /°C	7,1	7,4	7,3	7,5	8,0
	20°C - 800°C x 10 ⁻⁶ /°C	7,5	7,9	7,8	8,0	8,9

Figura 3.2- Proprietà meccaniche Allumina in funzione della purezza secondo la "MATERIALI TECNOCERAMICI BETTINI"

Successivamente alla scelta del materiale, è stato verificato che quest'ultimo reggesse ai carichi massimi previsti in esercizio in modo da non invalidare la prova. A tale fine è stata usata la teoria di Hertz utilizzando una modellazione del contatto come un contatto cilindro-piano. In **Figura 3.3** ve ne è una rappresentazione.

La lunghezza del contatto è pari a B=20mm, il massimo carico previsto dalla macchina è stato settato a P=20 kN, il che porta ad avere un carico q pari a:

$$q = \frac{P}{B} = 1000 \frac{N}{mm}$$

CILINDRO		
Al ₂ O ₃		
E ₁	360	GPa
ν ₁	0,22	
R _{cmp}	2900	MPa
R ₁	12,5	mm

PIANO		
Acciaio		
E ₂	210	GPa
ν ₂	0,3	
R ₂	infinito	

La semilarghezza *a* di contatto si può trovare tramite la formula:

$$a = \sqrt{\frac{4}{\pi} q \frac{\rho}{\Delta}}$$

Dove:

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

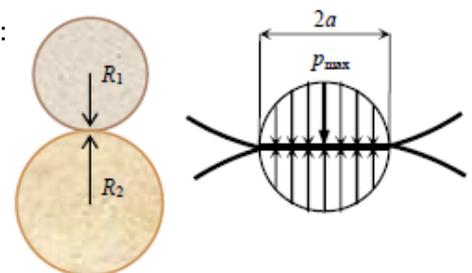


Figura 3.3 – Rappresentazione del contatto cilindro- cilindro e della distribuzione di pressione fra i due corpi

Risulta quindi:

$$a = 0,33 \text{ mm}$$

Di conseguenza, la pressione massima si può valutare tramite la seguente formula:

$$p_{max} = \sqrt{\frac{q\Delta}{\pi\rho}} = 1910,49 \text{ MPa}$$

E nel caso dei due rulli sottoposti a $\frac{P}{2}$:

$$p_{max} = \sqrt{\frac{q\Delta}{\pi\rho}} = 1350,92 \text{ MPa}$$

Trattandosi di un materiale fragile si usa il criterio di rottura della massima tensione principale. Essa sarà la σ_z valutata sulla superficie del pezzo e pari al valore p_{max} .

Il coefficiente di sicurezza sarà quindi:

$$CS = 1,52 \text{ per il rullo soggetto a } P.$$

$$CS = 2,15 \text{ per i due rulli soggetti a } \frac{P}{2}.$$

3.2 SETUP DEI MACCHINARI E PROCEDURA

Verificata la resistenza delle spine necessarie per l'isolamento elettrico dei provini, la misura di lunghezza delle cricche di fatica con il metodo del potential drop richiede dei componenti ausiliari rispetto alla sola macchina di prova.

Gli ausiliari richiesti variano a seconda che la misura dell'EPD (Electro-Potential Drop) voglia esser fatta in corrente continua o in corrente alternata.

Per la nostra prova si è deciso di usare il DC (Direct Current) method; esso prevede un layout, descritto in norma ASTM E647 – 15-e1 ^[4] del tipo descritto in **Figura 3.4**:

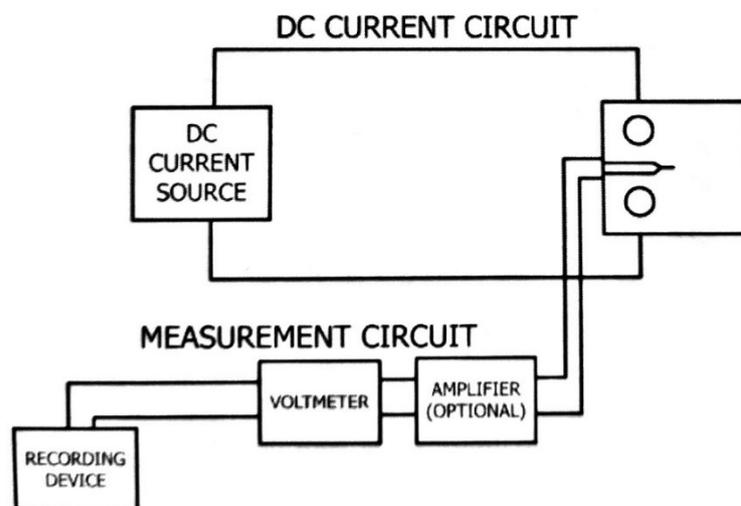


Figura 3.4 -Layout previsto da normativa E647 per la misura della lunghezza di cricca mediante il metodo del Potential Drop

Il DC CURRENT SOURCE fornisce un campo elettrico di corrente continua che attraversa il provino; generalmente le correnti sono dell'ordine dei 5 – 50 A che portano a letture della tensione in output di circa 0,1 – 50 mV con una precisione richiesta dello $\pm 1\%$. Nel nostro caso è rappresentato dal macchinario "AGILENT".

Si viene quindi a creare una distribuzione delle correnti pari a quello descritto nella **Figura 3.5**:

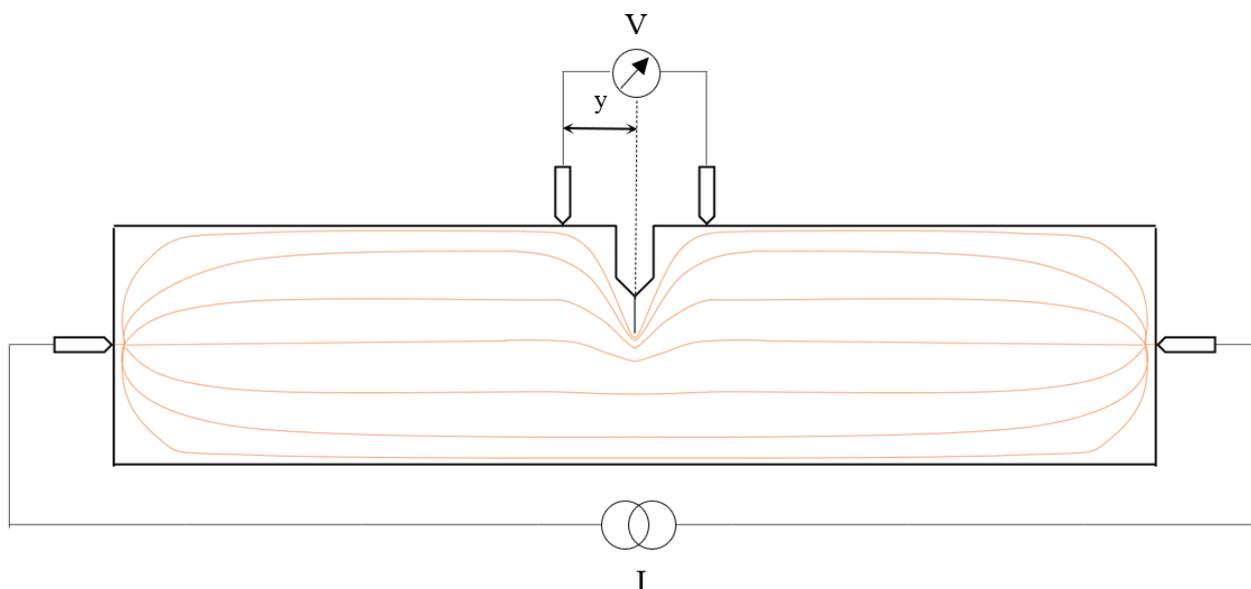


Figura 3.5 – Disturbo delle linee di corrente a causa della presenza della cricca in un componente eccitato con corrente continua

Come si può vedere dalla **Figura 3.5**, un incremento della lunghezza della cricca porta ad una distorsione maggiore del campo elettrico, che si traduce in un incremento del valore di tensione letto sul volmetro. Affinché la lettura di tale valore non risulti erronea, il macchinario per la prova di misura deve essere bloccato in modo tale per cui la cricca rimanga in posizione "aperta".

In tal modo si evita un cortocircuito delle facce adiacenti della cricca, che portano ad una lettura della tensione minore rispetto a quello a cricca "aperta", e di conseguenza una minor lunghezza di cricca effettiva.

Essendo i valori di tensione molto piccoli, è spesso necessario un amplificatore del segnale, in modo che la lettura dei dati sia più chiara. Esso va collegato a monte del volmetro e permette una miglior gestione dei segnali in uscita dal provino nel "RECORDING DEVICE". Tali componenti nel nostro caso sono rappresentati dall' HBM e dal TRIO. Essi amplificano, leggono e registrano il segnale in arrivo dal provino, e tramite l'interfaccia con il software CATMAN AP lo gestiscono.

Settati quindi tutti i macchinari si può procedere con la prova.

Il primo step consiste nel registrare una tensione di riferimento V_{ref} corrispondente ad una lunghezza di cricca a_o . Tale lunghezza di cricca sarà quella derivante dalla fase di precricatura, e sarà misurata in maniera tradizionale, con una tecnica di tipo ottico. Questa misura di tensione ci serve poiché un valore solo della tensione a fine prova non avrebbe senso, e confrontarlo con uno di riferimento permette di capire se la cricca ha propagato e nel caso di quanto ha propagato. C'è da prestare attenzione ad un aspetto; il provino verrà attraversato da un campo di corrente che provocherà in esso un aumento della temperatura a causa delle resistenze passive che il flusso incontra. Sarà quindi necessario aspettare un certo tempo in cui il provino vada a regime per misurare il valore di tensione di riferimento, e associare ad esso la temperatura che il provino ha raggiunto in questa fase; successivamente, sarà interrotto il flusso di corrente, il provino verrà riportato a temperatura ambiente, verrà sottoposto al ciclo di carico previsto e nuovamente collegato al DC POWER SUPPLY per la lettura del nuovo valore di tensione, sempre attendendo che venga raggiunta la temperatura di regime, necessariamente non troppo distante da quella raggiunta in fase iniziale.

L'espressione che correla la lunghezza della cricca alla lettura della tensione sarà del tipo:

$$a = f\left(\frac{V}{V_{ref}}, a_o\right)$$

In particolare, si può usare la formula di Johnson generica:

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left(\frac{V}{V_{ref}} \cosh^{-1}\left\{\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_o}{2W}\right)}\right\}\right)} \right]$$

Con:

V = la tensione misurata,

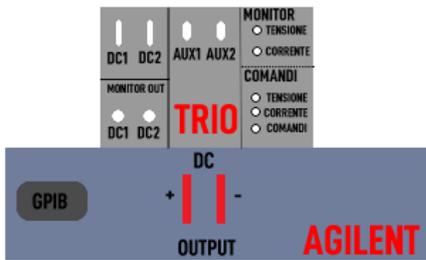
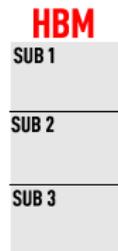
V_{ref} = la tensione misurata in condizioni di riferimento,

a = la grandezza della cricca,

a_o = la grandezza della cricca associata a V_{ref} ,

W = la larghezza del provino SENB,

y = la distanza dal centro cricca dei punti di misura di tensione.



COLLEGAMENTI

PROVINO SENB - AGILENT

C → DC_{OUT} +

D → DC_{OUT} -

L'AGILENT, ovvero il DC POWER SUPPLY fornisce corrente al provino tramite i collegamenti C e D.

PROVINO SENB – TRIO

A → DC 1

Tramite questi collegamenti il provino invia al macchinario TRIO il segnale in Volt relativo all'apertura della cricca, il macchinario lo elabora amplificandolo e rendendolo più stabile.

PC – HBM

USB → USB DEVICE

Il pc si mette in comunicazione con il macchinario HBM e tramite il software CATMAN AP gestisce i segnali, per la lettura della tensione effettiva sul provino.

TRIO – HBM

MONITOR OUT - DC1 → SUB 1

Al canale SUB 1 arriverà il segnale V amplificato ed esso sarà poi letto dal software Catman AP.

Poiché il segnale risultava eccessivamente disturbato, specie durante l'accensione di macchinari o componenti ausiliari limitrofi a quelli di misura (come l'accensione della luce o della lucidatrice) sono state costruite delle Gabbie di Faraday in modo da contenere tali disturbi.

Il risultato è rappresentato in **Figura 3.6**:

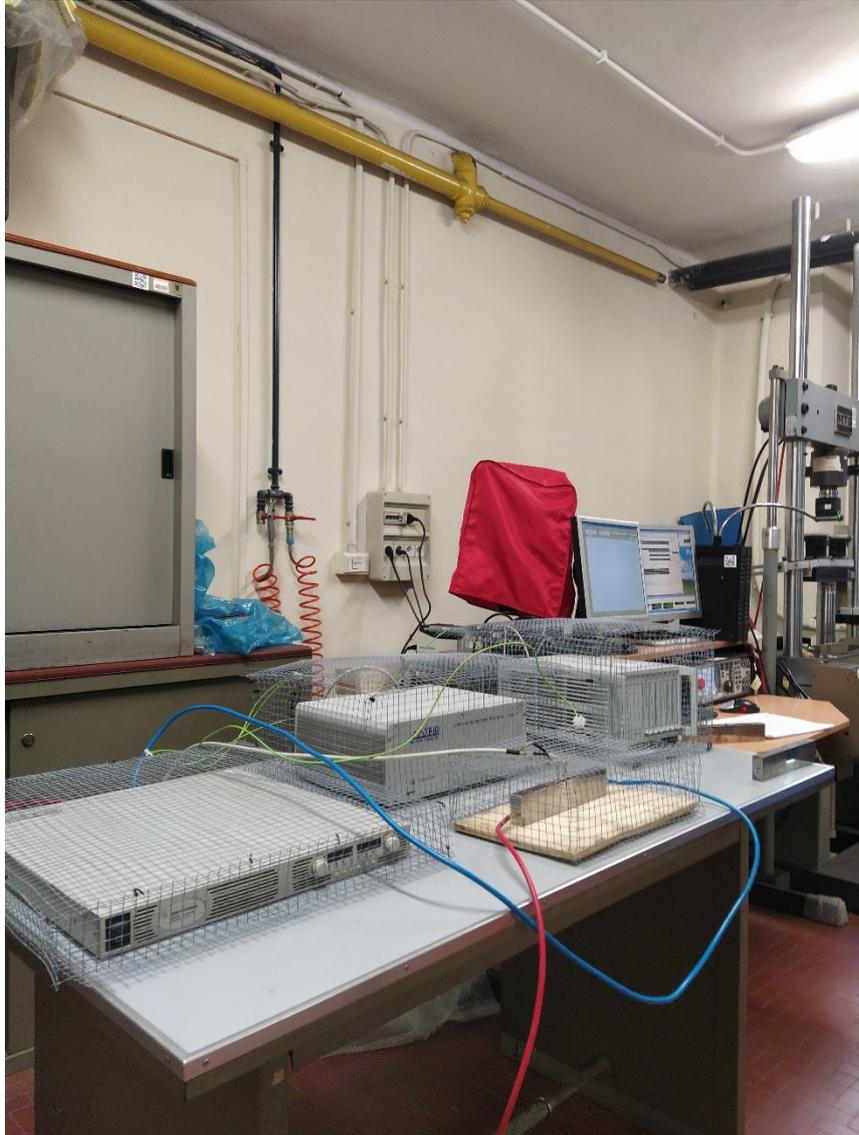


Figura 3.6 Layout per la verifica dell'efficacia delle gabbie di Faraday

I risultati sono stati soddisfacenti, tuttavia si è visto che se nulla veniva acceso nei dintorni, nei momenti della misurazione, le gabbie erano inefficaci e il disturbo che si aveva era pari a non averle poiché proveniente dall'alimentazione.

Per misurare quindi la tensione attraverso il provino, su di esso sono stati creati dei fori filettati, in modo da avere un segnale stabile ed avere ripetibilità delle misure. Il provino in cui la misura della lunghezza di cricca è stata eseguita con il metodo PD è stato il 315-1 sottoposto a prove con rapporti di carico $R=0,3$. Tale metodo non è stato l'unico con cui si è misurata la lunghezza di cricca, ma è stato sempre affiancato, periodicamente durante le prove, a quello ottico.

La **Figura 3.7** rappresenta il layout adottato per le misurazioni attraverso PD.

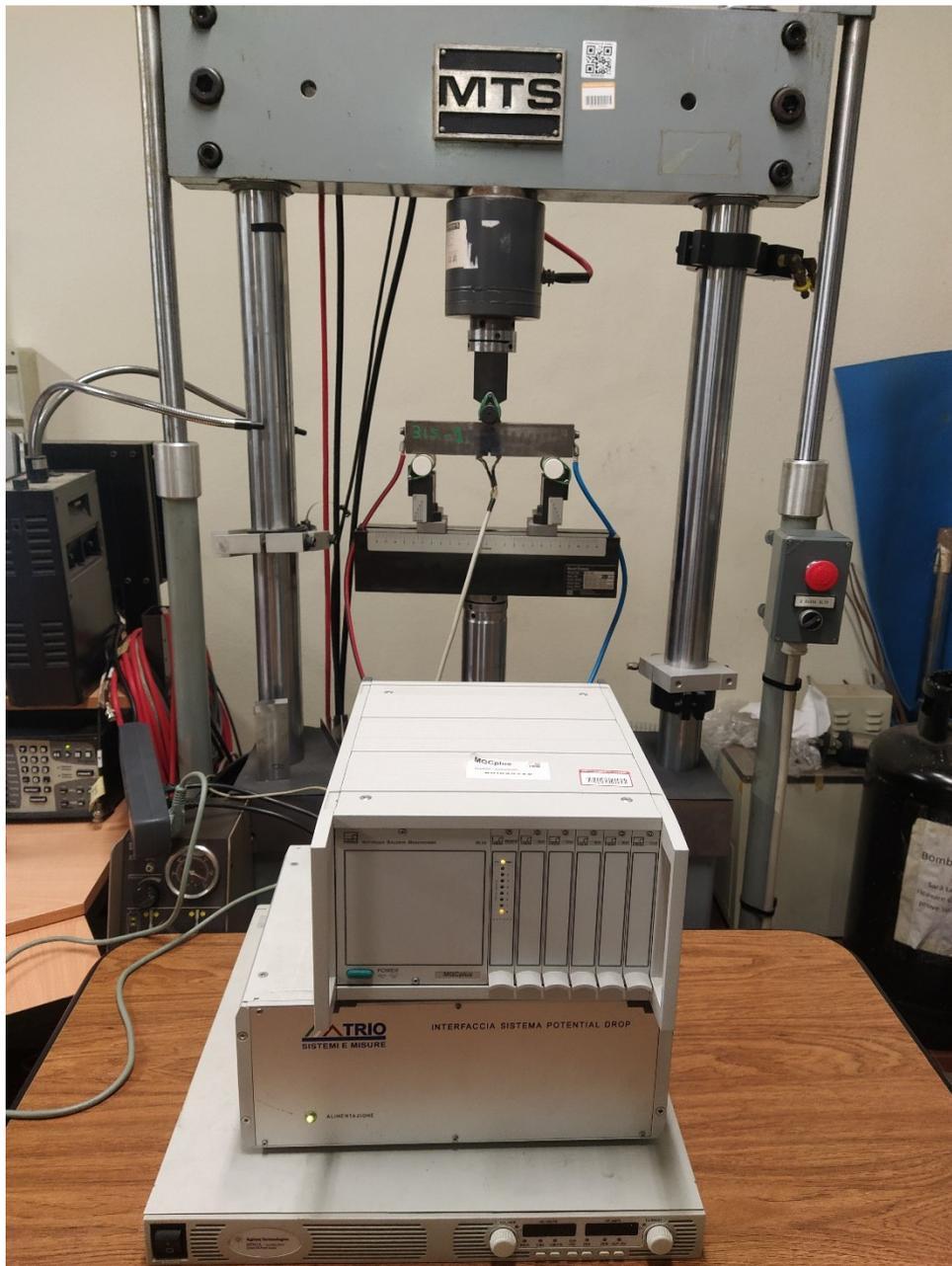


Figura 3.7 Layout per la misura della lunghezza di cricca con il metodo PD.

Il metodo PD è stato ottimo nella determinazione della lunghezza di cricca nelle prime fasi della propagazione portando a risultati leggermente maggiori (giustamente) rispetto a quanto si leggeva in superficie con il metodo ottico. La maggiore misura derivante dal metodo PD deriva dal fatto che all'interno del componente la plasticizzazione all'apice è ridotta, per via dello stato di tensione che si viene a generare, ovvero uno stato di tensione triassiale.

In superficie invece, dove lo stato di tensione è sicuramente di tensione piana, la plasticizzazione è più favorita e la crescita della cricca in maniera elastica risulta meno favorita a causa della zona plasticizzata di maggiori dimensioni, di conseguenza la dimensione di quest'ultima risulta essere minore. La **Figura 3.8** mette in evidenza quanto appena detto.

Durante queste fasi, se la lettura della lunghezza di cricca derivante dal metodo PD risultava leggermente maggiore (si parla dell'ordine di 2 decimi), l'avanzamento della cricca misurato sia otticamente sia con il metodo PD portava a risultati più che coerenti, con differenze di misura che differivano invece di quantità dell'ordine del centesimo.

Il metodo PD ha cominciato a non essere più tanto affidabile nel momento in cui il materiale si è avvicinato al valore di soglia; in queste fasi infatti a causa dell'interazione elettrica delle facce che hanno portato alla indubbia creazione di ossidi su queste ultime, a creazione di ponti elettrici e a creazione di zone saldate, il valore di potenziale ha assunto valori troppo instabili, non permettendo di comprendere se ci fosse stata propagazione o meno.

Di seguito viene riportata la tabella che riporta il confronto tra misurazione ottica e misurazione attraverso il metodo PD e relativo scostamento sia su misura assoluta, sia su misura dell'allungamento della cricca.

Lo scostamento sulla lunghezza è definito come:

$$Scost_{lunghezza} = lunghezza_{PD} - lunghezza_{OTT}$$

Dove:

- $lunghezza_{PD}$ è la misura di lunghezza derivante dal metodo PD.
- $lunghezza_{OTT}$ è la misura di lunghezza derivante dal metodo ottico.

Lo scostamento sull'avanzamento è definito come:

$$Scost_{avanzamento} = (lunghezza''_{PD} - lunghezza'_{PD}) - (lunghezza''_{OTT} - lunghezza'_{OTT})$$

Dove:

- $lunghezza'_{PD}$ e $lunghezza''_{PD}$ sono rispettivamente le misure di lunghezza derivanti dal metodo PD prima e dopo la propagazione.
- $lunghezza'_{OTT}$ e $lunghezza''_{OTT}$ sono rispettivamente le misure di lunghezza derivanti dal metodo ottico prima e dopo la propagazione.

K [MPa√m]	MISURAZIONE PD [mm]	MISURAZIONE OTTICA SUPERFICIE [mm]	SCOST. LUNGHEZZA [mm]	SCOSTAMENTO AVANZAMENTO [mm]
14,4	22,91	22,91	0	0
14	23,8	23,61	0,19	0
10,4	24	23,78	0,22	0,03
8,2	24,09	23,8	0,29	0,07
7	24,25	23,8	0,45	0,16

Come si può notare per il metodo PD le misurazioni risultano maggiori ma coerenti con quelle ottiche sino a quando il valore di K applicato è sufficientemente lontano da quello ritenuto di soglia (per questo rapporto di carico misurato a 7,6 MPa√m). Mentre per il metodo PD la cricca continua a crescere nonostante il valore di K sia inferiore a quello di soglia, per il metodo ottico la cricca è ferma già da K=8,2 MPa√m.

Questo valore di K, inoltre, era il valore che si riteneva essere di soglia per il provino 339-2, ugualmente sottoposto a rapporto di carico $R=0,3$, poiché con il metodo ottico non si riuscivano ad apprezzare più allungamenti di cricca già da un paio di milioni di cicli.

Il fatto che non si siano apprezzati aumento di lunghezza di cricca anche per il provino 315-1, sottoposto a stesso rapporto di carico, per lo stesso valore di K è coerente.

Il provino 315-1 è stato utilizzato anche per la prova della misura K_{IC} , come si può vedere la superficie di frattura è completamente annerita, sicuramente a causa del passaggio di corrente derivante dal metodo PD. Di seguito una fotografia del provino in questione:



Figura 3.8 - Superficie di frattura in seguito alla prova per la determinazione del K_{IC}

A conferma delle ipotesi fatte sull'instabilità del segnale, misurando la cricca per la valutazione del K_{IC} e confrontandola con ciò che il metodo PD misurava si ottiene:

OTTICO [mm]	PD [mm]	SCOSTAMENTO [mm]
24,49	24,25	0,24

La misura con il metodo definito "ottico" post mortem è la media delle misure sulla superficie e la misura al centro del provino, secondo quanto prescritto da normativa E399, e perciò risulta leggermente maggiore rispetto ai valori letti con il metodo PD; fosse stata presa in considerazione solo la misura ottica in superficie, essa sarebbe risultata minore, come già detto. È stata fatta la media per avvicinarsi il più possibile a ciò che il metodo PD vede, cioè una superficie di passaggio a cui poi si associa una lunghezza di cricca attraverso la formula di Johnson.

Si nota come il metodo PD riporti comunque lunghezze di cricca inferiori, segno che la presenza di fenomeni di ossidazione, creazione di ponti elettrici e fenomeni temporanei di microsaldatura "falsino" la superficie effettiva su cui può passare corrente traducendosi in lettura di lunghezza di cricca inferiori.

4 EVIDENZA SPERIMENTALE DEL FENOMENO "CRACK CLOSURE"

In seguito all'analisi dello stato di tensione all'apice della cricca e dell'esistenza di alcuni fenomeni particolari che si verificatisi durante le prove di fatica, si è voluto andare ad indagare più approfonditamente ciò che accadeva, in termini di spostamento all'apice della cricca.

Successivamente al raggiungimento del ΔK_{th} per i provini, si è deciso di sottoporli a un ciclo di carico identico all'ultimo ciclo a cui erano stati assoggettati, in modo da sottoporli allo stesso ΔK .

Se veramente esiste un ΔK_{th} del materiale, teoricamente non avremmo notato avanzamenti all'apice della cricca. Per analizzare più dettagliatamente il fenomeno si è ricorsi all'analisi con prove di cedevolezza e alla tecnica della correlazione immagine digitale. Successivamente a queste due tecniche, attraverso una procedura proposta da T.L. Anderson [2], si è andati a cercare quale fosse il valore di K per cui si verificasse apertura della cricca.

4.1 CARICO DI CHIUSURA E CEDEVOLEZZA

Sono presenti varie tecniche di misurazione del carico di chiusura; in questo caso è stata utilizzata la metodologia del "Compliance Offset" seguendo le raccomandazioni indicate su norma ASTM E647^[4]. Tale procedura consiste nel condurre una misura di cedevolezza del campione in esame, raccogliendo i dati digitali con un intervallo di ricavo fra i punti in cui si misura forza e COD pari al 2% del range intero di forza spaziato.

Successivamente sarà necessario andare a considerare quale sia il valore di cedevolezza attribuito al provino quando la cricca è completamente aperta. Per fare ciò, partendo subito poco dopo dal carico massimo bisognerà definire la cedevolezza di un segmento che comprenda al minimo il 25% dei dati raccolti. L'inclinazione di tale retta sarà definita come "Open-crack compliance".

Dopo di che sarà necessario suddividere la linea di carico in segmenti, partendo da un carico leggermente più basso dal carico massimo durante la prova (al massimo il 95% P_{max}) e distribuire nei vari segmenti in un numero di dati che ricoprano il 10% del ciclo di forza e che i dati fra un segmento e l'altro si sovrappongano per il 5% dei dati totali del ciclo di forza, come mostrato dalla Figura 4.1.

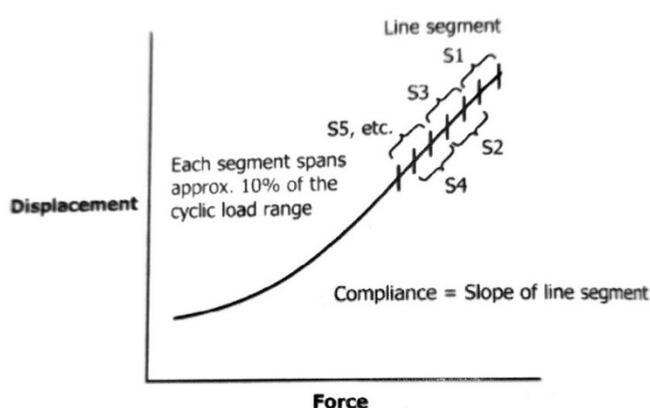


Figura 4.1 – Suddivisione in segmenti del diagramma spostamento-carico secondo la norma ASTM E647

Successivamente alla valutazione della cedevolezza per ogni segmento, l'offset dalla cedevolezza viene calcolato nel seguente modo:

$$\text{Compliance offset} = \frac{[(\text{open crack compliance}) - (\text{segment compliance})]}{(\text{open crack compliance})} \cdot 100$$

Plottando i risultati ottenuti ci si aspetta un grafico del tipo di **Figura 4.2**:

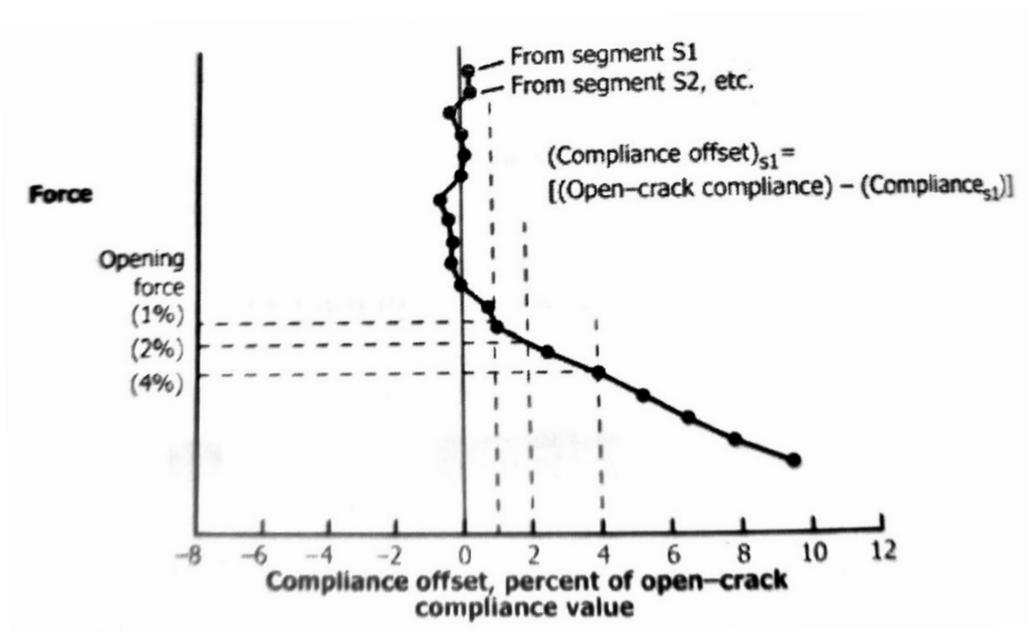


Figura 4.2- Risultati attesi dalla prova dal Compliance Offset Method

Il carico di apertura sarà quindi definito come carico per cui l'offset aumenta di un valore prefissato e sarà determinato analizzando quale sia il carico medio sul segmento che porta ad un offset rispettivamente del 1,2, 4%.

Nel caso si ottenessero dei risultati come quelli di **Figura 4.3**, la prova non risulterebbe valida.

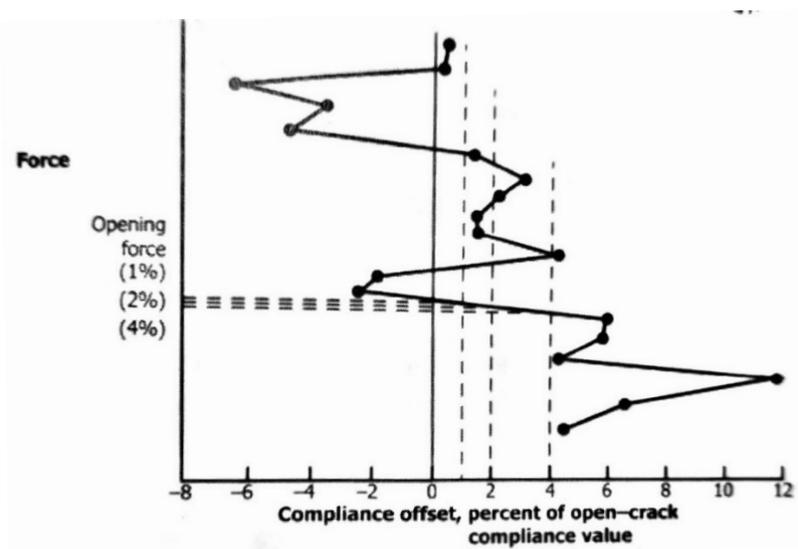


Figura 4.3- Esempio di prova non valida, i dati sono troppo dispersi e non si riesce ad indicare quale effettivamente sia il carico di apertura.

4.2 LA TECNICA DELLA CORRELAZIONE IMMAGINE DIGITALE

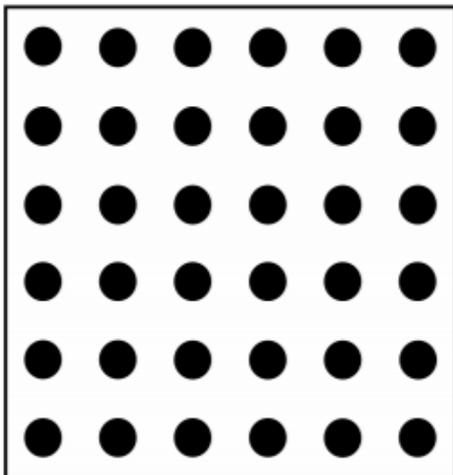


Figura 4.4- Pattern per la calibrazione. Il software è a conoscenza della distanza esatta tra i cerchi neri e il loro diametro, in tal modo potrà valutare l'entità dei successivi spostamenti e l'orientazione del sistema di riferimento

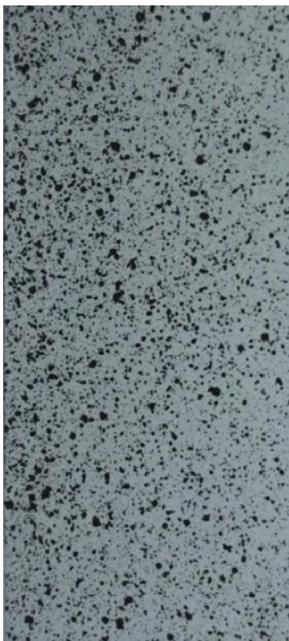


Figura 4.5 – Pattern effettivo sul campione

ogni punto e li traduce in misure fisiche grazie alla calibrazione avvenuta in precedenza.

In questo modo è possibile ottenere delle mappe colorate rappresentative degli spostamenti e delle deformazioni sia lungo l'asse x, sia lungo l'asse y.

Con tale tecnica, settando opportunamente i parametri di calibrazione, è possibile andare ad analizzare il campo di spostamenti in una particolare zona del componente.

È una tecnica molto vantaggiosa poiché permette di misurare gli spostamenti su tutta la superficie di interesse senza adoperare un elevato numero di trasduttori; inoltre non è una tecnica distruttiva.

La correlazione immagine digitale può essere 2D e 3D.

La correlazione 2D, adoperata in questo caso, prevede l'utilizzo di una sola telecamera. Quella 3D richiede al minimo due fotocamere.

Richiede che venga eseguita una calibrazione con un opportuno calibratore in modo che la fotocamera, essendo note le dimensioni delle figure presenti sul calibratore, risenta della distanza a cui

si trova rispetto la superficie da analizzare.

Successivamente alla calibrazione è necessario generare un pattern in bianco e nero sul provino in modo da fornire al software una mappa puntuale e una fotocamera in grado di scattare molte foto ogni secondo.

Scattando un numero previsto di foto al secondo il sistema di gestione tiene conto degli spostamenti di

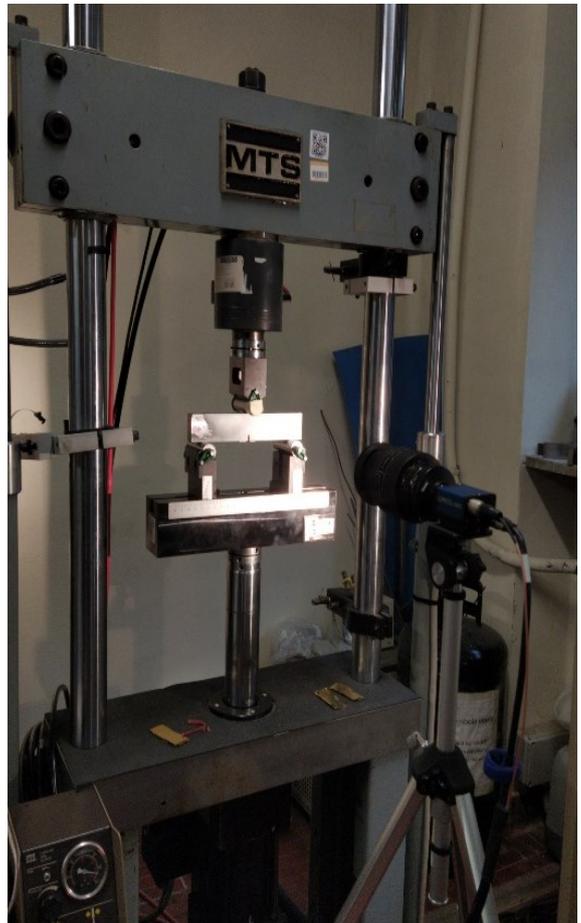


Figura 4.6- Applicazione della DIC

4.3 ALLA RICERCA DI K_{OP} E ΔK_{EFF}

Successivamente all'analisi di ogni campione, individuando in quali di questi si verificasse chiusura o meno, si è voluti andare a cercare, dove aveva senso, quale fosse il carico per cui la cricca si apriva, e andare a verificare, dove non si riscontravano fenomeni evidenti di chiusura con i metodi precedenti nel range di carico in esercizio, che effettivamente fosse così.

Infatti, le misure di chiusura che si ricavano dalle prove di cedevolezza sono molto soggettive, poiché la chiusura è un fenomeno graduale che si sviluppa in una certa ampiezza di carico e non ad un carico preciso, rendendo l'individuazione del carico di chiusura difficile.

A tal proposito si è seguita una procedura proposta da T.L. Anderson nel suo libro Fracture Mechanics [2] per l'individuazione del P_{op} e successivamente del K_{op} e del ΔK_{eff} , per la cui definizione si rimanda il lettore al **Paragrafo 1.5**.

Tale procedura prevede in primis che il valore di COD derivante dalle varie prove di cedevolezza sia corretto di un valore che tenga conto della cedevolezza misurata alla bocca dell'intaglio.

Quando infatti le facce della cricca sono in contatto, esiste comunque un intaglio le cui facce sono separate. In questi casi, la pendenza della curva COD-carico riflette la cedevolezza di un provino intagliato ma non criccato. Rimuovendo questo contributo alla cedevolezza potrebbe avere un effetto benefico sulla sensibilità sulle misure di chiusura. Di conseguenza, definiamo il COD corretto come segue:

$$V^* = V - C(a_N)P$$

Dove:

- V è il valore di COD non corretto, derivante dalle prove di cedevolezza.
- V^* è il valore di COD corretto indicato successivamente con COD*.
- $C(a_N)$ è la cedevolezza di un provino non criccato con un intaglio di lunghezza a_N .
- P è il carico per cui si sta valutando la cedevolezza.

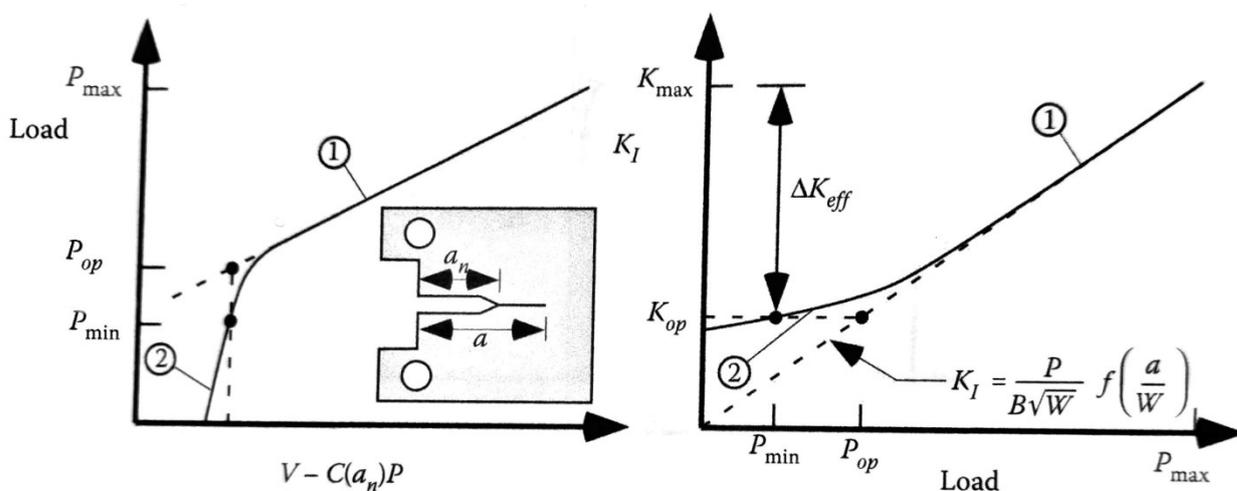


Figura 4.7 - Definizione proposta per la determinazione di P_{op} al fine della vera indicazione di ΔK_{eff}

La parte sinistra della **Figura 4.7** è un grafico schematico della curva COD corretto – carico.

Il corrispondente grafico di K_I – carico è invece rappresentato a destra.

La parte di curva indicata con **1** corrisponde al tratto dove la cricca è completamente aperta e il K_I è determinato dal carico remoto applicato. Nella regione indicata con **2** la cricca è parzialmente o completamente chiusa e K_I è determinato dallo spostamento delle facce della cricca.

Gli step da seguire per determinare P_{op} sono illustrati in **Figura 4.7** e di seguito verranno indicati:

1. Determinazione del COD* al carico minimo in prova P_{min} .
2. Costruzione di una linea verticale dal valore di COD* trovato al punto 1 precedente.
3. Estrapolazione della curva COD* – P in configurazione completamente aperta fino a valori di carico inferiori (Regione 1). Il carico P_{op} di apertura è definito come il punto di intersezione fra la verticale del precedente punto 2 e la curva COD* – P.
4. Determinazione del K_{op} nota la correlazione fra P e fattore di intensificazione degli sforzi.

Al fine di seguire tale procedura, un campione intagliato e non precriccato, è stato utilizzato per ottenere il valore di $C(a_N)$. La curva COD – P per un ampio spettro di carico che si è ottenuta è:

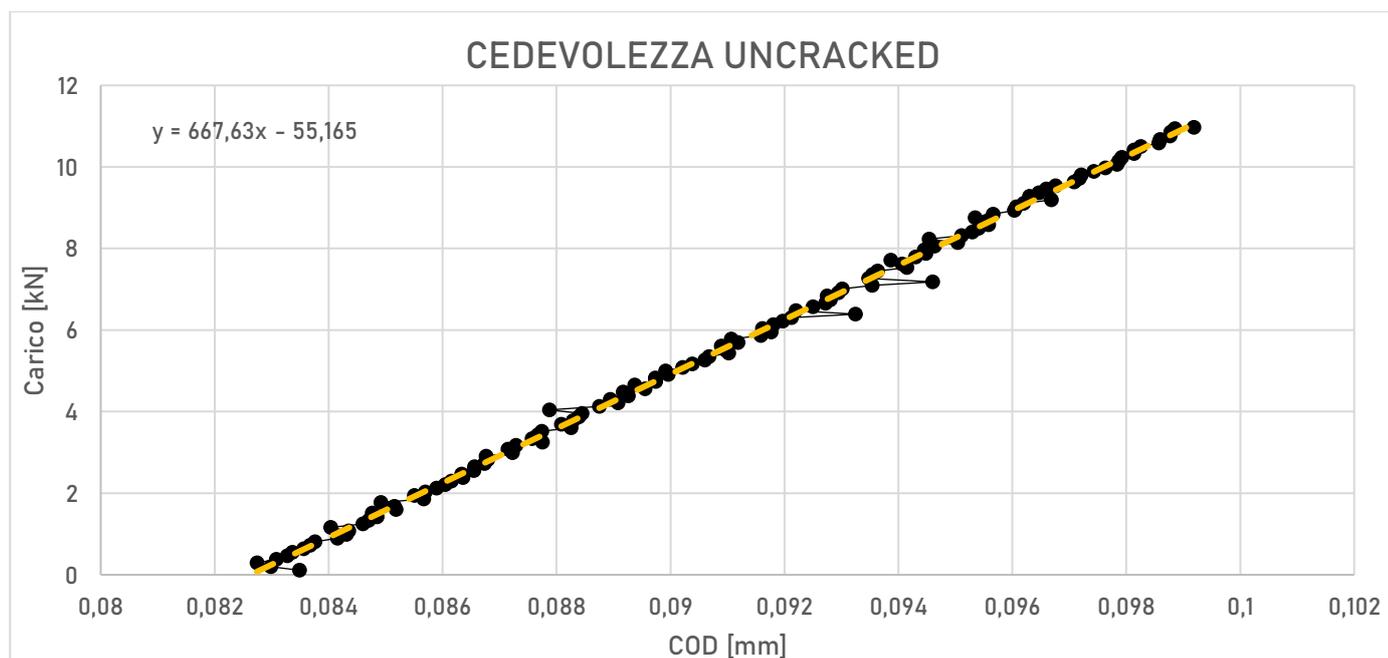


Figura 4.8 - Grafico carico-COD per un provino non criccato. Da notare la linearità della curva.

In nero sono evidenziati i punti sperimentali, in arancio la retta che interpola tali punti. Per tutti i provini è stato assunto quindi un valore di $C(a_N)$ pari a:

$$C(a_N) = \frac{1}{667,63} = 0,001497836 \left[\frac{mm}{kN} \right]$$

4.4 RISULTATI OTTENUTI

4.4.1 PROVINO 342-2 – R=0,5

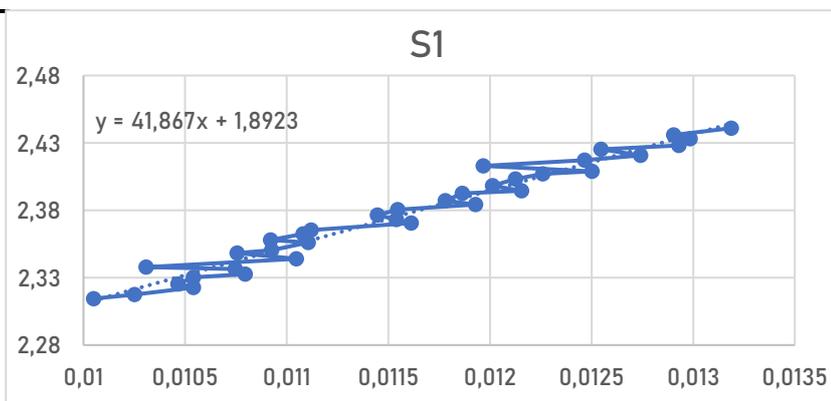
Il primo campione sottoposto a cedevolezza è stato il 342-2, assoggettato a carichi con $R=0,5$.

Seguendo la procedura da normativa E647, si è andato a suddividere il tratto lineare della curva di cedevolezza alla massima apertura in piccoli segmenti i cui dati fossero almeno il 10% dei dati totali a disposizione. I grafici hanno sull'asse delle ascisse la misura COD misurata in mm, e sull'asse delle ordinate i carichi, misurati in kN. Le cedevolezza sono misurate in mm/kN.

La cedevolezza del segmento è stata individuata come il reciproco del coefficiente angolare della retta, essendo esso il reciproco della rigidezza del sistema. Si riporta il risultato del calcolo dell'offset per 4 intervalli di carico, come indicato nella normativa ASTM E647^[4].

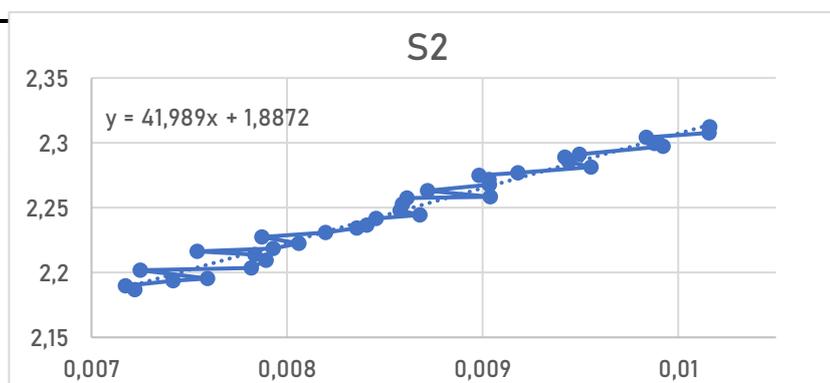
S1

P_{mean}	2,376911669
Equazione	$y = 41,867x + 1,892$
Cedevolezza	0,02388516
Ced. opening	0,023584906
Scostamento	-1,27%



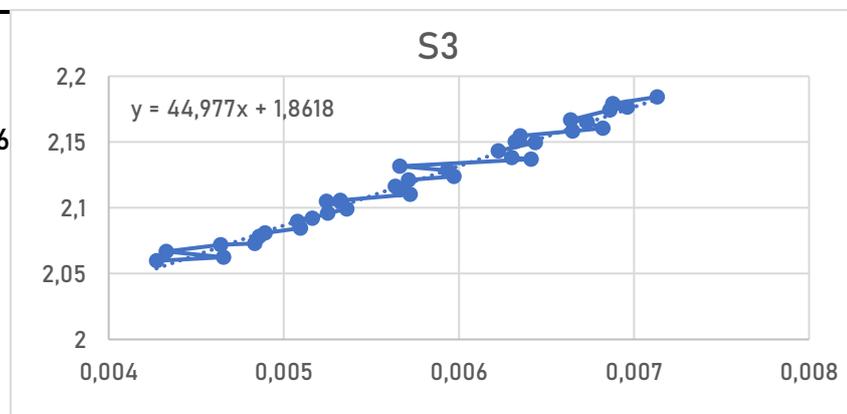
S2

P_{mean}	2,248708883
Equazione	$y = 41,989x + 1,887$
Cedevolezza	0,023815761
Ced. Opening	0,023584906
Scostamento	-0,98%



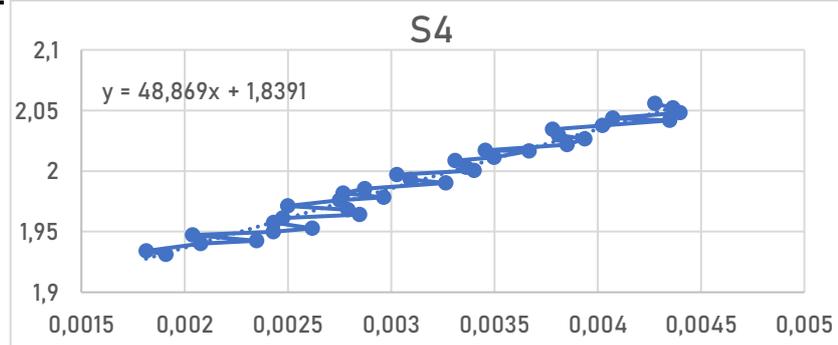
S3

P_{mean}	2,121370954
Equazione	$y = 44,977x + 1,86$
Cedevolezza	0,022233586
Ced. Opening	0,023584906
Scostamento	5,73%



S4

P_{mean}	1,99340514
Equazione	$y = 48,869x + 1,839$
Cedevolezza	0,02046287
Ced.Opening	0,023584906
Scostamento	13,24%



Le equazioni nei vari tratti sono state calcolate svolgendo la regressione con il metodo dei minimi quadrati applicati a funzioni lineari. In questo modo, il coefficiente della retta è rappresentativo della rigidità del sistema in quel tratto. La cedevolezza per ogni segmento è stata quindi calcolata come l'inverso di tale valore.

Anche il valore di cedevolezza di "opening", già citato come "*Ced.Opening*" nelle tabelle precedenti, è stato valutato come per i singoli segmenti, nel seguente modo:

$$Cedevolezza = \frac{1}{m}$$

Dove m indica il coefficiente angolare della retta ricavata per quel segmento.

Tuttavia, i dati presi in considerazione per la determinazione della *Cedevolezza di Opening* non sono più il 10% bensì il 25% dei dati totali a disposizione. La **Figura 4.9** rappresenta i dati sperimentali e l'equazione della retta interpolatrice per ricavare i parametri ricercati.

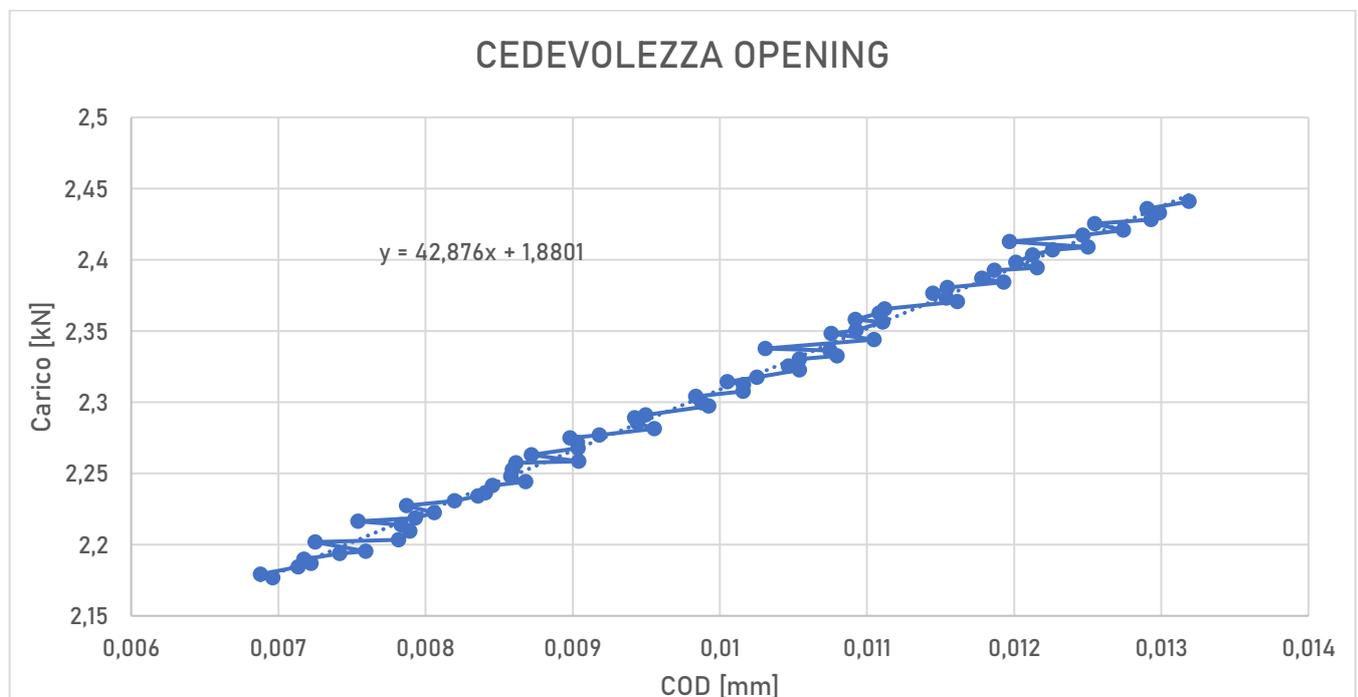


Figura 4.9 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

Il fine di tale suddivisione è l'individuazione del carico di chiusura, qualora presente, corrispondente al valore per cui la cedevolezza del segmento in esame si scosta per più del 4% dal valore di "opening".

Qui di seguito viene riportato il grafico relativo a carico medio- scostamento, analogamente alla **Figura 4.2:**

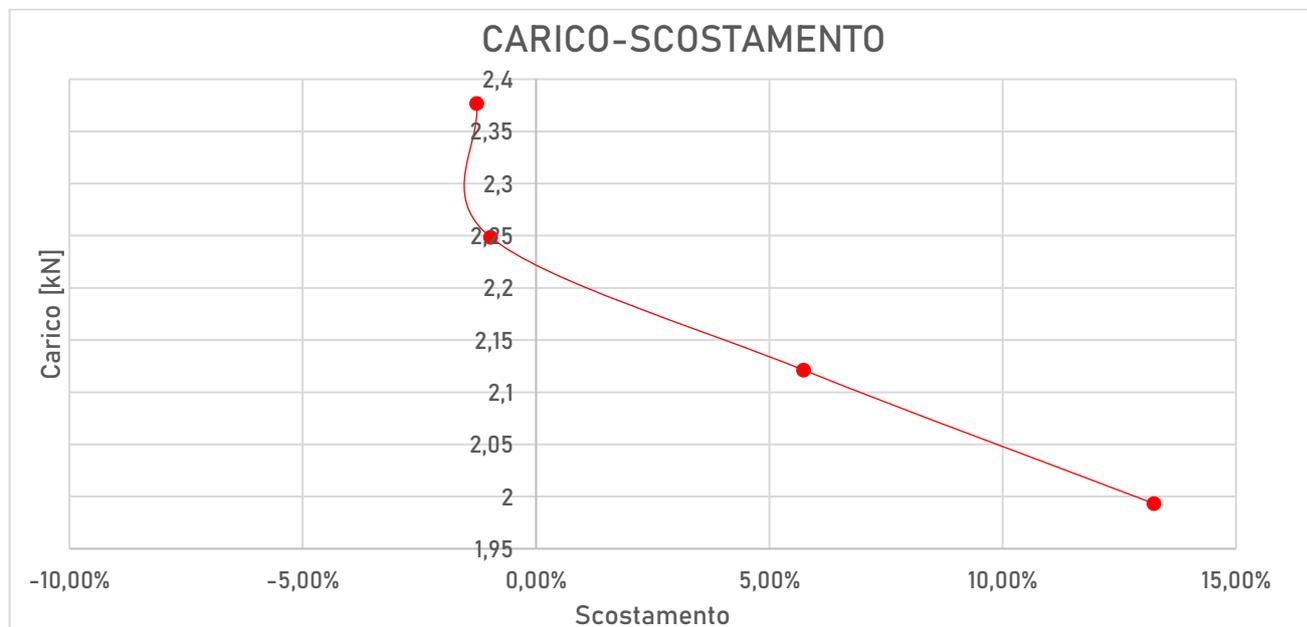


Figura 4.10 - Grafico carico-Compliance Offset

Lo scostamento brusco nel segmento S3 evidenzia che sono presenti fenomeni di chiusura.

A conferma di ciò, i risultati della Correlazione d'Immagini Digitali riportano risultati coerenti con quelli di cedevolezza. Nel seguito sono riportati e discussi i risultati degli esperimenti condotti con la Correlazione d'Immagini Digitali.

Il provino è stato assoggettato un ciclo di carico compreso fra -1,22kN e -2,44kN con una frequenza di 0,025 Hz. Qui di seguito è riportato il ciclo di carico del provino. I valori di forza sono in valore assoluto.

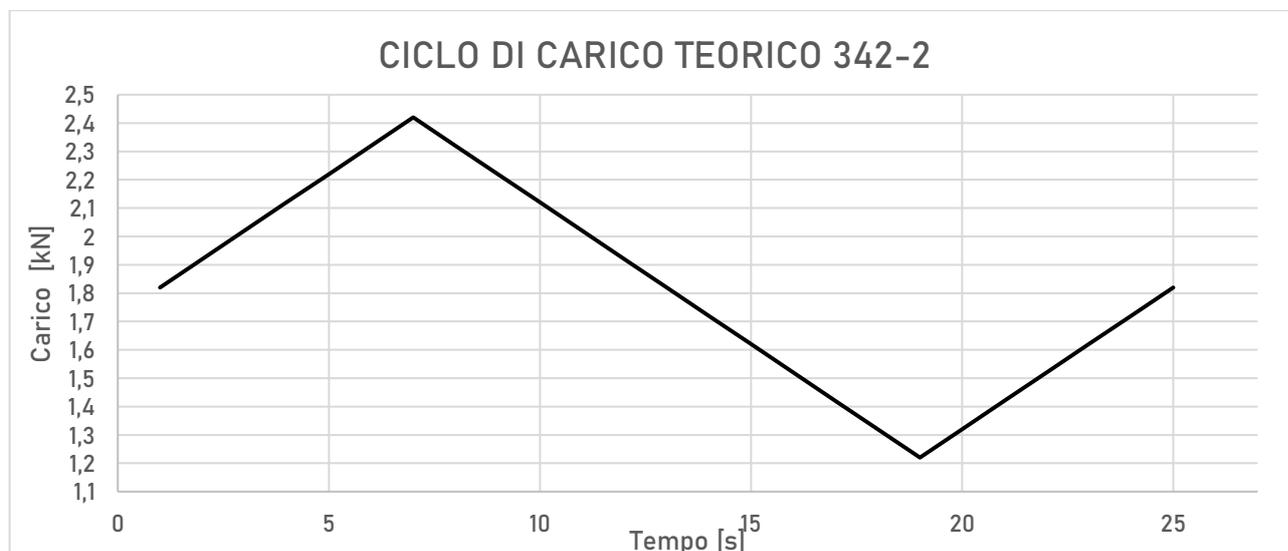


Figura 4.11 - Ciclo di carico teorico a cui è stato sottoposto il provino durante le prove di cedevolezza

Il grafico sottostante riporta il ciclo di carico in cui sono effettivamente avvenute le prove:

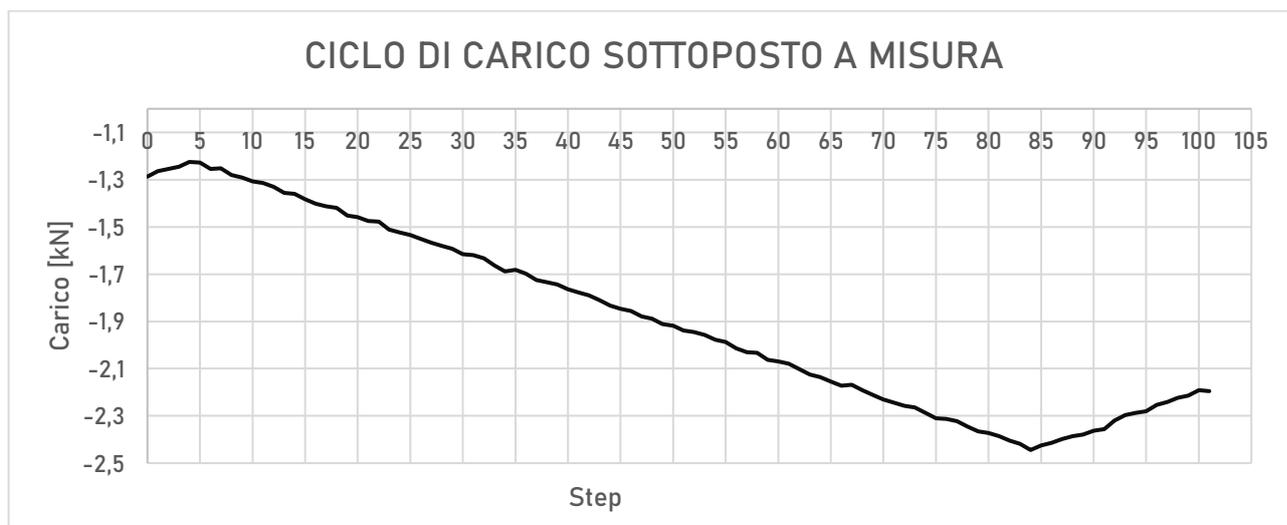


Figura 4.12 -Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Il sistema di acquisizione dei dati, a causa della frequenza di acquisizione scelta di questi ultimi, suddivide l'acquisizione in step, o in passi. Per ogni step sarà associato un valore di carico e un valore di coordinata nel sistema di riferimento. Con questi dati poi il sistema di gestione calcolerà gli spostamenti e le deformazioni ricercati.

Nel nostro caso, come si può vedere dal grafico soprastante, lo step in cui il provino è soggetto al massimo carico in valore assoluto è quello 84. Pertanto, in questo step ci si aspetta il massimo valore di spostamenti.

I risultati a questo step sono raffigurati qui di seguito:

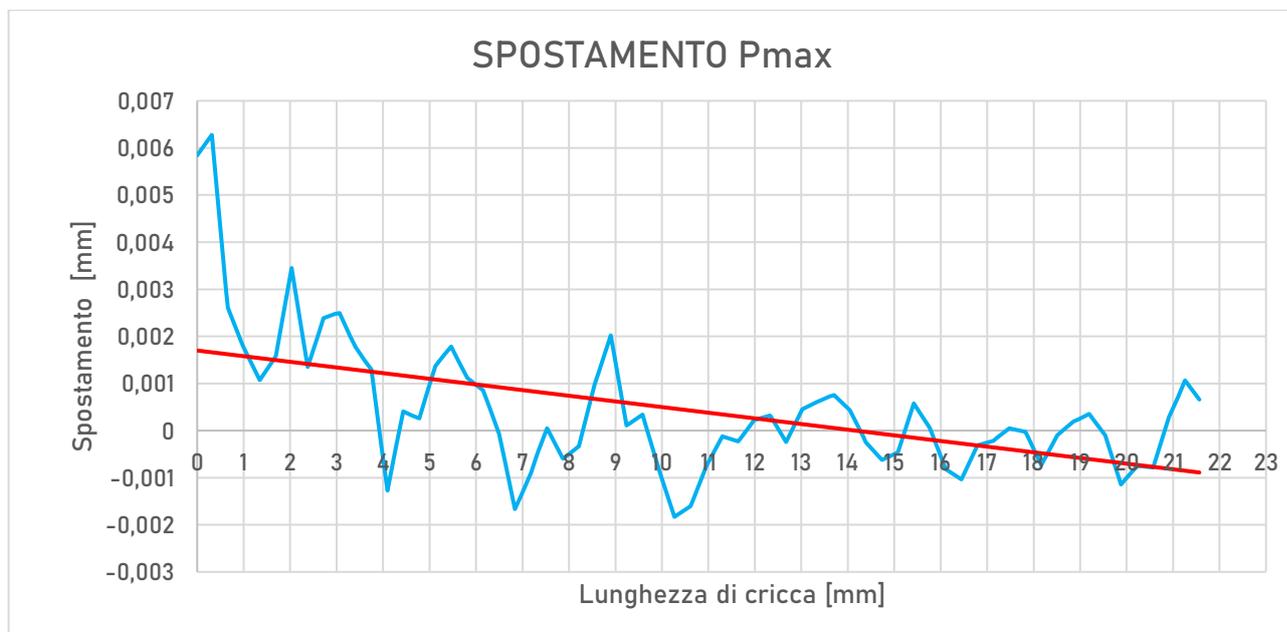


Figura 4.13 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca

Nonostante la linea di tendenza in rosso evidenzi una somiglianza con quanto teoricamente ci si aspetta di trovare, la linea in azzurro, che è la misura degli spostamenti effettivi, mette in risalto grandi oscillazioni, in parte dovute a un rumore del segnale, in parte dovuto ai fenomeni di

chiusura che sono sicuramente presenti alla lunghezza di cricca distante 6,90 mm dall'apice dell'intaglio e alla lunghezza 10,50 mm.

Pertanto, la misura di cedevolezza ha messo in evidenza che esistevano dei fenomeni di chiusura e che due facce, a una certa lunghezza di cricca per un valore nell'intorno dei 2 kN si siano "staccate" portando ad un abbassamento della rigidità del sistema o ad un aumento della sua cedevolezza.

La presenza di altri punti in cui questi fenomeni di chiusura avvengono giustificerebbe l'esistenza del valore ΔK_{th} .

Si potrebbe pensare che il ΔK a cui si assoggetta il componente sia inferiore a quello necessario per "scollare" le due facce, portando a non far più avanzare la cricca.

Le **Figure 4.14** e **4.15** riportano una foto del campo di spostamenti di tutta la zona di interesse allo Step 84. La dicitura "Tangential Strain X" sta ad indicare le deformazioni lungo la direzione X.

Nella zona in corrispondenza della cricca si può notare come il campo delle deformazioni si colori di rosso, a mettere in evidenza che lì le facce si stiano muovendo.

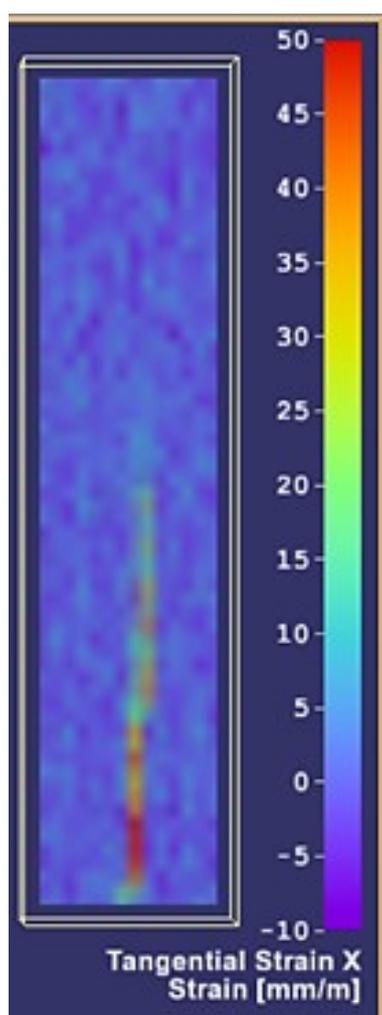


Figura 4.14 - Campo deformazioni lungo asse x - Lato A

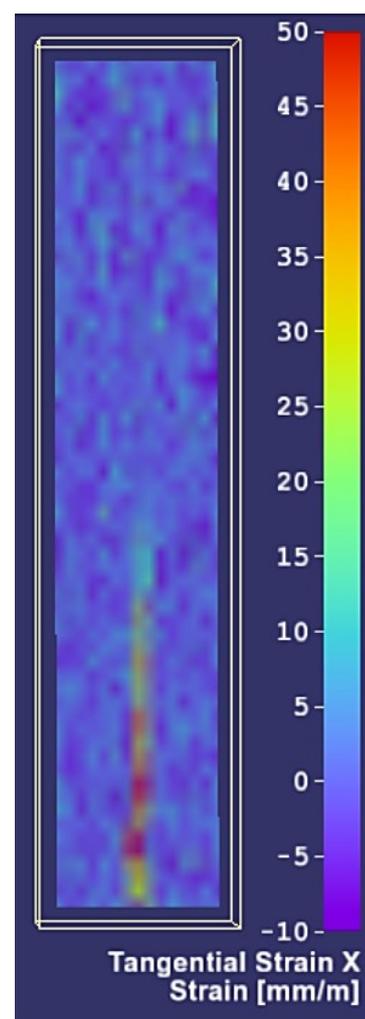


Figura 4.15 - Campo deformazioni lungo asse x - Lato B

Questo provino è stato anche sottoposto all'analisi per la ricerca del K_{Op} .

La curva COD – P completa, incluso il tratto iniziale non lineare e dove è sempre presente un ginocchio, è:

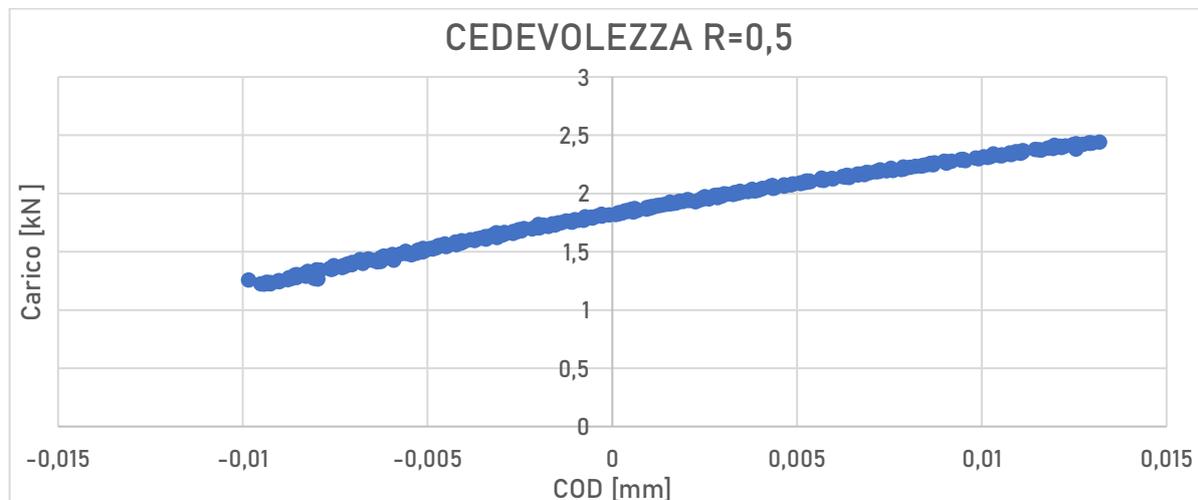


Figura 4.16 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson [2], si ottiene il seguente grafico:

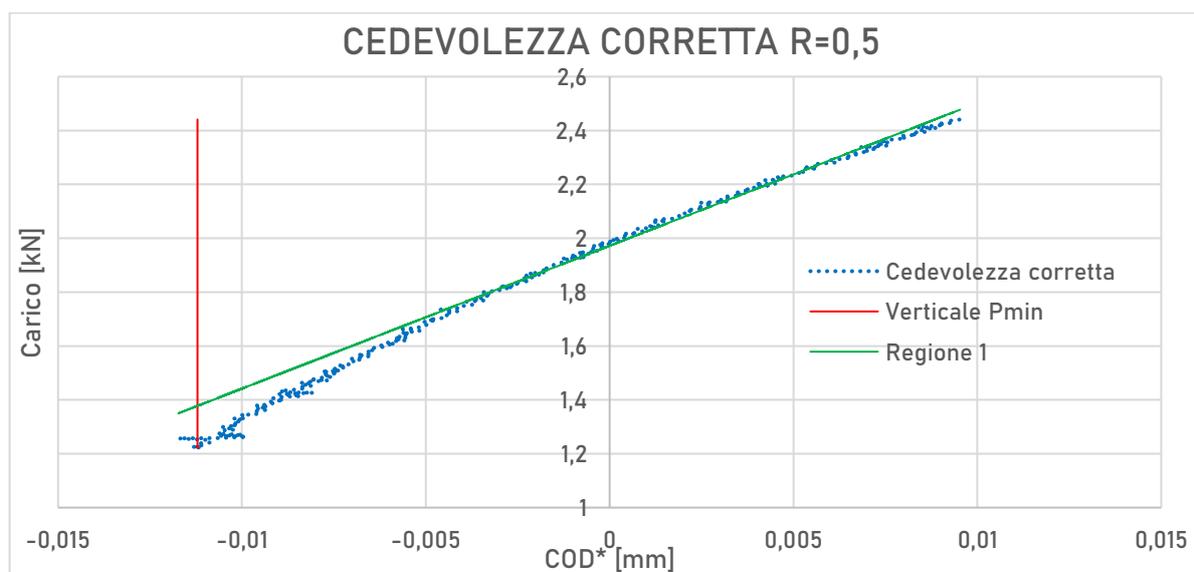


Figura 4.17 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Si può notare che in seguito alla correzione introdotta con $C(a_N)P$, il ginocchio della curva risulti più marcato, rendendo meno arbitraria l'individuazione del carico di apertura.

Il carico di apertura risulta essere:

$$P_{Op} = 1,40 \text{ kN}$$

E di conseguenza il valore di K, per cui si verifica apertura, è:

$$K_{Op} = 6,9 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Noto quindi il valore di K_{Op} e del K_{max} durante la prova si ricava il valore di ΔK_{eff} , che risulta essere:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{Op} = 5,1 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

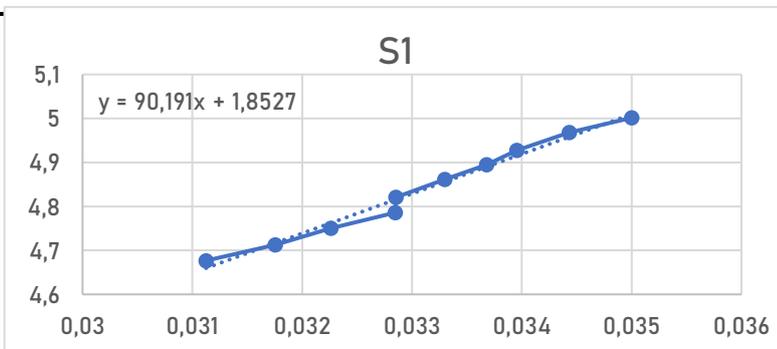
4.4.2 PROVINO 336-2 – R=0,1

Anche il campione 336-2, soggetto a carichi con rapporto **R=0,1**, riporta evidenti fenomeni di chiusura.

È stata seguita la stessa procedura degli altri provini, di seguito si riportano i risultati ottenuti:

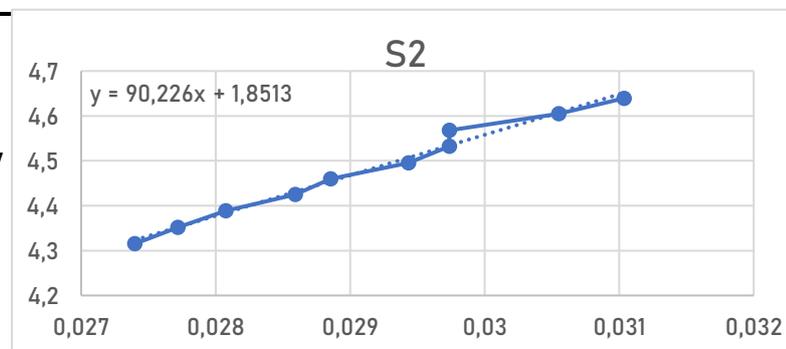
S1

P_{mean} 4,83984489
 Equazione $y = 90,191x + 1,8527$
 Cedevolezza 0,01101
 Ced. Opening 0,01097
 Scostamento -1,02%



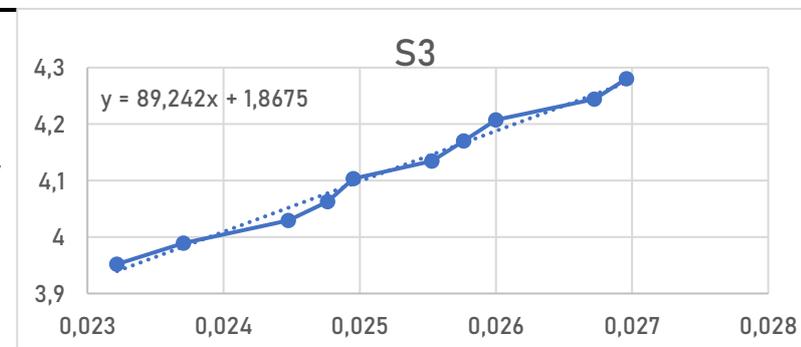
S2

P_{mean} 4,47800812
 Equazione $y = 90,226x + 1,851$
 Cedevolezza 0,01108328
 Scostamento -0,99%



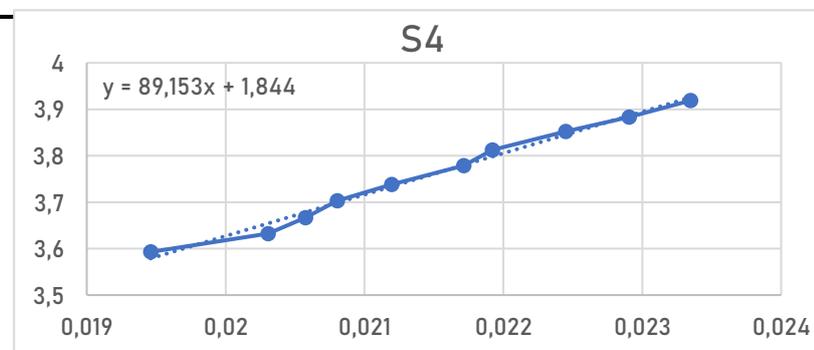
S3

P_{mean} 4,11731656
 Equazione $y = 89,242x + 1,867$
 Cedevolezza 0,011205486
 Scostamento -2,10%



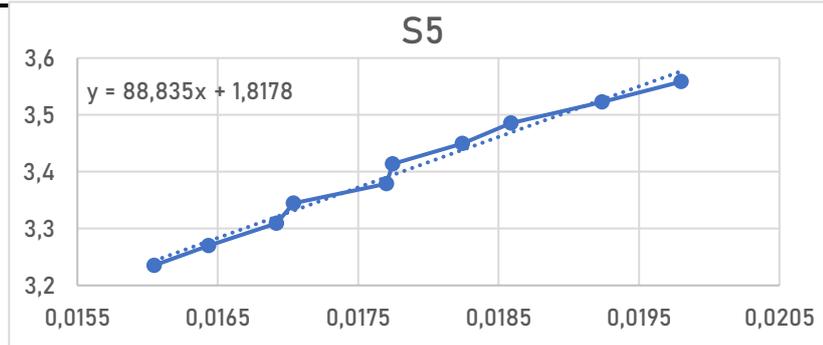
S4

P_{mean} 3,75797782
 Equazione $y = 89,153x + 1,844$
 Cedevolezza 0,11216672
 Scostamento -2,20%



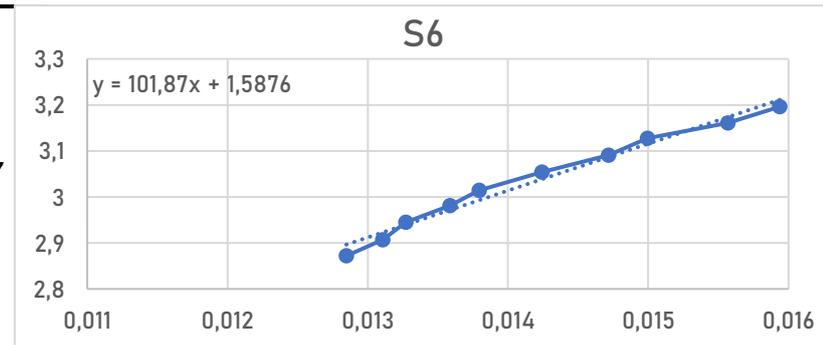
S5

P_{mean} 3,39686242
Equazione $y = 88,835x + 1,817$
Cedevolezza 0,011256824
Scostamento -2,57%



S6

P_{mean} 3,03487136
Equazione $y = 101,87x + 1,587$
Cedevolezza 0,009816433
Scostamento 10,56%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevolezza di opening:

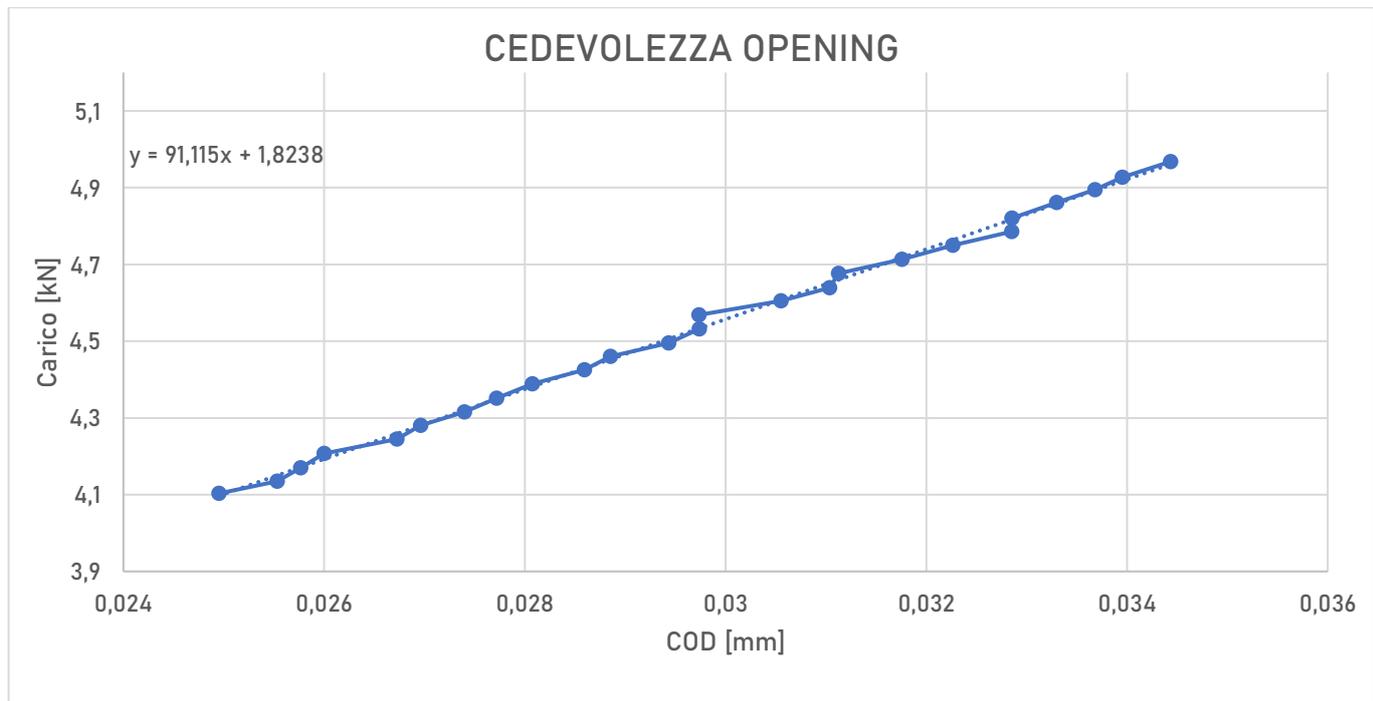


Figura 4.18 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

E il grafico relativo al carico-scostamento:

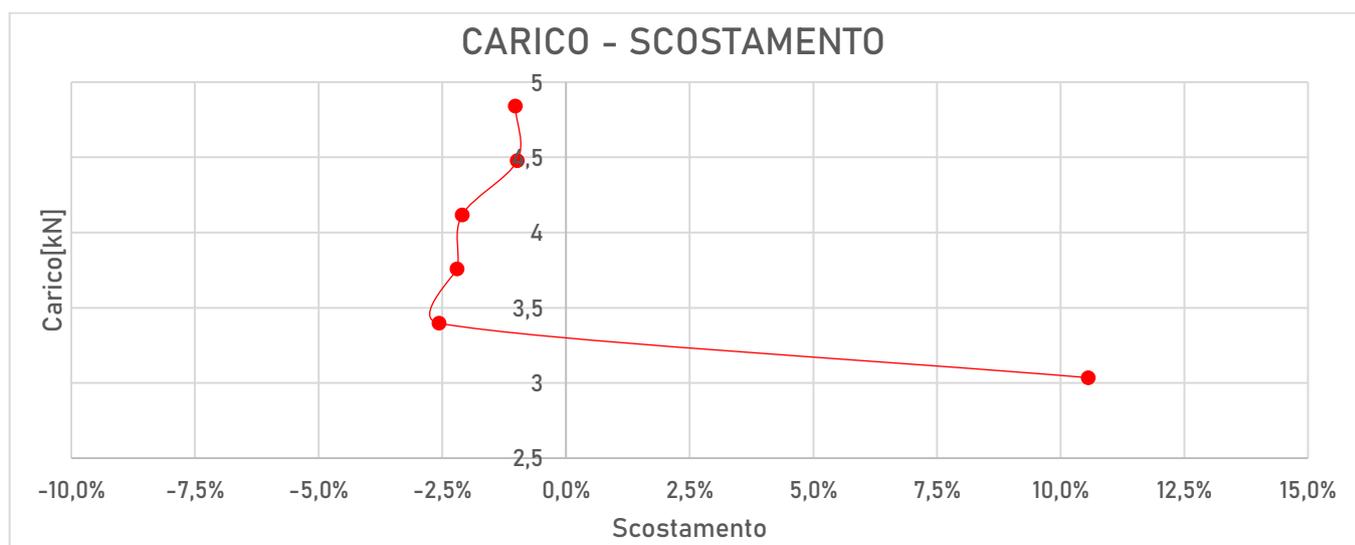


Figura 4.19 - Grafico carico-Compliance Offset

Lo scostamento brusco nel segmento S6 evidenzia che sono presenti fenomeni di chiusura e nell'intorno del valore di forza medio del segmento. Le facce antagoniste di qualche tratto della cricca, prima incollate l'una sull'altra, con tutta probabilità ora si staccano perché viene raggiunto il carico di apertura, portando ad una modifica globale e brusca della rigidità del sistema.

A conferma di ciò, anche in questo caso i risultati della correlazione immagine digitale riportano risultati coerenti con quelli di cedevolezza.

In questo caso il provino è stato assoggettato a un ciclo di carico compreso fra -0,5 kN e -5 kN con una frequenza di 0,25 Hz come riporta il grafico sottostante.

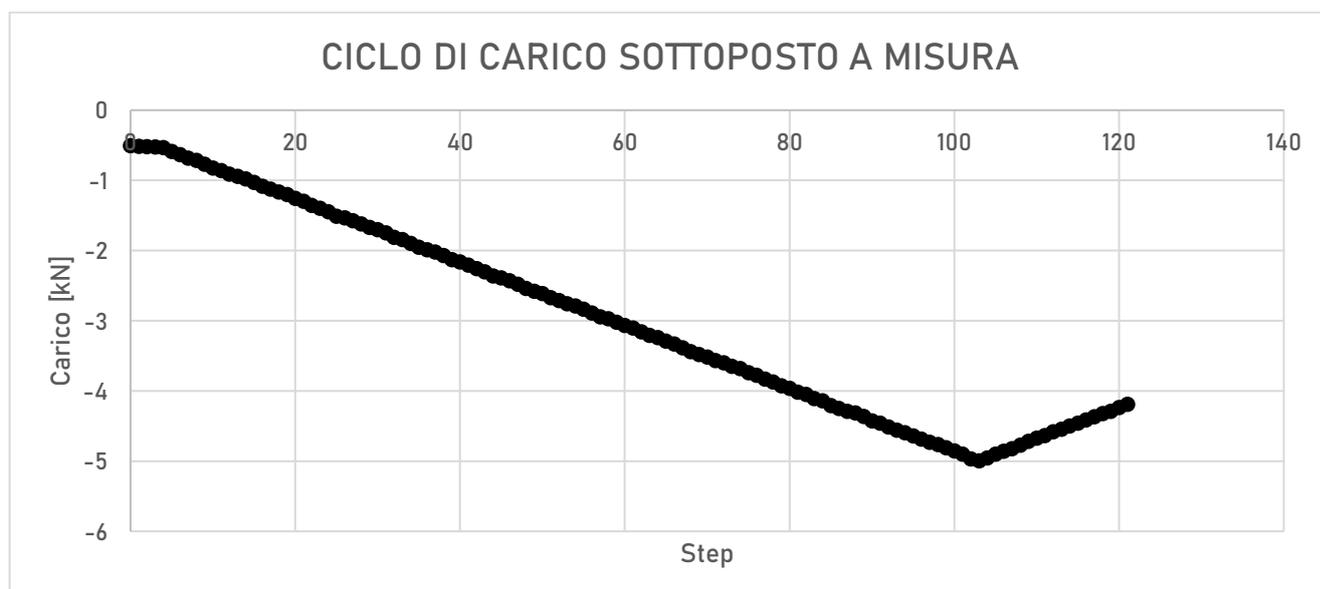


Figura 4.20 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Come si può vedere dal grafico soprastante, lo step in cui il provino è soggetto al massimo carico in valore assoluto è quello 103. Pertanto, in questo step ci si aspetta il massimo valore di spostamento.

I risultati a questo step sono raffigurati qui di seguito:

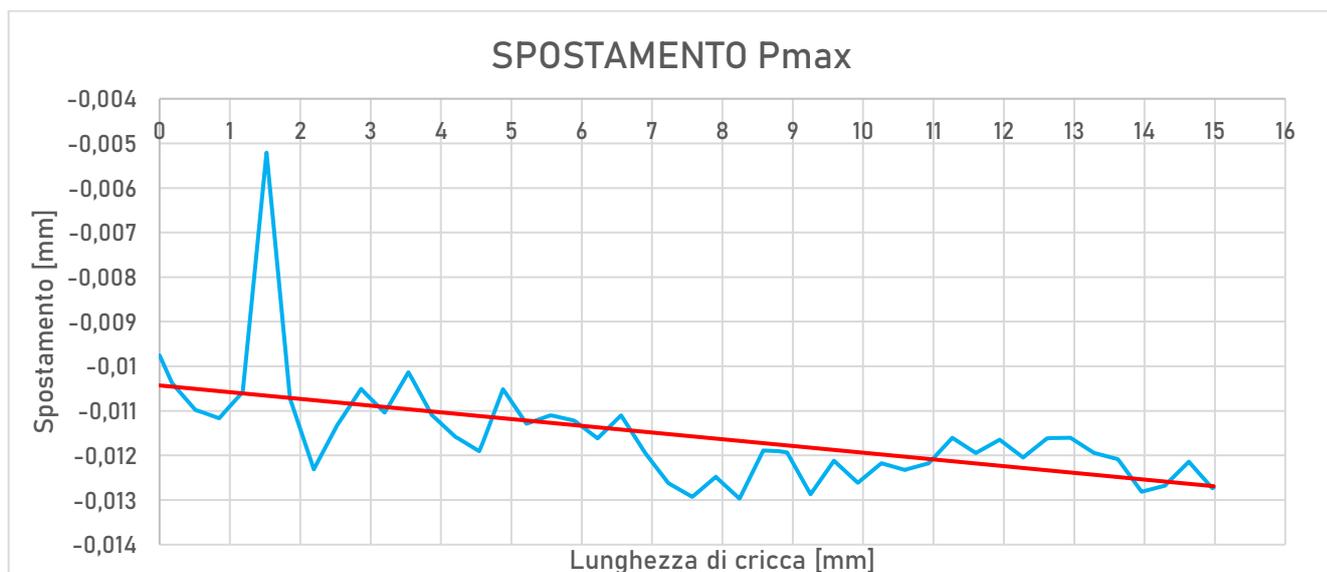


Figura 4.21 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca

Anche in questo caso il campo degli spostamenti in direzione perpendicolare all'applicazione del carico mette in evidenza che sono presenti fenomeni di chiusura in zone della cricca distanti nell'intorno dei 4,5 mm e degli 8mm dall'apice dell'intaglio preesistente, mentre la linea di tendenza riporta un profilo coerente con quello teorico.

Di seguito viene riportata per completezza la **Figura 4.22**, foto del campo di deformazioni di tutta la zona di interesse allo Step 103, lato A.

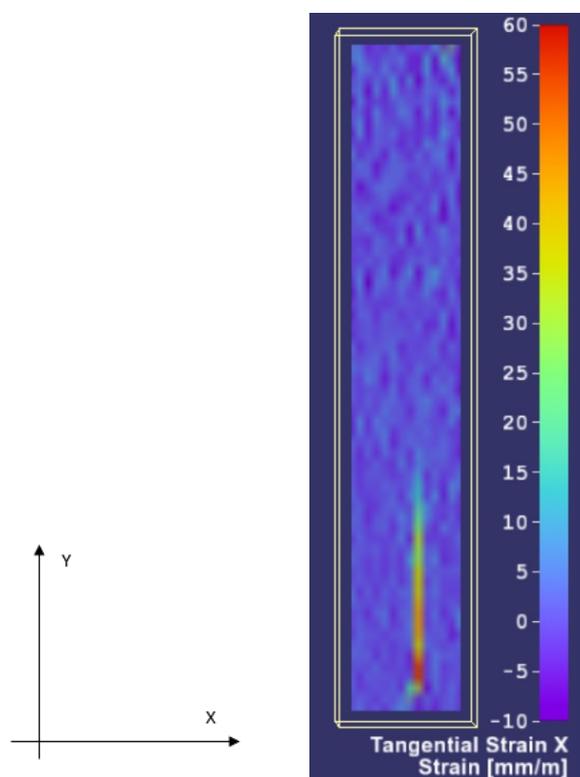


Figura 4.22 - Campo deformazioni lungo asse x - Lato A

Anche questo provino è stato anche sottoposto all'analisi per la ricerca del K_{Op} .

La curva COD – P completa è:

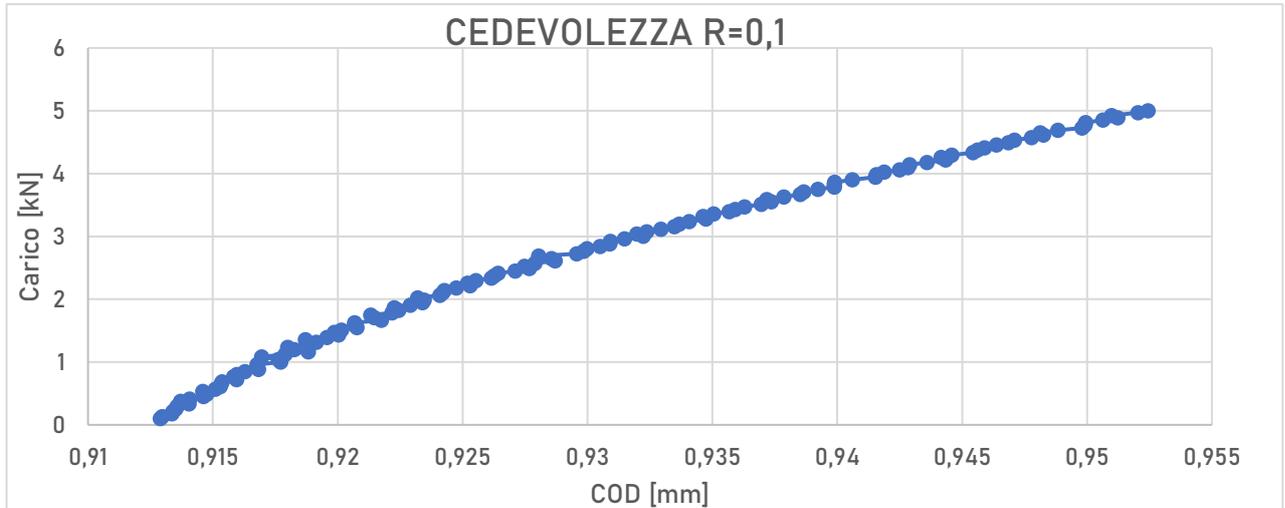


Figura 4.23 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

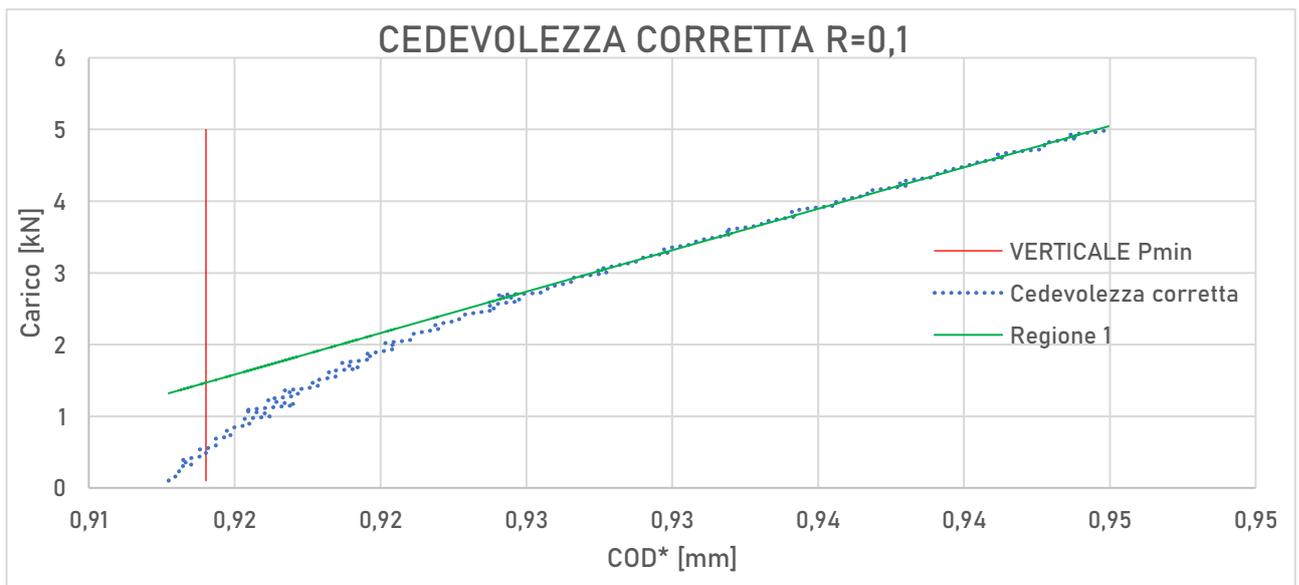


Figura 4.24 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Si può notare che in seguito alla correzione introdotta con $C(a_N)P$, il ginocchio della curva risulti più marcato, rendendo meno arbitraria l'individuazione del carico di apertura.

Il carico di apertura risulta essere:

$$P_{op} = 1,47 \text{ kN}$$

E di conseguenza il valore di K , per cui si verifica apertura, è:

$$K_{op} = 3,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Noto quindi il valore di K_{op} e del K_{max} durante la prova si ricava il valore di ΔK_{eff} , che risulta essere:

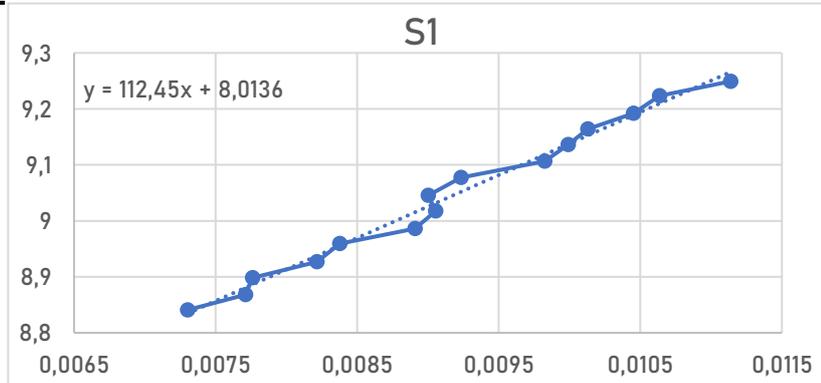
$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = 8,11 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

4.4.3 PROVINO 291-1 – R=0,85

Per quanto riguarda il campione 291-1, sottoposto a carichi con $R = 0,85$ ci si aspetta di non vedere fenomeni di chiusura evidenti, poiché le facce della fessura sono via via più lontane e il movimento che si impone alla cricca è sempre più limitato con il crescere del rapporto R. Per valori di carico molto vicino alla soglia infatti, con il metodo di “Offset Compliance” si sono ottenuti i seguenti risultati:

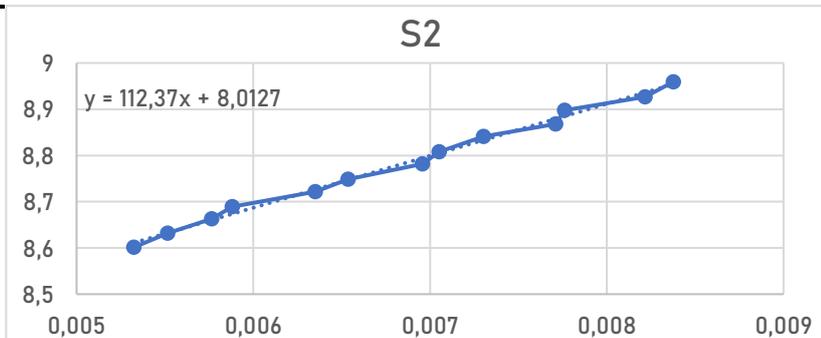
S1

P_{mean} 9,11987124
 Equazione $y = 112,45x + 8,013$
 Cedevolezza 0,008875477
 Ced. Opening 0,008862891
 Scostamento -0,14%



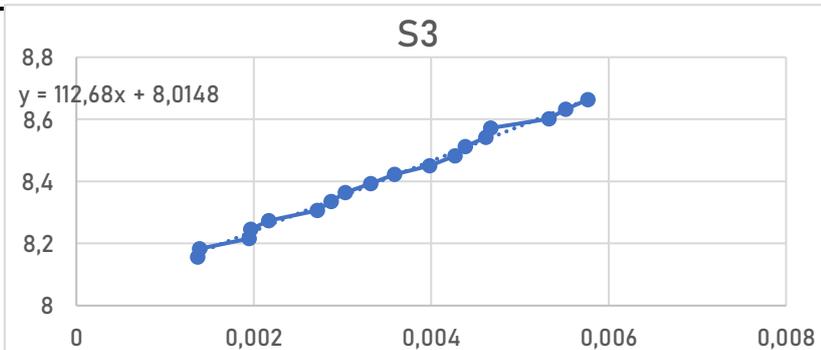
S2

P_{mean} 8,82419158
 Equazione $y = 112,37x + 8,012$
 Cedevolezza 0,008899172
 Scostamento -0,41%



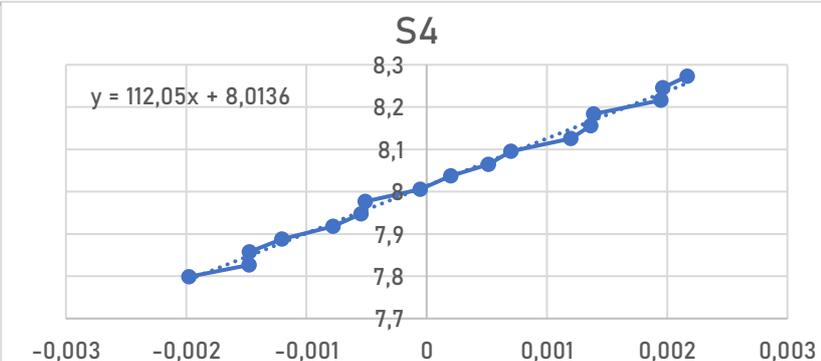
S3

P_{mean} 8,482774723
 Equazione $y = 112,68x + 8,014$
 Cedevolezza 0,008875477
 Scostamento -0,14%



S4

P_{mean} 7,887386946
 Equazione $y = 112,05x + 8,013$
 Cedevolezza 0,008924587
 Scostamento -0,70%



S5

P_{mean}

7,5012524

Equazione

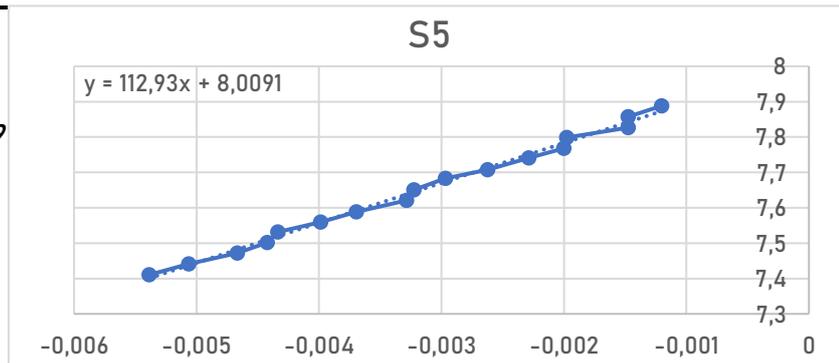
$y = 112,93x + 8,009$

Cedevolezza

0,008855043

Scostamento

0,09%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevolezza di opening:

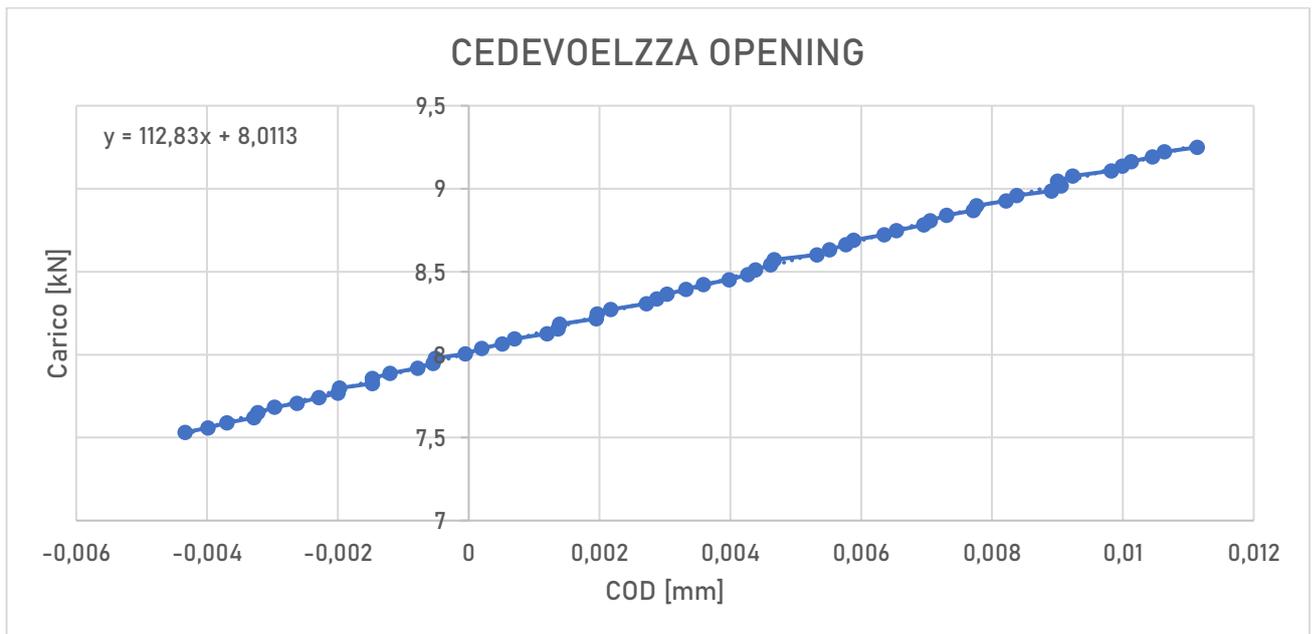


Figura 4.25 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

E il grafico relativo al carico-scostamento risulta essere:

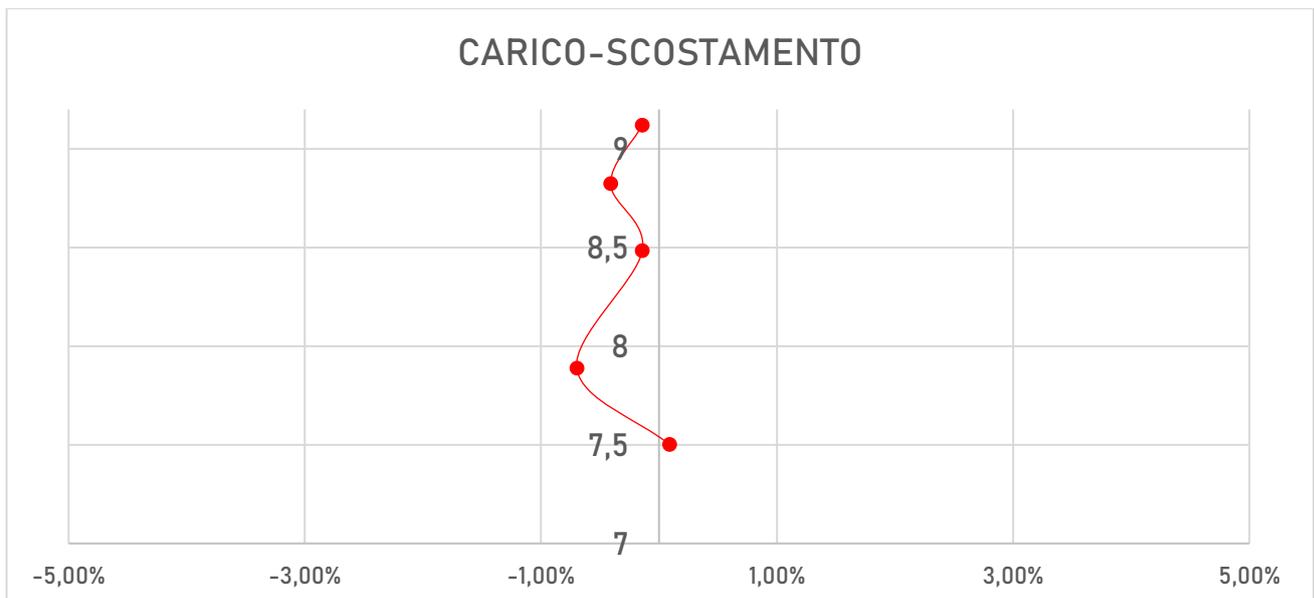


Figura 4.26 - Grafico carico-Compliance Offset

Come ci si aspettava, non si notano scostamenti eccessivi della cedevolezza nei vari tratti analizzati, indice che non sono presenti fenomeni di chiusura evidenti nella zona di carico in esercizio del provino. Il massimo scostamento in valore assoluto dal valore di opening si ha nel tratto denominato "S4" e pari allo 0,7%. Tuttavia, si può ritenere che tale variazione sia assai meno marcata rispetto a quelle misurate per i campioni precedenti e che sia essenzialmente imputabile al disturbo del segnale.

La non presenza di fenomeni di chiusura marcata, nella zona di sollecitazione a cui è sottoposto il provino, viene confermata anche dalla correlazione immagine digitale.

Il ciclo di carico a cui è assoggettato il provino è:

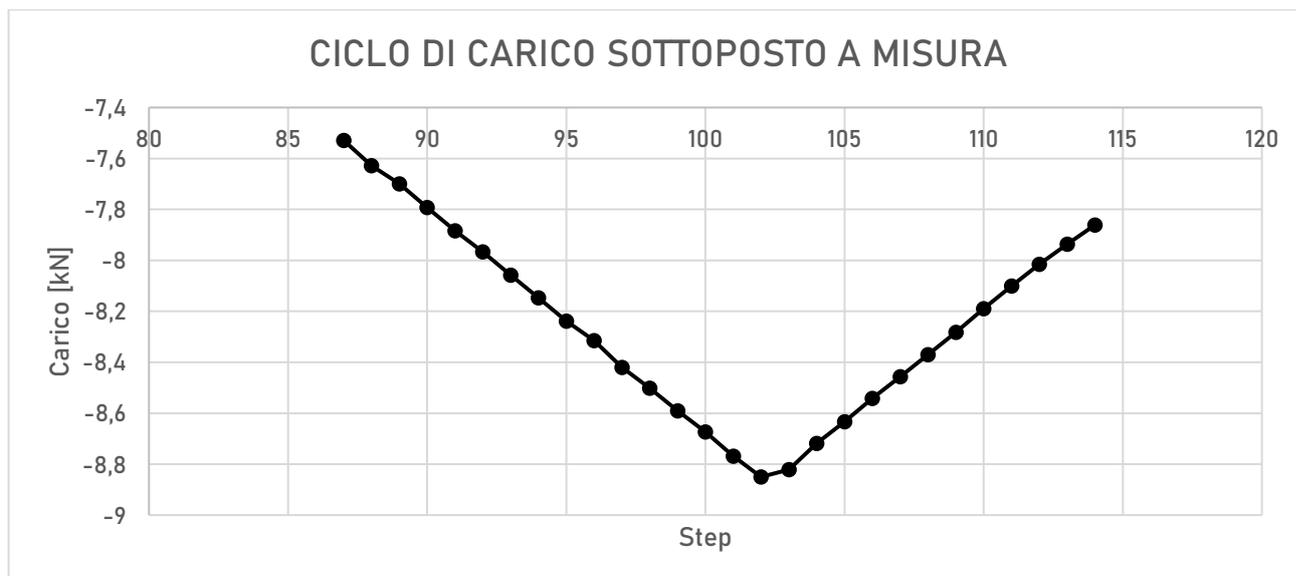


Figura 4.27 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Lo step a cui il provino è soggetto al massimo carico è quindi il 102. Per questo step sono stati ottenuti i seguenti risultati:

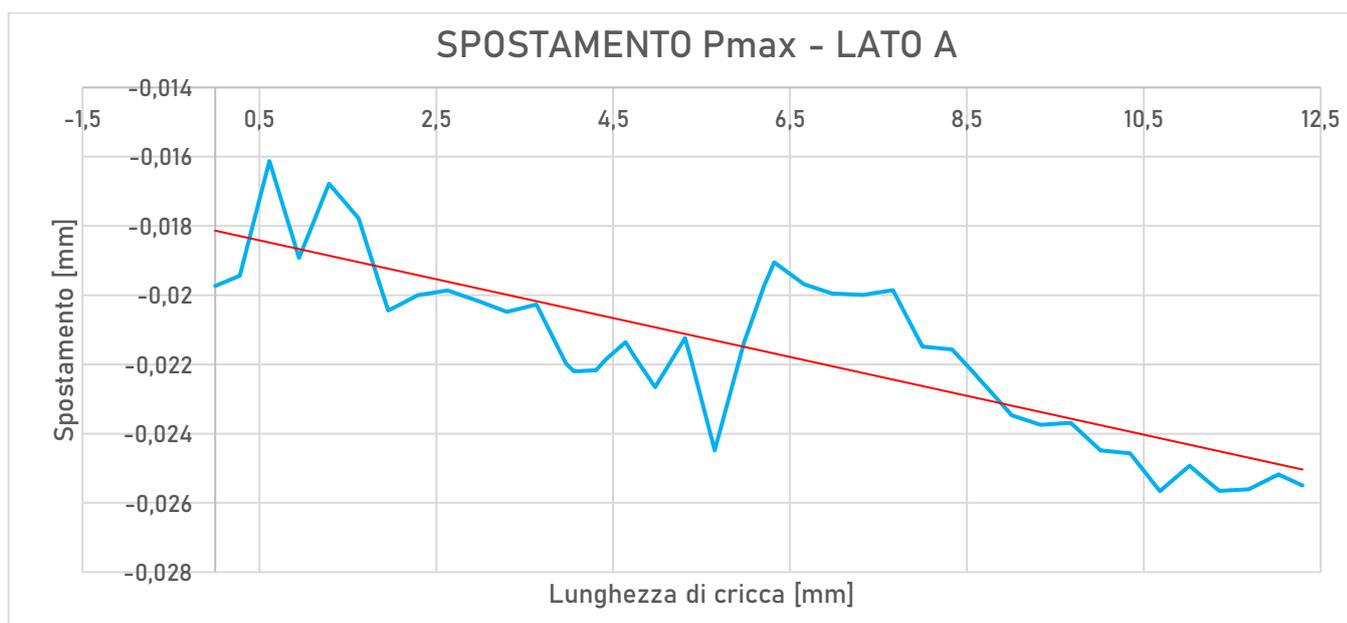


Figura 4.28 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca, Lato A

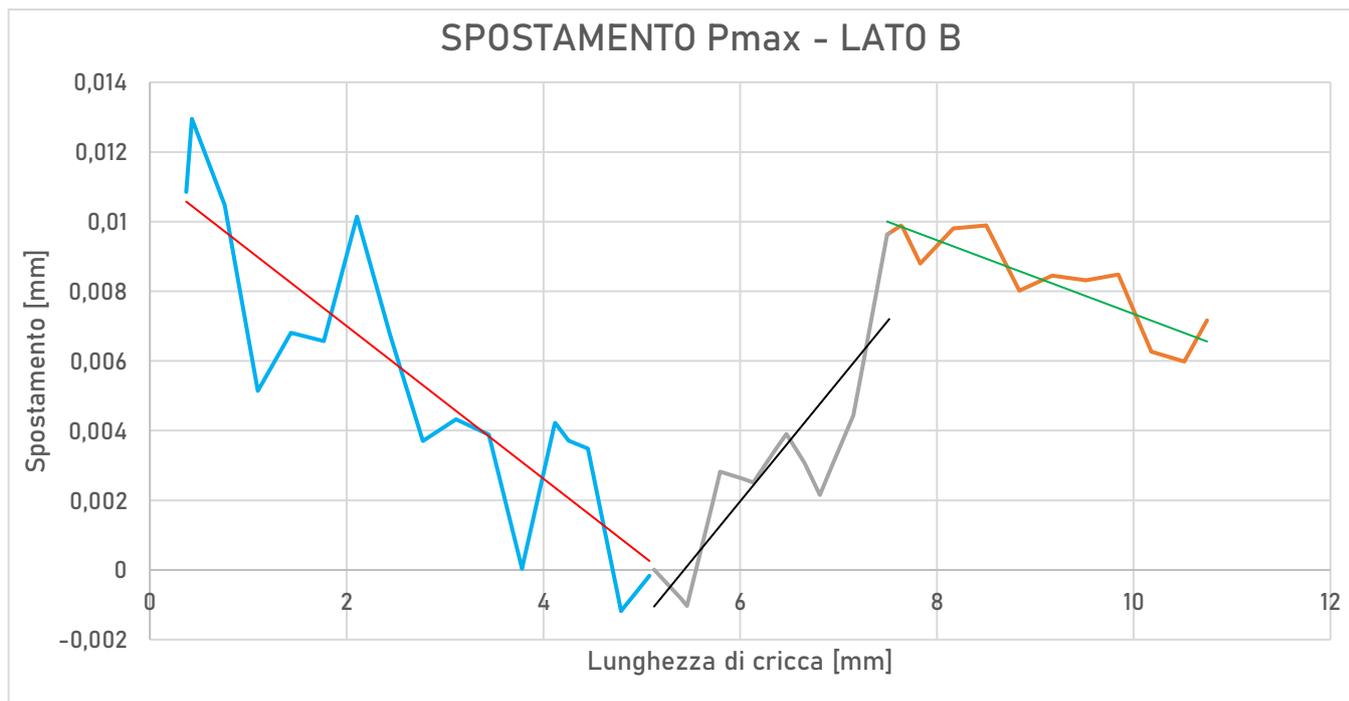


Figura 4.29 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca, Lato B

Per quanto riguarda il lato A si può notare che non sono presenti macroscopici fenomeni di chiusura e che la cricca risulta avere un profilo tendente a quello “ideale” (profilo in rosso).

Gli scostamenti da tale profilo sono dovuti essenzialmente al rumore sul segnale in parte e in parte alla non perfetta linearità della fessura, comunque non così elevata da generare incollamento delle facce.

Il profilo particolare sul lato B invece mette in evidenza il fenomeno della propagazione mista, della cui descrizione si rimanda al **Paragrafo 1.7**.

Infatti, sino a circa 5 mm dall’apice dell’intaglio la cricca sembra avere un andamento molto simile al lato A, dopo di che c’è un tratto da 5mm a circa 7mm dall’apice dell’intaglio (profilo grigio) dove la cricca cambia piano e riprende poi ad avere un profilo che riprende nuovamente quello ideale (evidenziato in arancio).

Tale tipo di comportamento, è con tutta probabilità dovuto alla variazione del valore di K_{max} in esercizio o ad un cambio microstrutturale, questo porta a non avere una propagazione in cui il tasso di rilascio di energia elastica sia massimo e costringe la cricca a cambiare piano di propagazione, muovendosi sia in Modo 1 che in Modo 2.

Se il fenomeno è molto marcato non ci si ritrova solo con una cricca che nel dettaglio ha un profilo frastagliato ma che complessivamente sembra seguire un profilo teorico di propagazione in Modo 1 come nel caso in **Figura 4.28**, ma con una macroscopica deviazione angolare di quest’ultima dal profilo teorico come nel caso in **Figura 4.29**.

Tale fenomeno si evidenzia anche dalla mappa delle deformazioni ottenuta tramite DIC, mostrate qui di seguito in **Figura 4.30** e **4.31**:

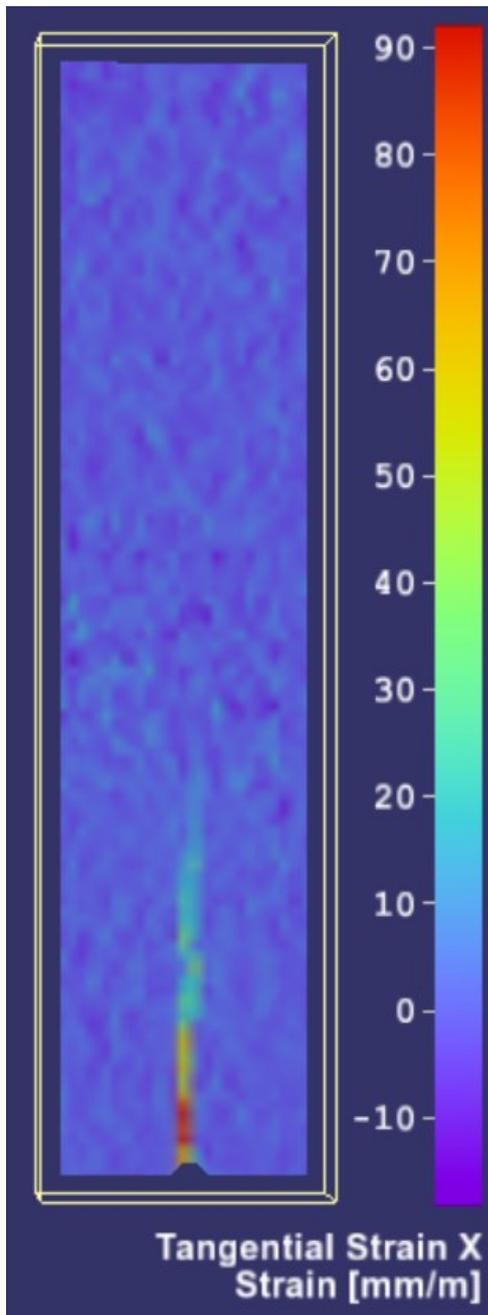
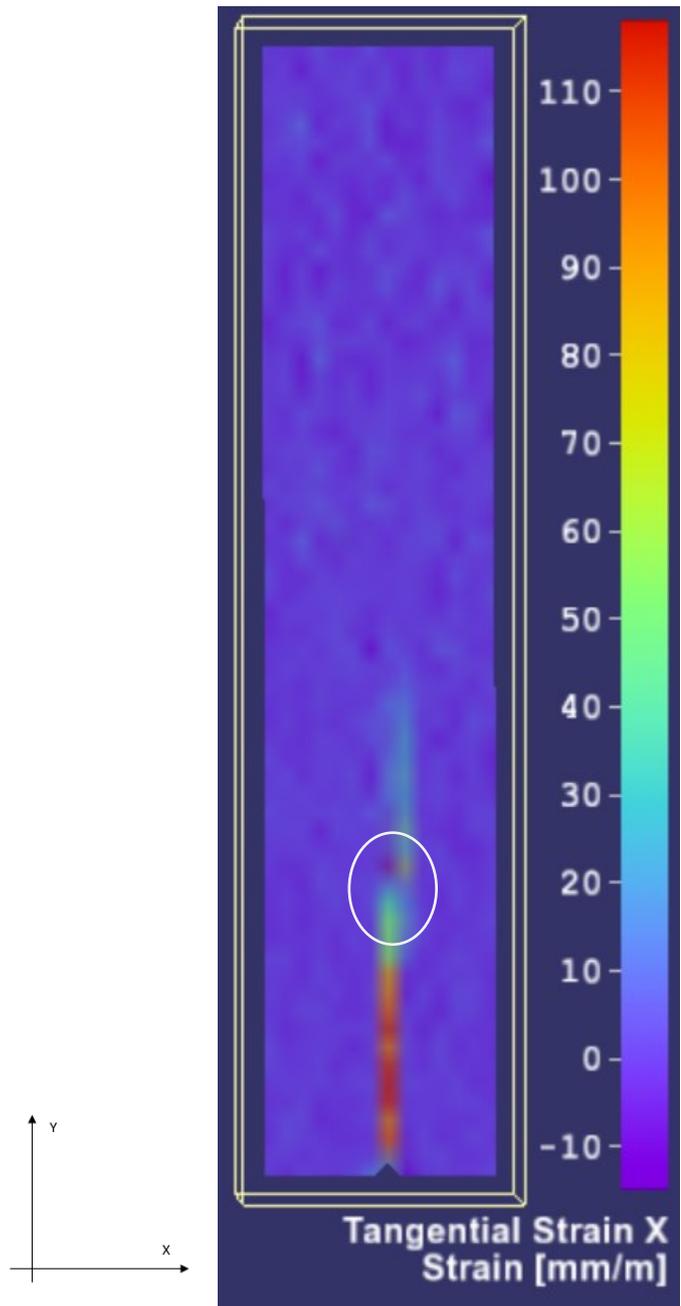


Figura 4.31 – Campo deformazioni lungo x - Lato A.



*Figura 4.30 – Campo deformazioni lungo x – Lato B.
In bianco è evidenziato il punto in cui si verifica propagazione mista.*

Anche questo provino è stato sottoposto all'analisi per la ricerca del K_{OP} . Lo scopo tuttavia, in questo caso, era quello di confermare che nel range di carico in cui il provino è stato sottoposto durante la prova non si verificasse chiusura.

La curva COD – P completa è:

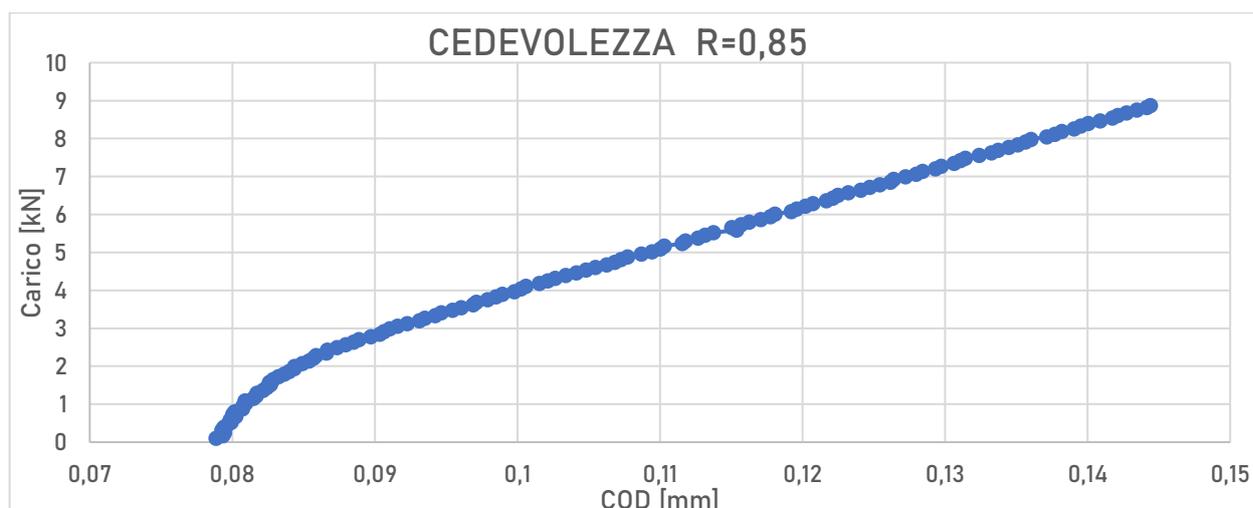


Figura 4.32 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

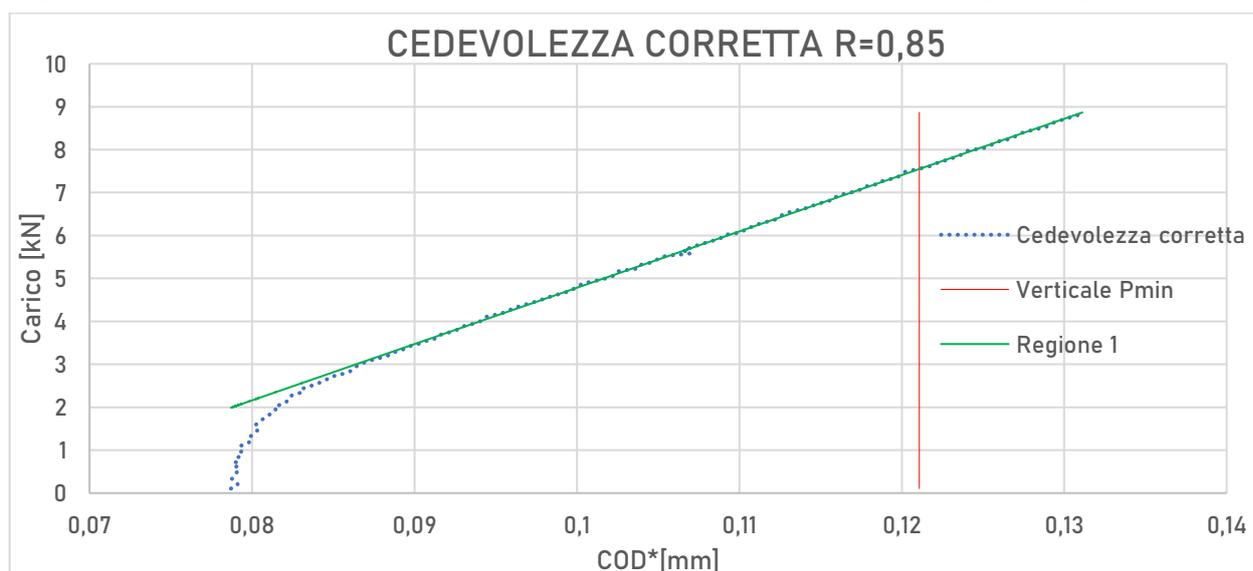


Figura 4.33 - Curva carico - COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

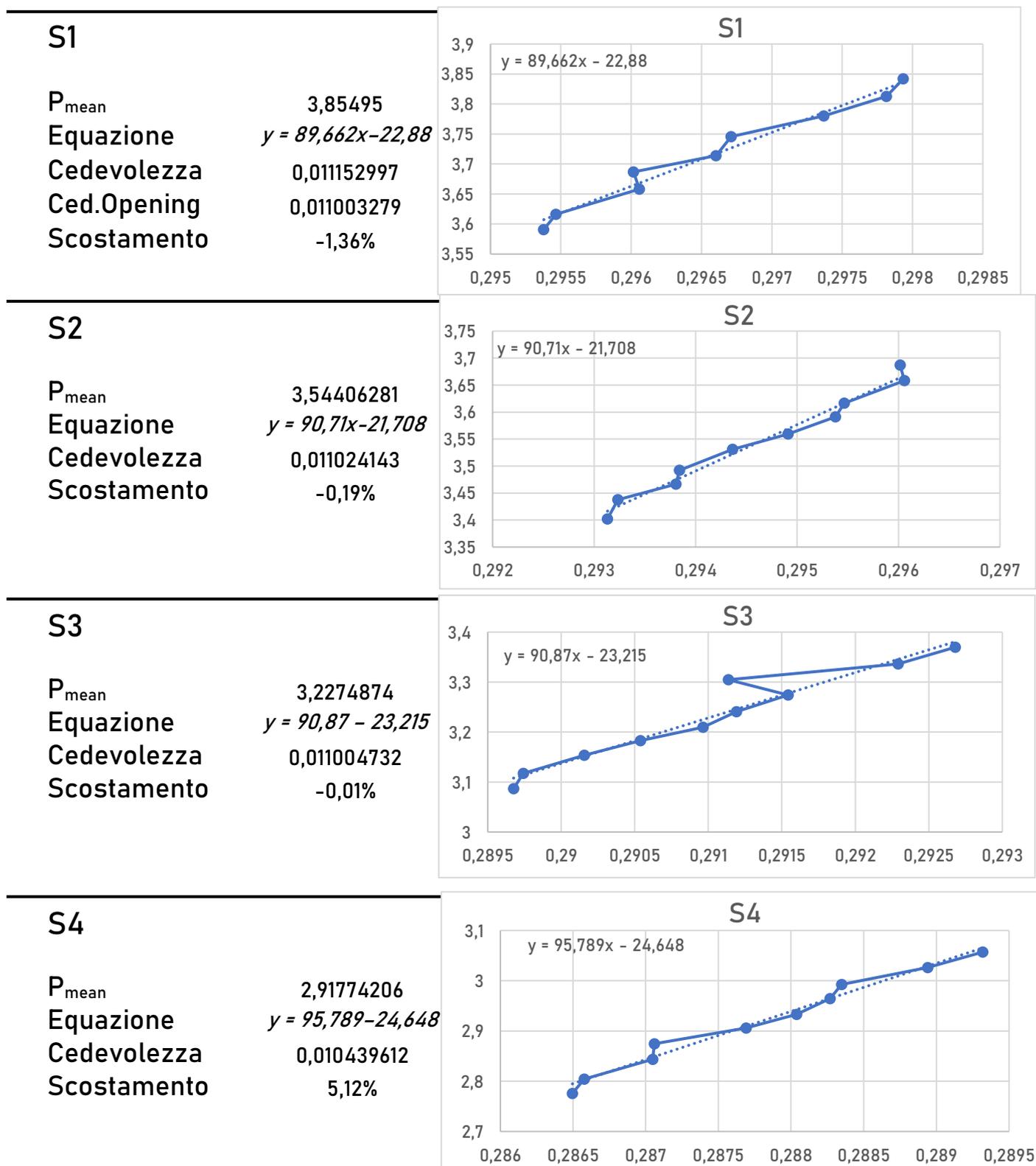
Si può notare che in seguito alla correzione introdotta con $C(a_N)P$, il ginocchio della curva risulti anche in questo caso più marcato. Analizzando la **Figura 4.33** il risultato interessante è che la verticale per il valore di COD^* corrispondente al carico minimo P_{min} cada completamente nella **Regione 1**, tratto lineare in cui la cricca è completamente aperta. Per cominciare a vedere un fenomeno di chiusura è necessario scendere ancora molto con il carico sino ad arrivare a circa 2 kN, valore che il provino non raggiunge mai nella prova per la determinazione di ΔK_{th} .

È comunque interessante notare che a prescindere dal rapporto di carico a cui si sottopone il provino, è sempre presente un ginocchio in queste prove, ad indicare che esistono sempre fenomeni di chiusura se il provino è criccato. Però si può altrettanto concludere che essi diventino poco influenti quando il rapporto di carico R diventa molto alto, tale da tenere molto ben separate le due facce della cricca.

4.4.4 PROVINO 315-1 – R=0,3

Il provino 315-1 è stato sottoposto a carichi con rapporto **R=0,3**, pertanto avendo potuto evidenziare fenomeni di chiusura per i provini 342-2 e 336-2 rispettivamente sottoposti a rapporti di carico R pari a 0,5 e 0,1, ci si aspetta di poterne evidenziare anche in questo caso.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti:



S5

P_{mean}

2,60604297

Equazione

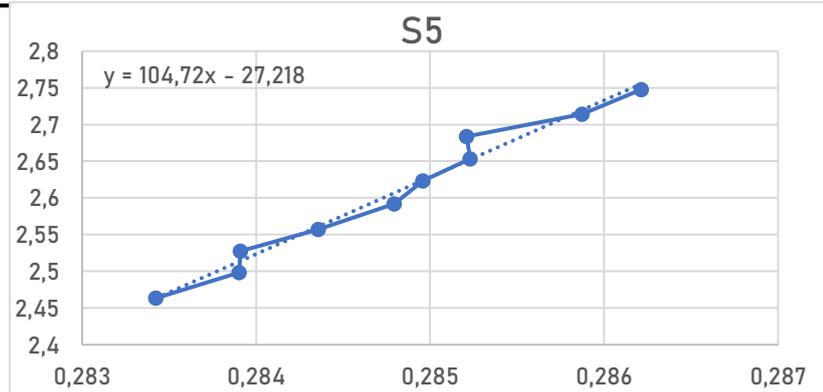
$y = 104,72x - 27,218$

Cedevolezza

0,009549274

Scostamento

13,21%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevolezza di opening:

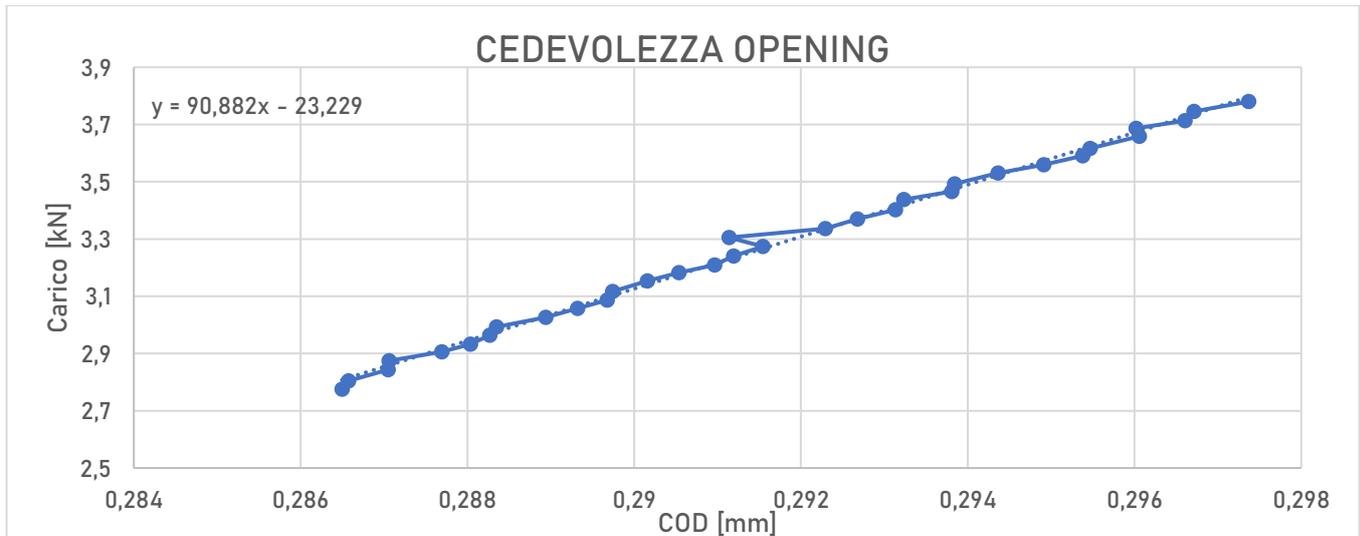


Figura 4.34 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

E il grafico relativo al carico-scostamento risulta essere:

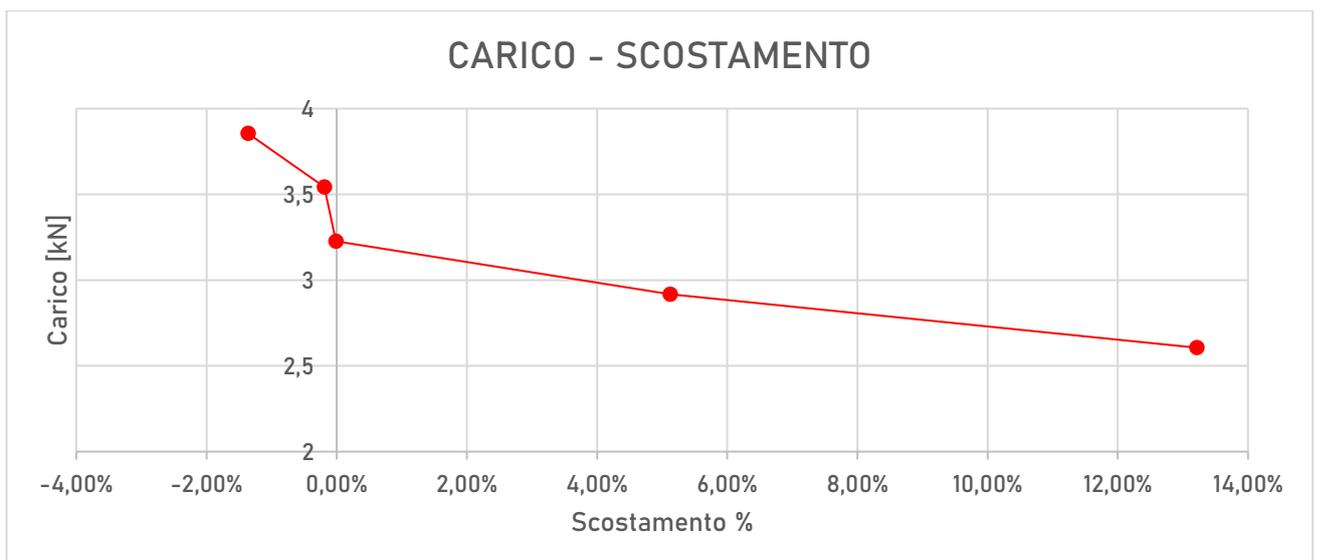


Figura 4.35 - Grafico carico-Compliance Offset

Come previsto, anche per questo provino si possono evidenziare fenomeni di chiusura in corrispondenza del tratto S4 ed S5.

A conferma di ciò, anche in questo caso i risultati della correlazione immagine digitale riportano risultati coerenti con quelli di cedevolezza.

Il provino è assoggettato ad un ciclo compreso fra -1,2 kN e -4 kN, come rappresentato dal grafico sottostante:

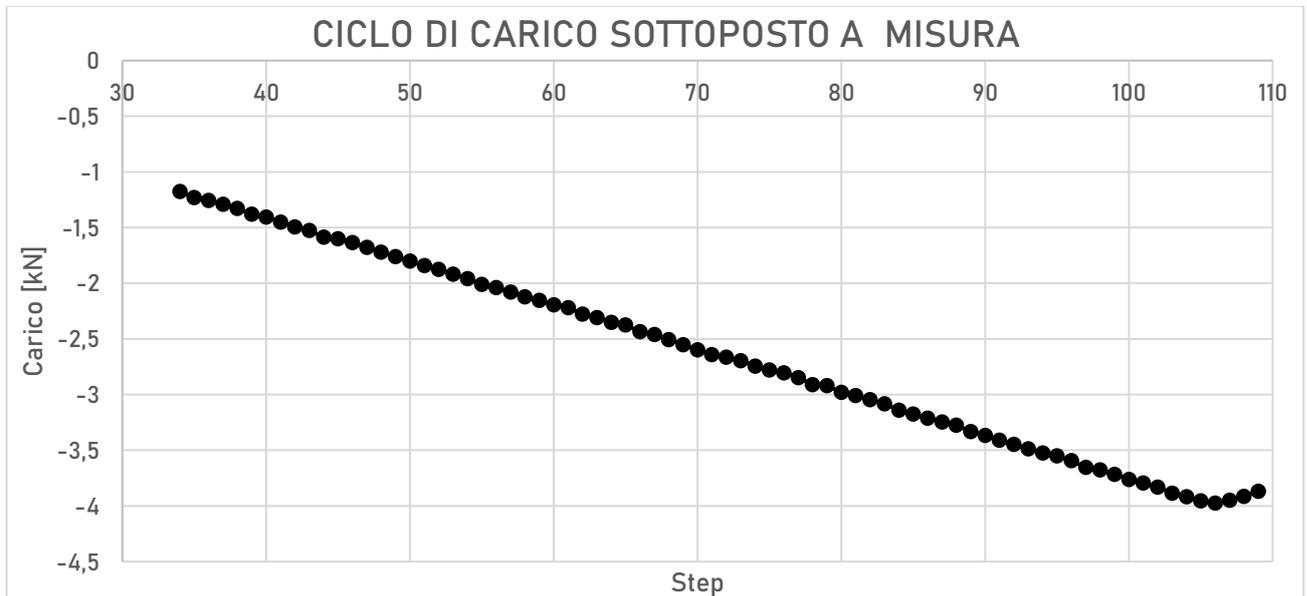


Figura 4.36 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Lo step per cui si ha massimo carico è il n° 106, pertanto gli spostamenti ottenuti sono:

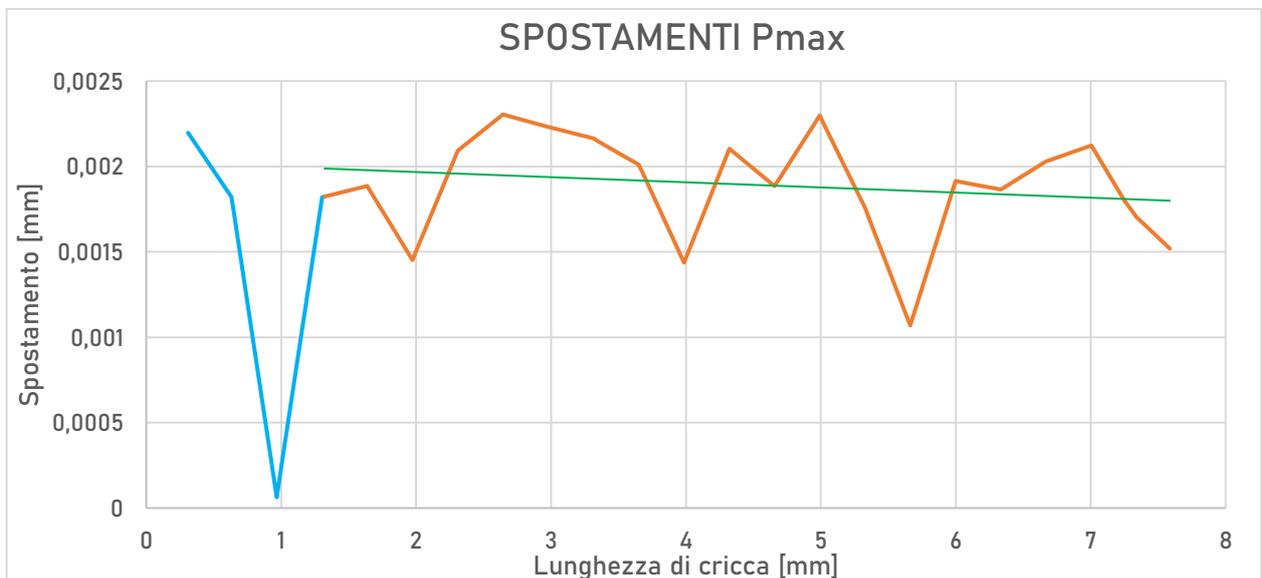


Figura 4.37 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca

È senza dubbio evidente un marcato fenomeno di chiusura ad 1 millimetro dall'apice dell'intaglio, dove lo spostamento si azzerava. Successivamente la cricca riprende ad avere un profilo coerente con quello teorico (profilo arancio-verde).

Di seguito viene riportata per completezza la **Figura 4.38**, foto del campo di deformazioni di tutta la zona di interesse allo Step 106, lato A.

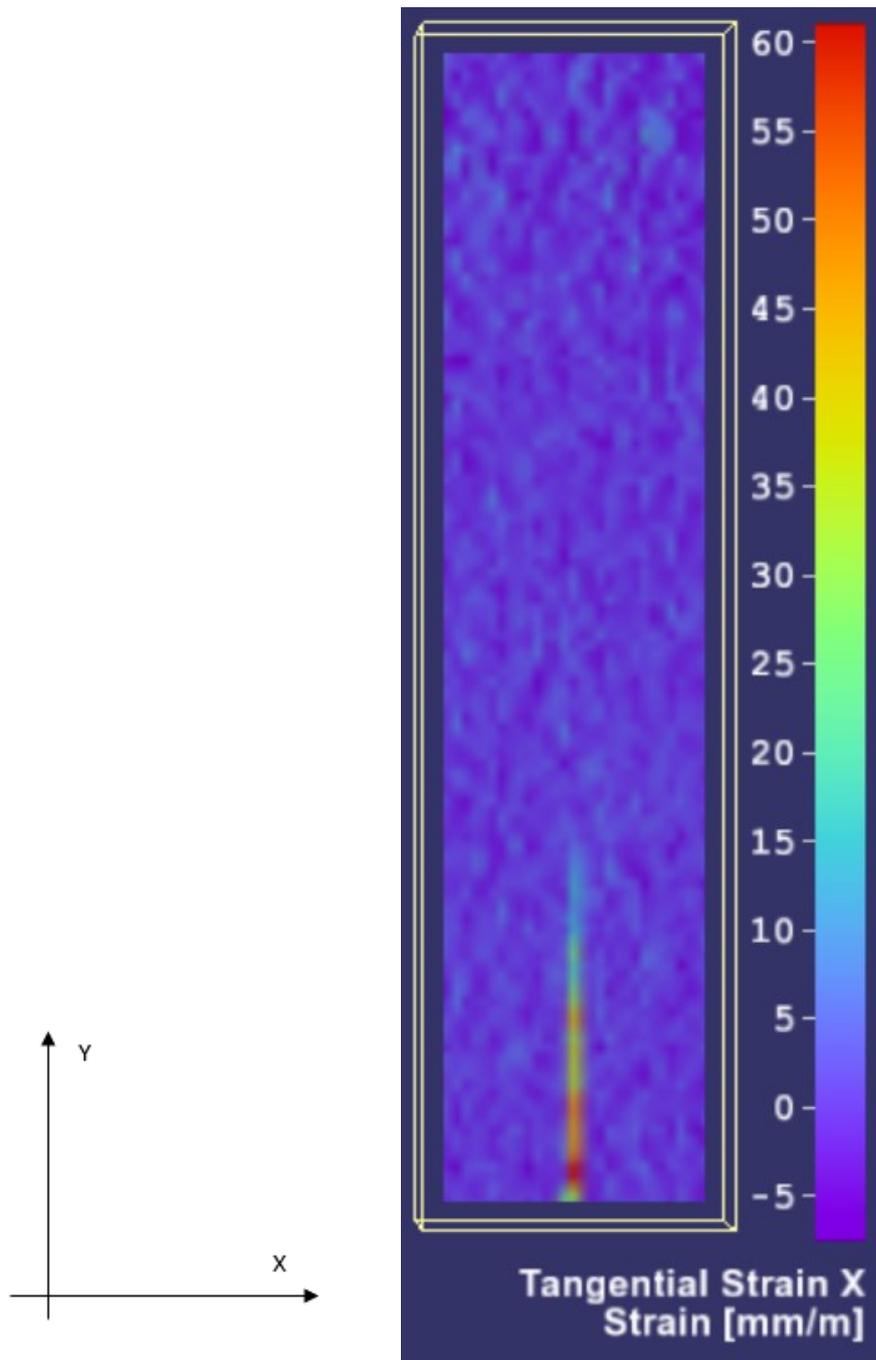


Figura 4.38-Campo deformazioni lungo x – Lato A

Avendo evidenziato fenomeni di chiusura con i metodi precedenti ci si aspetta altrettanto dall'analisi per la ricerca del K_{Op} .

La curva COD – P completa è:

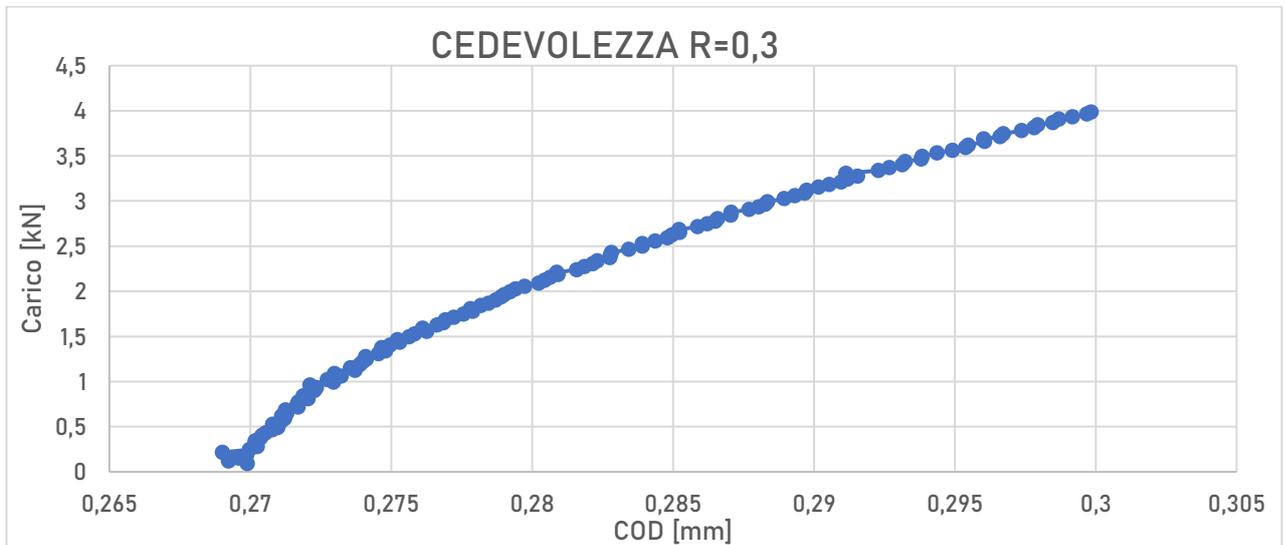


Figura 4.39 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

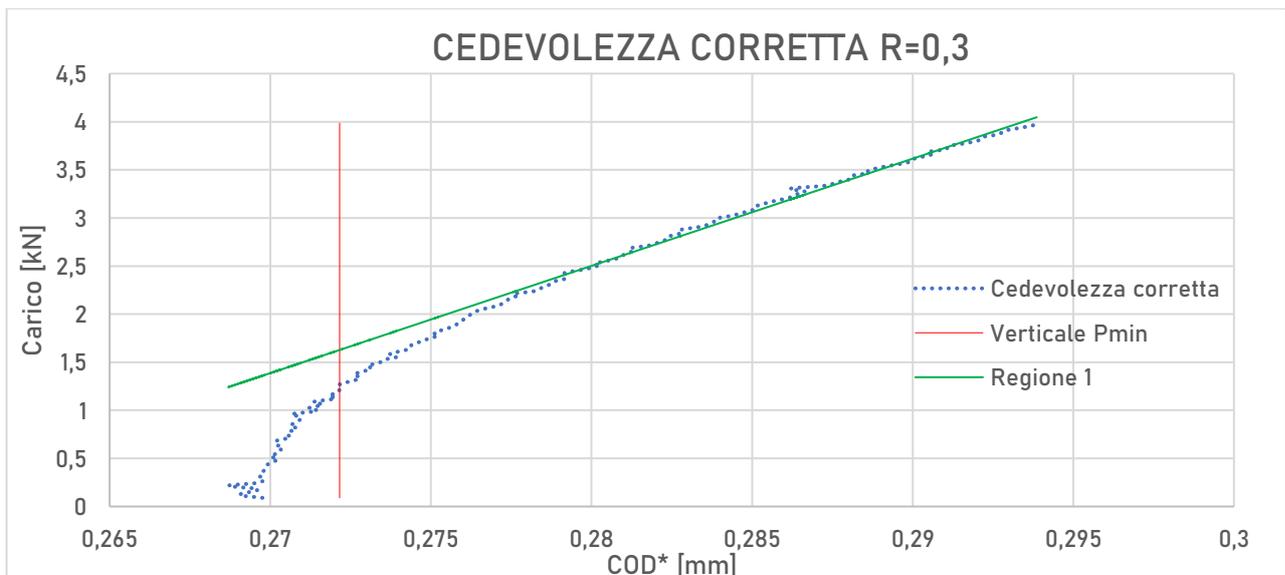


Figura 4.40 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Come previsto, la verticale per il valore di COD* corrispondente al carico minimo in prova interseca la retta della Regione 1 nella zona del ginocchio, sono quindi presenti fenomeni di chiusura. Ha senso quindi andare a valutare quale sia il valore di ΔK_{eff} .

Il carico di apertura risulta essere:

$$P_{op} = 1,64 \text{ kN}$$

E di conseguenza il valore di K, per cui si verifica apertura, è:

$$K_{op} = 4,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Noto quindi il valore di K_{op} e del K_{max} durante la prova si ricava il valore di ΔK_{eff} , che risulta essere:

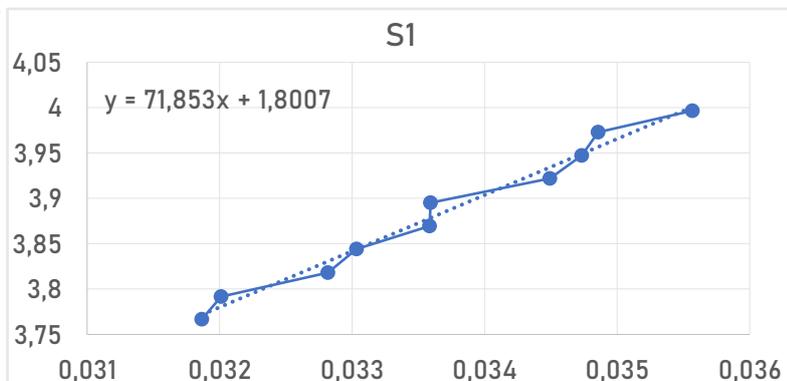
$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = 6,81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

4.4.5 PROVINO 342-1 – R=0,2

Il provino 342-1 è stato sottoposto a carichi con rapporto **R=0,2**, pertanto avendo potuto evidenziare fenomeni di chiusura per i provini 342-2 e 336-2 e 315-1 rispettivamente sottoposti a rapporti di carico R pari a 0,5 - 0,1 - 0,3, ci si aspetta di poterne evidenziare anche in questo caso.

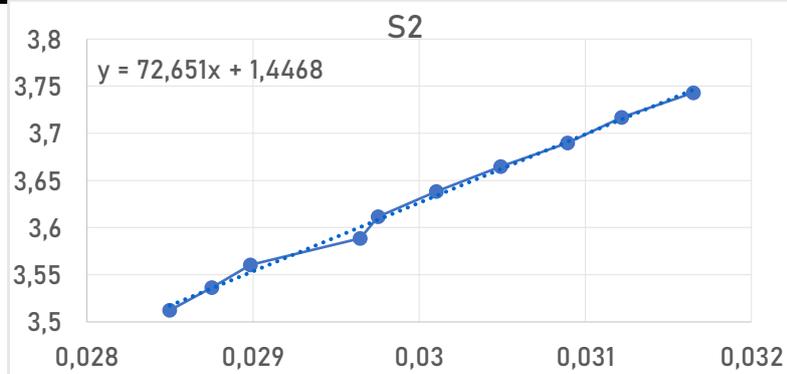
S1

P_{mean} 3,88237964
 Equazione $y = 71,853x + 1,8007$
 Cedevolezza 0,013917303
 Ced.Opening 0,013787588
 Scostamento -0,94%



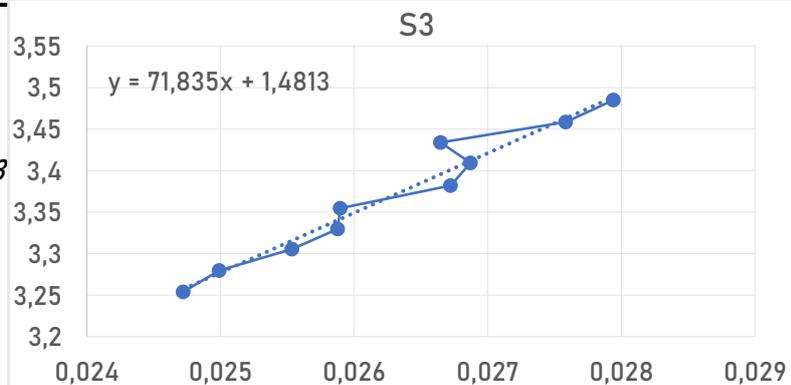
S2

P_{mean} 3,62627389
 Equazione $y = 72,651x + 1,4468$
 Cedevolezza 0,013764435
 Scostamento 0,17%



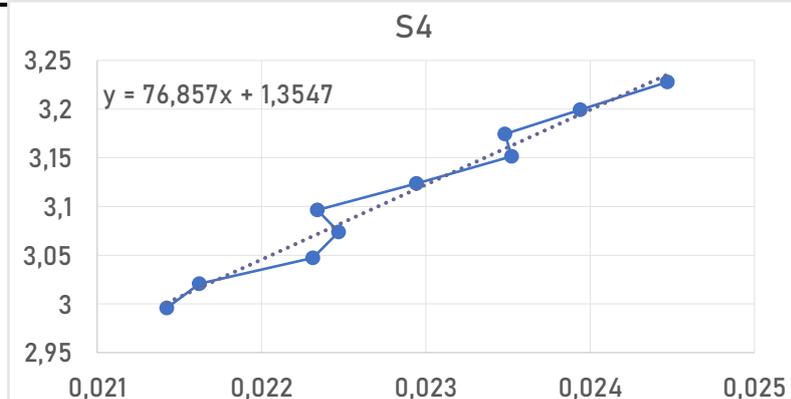
S3

P_{mean} 3,36901567
 Equazione $y = 71,835x + 1,4813$
 Cedevolezza 0,013920791
 Scostamento -0,97%



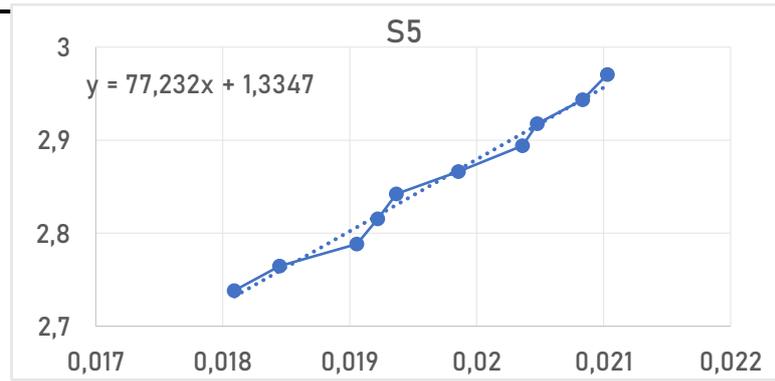
S4

P_{mean} 3,11105441
 Equazione $y = 76,857x + 1,3547$
 Cedevolezza 0,013011177
 Scostamento 5,63%



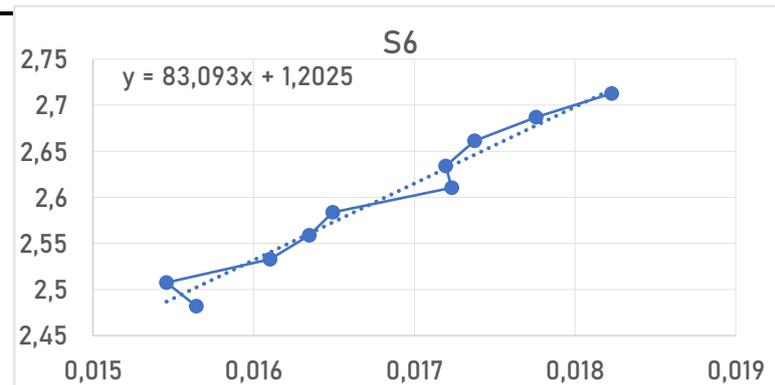
S5

P_{mean} 2,85418866
Equazione $y = 77,232x + 1,3347$
Cedevolezza 0,012948336
Scostamento 6,09%



S6

P_{mean} 2,62263655
Equazione $y = 83,093x + 1,2025$
Cedevolezza 0,012034708
Scostamento 12,71%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevolezza di opening:

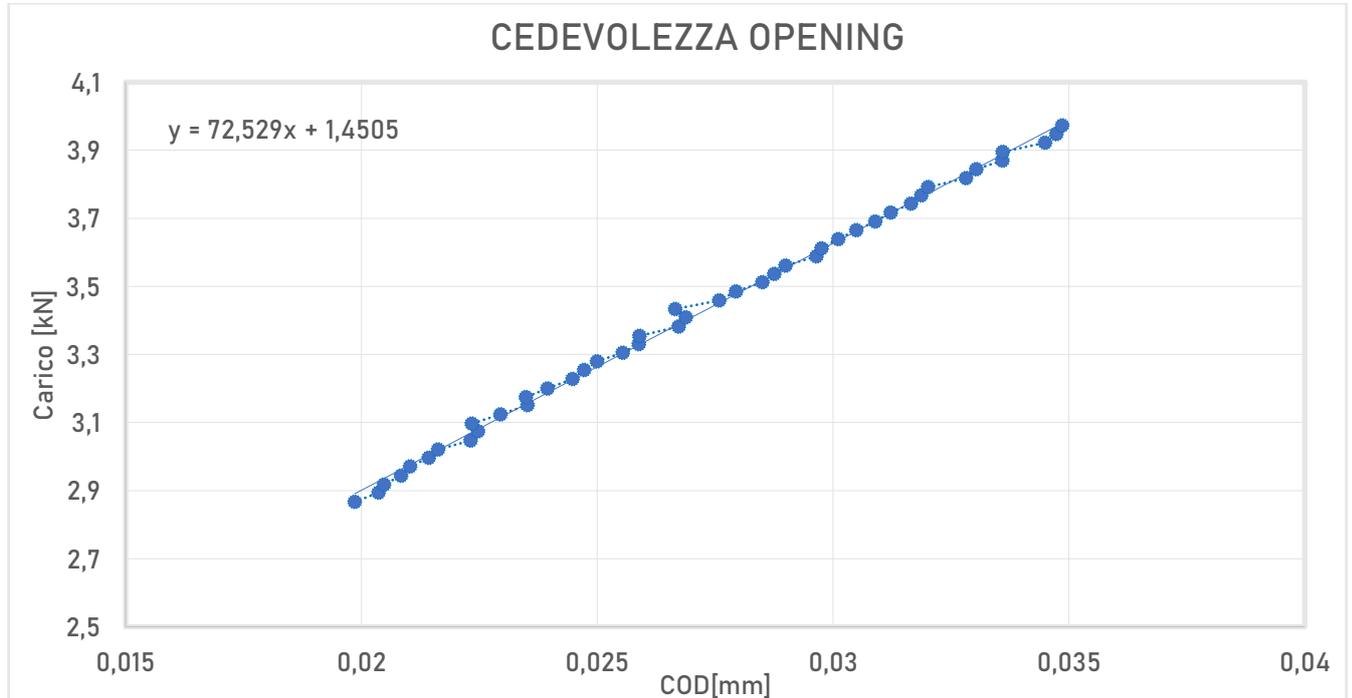


Figura 4.41 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

Il risultato carico-scostamento è:

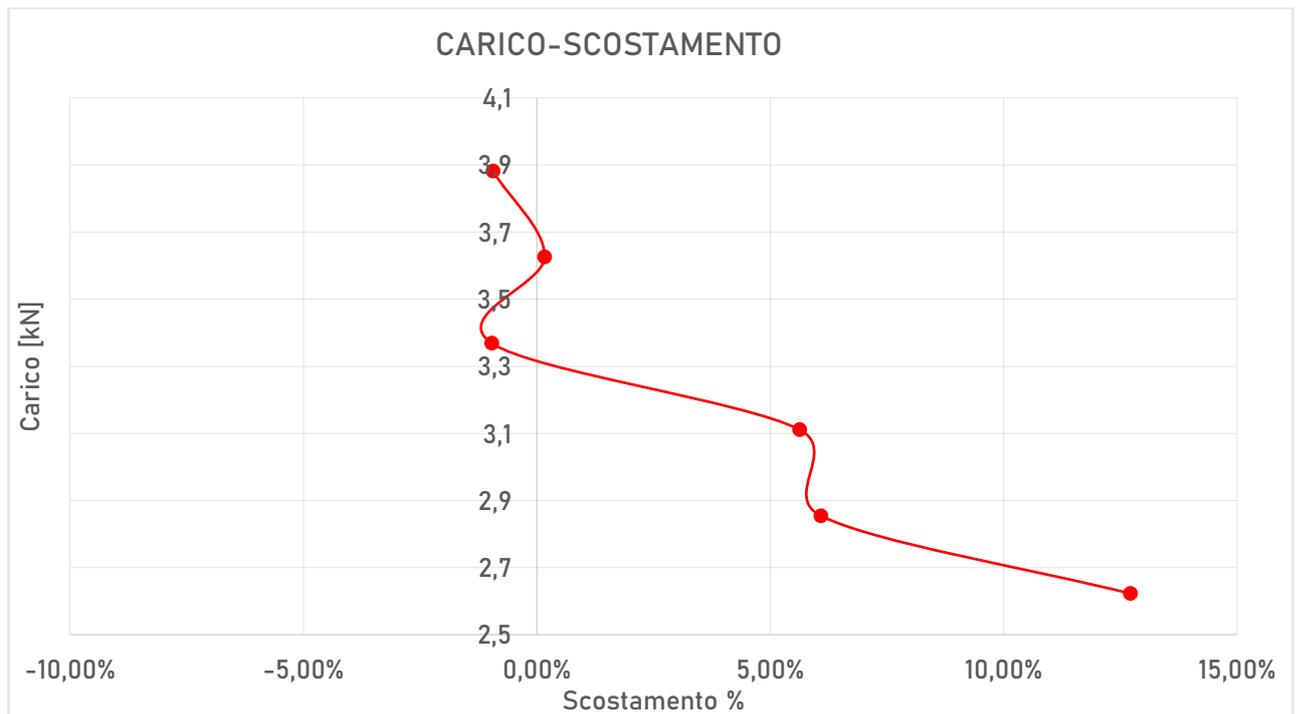


Figura 4.42 - Grafico carico-Compliance Offset

Come si può notare, dal segmento S4 in poi, lo scostamento è via via crescente al diminuire del carico medio. Questo indica che sono presenti fenomeni di chiusura per questo provino. Anche in questo caso la correlazione immagine digitale conferma ciò che è stato trovato con il compliance offset.

Il carico a cui è stato sottoposto il provino è:

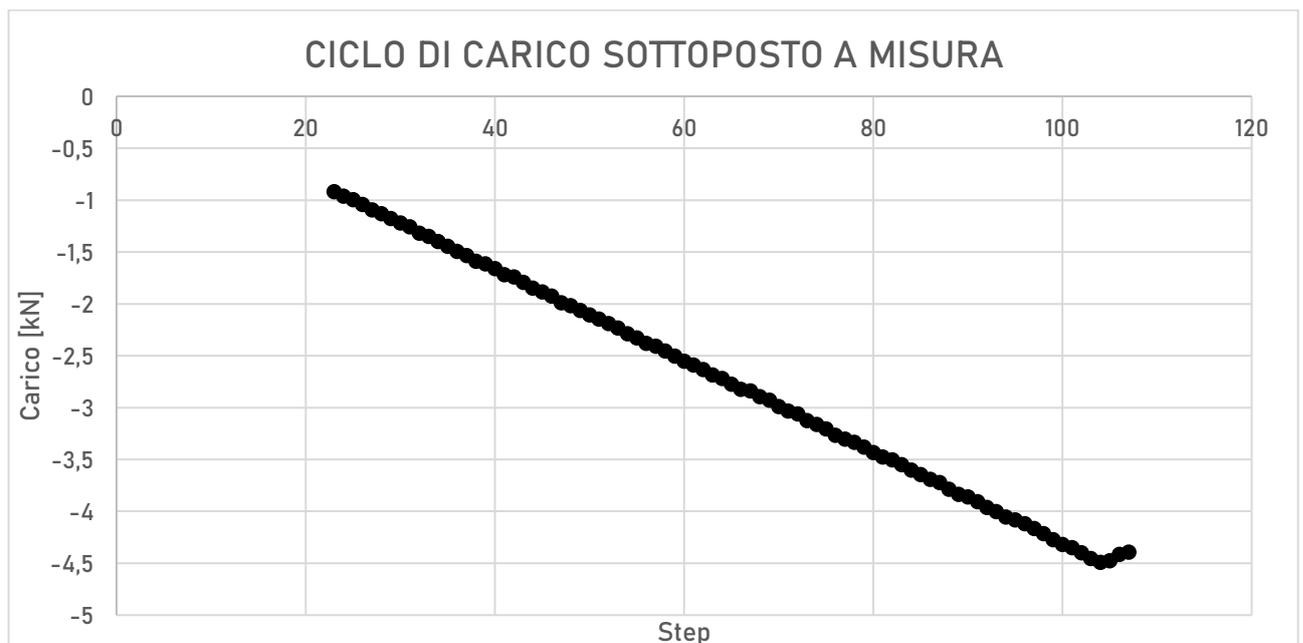


Figura 4.43 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Il massimo carico si ottiene allo step n° 104.

I risultati degli spostamenti ottenuti a questo step sono:

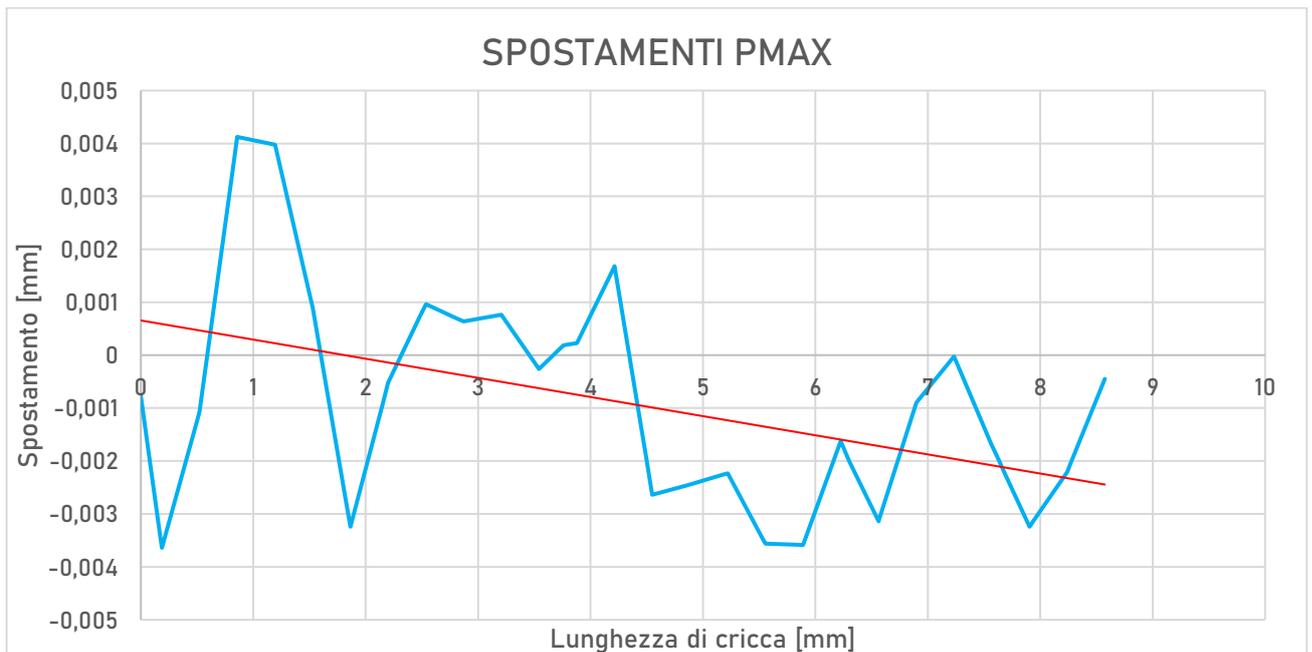


Figura 4.44 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca

L'andamento puntuale mette in evidenza che sono sicuramente presenti fenomeni di chiusura ad una distanza di 0,5, 2 e tra 4,5 e 6,5 mm dall'apice dell'intaglio, come ci si aspettava.

Di seguito viene riportata in **Figura 4.45** la mappa delle deformazioni lungo x per il lato B.

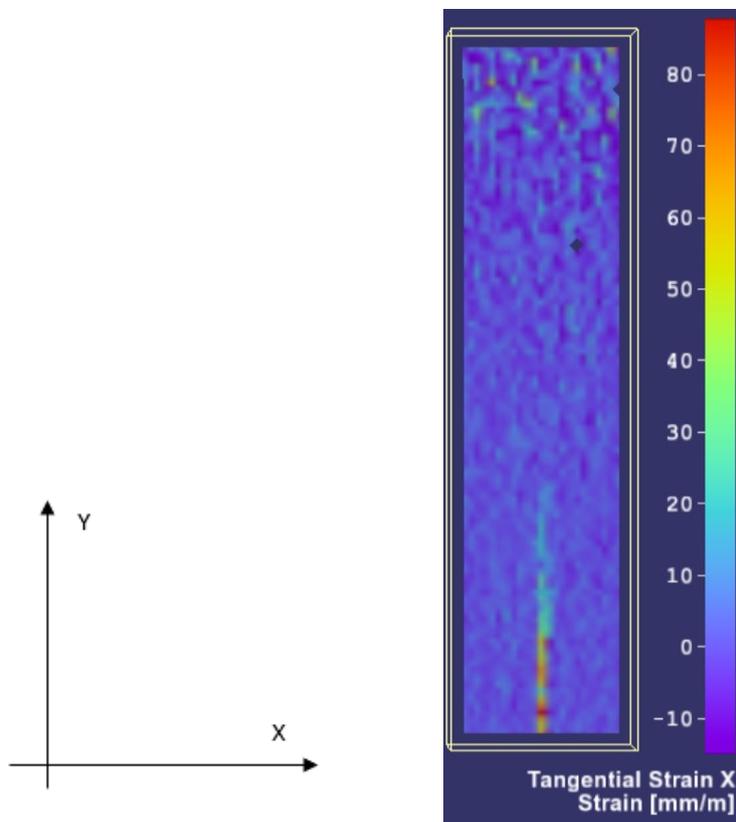


Figura 4.45 - Campo deformazioni lungo x - Lato B

Avendo evidenziato anche in questo caso fenomeni di chiusura con i metodi precedenti ci si aspetta altrettanto dall'analisi per la ricerca del K_{Op} .

La curva COD – P completa è:

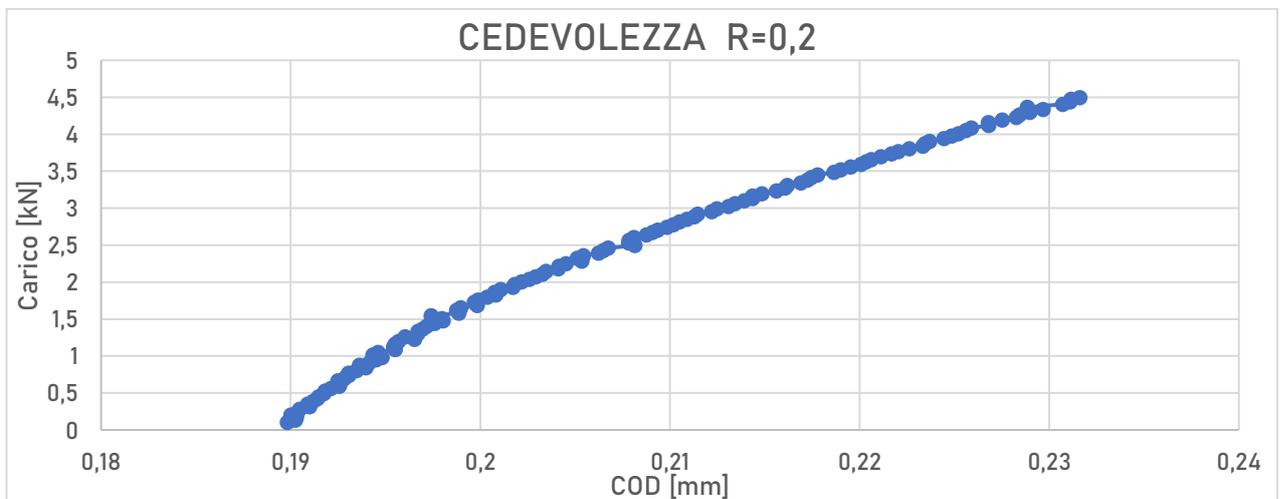


Figura 4.46 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

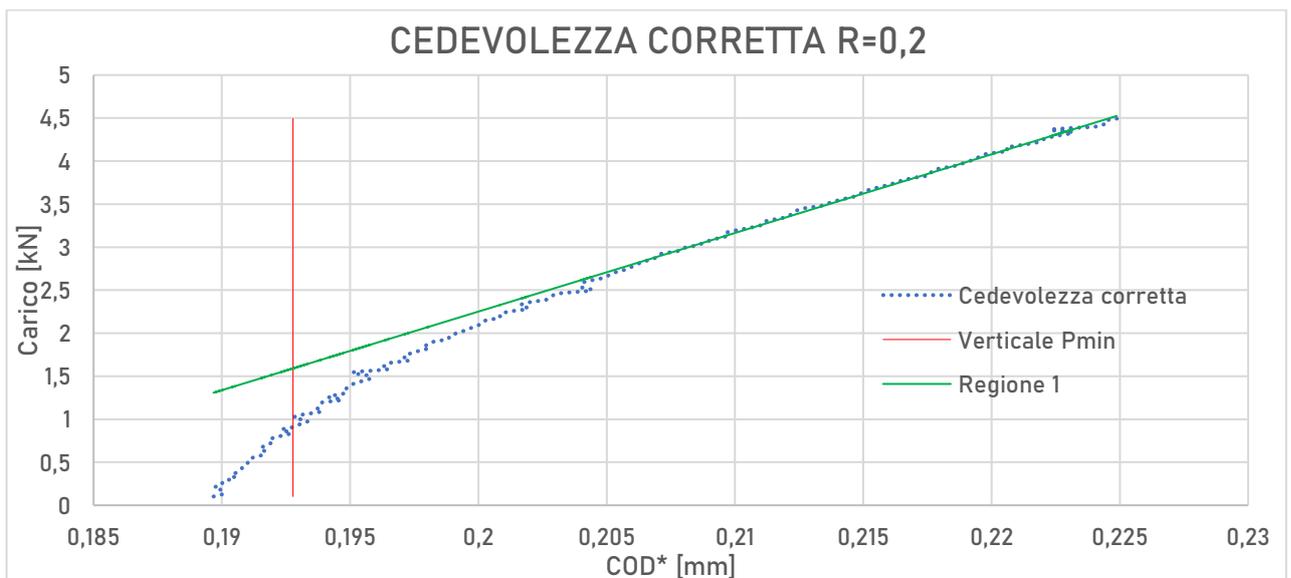


Figura 4.47 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Come previsto, la verticale per il valore di COD* corrispondente al carico minimo in prova interseca la retta della Regione 1 nella zona del ginocchio, sono quindi presenti fenomeni di chiusura. Ha senso quindi andare a valutare quale sia il valore di ΔK_{eff} .

Il carico di apertura risulta essere:

$$P_{op} = 1,59 \text{ kN}$$

E di conseguenza il valore di K, per cui si verifica apertura, è:

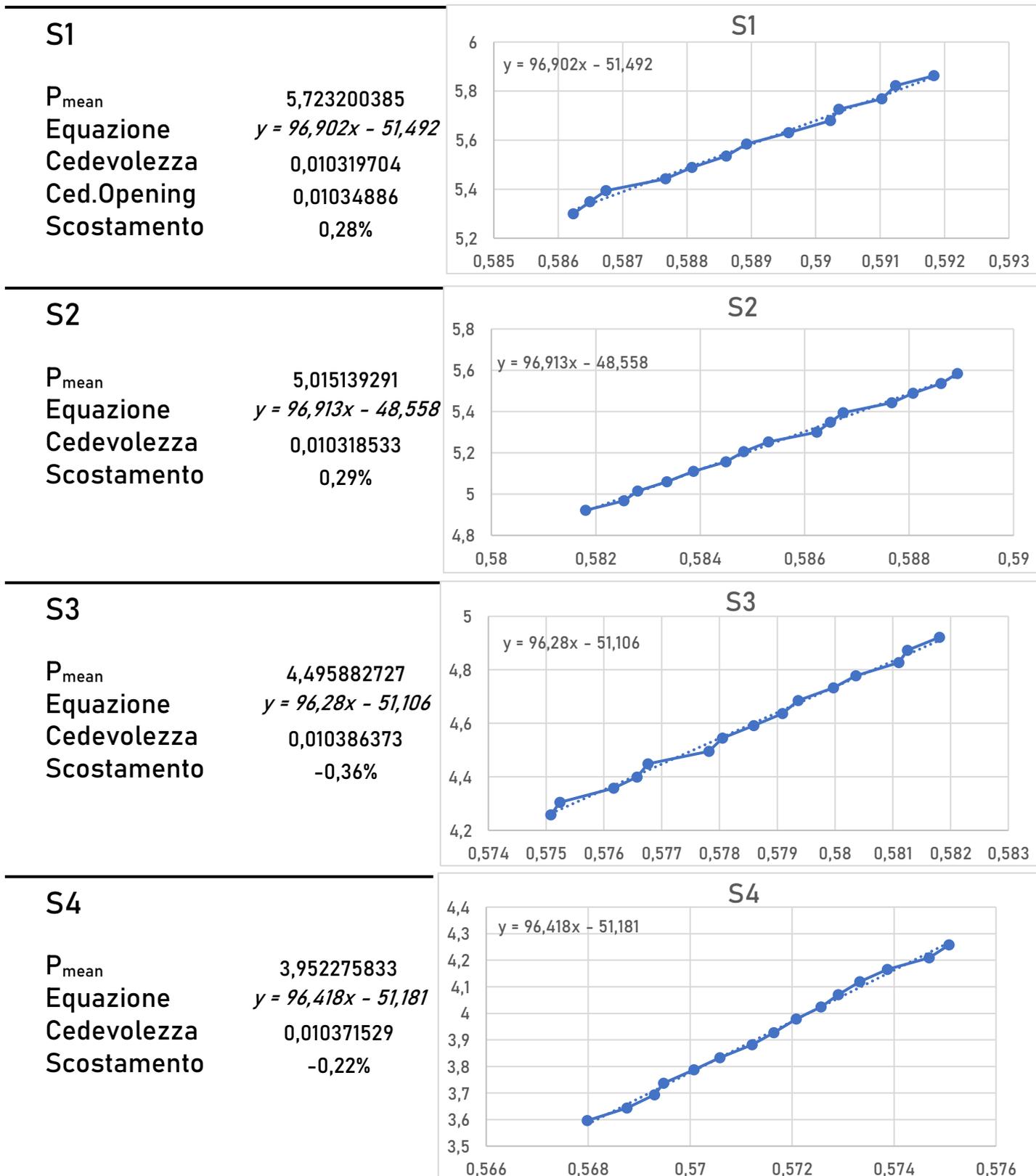
$$K_{op} = 4,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Noto quindi il valore di K_{Op} e del K_{max} durante la prova si ricava il valore di ΔK_{eff} , che risulta essere:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = 8,09 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

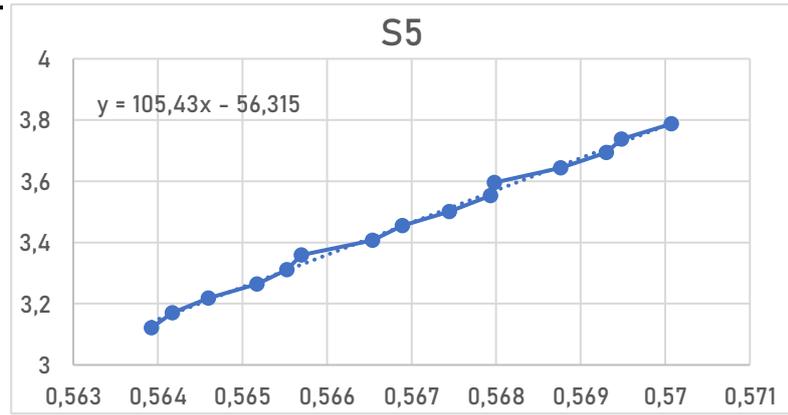
4.4.6 PROVINO 291-2 – R=0,7

Il provino 291-2 è stato sottoposto a carichi con rapporto **R=0,7**. Per questo provino non si sa cosa aspettarsi poiché per il provino assoggettato a carichi con R=0,5 si sono potuti riscontrare fenomeni di chiusura, per quello assoggettato a R=0,85 invece, non vi è traccia di questi fenomeni. I risultati ottenuti sono i seguenti:



S5

P_{mean} 3,383235217
Equazione $y = 105,43x - 56,315$
Cedevozza 0,009484966
Scostamento 8,35%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevozza di opening:

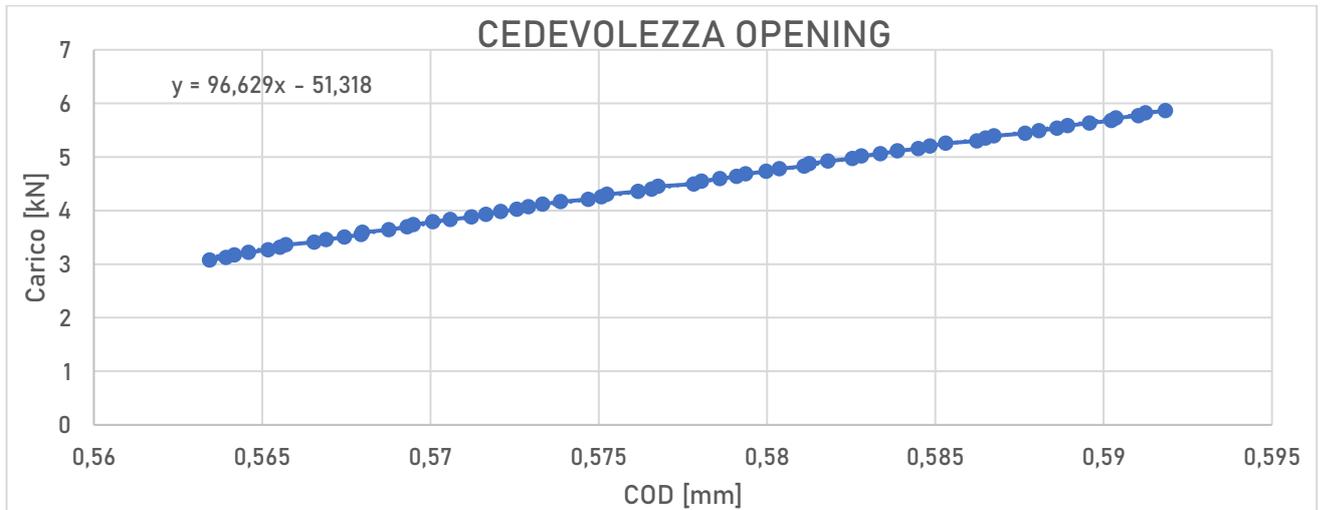


Figura 4.48 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevozza della cricca in modalità "completamente aperta"

Il risultato carico scostamento è:

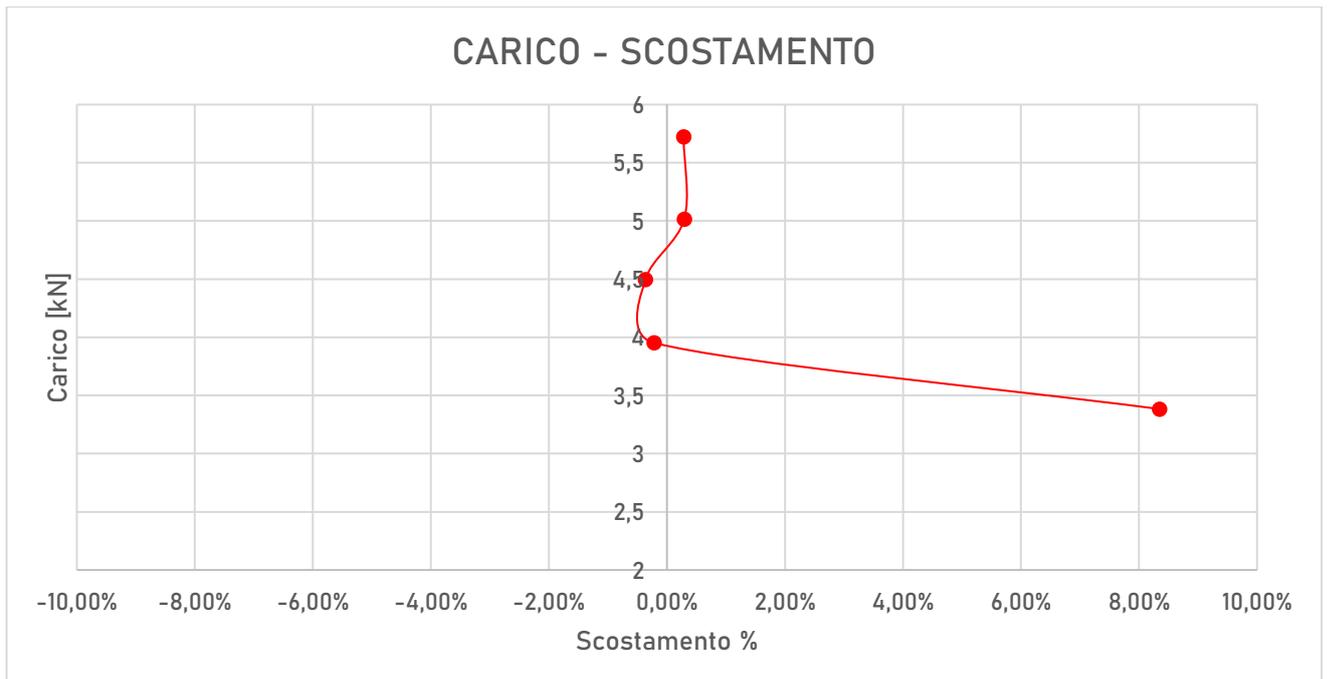


Figura 4.49 - Grafico carico-Compliance Offset

Come si può notare, in corrispondenza del segmento S5 lo scostamento dal valore di cedevolezza ottenuto per cricca completamente aperta è di circa 8 punti percentuali.

Questo indica che sono presenti fenomeni di chiusura anche per questo provino. Tuttavia, c'è da considerare l'effettivo range di carico a cui è assoggettato: il minimo carico in kN che raggiunge il provino è di 4,2 kN, mentre lo scostamento maggiore si verifica per un carico medio del segmento di 3,38 kN, ben al di sotto del minimo in esercizio. Pertanto, dal campo di spostamenti ottenuti attraverso la correlazione immagine digitale ci si aspetta di non notare nulla che possa essere ricondotto alla chiusura.

Il carico a cui è stato sottoposto il provino è:

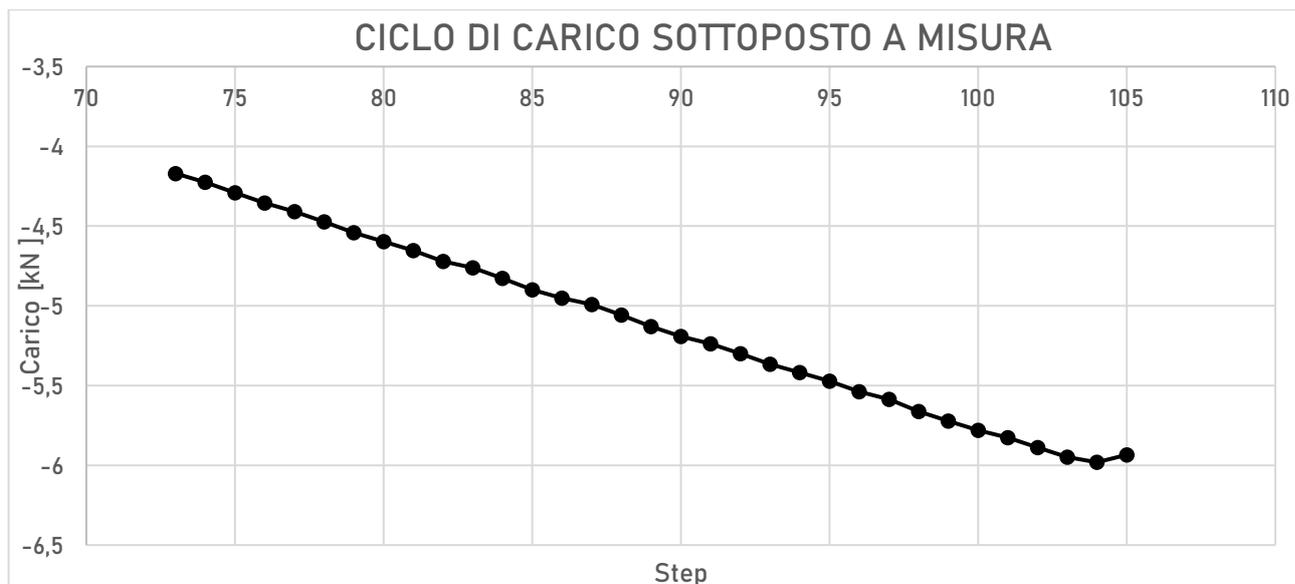


Figura 4.50 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Il massimo carico si ottiene allo step n° 104.

I risultati degli spostamenti ottenuti a questo step sono:

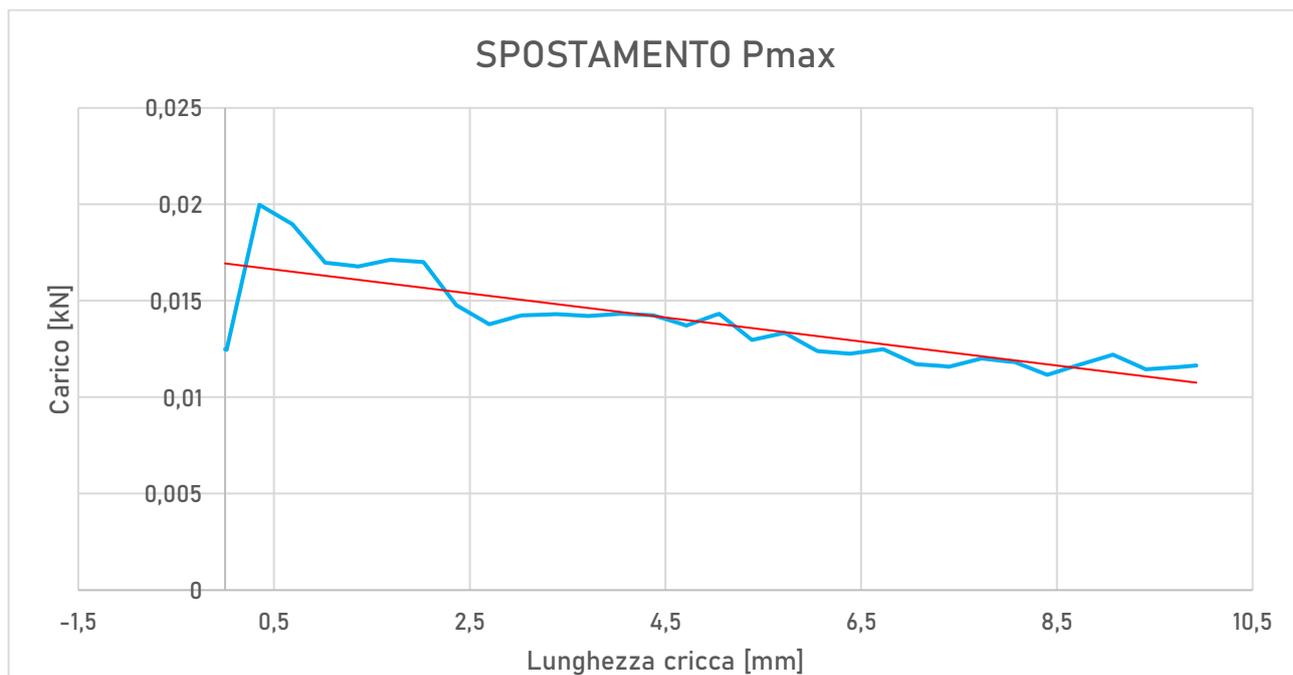


Figura 4.51 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca.

L'andamento puntuale mette in evidenza che non sono presenti particolari fenomeni di chiusura e che il profilo della cricca sembra seguire quello ideale, evidenziato in rosso, a conferma di ciò che era stato ipotizzato semplicemente guardando i risultati del metodo compliance offset.

Per completezza viene riportata in **Figura 4.52** la mappa delle deformazioni lungo x

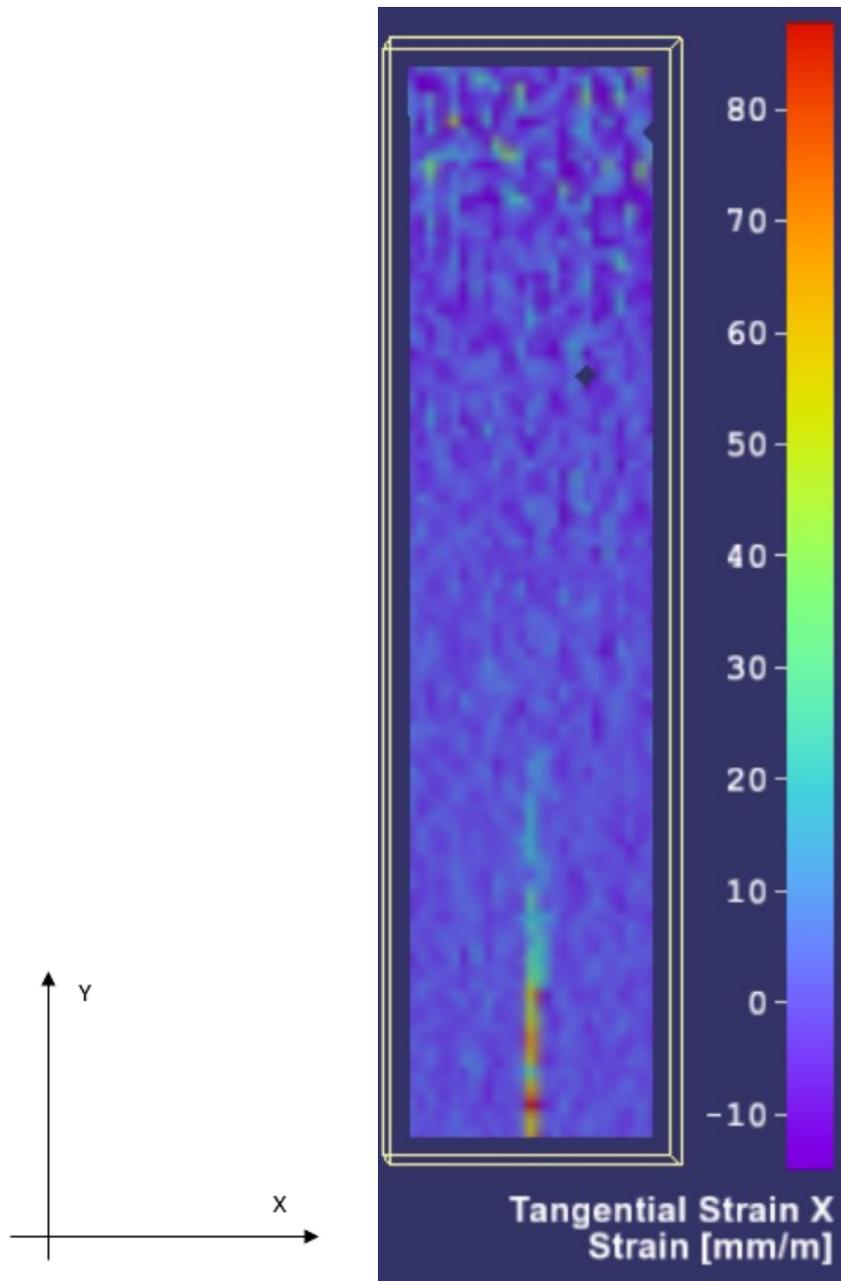


Figura 4.52 - Campo deformazioni lungo x - Lato B

Anche questo provino è stato sottoposto all'analisi per la ricerca del K_{OP} . Lo scopo tuttavia, in questo caso, era quello di confermare che nel range di carico in cui il provino è stato sottoposto durante la prova non si verificasse chiusura.

La curva COD – P completa è:

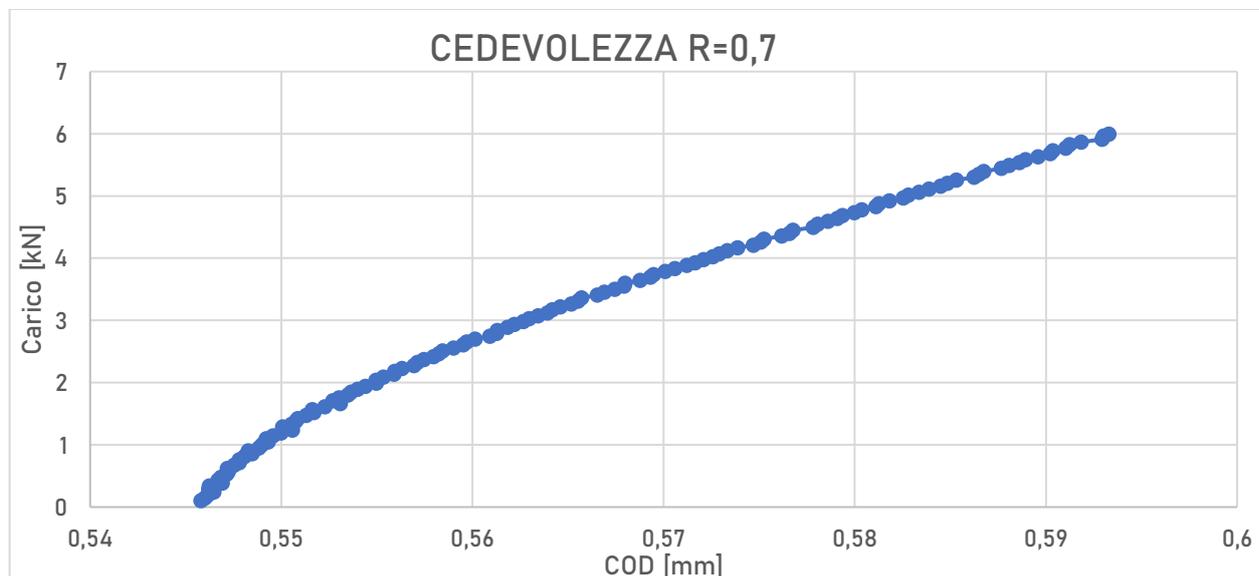


Figura 4.53 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

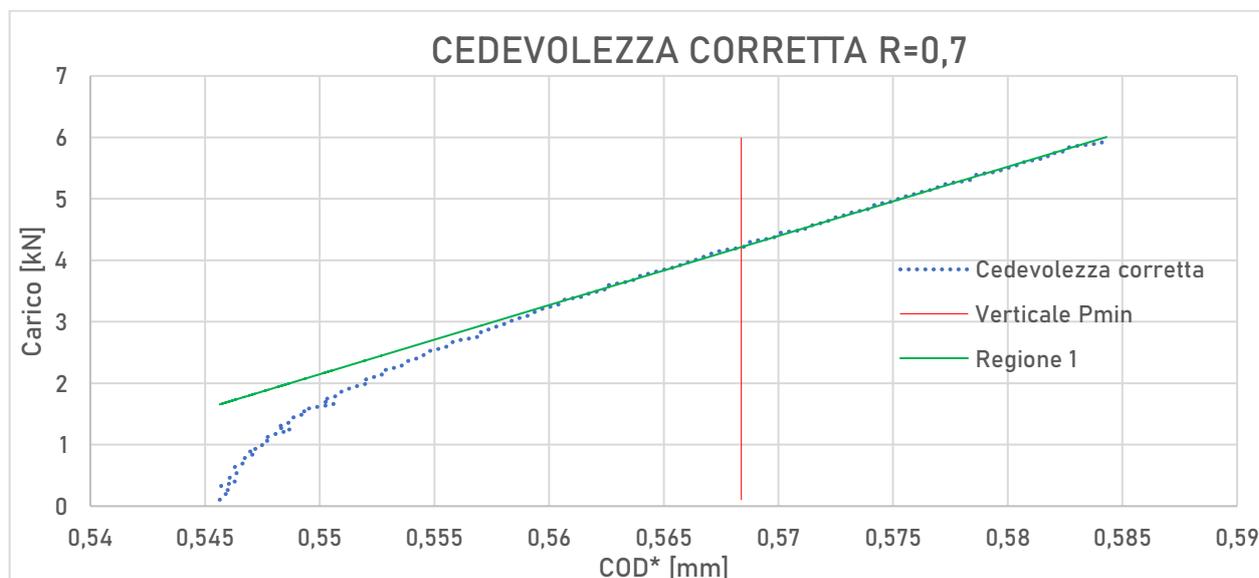


Figura 4.54 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Si può notare che in seguito alla correzione introdotta con $C(a_N)P$, il ginocchio della curva risulti anche in questo caso più marcato. Il risultato interessante è che la verticale per il valore di COD^* corrispondente al carico minimo P_{min} cada completamente nella **Regione 1**, tratto lineare in cui la cricca è completamente aperta. Per cominciare a vedere un fenomeno di chiusura è necessario scendere ancora molto con il carico sino ad arrivare a circa 3 kN, valore che il provino non raggiunge mai nella prova per la determinazione di ΔK_{th} .

I risultati sono coerenti con ciò che si è visto con il metodo compliance offset, per cui lo scostamento cominciava ad essere più marcato per valori di carico medio di 3,38 kN; nell'intorno di quel valore infatti la curva blu comincia a discostarsi da quella verde.

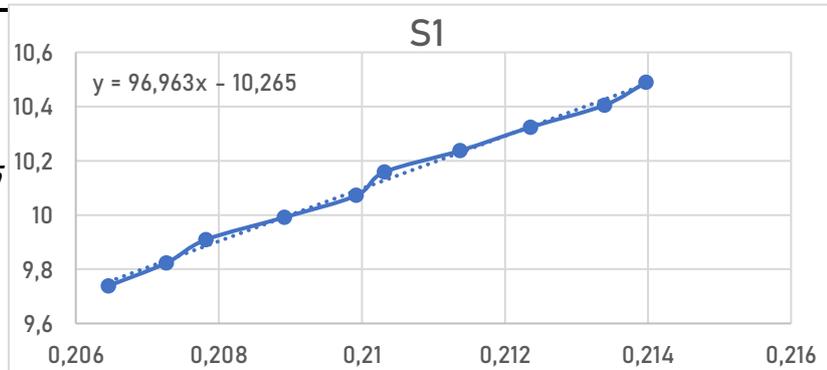
4.4.7 PROVINO 339-1 – R=0,9

Il provino 339-1 è stato sottoposto a carichi con rapporto **R=0,9**. Per questo provino ci si aspettano risultati simili a quelli ottenuti per il provino 291-1 caricato con R=0,85.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

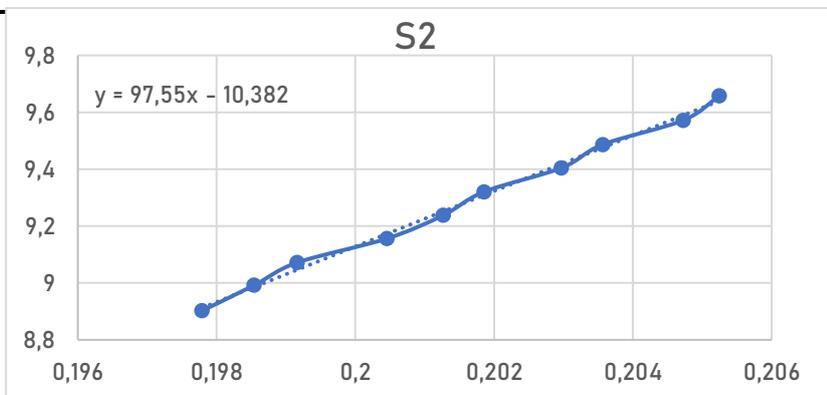
S1

P_{mean} 10,11471908
 Equazione $y = 96,963x - 10,265$
 Cedevolezza 0,010313212
 Ced.Opening 0,010312042
 Scostamento -0,01%



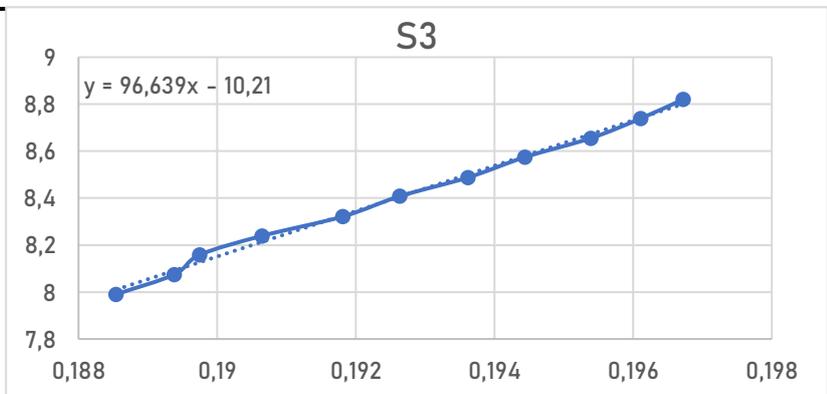
S2

P_{mean} 9,28025418
 Equazione $y = 97,55x - 10,382$
 Cedevolezza 0,010251153
 Scostamento 0,59%



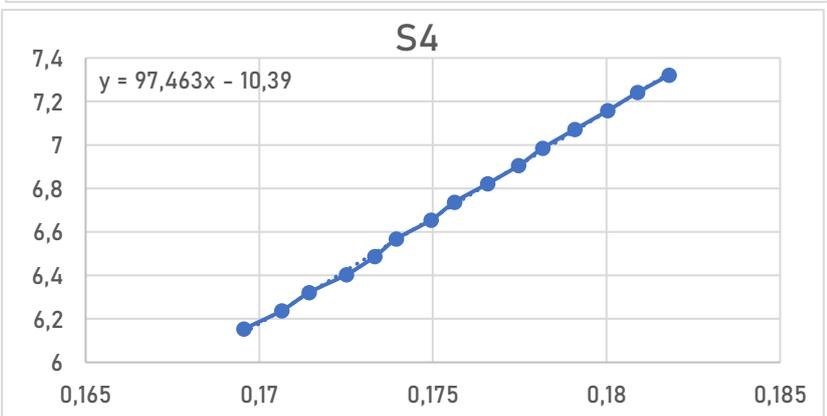
S3

P_{mean} 8,365073
 Equazione $y = 96,639x - 10,21$
 Cedevolezza 0,010313212
 Scostamento -0,01%



S4

P_{mean} 7,44781991
 Equazione $y = 97,463x - 10,39$
 Cedevolezza 0,010260304
 Scostamento 0,50%



E qui viene riportato il tratto di curva attraverso il quale si è ottenuta la cedevolezza di opening:

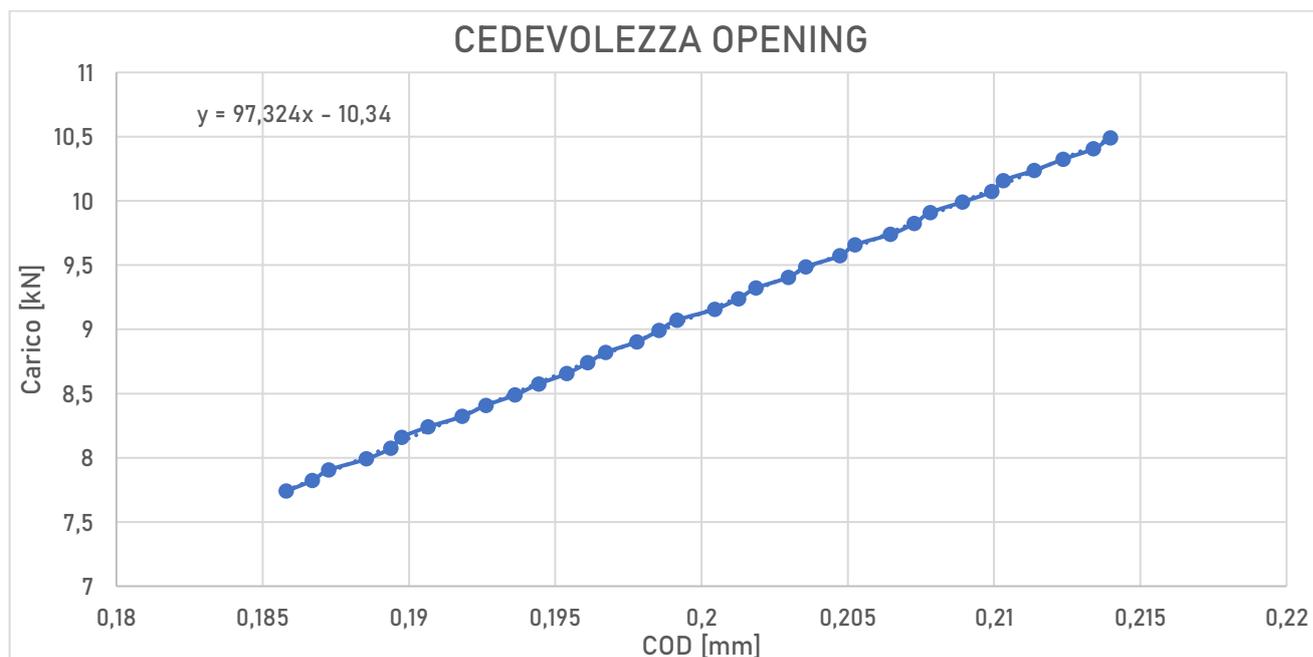


Figura 4.55 - Grafico carico-COD nel tratto lineare della curva, da cui si ricava il valore di cedevolezza della cricca in modalità "completamente aperta"

Il risultato carico scostamento è:

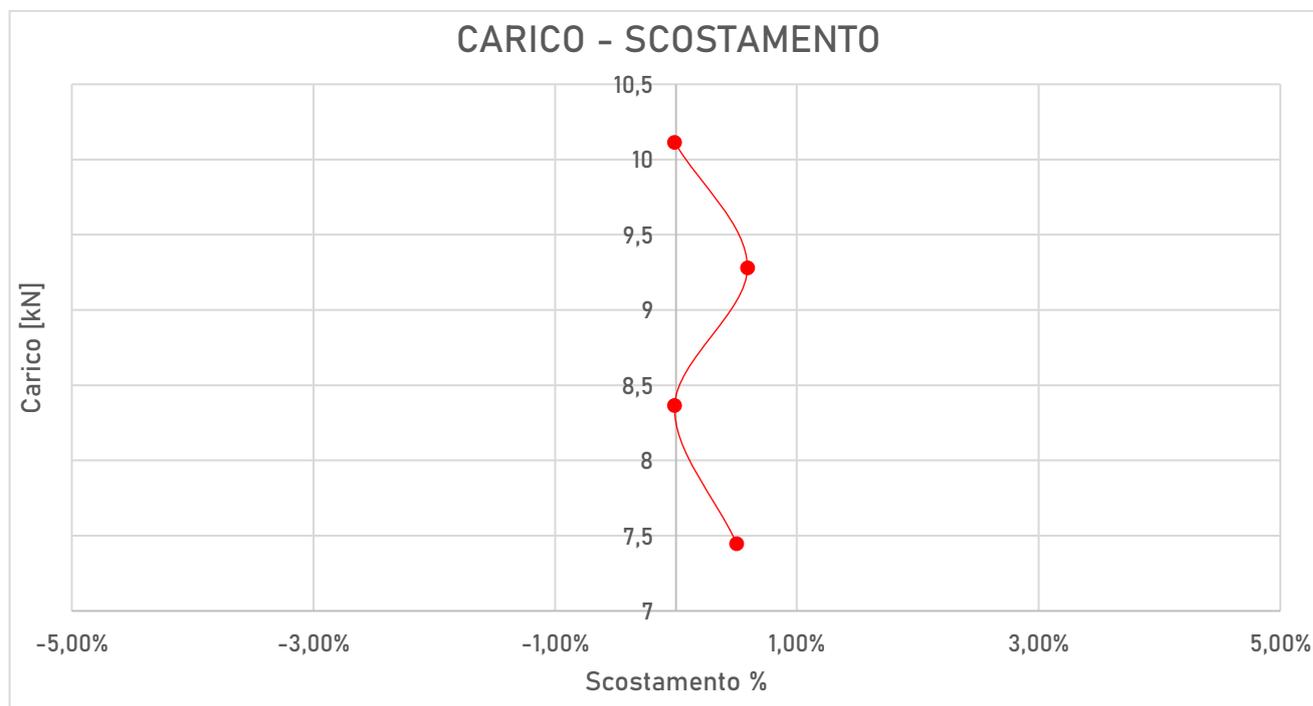


Figura 4.56 - Grafico carico-Compliance Offset

Non si notano particolari fenomeni di chiusura nell'intorno del range di carico a cui si è sottoposti il provino, infatti il massimo scostamento dalla cedevolezza di opening corrisponde a 0,59 punti percentuali, non sufficienti a definire e affermare che sia presente un rilevante fenomeno di chiusura. I risultati, come previsto, sono quindi molto simili a quelli ottenuti per il provino sottoposto a $R=0,85$ e sono inoltre confermati dalla correlazione immagine digitale.

Il carico a cui è stato sottoposto il provino è:

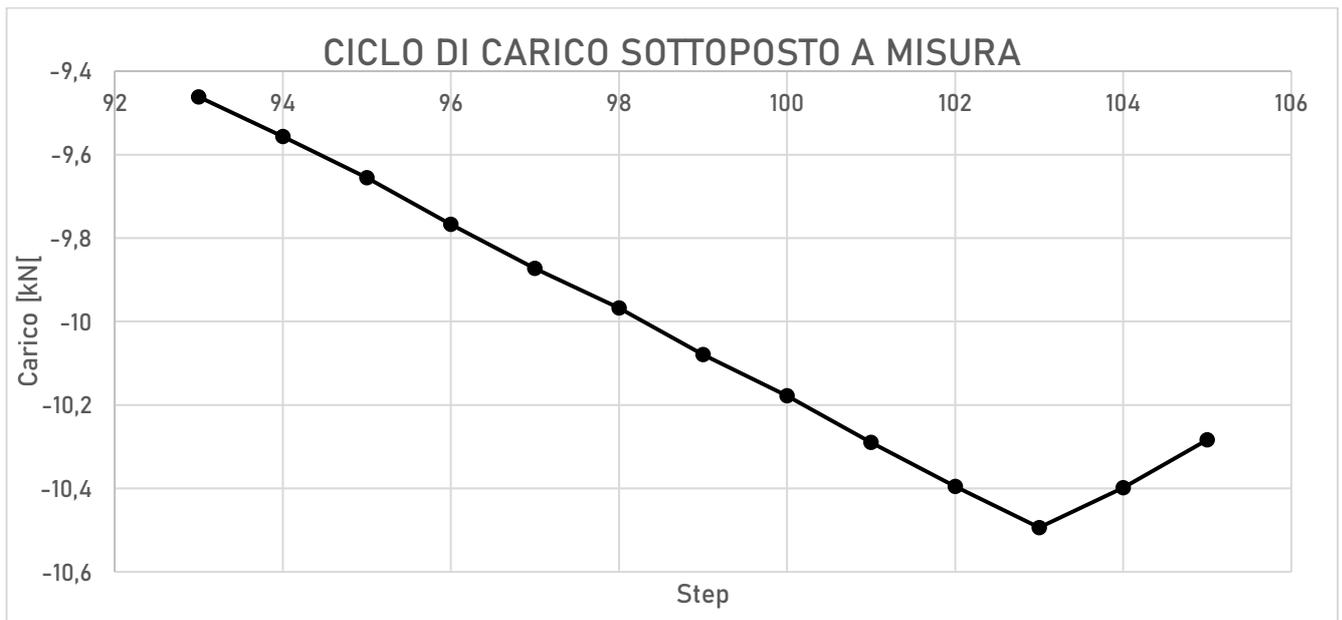


Figura 4.57 - Ciclo di carico sperimentale del provino durante la prova di cedevolezza

Il massimo carico si ottiene allo step n° 103.

I risultati degli spostamenti ottenuti a questo step sono:

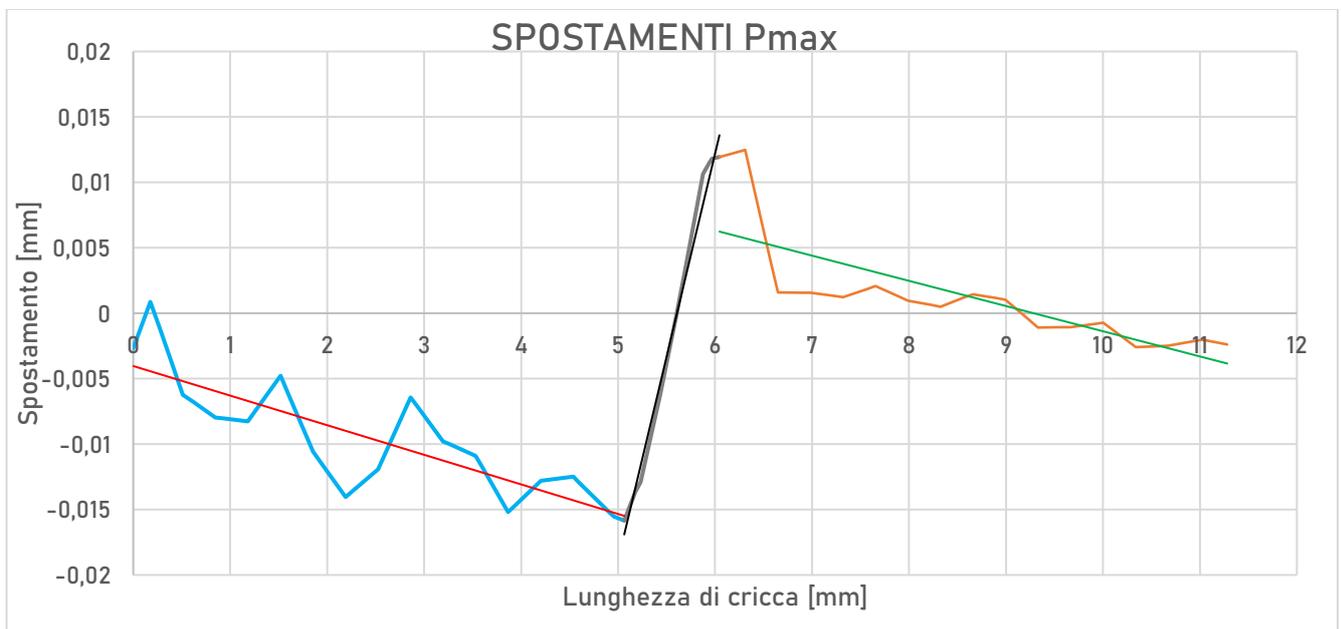


Figura 4.58 - Risultato del campo di spostamenti derivante dalla DIC in prossimità della cricca

L'andamento puntuale mette in evidenza che non sono presenti particolari fenomeni di chiusura, ma un evidente fenomeno di propagazione mista (tratto grigio – nero) tra 5 e 6 mm dall'apice dell'intaglio, mentre gli andamenti precedenti e successivi a tale tratto facilmente riconducibili all'idealità, senza evidenziare fenomeni di chiusura.

Per completezza viene riportata in **Figura 4.59** la mappa delle deformazioni lungo x. La zona cerchiata in bianco indica il punto dove si verifica propagazione mista.

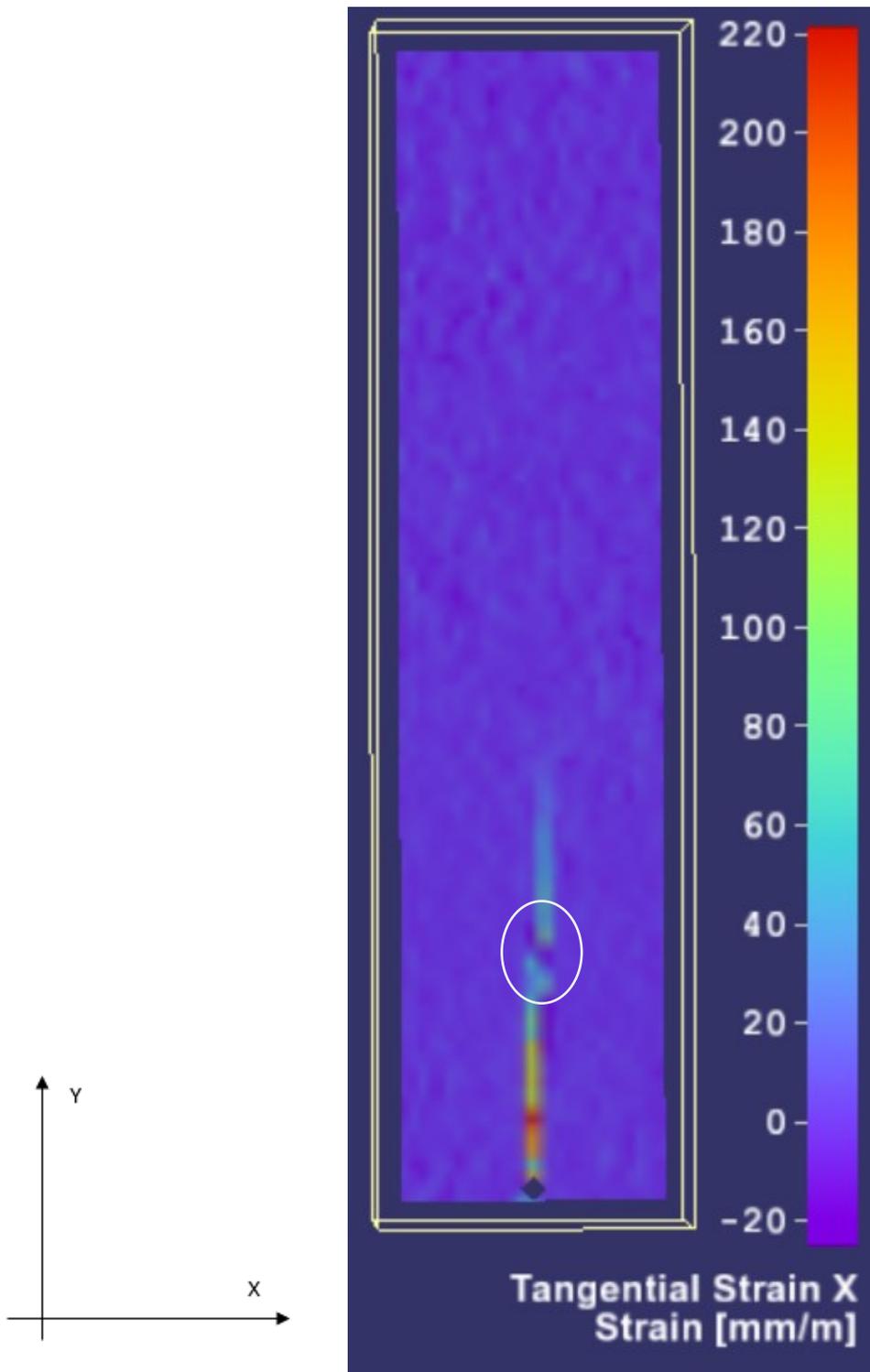


Figura 4.59 – Campo tensioni lungo x – Lato A

Anche questo provino è stato sottoposto all'analisi per la ricerca del K_{OP} . Lo scopo tuttavia, in questo caso, era quello di confermare che nel range di carico in cui il provino è stato sottoposto durante la prova non si verificasse chiusura.

La curva COD – P completa è:

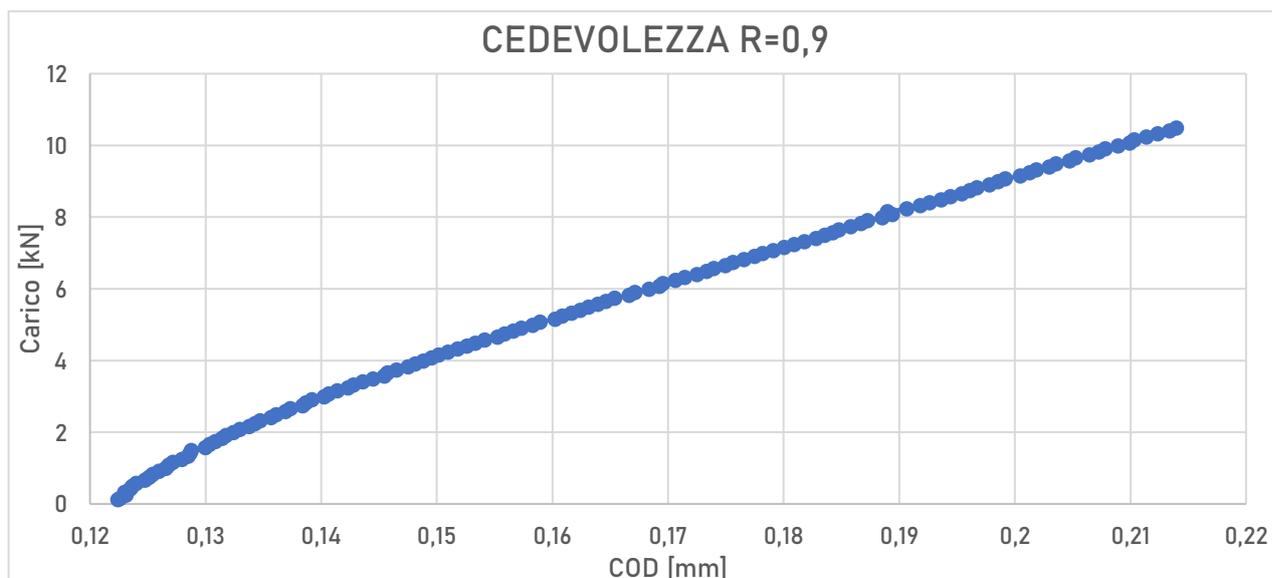


Figura 4.60 - Curva carico-COD completa

Seguendo i 4 step della procedura introdotta da Anderson ^[2], si ottiene il seguente grafico:

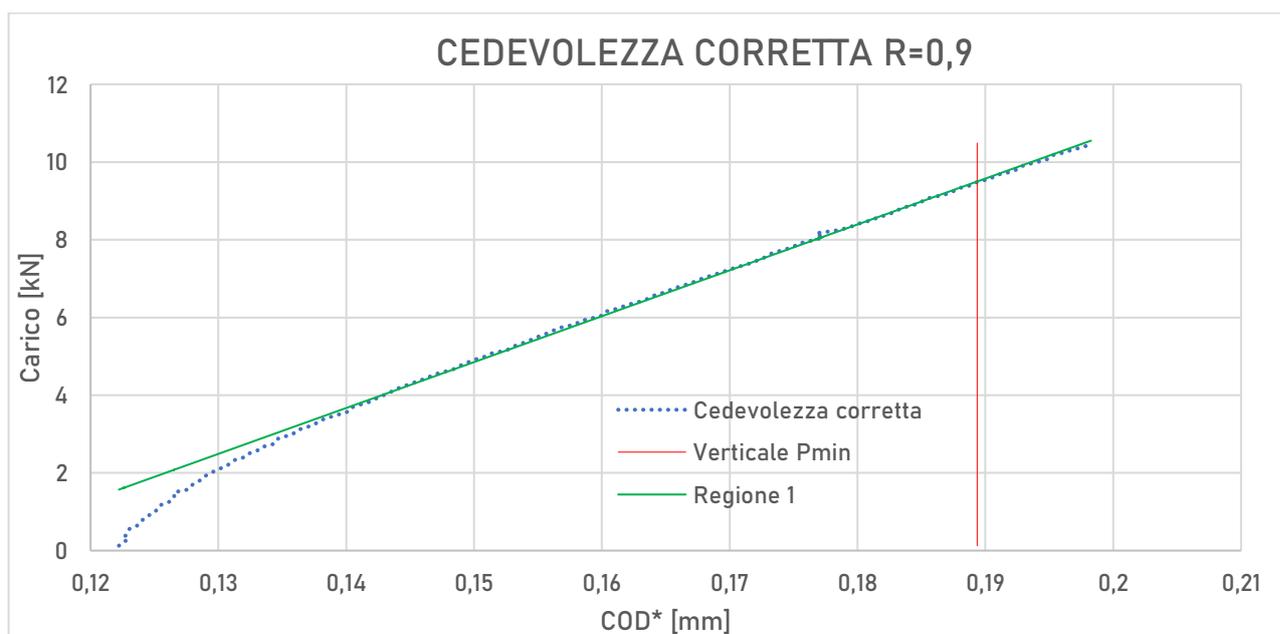


Figura 4.61 - Curva carico-COD* e annessa costruzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 4.3

Si può notare che in seguito alla correzione introdotta con $C(a_N)P$, il ginocchio della curva risulti anche in questo caso più marcato. Il risultato interessante è che la verticale per il valore di COD^* (retta rossa) corrispondente al carico minimo P_{min} cada completamente nella **Regione 1** (evidenziata con colore verde), tratto lineare in cui la cricca è completamente aperta. Per cominciare a vedere un fenomeno di chiusura è necessario scendere ancora molto con il carico sino ad arrivare a circa 3 kN, valore che il provino non raggiunge mai nella prova per la determinazione di ΔK_{th} .

4.5 OSSERVAZIONI

Le prove sperimentali condotte, al fine di ricercare se fossero presenti o meno fenomeni di chiusura nei provini sottoposti a rapporti di carico R variabili, sono da ritenersi soddisfacenti e in linea con ciò che la letteratura a riguardo prevedeva. Si nota infatti che tali fenomeni sono via via meno marcati all'aumentare del carico R , poiché le facce della cricca risultano sempre meno in contatto.

Come già evidenziato nel **Paragrafo 2.4**, l'evidenza sperimentale per questo materiale mette in luce che il carico P_{op} di apertura risulti essere poco variabile, qualunque sia il rapporto di carico R a cui si verificano fenomeni di chiusura. Tra i fenomeni che possono generare chiusura nel nostro, descritti nel **Paragrafo 1.5** e rappresentati in **Figura 1.14a** e **Figura 1.14b**, ci sono fenomeni di plasticizzazione all'apice e propagazione con Modo 2.

Ciò che emerge è che sicuramente sono presenti fenomeni di propagazione in Modo 2, che porta quindi a propagazione mista, evidenziate dalle **Figure 4.29** e **4.58** e il fatto che il carico di apertura sia poco variabile fa pensare che la causa di tale fenomeno sia la stessa per ogni provino.

Non è altresì da escludere la chiusura per via della plasticizzazione dell'apice; si sono infatti riscontrati, durante le prove per la ricerca del valore di soglia, fasi di propagazione molto lenta o nulla, precedentemente a fasi di propagazione nettamente più veloce, a parità di blocco di carico a cui si sottoponeva il provino in questione.

Questo fenomeno è noto come fenomeno di ritardo. L'applicazione di un sovraccarico, o di un carico superiore a quello che successivamente si applicherà, genera una zona il cui raggio plastico risulta essere r_{po} . Non appena cessa l'azione del sovraccarico, la zona si trova in uno stato di compressione residua che tende a ritardare la propagazione del difetto sino a che l'apice di quest'ultimo si trova all'interno di questa regione. Allorché l'apice del difetto attraversa questa zona, la propagazione del difetto riprende il suo andamento normale. La **Figura 4.62** rappresenta ciò che è stato appena detto.

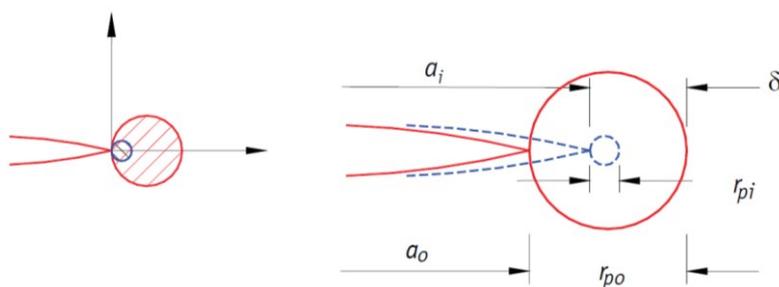


Figura 4.62 - Rappresentazione grafica del fenomeno del ritardo

5 MISURAZIONE DELLA TENACITA' A FRATTURA K_{Ic}

5.1 METODOLOGIA DI PROVA

Al fine di caratterizzare al meglio il materiale, svolte le prove per la determinazione del valore di soglia per la propagazione di cricche di fatica, e quelle di cedevolezza e di correlazione immagine digitale per la verifica del fenomeno di chiusura, seguendo la normativa ASTM E399^[3] si è svolta la procedura per la determinazione della tenacità a frattura del materiale.

La determinazione della tenacità a frattura viene eseguita mediante prova di flessione su tre punti o di trazione su provette intagliate meccanicamente e prefessurate per fatica all'apice dell'intaglio. Tale intaglio è ottenuto per lavorazione meccanica e può essere sia ad angolo retto che a freccia, denominato Chevron.

Le provette vengono quindi sottoposte a carico crescente di flessione o trazione, a seconda del provino usato, e viene registrato l'andamento del carico in funzione dell'apertura dell'intaglio.

Si determina il valore di carico all'inizio della propagazione instabile della fessura e mediante l'opportuna formula si ricava quindi il valore probabile di K_Q della tenacità a frattura.

Successivamente alla determinazione di K_Q si verifica che durante la prova siano stati rispettati determinati limiti. Se così è stato, ciò che si è trovato è il K_{Ic} del materiale. Alternativamente, ma sempre sotto la condizione che l'estensione della plasticità all'apice della cricca sia molto più piccola delle dimensioni caratteristiche della provetta ("small scale yielding"), K_Q è solo la tenacità a frattura del materiale per quel determinato spessore e temperatura di prova.

5.1.1 SCELTA DEI PROVINI

I provini che possono essere scelti per questa prova sono i seguenti:

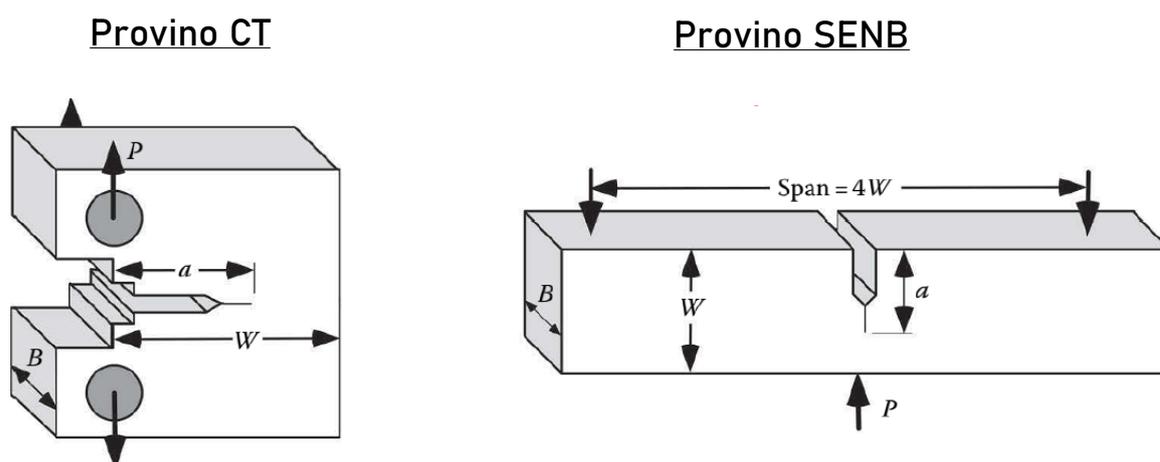


Figura 5.1 – Tipi di provini utilizzabili per la prova di K_{Ic}

Il provino CT (compact tension) prevede l'applicazione di un carico di trazione attraverso i due fori evidenziati in grigio, il provino SENB (single edge notched beam) prevede invece l'applicazione di un carico di flessione. Il provino CT consente di risparmiare molto più materiale, a parità di W richiesto.

Di solito $B/W = 0,5$ ma è anche tollerato $1 \leq W/B \leq 4$ per i SENB e $2 \leq W/B \leq 4$ per i CT.

Una volta scelto il provino, è necessario dare l'orientamento del campione rispetto al processo produttivo. In particolare, per componenti estrusi o laminati:

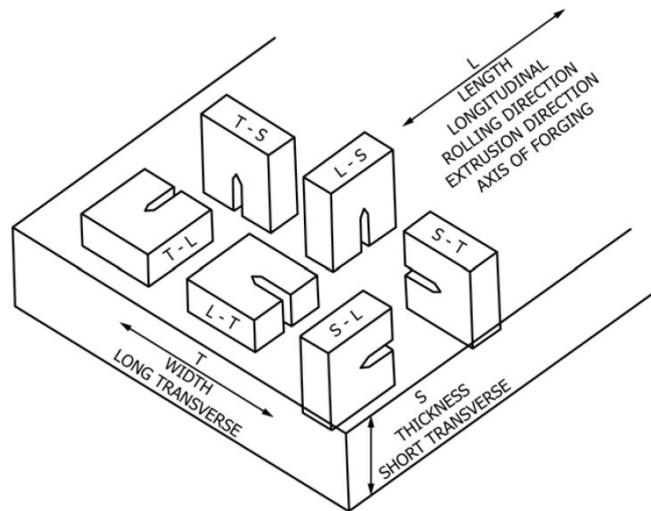


Figura 5.2 - Orientamento dei provini in funzione della direzione di estrusione, dell'applicazione del carico e di propagazione

La prima lettera indica la direzione normale al piano della cricca, cioè la direzione del carico applicato, la seconda lettera la direzione in cui ci si aspetta la cricca propagarsi.

5.1.2 PRECRICCATURA

La meccanica della frattura si applica a campioni con fessure (cricche) ideali, cioè con raggio di apice tendente a zero.

Ciò non si può ottenere direttamente per lavorazione meccanica e si ottiene invece come segue:

- Si realizza un intaglio meccanico con raggio di apice 0.1 – 0.3 mm;
- Mediante cicli di fatica, si nuclea e si accresce una cricca. Il rapporto di carico normalmente è positivo e vicino a zero. Si può usare un intaglio a Chevron per favorire la formazione di una cricca simmetrica.

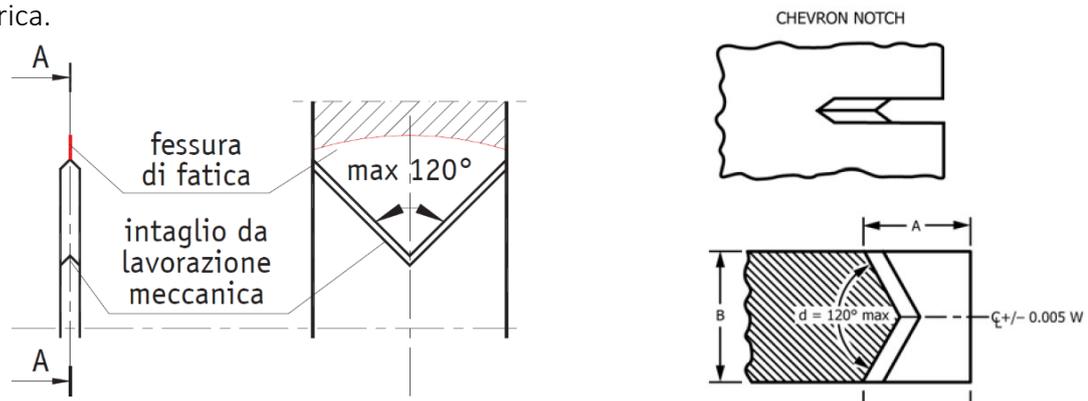


Figura 5.3 - Descrizione dell'intaglio meccanico e della morfologia della cricca

Il massimo carico applicabile durante la precriccatura è limitato, allo scopo di limitare sia la dimensione della zona plastica ciclica all'apice delle fessure, sia l'arrotondamento plastico dell'apice medesimo, come segue:

- $K_{max} < 0,8 K_{Ic}$ sempre.
- $K_{max} < 0,6 K_{Ic}$ nell'ultimo 2,5 % di a .

Se si usa un carico massimo maggiore, la precriccatura è più veloce, ma è anche maggiore il rischio di ottenere alla fine una prova non valida.

5.1.3 ESECUZIONE DELLA PROVA

Successivamente alla fase di precricatura viene eseguita la prova vera e propria. Si misura l'andamento del carico in funzione dell'apertura della cricca fino a rottura del provino.

Gli strumenti utilizzati per la misura, in questa prova, sono gli stessi usati per le prove di cedevolezza.

Una cella di carico per la misura della forza in kN applicata al provino.

Un estensimetro clip-gage per la misura dell'apertura della cricca durante la prova.

Durante la prova, il carico deve essere applicato con una velocità tale per cui l'incremento del valore di K per ogni secondo risulti:

$$0,55 \leq \Delta K \leq 2,75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \cdot \text{s}$$

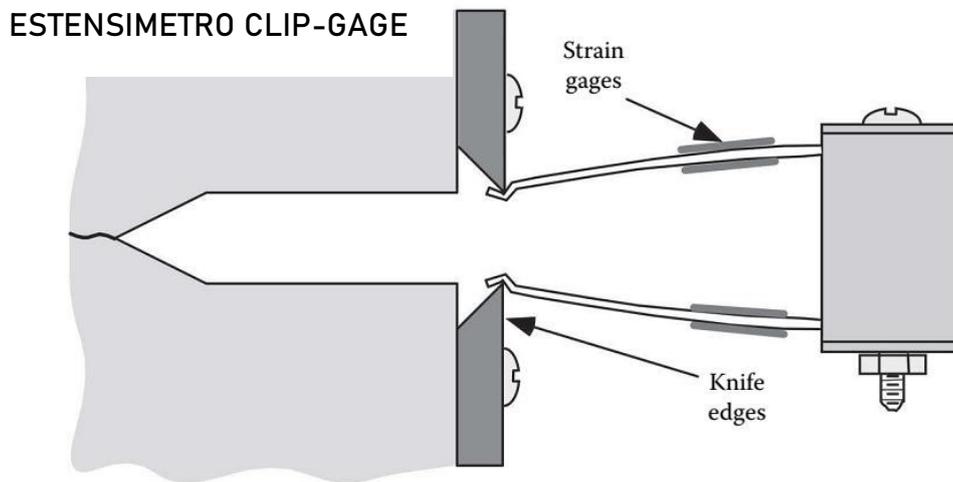


Figura 5.4 - Misura della apertura della bocca dell'intaglio mediante estensimetro clip-gage

I grafici che solitamente si ottengono sono di tre diversi tipi, come mostra la Figura 5.5:

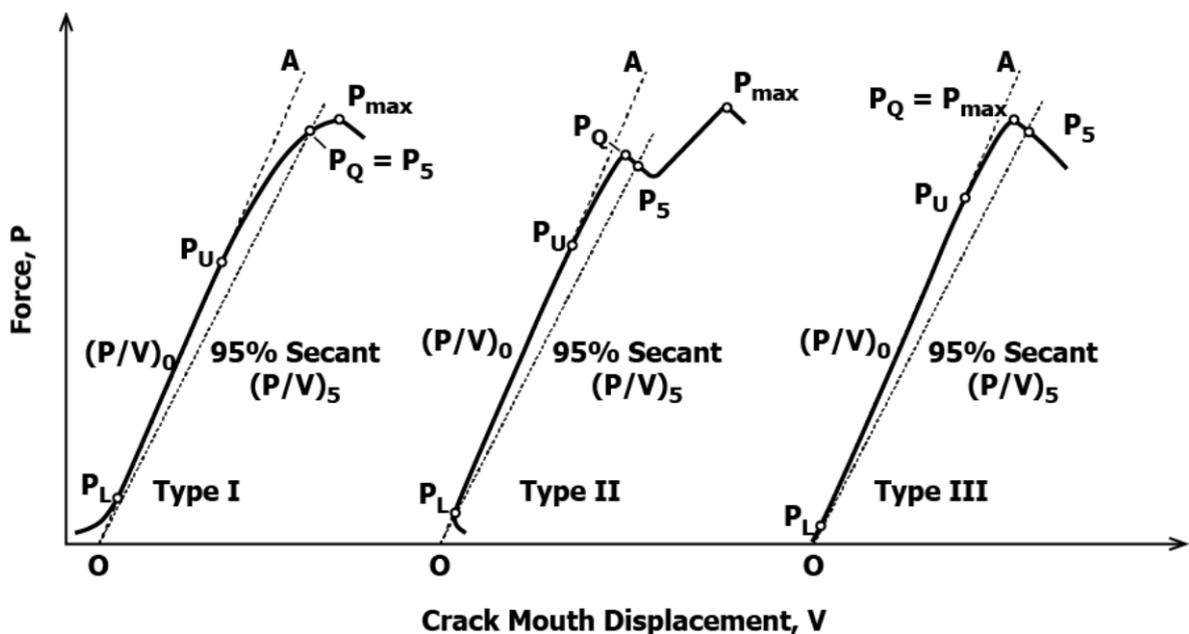


Figura 5.5 - Tipologie di comportamento carico-spostamento durante le prove di K_{Ic}

Al fine di calcolare K_Q è necessario conoscere P_Q al quale il provino inizia la propagazione instabile; poiché la **Figura 5.5** mostra che l'andamento della curva non sia perfettamente elastico, ma che ci sia un certo grado di non linearità, la normativa prevede che si utilizzi un metodo denominato della "secante offset". Si traccia una linea secante l'origine avente come pendenza del 5% minore della tangente al tratto lineare della curva e si determina il carico P_5 corrispondente all'intersezione della secante con la curva.

Il carico P_Q si definisce uguale a P_5 o a qualsiasi carico più elevato che preceda sul diagramma il punto P_5 .

Successivamente all'individuazione di P_Q si verifica che:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1,10$$

Dove P_{max} è il massimo carico raggiunto durante la prova. Questa verifica viene fatta per verificare che la deviazione della linearità sia dovuta non solo a deformazione plastica, ma ad una effettiva propagazione instabile del difetto.

Successivamente a tale verifica si misura la lunghezza della cricca come segue:

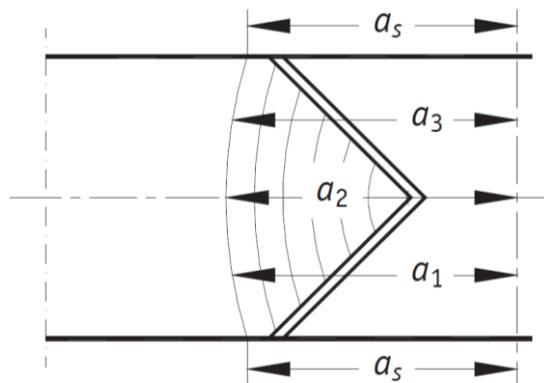


Figura 5.6 - Rappresentazione della morfologia di un campione rotto

Dove:

- a_s è la misura di lunghezza di cricca in superficie.
- a_1 , a_2 , e a_3 sono rispettivamente le misure di lunghezza di cricca a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ dello spessore B .

Si verifica successivamente che:

- Lo scostamento massimo fra la media di a_1 , a_2 , a_3 e la singola misurazione a_1 , a_2 , a_3 sia inferiore al 5%.
- Lo scostamento massimo fra la media di a_1 , a_2 , a_3 e le misure in superficie a_s sia inferiore al 10%.

Ovvero definendo la media di a_1 , a_2 , a_3 come:

$$a_m = \frac{(a_1 + a_2 + a_3)}{3}$$

Si valuta:

$$\frac{(a_m - a_i)}{a_m} \leq 5\%$$

$$\frac{(a_m - a_s)}{a_m} \leq 10\%$$

Con $i=1,2,3$.

Se tutti gli step di verifica sono superati, si può quindi procedere alla determinazione del valore K_Q . Le formule per la determinazione di quest'ultimo non sono universali e variano a seconda del provino scelto per fare la prova.

Nel caso del provino SENB, utilizzato per le nostre prove, la formulazione per la determinazione del fattore di intensificazione degli sforzi è la stessa usata che nella fase di determinazione del valore di soglia, e pari a:

$$K_Q = \frac{P_Q S}{\sqrt{B B_N} W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Con $f(a/w)$:

$$3 \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \frac{1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left[2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

Tutti i parametri per la determinazione del K_Q sono descritti sulla normativa, si tralascia questa parte al lettore.

Noto quindi K_Q si verifica ancora che:

- $0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55$
- $W - a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}}\right)^2$

Questo per verificare che la dimensione della zona plastica all'apice della cricca sia molto minore rispetto alla dimensione del legamento residuo ($W-a$), altrimenti non esisterebbe una zona K-dominata dove la MFLE descrive in maniera sufficiente lo stato di tensione.

Se anche queste verifiche sono soddisfatte, il presunto valore di K_Q è allora il valore di K_{Ic} del materiale.

Per ogni prova è importante allegare anche la temperatura a cui si è svolta, poiché è un parametro che influenza molto i risultati.

5.2 RISULTATI OTTENUTI

Per tutte le prove eseguite i provini erano gli stessi usati per le prove finalizzate alla determinazione del ΔK_{th} , quindi del tipo SENB.

I provini risultavano quindi già precriccati dalla prova per la ricerca del valore di soglia.

Entrambe le prove sono state svolte in controllo di spostamento, facendo avanzare il macchinario di una quantità pari a 0,020 mm/s in modo da rientrare nei parametri di incremento del fattore di intensificazione degli sforzi.

Le misurazioni della lunghezza di cricca sono state fatte attraverso il metodo ottico, adoperando la stessa metodologia che per la ricerca del valore di soglia.

5.2.1 PROVINO 315-1

La prima prova per la determinazione del K_{Ic} è stata eseguita sul provino 315-1. In seguito alla rottura del provino, è stata misurata la lunghezza effettiva di cricca, che ha portato ai seguenti risultati:

POSIZIONAMENTO	BASE [mm]	FINALE [mm]	MISURA [mm]
a(1/4)	48,07	22,685	25,385
a(1/2)	48,13	23,03	25,1
a(3/4)	48,16	23,21	24,95

Il valore medio delle tre misure risulta quindi essere:

$$a = 25,15 \text{ mm}$$

E quindi gli scostamenti di ogni singola misura rispetto al valore medio, e lo scostamento rispetto alle misurazioni in superficie risultano essere:

POSIZIONAMENTO	MISURA [mm]	SCOSTAMENTO
a(1/4)	25,39	-0,95%
a(1/2)	25,10	0,18%
a(3/4)	24,95	0,78%
a_s	23,80	5,35%

Tutti valori risultano essere nei margini di scostamento previsti da norma.

Successivamente alla misurazione della lunghezza di cricca si verifica che:

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55$$

Essendo $W=45 \text{ mm}$ risulta che :

$$\frac{a}{W} = 0,5588$$

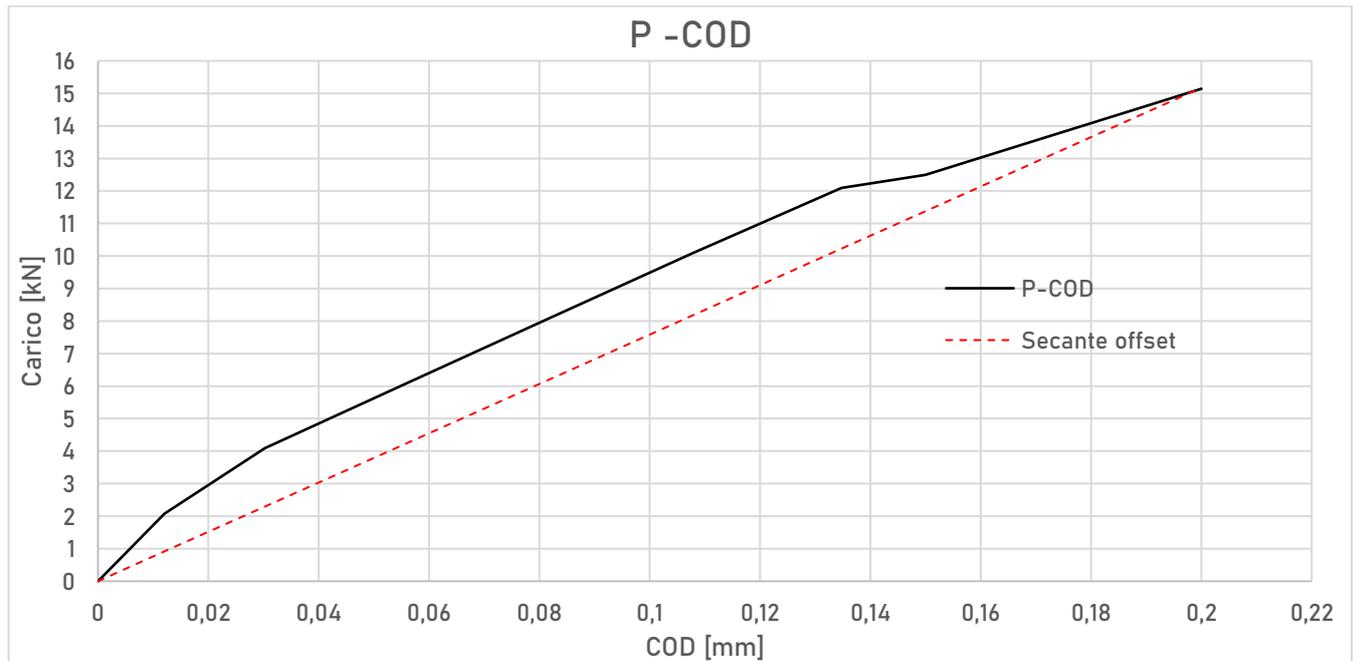
Valore leggermente maggiore rispetto a quanto previsto da norma. Nonostante ciò si è voluto comunque valutare quale fosse il valore di K_Q per queste particolari condizioni.

Si è proceduto allo step successivo ovvero quello della ricerca del carico P_Q .

Per trovare tale valore di carico in kN si è dovuto procedere per passi. È stato inizialmente necessario ottenere il grafico P-v misurato durante la prova.

Successivamente è stato opportuno individuare il tratto lineare della curva, ricavarne l'equazione e quindi il coefficiente angolare.

Noto quest'ultimo, il suo valore è stato ridotto del 5% e ne è stata trovata l'intersezione con la curva. Il risultato dell'intersezione è il carico denominato P_5 .



Come si può vedere il carico P_5 interseca la curva precedentemente al P_{max} .

Essendo P_Q definito come il carico uguale a P_5 o a qualsiasi carico più elevato che preceda sul diagramma il punto P_5 , si deduce che in questo caso P_Q è uguale a P_5 .

$$P_Q = 14,9 \text{ kN}$$

Si verifica quindi che:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1,10 = 1,016$$

E quindi il valore K_Q risulta essere:

$$K_Q = 42,49 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

5.2.2 PROVINO 291-1

La seconda prova per la determinazione del K_{Ic} è stata eseguita sul provino 291-1. In seguito alla rottura del provino, è stata misurata la lunghezza effettiva di cricca, che ha portato ai seguenti risultati in questo caso:

POSIZIONAMENTO	BASE [mm]	FINALE [mm]	MISURA [mm]
a(1/4)	48,2	25,53	22,67
a(1/2)	48,21	25,48	22,73
a(3/4)	48,19	25,5	22,69

Il valore medio delle tre misure risulta quindi essere:

$$a = 22,69 \text{ mm}$$

E quindi gli scostamenti di ogni singola misura rispetto al valore medio, e lo scostamento rispetto alle misurazioni in superficie risultano essere:

POSIZIONAMENTO	MISURA [mm]	SCOSTAMENTO
a(1/4)	22,67	0,12%
a(1/2)	22,73	-0,15%
a(3/4)	22,69	0,03%
a_s	21,04	7,30%

Tutti valori risultano essere nei margini di scostamento previsti da norma.

Successivamente alla misurazione della lunghezza di cricca si verifica che:

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55$$

Essendo $W=45 \text{ mm}$ risulta che:

$$\frac{a}{W} = 0,504$$

Valore questa volta completamente nel range previsto da norma.

Pertanto, si è proceduto allo step successivo ovvero quello della ricerca del carico P_Q .

Per trovare tale valore di carico in kN si è dovuto procedere per passi. E' stato inizialmente necessario ottenere il grafico P-v misurato durante la prova.

Successivamente è stato opportuno individuare il tratto lineare della curva, ricavarne l'equazione e quindi il coefficiente angolare.

Nota quest'ultimo, il suo valore è stato ridotto del 5% e ne è stata trovata l'intersezione con la curva. Il risultato dell'intersezione è il carico denominato P_5 .

Di seguito è riportato il grafico in questione:

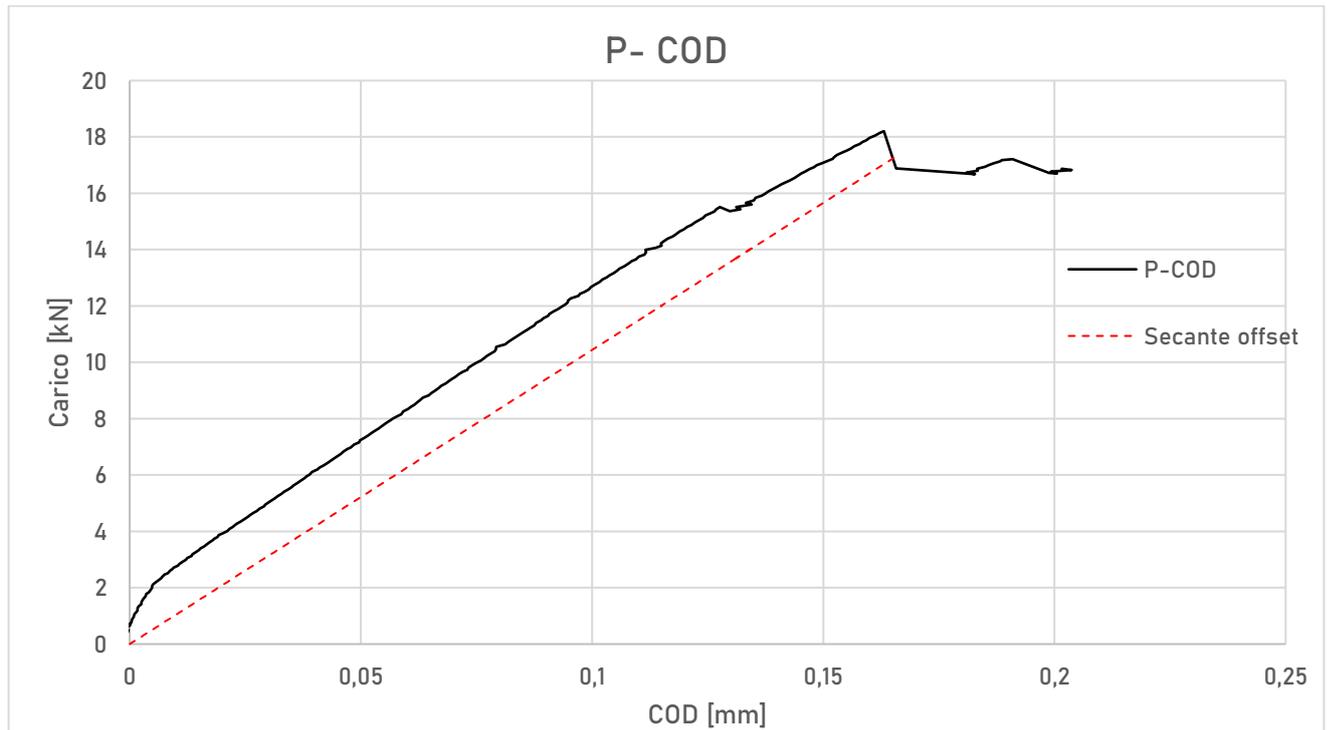


Figura 5.7 - Curva carico - spostamento per il provino 291-1

Come si può vedere il carico P_5 interseca la curva successivamente al P_{max} .

Essendo P_Q definito come il carico uguale a P_5 o a qualsiasi carico più elevato che preceda sul diagramma il punto P_5 , si deduce che in questo caso P_Q è uguale a P_{max} .

$$P_Q = 18,204 \text{ kN}$$

Si verifica quindi che:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1,10 = 1$$

E quindi il valore K_Q risulta essere:

$$K_Q = 41,33 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Noto K_Q si verifica ancora che:

- $K_{max} < 0,8 K_{Ic}$ sempre.
- $K_{max} < 0,6 K_{Ic}$ nell'ultimo 2,5 % di a .
- $W - a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}} \right)^2$

Il massimo valore di K raggiunto durante la fase di precricatura risulta minore dell'80% di K_Q infatti:

$$28,71 < 0,8 \cdot 41,33 = 33,064 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Analogamente accade per la seconda richiesta; il 2,5% di a risulta essere 0,567 mm e in questo tratto di crescita il valore di K_{max} risulta essere:

$$20,35 < 0,6 \cdot 41,33 = 24,798 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

L'ultima richiesta risulta altrettanto soddisfatta, infatti:

$$W - a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

$$45 - 22,69 \geq 2,5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{41,33}{730} \right)^2$$

$$22,31 \geq 8,01 \text{ mm}$$

Di conseguenza il valore di K_Q trovato è effettivamente quello critico.

Definiamo quindi per questo materiale, alla temperatura di 20°C, il valore di fattore di tenacità a frattura K_{Ic} pari a:

$$K_{Ic} = 41,33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

5.2.3 PROVINO 228-4

La terza prova per la determinazione del K_{Ic} è stata eseguita sul provino 228-4. In seguito alla rottura del provino, è stata misurata la lunghezza effettiva di cricca, che ha portato ai seguenti risultati in questo caso:

POSIZIONAMENTO	BASE [mm]	FINALE [mm]	MISURA [mm]
a(1/4)	48,25	26,47	21,78
a(1/2)	48,23	26,28	21,95
a(3/4)	48,21	26,35	21,86

Il valore medio delle tre misure risulta quindi essere:

$$a = 21,86 \text{ mm}$$

E quindi gli scostamenti di ogni singola misura rispetto al valore medio, e lo scostamento rispetto alle misurazioni in superficie risultano essere:

POSIZIONAMENTO	MISURA [mm]	SCOSTAMENTO
a(1/4)	21,78	0,38%
a(1/2)	21,95	-0,40%
a(3/4)	21,86	0,02%
a_s	20,14	7,88%

Tutti valori risultano essere nei margini di scostamento previsti da norma.

Successivamente alla misurazione della lunghezza di cricca si verifica che:

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55$$

Essendo $W=45 \text{ mm}$ risulta che:

$$\frac{a}{W} = 0,486$$

Valore anche questa volta completamente nel range previsto da norma.

Pertanto, si è proceduto allo step successivo ovvero quello della ricerca del carico P_Q .

Per trovare tale valore di carico in kN si è dovuto procedere per passi. È stato inizialmente necessario ottenere il grafico P-v misurato durante la prova.

Successivamente è stato opportuno individuare il tratto lineare della curva, ricavarne l'equazione e quindi il coefficiente angolare.

Nota quest'ultimo, il suo valore è stato ridotto del 5% e ne è stata trovata l'intersezione con la curva. Il risultato dell'intersezione è il carico denominato P_5 .

Di seguito è riportato il grafico in questione:

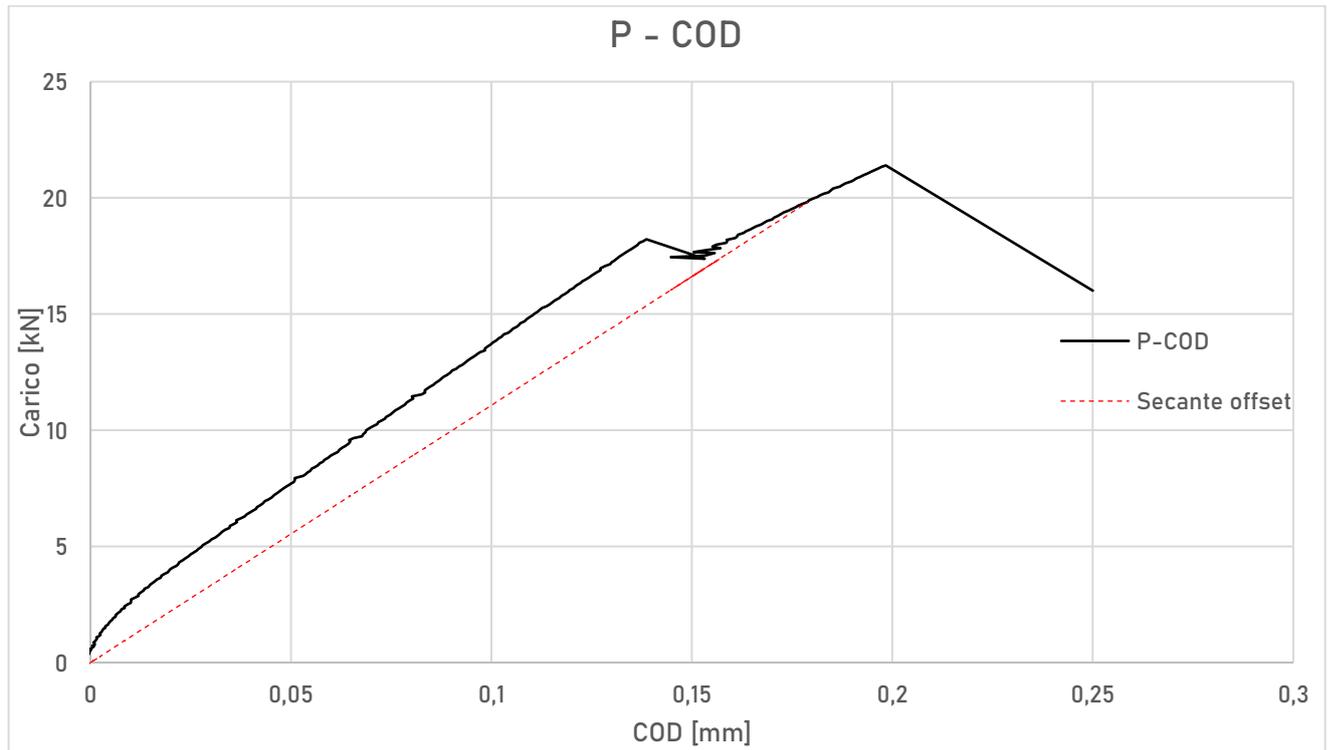


Figura 5.8 - Curva carico - spostamento per il provino 228-4

Come si può vedere il carico P_5 interseca la curva precedentemente al P_{max} .

Essendo P_Q definito come il carico uguale a P_5 o a qualsiasi carico più elevato che preceda sul diagramma il punto P_5 , si deduce che in questo caso P_Q è uguale a P_5 .

$$P_Q = 19,54 \text{ kN}$$

Il carico massimo P_{max} durante la prova risulta invece essere:

$$P_{max} = 21,40 \text{ kN}$$

Si verifica quindi che:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1,10 = 1,095$$

E quindi il valore K_Q risulta essere:

$$K_Q = 43,10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Noto K_Q si verifica ancora che:

- $K_{max} < 0,8 K_{Ic}$ sempre.
- $K_{max} < 0,6 K_{Ic}$ nell'ultimo 2,5 % di a .
- $W - a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}} \right)^2$

Il massimo valore di K raggiunto durante la fase di precricatura risulta minore dell'80% di K_Q infatti:

$$27,31 < 0,8 \cdot 43,10 = 34,48 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Analogamente accade per la seconda richiesta; il 2,5% di a risulta essere 0,5465 mm e in questo tratto di crescita il valore di K_{max} risulta essere:

$$20,26 < 0,6 \cdot 43,10 = 25,86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

L'ultima richiesta risulta altrettanto soddisfatta, infatti:

$$W - a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{SN}} \right)^2$$

$$45 - 21,86 \geq 2,5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{43,1}{730} \right)^2$$

$$23,14 \geq 8,71 \text{ mm}$$

Di conseguenza il valore di K_Q trovato è effettivamente quello critico.

Definiamo quindi per questo materiale, alla temperatura di 20°C, il valore di fattore di tenacità a frattura K_{Ic} pari a:

$$K_{Ic} = 43,10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

5.3 OSSERVAZIONI

I valori di K_{Ic} ottenuti non si scostano molto uno dall'altro. Si può quindi affermare che il K_{Ic} del materiale risulti essere compreso fra i valori:

$$41 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K_{Ic} \leq 43 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Tali valori sono concordi con ciò che si trova in letteratura per questo materiale.

In entrambi i provini in cui la prova risultasse valida, è stato riscontrato il fenomeno del pop-in, ovvero un'apparente propagazione instabile della cricca.

Nel caso del provino 291-1, conseguentemente al pop-in il carico non ha più ripreso a crescere e il campione ha assunto un comportamento molto vicino al "Tipo 3" descritto in **Figura 5.5**.

Nel caso invece del provino 228-4, avvenuto il pop-in, il carico ha ripreso a crescere e la curva ha assunto un comportamento simile a quello descritto in **Figura 5.5** con l'appellativo "tipo 2".

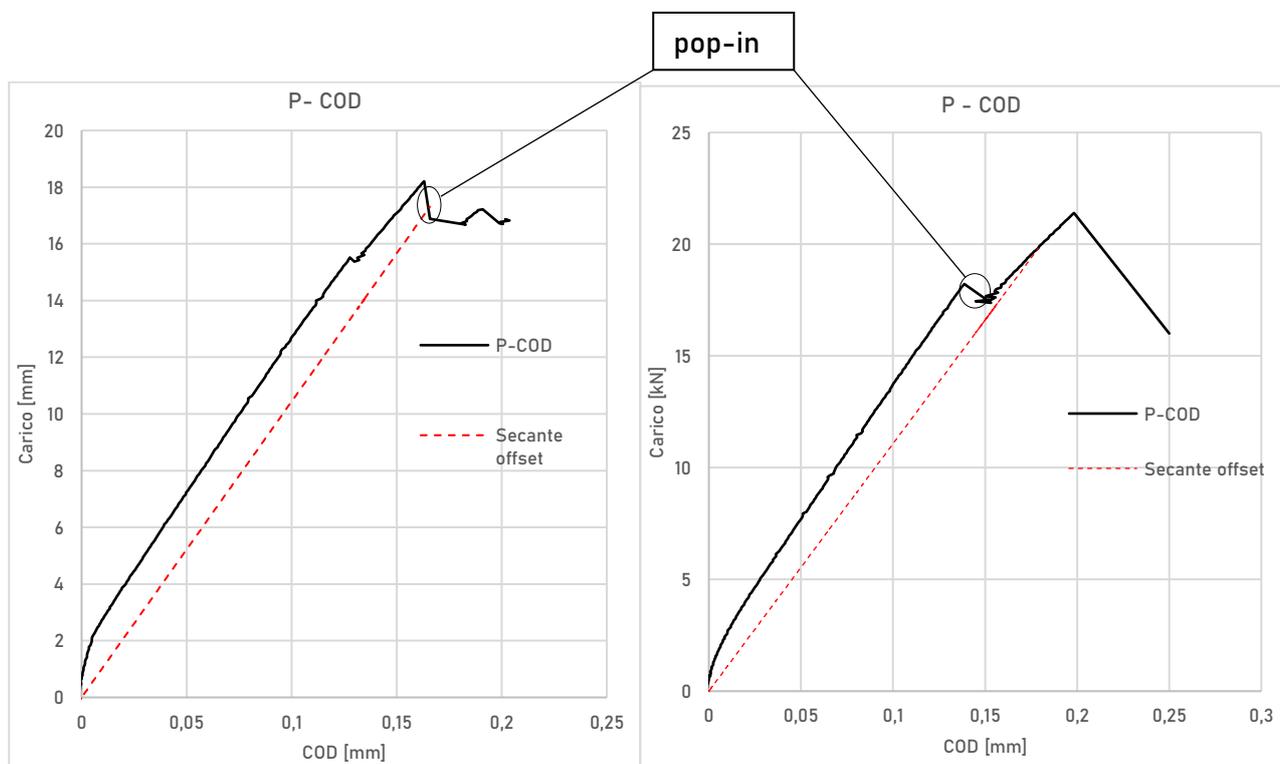


Figura 5.9 – Fenomeno del pop-in nelle curve carico - spostamento per le prove di K_{Ic}

Conseguentemente a queste prove, si può comunque non raccomandare la tecnica di misurazione attraverso Potential Drop nel caso in cui, successivamente alle prove di K_{Ic} , si volesse ancora fare un'analisi metallografica del provino.

Tale tecnica di misurazione invalida infatti l'analisi successiva poiché "annerisce" le superfici, rendendole praticamente inutilizzabili.

Le **Figure 5.10** e **5.11** mettono a confronto le superfici di frattura dei provini in cui la tecnica di misurazione fosse quella del potential drop, e l'altra in cui la tecnica di misurazione fosse solo quella ottica. Nel caso della **Figura 5.10** si può notare come la superficie presenti una gamma di colori uniforme, e nessuna zona scura, cosa che si nota nella **Figura 5.11**.

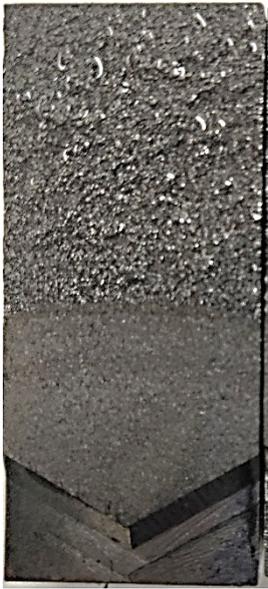


Figura 5.10 - Superficie di frattura per il provino 228-4, nel quale la misurazione della cricca di fatica è avvenuta esclusivamente con il metodo ottico



Figura 5.11 - Superficie di frattura per il provino 315-1, nel quale la misurazione della cricca di fatica è avvenuta sia con il metodo ottico che con quello PD

6 METALLOGRAFIA

Alla conclusione di tutte le prove, è stato ritenuto necessario analizzare quale fosse la microstruttura del materiale e la morfologia della cricca. Per fare tutto ciò si è effettuata una analisi metallografica del materiale in questione.

6.1 TECNICA UTILIZZATA

Per eseguire l'analisi metallografica dei campioni è stato innanzitutto necessario prelevare un campione di materiale dai provini. Nel nostro caso il materiale è stato prelevato dal provino esausto numerato 342-2 sollecitato con rapporti di carico $R=0,5$.

Affinché l'analisi risultasse soddisfacente è stato necessario inoltre lucidare il provino attraverso una lucidatrice metallografica, variando man mano la grana della carta al SiC nella sequenza 120-320-600-1200 gridt (grani di SiC al pollice quadro), sino a passare a panni umidificati con sospensioni diamantate in cui le microparticelle avessero le dimensioni dell'ordine dei 6-3-1-1/4 μm . Il macchinario utilizzato per lucidare i provini è una lucidatrice *Presi Minitech 233*, raffigurata in **Figura 6.1**.



Figura 6.1 - Tipo di lucidatrice metallografica adoperata

Ottenuta la finitura a specchio ricercata, il provino è stato pulito mediante acetone in una vasca ad ultrasuoni e successivamente è stato sottoposto ad un attacco chimico al Nital 2%. Il Nital non è altro che una soluzione di alcool etilico e acido nitrico usata per attaccare chimicamente i metalli. In particolare, è universalmente utilizzata in metallografia per rivelare la microstruttura di acciai al carbonio.

Successivamente all'attacco al Nital, il campione di metallo prelevato dal provino 342-2 è stato analizzato al microscopio. Il macchinario utilizzato è un microscopio metallurgico *Leica Reichert-Jung MeF3*. È un microscopio ottico dotato di telecamera, che può essere utilizzato per analizzare le caratteristiche microstrutturali di ceramiche e per caratterizzare la configurazione macroscopica e microscopica di campioni metallici. È possibile inoltre analizzare, sempre attraverso lo stesso macchinario e l'annesso software di gestione, anche la morfologia delle cricche. *Leica Reichert-Jung MeF3* può arrivare ad ingrandimenti compresi fra 20 X e 2000 X.

Tra le tecniche con cui è possibile analizzare i metalli si includono il campo luminoso, il campo scuro e l'illuminazione polarizzata.

In particolare, al fine di notare alcune fasi che altrimenti non sarebbero state visibili analizzando normalmente il campione, è stata utilizzata la tecnica del contrasto interferenziale.

La microscopia a contrasto di interferenza differenziale è infatti una tecnica di microscopia ottica utilizzata per migliorare il contrasto nei campioni non colorati, trasparenti. Funziona sul principio dell'interferometria per ottenere informazioni sulla lunghezza del cammino ottico del campione, permettendo di osservare caratteristiche altrimenti invisibili. Un sistema ottico relativamente complesso produce un'immagine dove l'oggetto, se incolore e trasparente, appare in bianco e nero su sfondo grigio. Migliora il contrasto creando ombre artificiali, come se l'oggetto fosse illuminato lateralmente. La **Figura 6.2** è una fotografia del microscopio utilizzato.



Figura 6.2 - Microscopio Leica Reichert-Jung MeF3

Utilizzando lo stesso microscopio, sono stati inoltre analizzati tutti gli altri provini, al fine di analizzare la morfologia delle cricche. Su questi ultimi però non è stato effettuato nessun trattamento superficiale di lucidatura come per il campione 342-2, tantomeno di attacco chimico.

6.2 RISULTATI OTTENUTI

L'analisi metallografica ha messo in evidenza la microstruttura del materiale analizzato, un acciaio eutettoide con microstruttura perlitica, come si può notare nella **Figura 6.3** o ancora

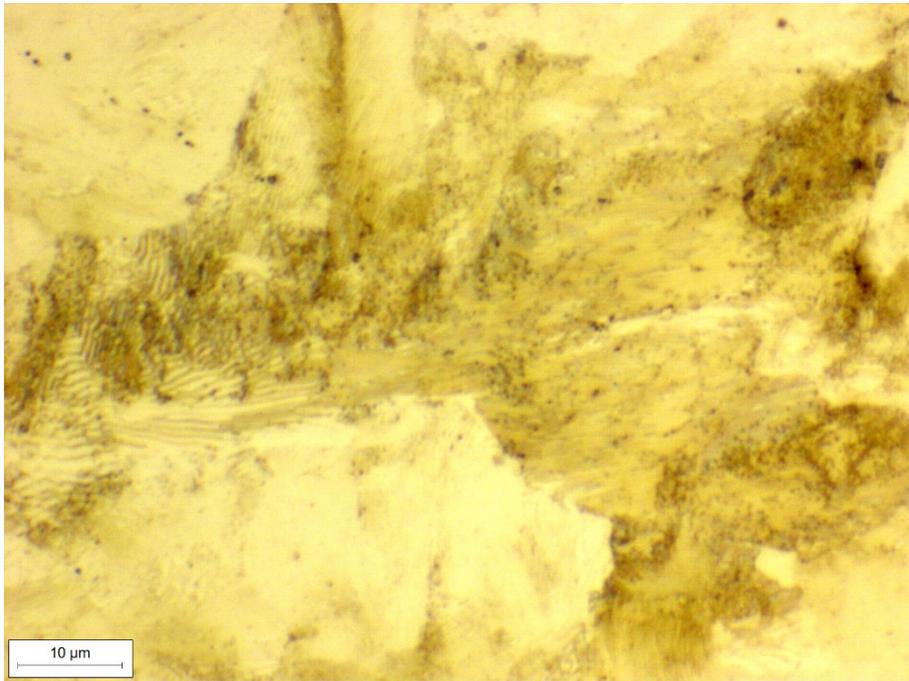


Figura 6.3 - Microstruttura perlitica. Ingrandimento 100 x1.25, fotografia ottenuta senza l'ausilio di luce laterale (contrasto interferenziale).

meglio nella **Figura 6.4**, ottenuta mediante contrasto interferenziale.

La microstruttura che si evidenzia è di tipo perlitico lamellare molto fine, in cui la distanza fra le lamelle risulta essere dell'ordine del μm e anche minori, segno che la formazione di quest'ultima è avvenuta a temperature ben al di sotto di A_1 , temperatura alla quale, durante il raffreddamento, l'Austenite divenuta eutettoide si trasforma in Perlite. Viceversa, durante il riscaldamento è la temperatura alla quale la Perlite si trasforma in Austenite Eutettoide. Il valore è di 723°C .

Le lamelle non sembrano seguire un orientamento particolare, ma hanno un orientamento variabile.

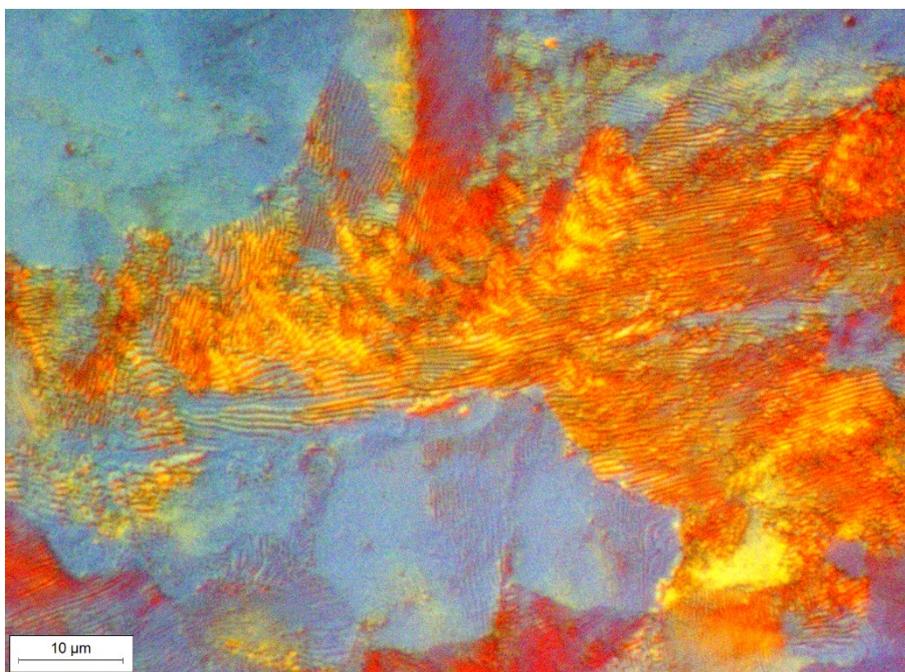


Figura 6.4 - Microstruttura perlitica. Ingrandimento 100 x1.25, fotografia ottenuta mediante l'ausilio di luce laterale (contrasto interferenziale).

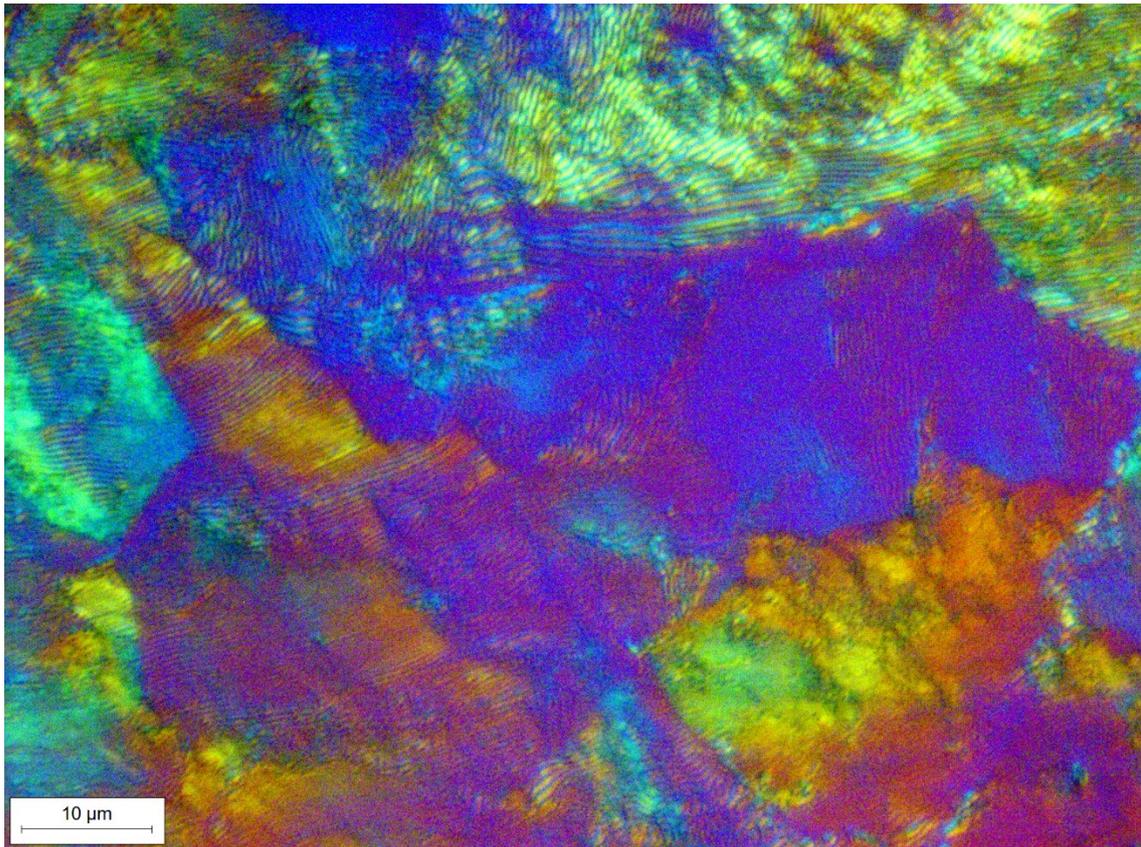


Figura 6.5 - Microstruttura perlitica lamellare. Fotografia ottenuta mediante l'utilizzo della tecnica di contrasto interferenziale.

La **Figura 6.5** mette in evidenza la differente orientazione delle lamelle; la diversa colorazione fra le parti indica la differente dimensione delle isole perlitiche.

Nell'articolo "The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wire", I. Verpoest, E. Aernoudt, A. Deruyttere and M. De Bondt ^[5], vengono evidenziati 3 modi principali di propagazione della cricca rispetto all'orientazione delle lamelle di cementite nella perlite, come rappresentato in **Figura 6.6**:

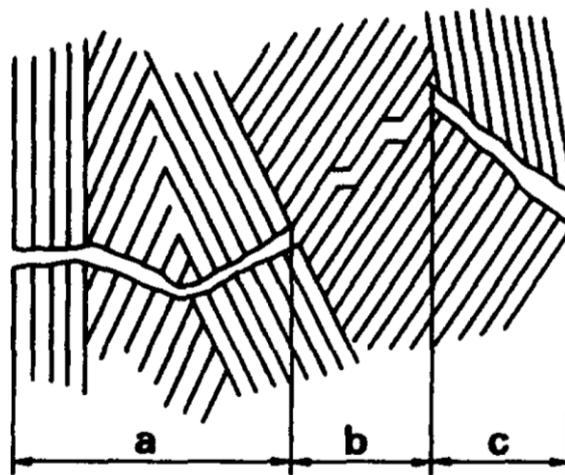


Figura 6.6 - Propagazione perpendicolare alle lamelle di cementite (a), parallela alle lamelle di cementite (b), al bordo delle isole perlitiche (c)

Ciò che è raffigurato in **Figura 6.6** viene riscontrato effettivamente se si va ad analizzare la microstruttura nei pressi della cricca, ovvero in **Figura 6.7** e **Figura 6.8**:

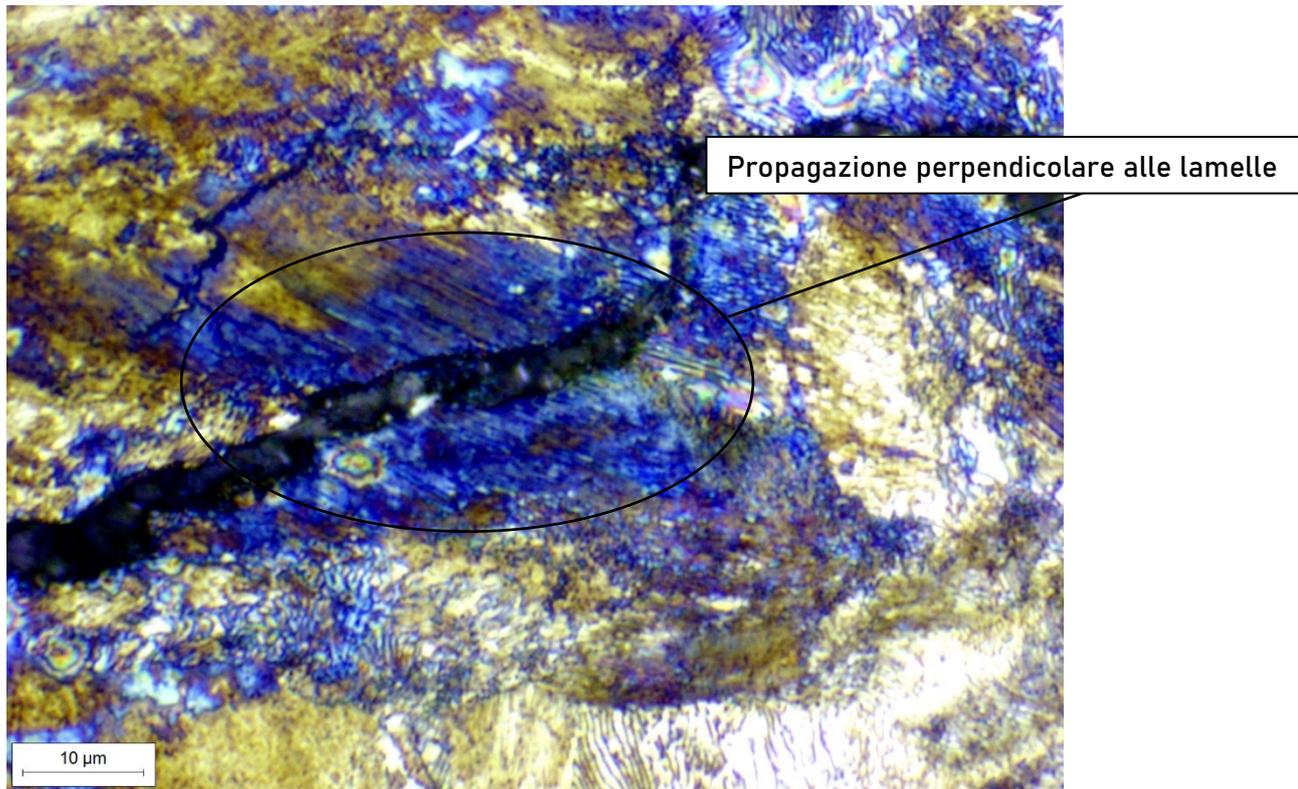


Figura 6.7 - Rappresentazione della propagazione della cricca di fatica rispetto alle lamelle di cementite. Si può sicuramente evidenziare una propagazione perpendicolare alle lamelle (tipo a).

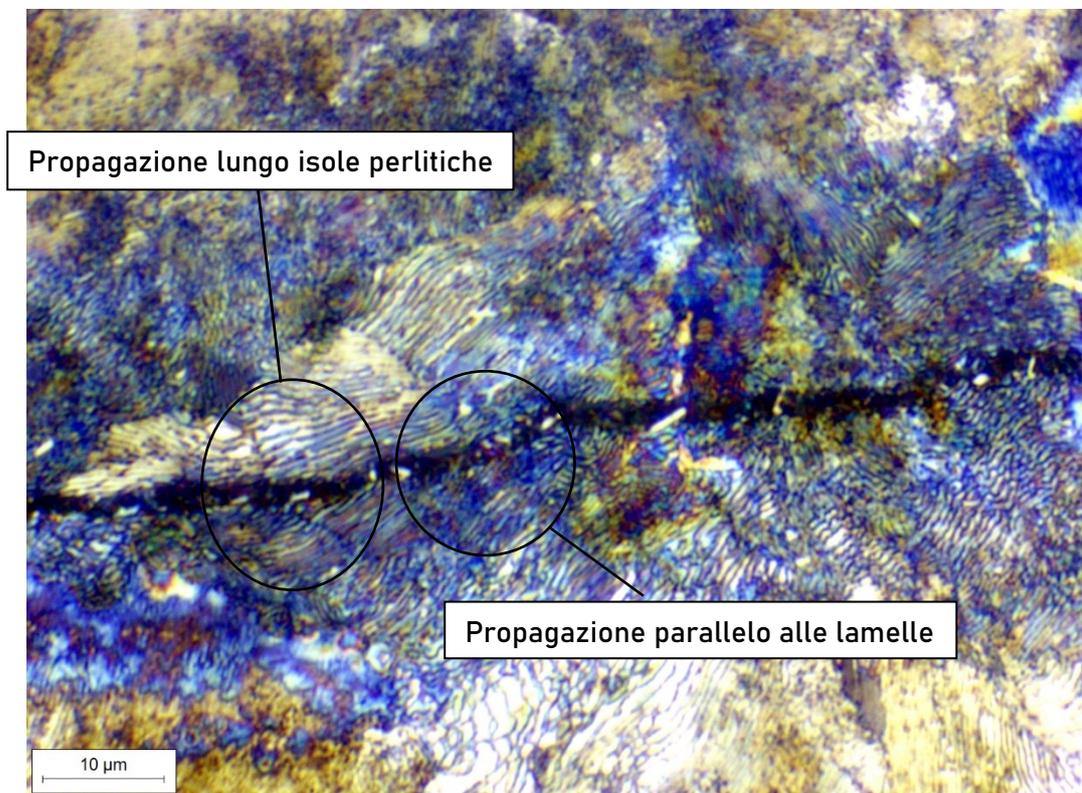


Figura 6.8 - Rappresentazione della propagazione della cricca di fatica rispetto alle lamelle di cementite. Si può sicuramente evidenziare una propagazione parallela alle lamelle (tipo b) e lungo le isole perlitiche (tipo c).

Sono inoltre non poco frequenti i fenomeni di propagazione mista, come evidenziato dalle **Figure 6.9, 6.10 e 6.11**, rilevati su provini differenti. Parimenti, si riscontrano spesso fenomeni di biforcazione della cricca come mostrato nelle medesime figure, che non fanno che accentuare il fenomeno della propagazione mista.

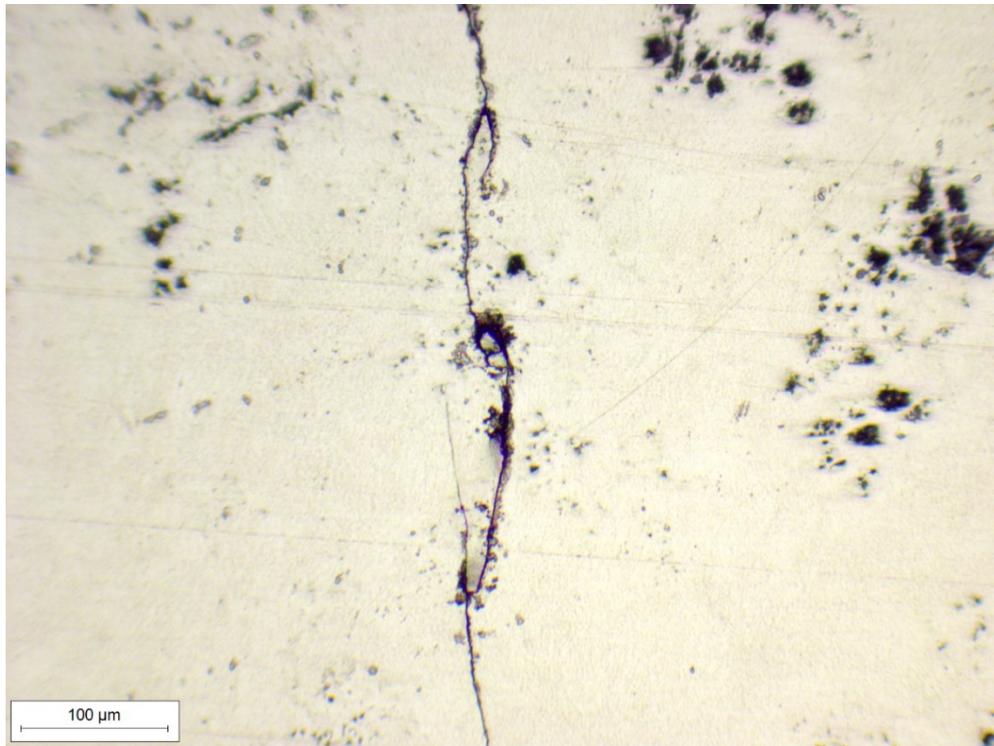


Figura 6.9 - Esempio di propagazione mista rinvenuto sul provino 336-2, sottoposto a rapporto di carico $R=0,1$. Come si può notare la cricca propaga in maniera tutt'altro che dritta.

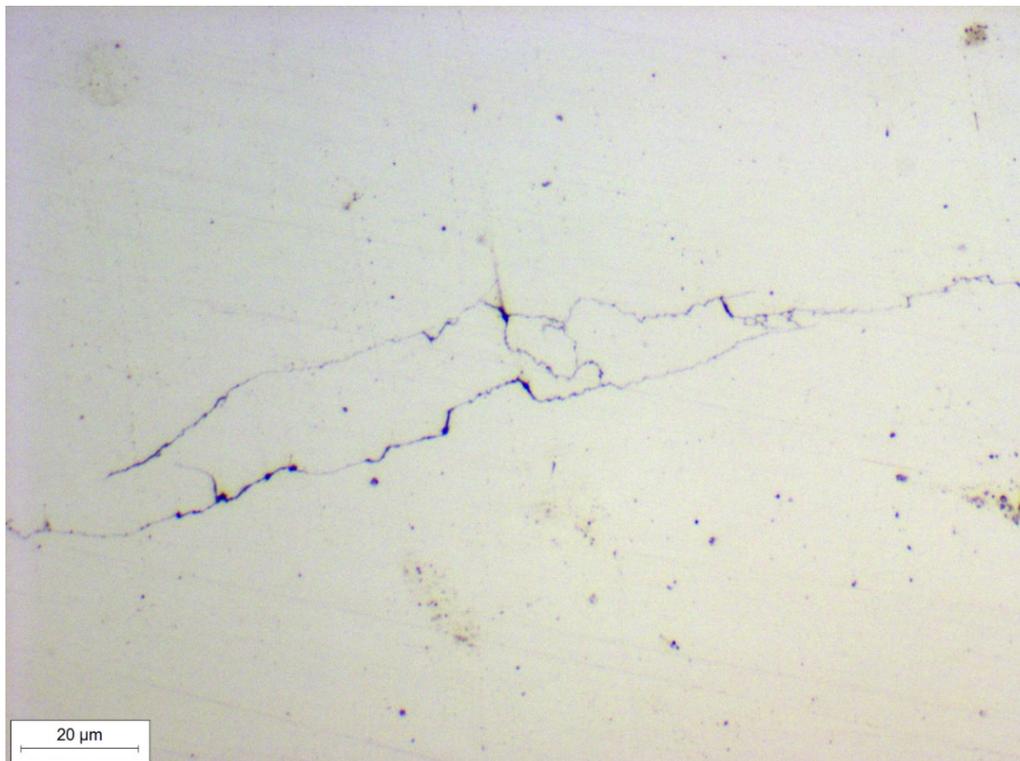


Figura 6.10 - Esempio di propagazione mista rinvenuto sul provino 342-2, sottoposto a rapporto di carico $R=0,5$. Da notare la biforcazione e poi la ripresa di propagazione nella stessa direzione della cricca.

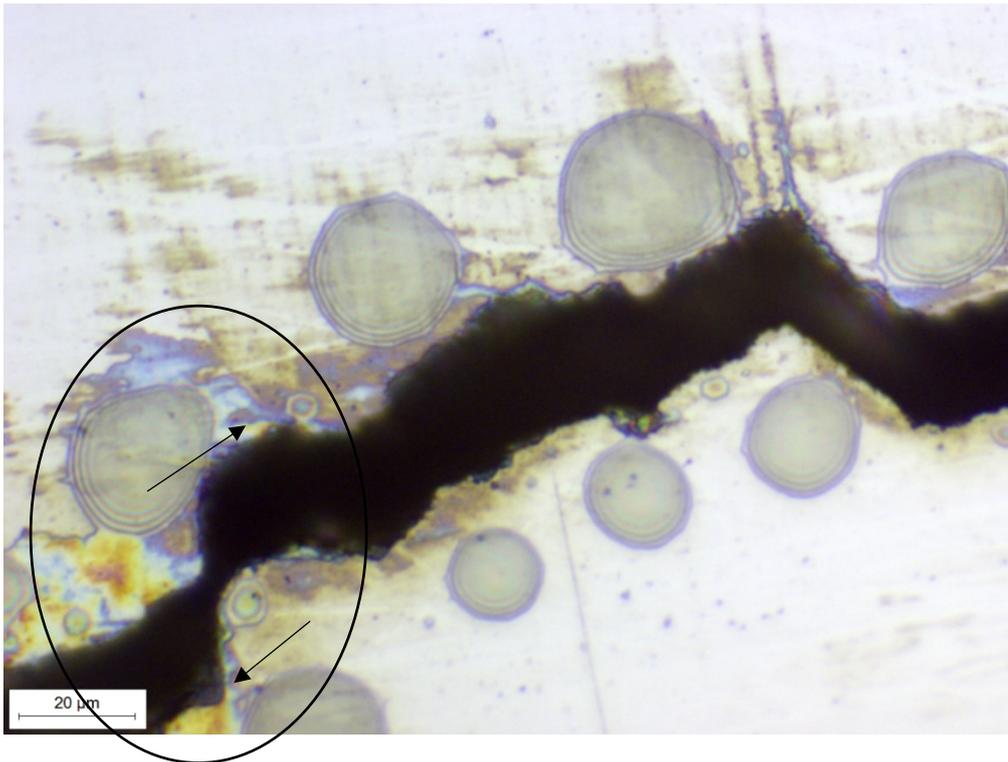


Figura 6.11 - Evidente fenomeno di propagazione in Modo 2 riscontrato sul provino 342-2 sottoposto a $R=0,5$

Analizzando il provino 336-2 si sono notati anche altri fenomeni particolari, come la fuoriuscita di prodotti di ossidazione dalla cricca, senza che il provino venisse sottoposto a condizioni corrosive durante le prove. Il motivo di tali fuoriuscite di materiale è lo sfregamento fra le facce della cricca collegato al rapporto di carico a cui si è sottoposto tale provino ($R=0,1$). La **Figura 6.12** ne è una evidenza:

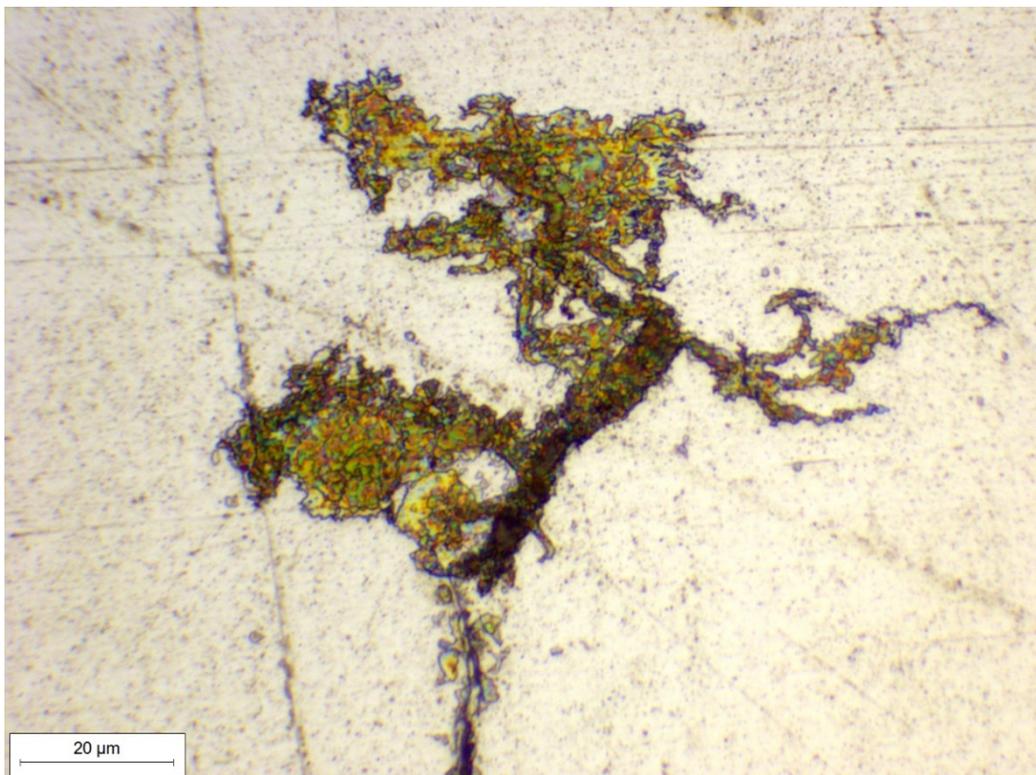


Figura 6.12 - Evidenza sperimentale dell'uscita di materiale dalla cricca a causa dello sfregamento delle facce.

L'ultima analisi che si è condotta sui provini, è stata quella di valutare l'apertura della cricca alla base dell'intaglio. I risultati in forma tabellare e grafica sono riportati qui di seguito:

R	Misura 1 [μm]	Misura 2 [μm]	Misura 2 [μm]	Media [μm]
0,1	4,66	4,53	5,21	4,80
0,2	2,79	2,75	2,73	2,76
0,3	3,2	2,55	2,39	2,71
0,5	0,8	1,23	1,26	1,10
0,7	6,73	6,85	7,4	6,99
0,85	3,52	3,52	4,06	3,70
0,9	2,87	3,15	3,2	3,07

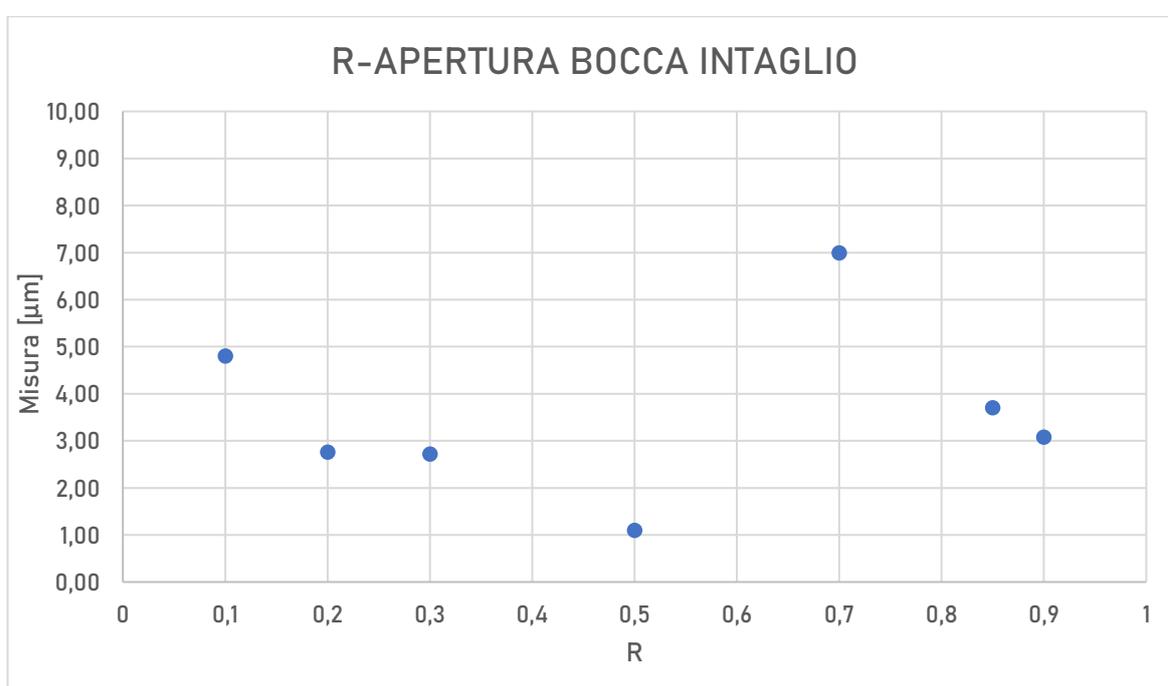


Figura 6.13 - Correlazione rapporto di carico R e misura apertura della cricca alla bocca dell'intaglio.

risultati non evidenziano particolari tendenze, ma una oscillazione dei valori fra 7 μm e 1 μm , valori di entità assai limitata che mostrano essenzialmente la dispersione di fondo dei valori di chiusura della cricca a carico nullo. Tale dispersione è distribuita di poco al di sopra dello zero, evidenziando così la presenza di ossidi o prodotti di corrosione che si sono formati all'interno della cricca per lo sfregamento dei fianchi della fessura in prossimità della soglia di propagazione, come anche la **Figura 6.12** dimostra in modo evidente.

Le **Figure 6.14, 6.15** sono alcune delle figure utilizzate per la misurazione dell'apertura della cricca alla bocca dell'intaglio.

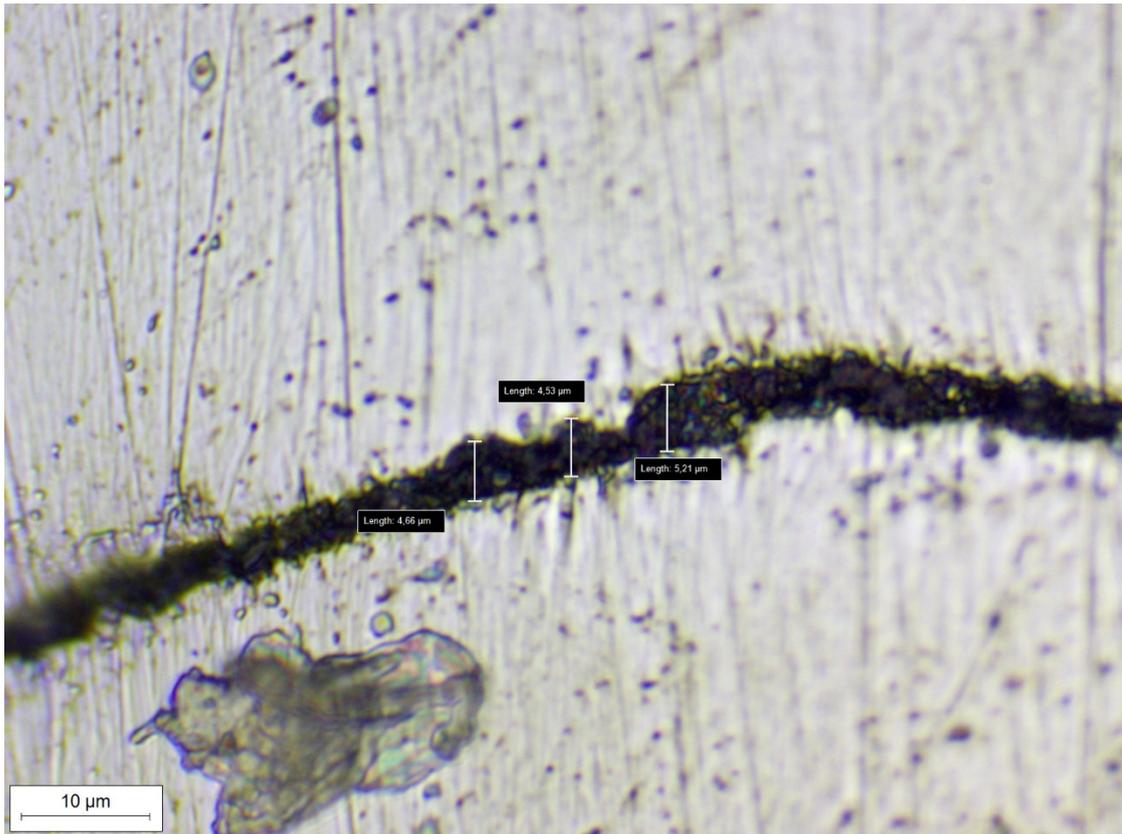


Figura 6.14 - Risultati della misura di cricca alla bocca dell'intaglio per il provino 336-2, $R=0,1$.

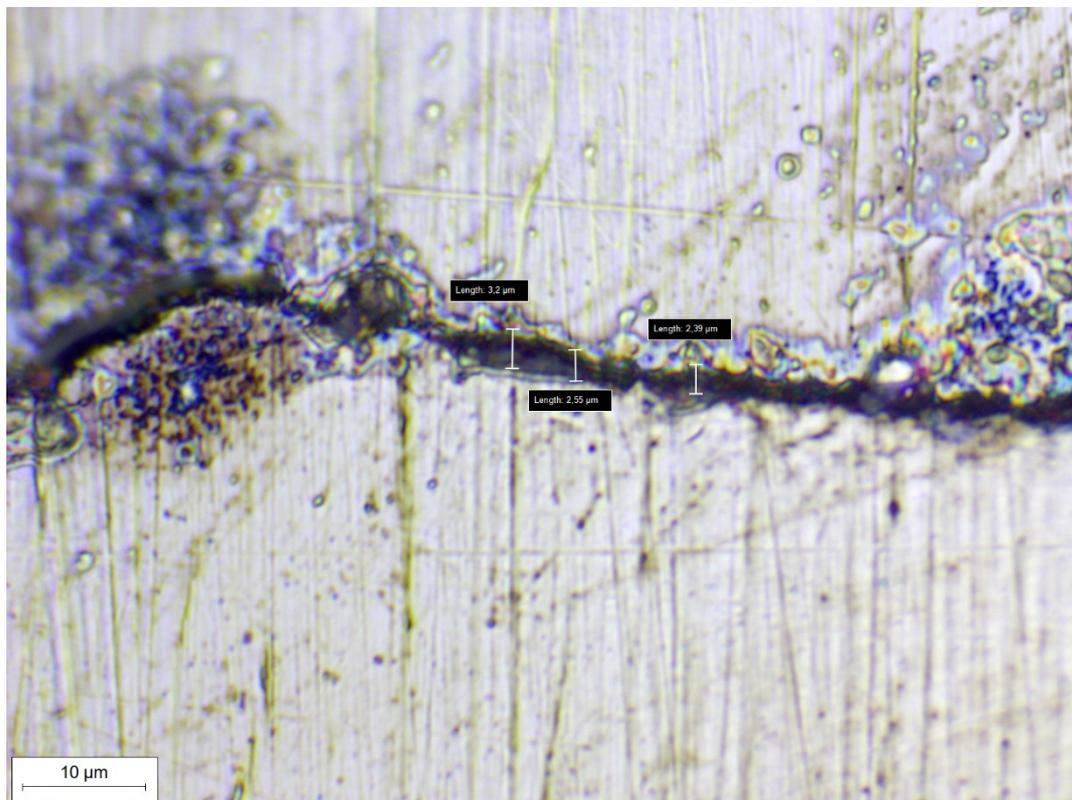


Figura 6.15 - Risultati della misura di cricca alla bocca dell'intaglio per il provino 315-1, $R=0,3$.

7 CONCLUSIONI

In seguito a tutte le prove eseguite sul materiale, e alle annesse analisi, considerando anche le metodologie adottate per raggiungere gli scopi, si può affermare per questa lega che:

- Il materiale, se sollecitato con rapporti di carico R prossimi allo zero presenta una ottima inerzia alla propagazione delle cricche; il valore di soglia per $R=0,1$ e $R=0,2$ risulta essere $\Delta K_{th} \approx 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.
- Il materiale presenta d'altro canto un valore di tenacità a frattura relativamente basso che si attesta su $41 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K_{Ic} \leq 43 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.
- Il materiale non presenta un valore di soglia intrinseca come modellizzato nel **Paragrafo 1.6.1**, ma il valore di soglia continua a decrescere, al crescere di R .
- Il materiale presenta fenomeni di chiusura via via meno marcati all'aumentare di R , coerentemente con ciò che dice la letteratura.
- La causa dei fenomeni di chiusura per questo materiale sembra essere la propagazione in Modo 2, come rappresentato teoricamente in **Figura 1.14b** e sperimentalmente in **Figura 6.11**.
- A conferma di un'unica causa del fenomeno di chiusura si può notare una scarsa variabilità del carico di apertura P_{Op} .
- Il metodo ottico si conferma il miglior metodo per l'analisi della crescita della cricca vicino al valore di soglia per questo acciaio.
- Il metodo del Potential Drop risulta essere invece molto efficace nelle fasi di crescita della cricca lontane dal valore di ΔK_{th} ; non si può dire altrettanto nella fase molto vicina al valore di soglia, dove a causa dei fenomeni elettrici che si vengono a creare (ponti elettrici, microsaldature, corrosione locale del materiale) il valore di potenziale risulta essere troppo instabile. È inoltre sconsigliato questo metodo se successivamente alla prova si prevede una successiva analisi frattografica; tale metodo infatti annerisce le superfici di frattura, rendendo illeggibile qualsiasi dato in una analisi frattografica.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato, desidero menzionare tutte le persone, senza le quali questo lavoro di tesi non esisterebbe nemmeno.

Ringrazio il mio relatore Roberto Doglione, che in questi mesi di lavoro, ha saputo guidarmi, con suggerimenti pratici e teorici, nelle ricerche e nella stesura dell'elaborato.

Ringrazio di cuore i miei genitori e la mia famiglia, senza i cui sacrifici non sarei mai riuscito a portare a termine gli studi universitari.

Ringrazio altrettanto di cuore la mia fidanzata per l'infinita pazienza e sostegno mostrati in questi anni.

Un ringraziamento particolare va altresì al mio collega Edoardo con cui ho condiviso tutte le battaglie e le difficoltà, nonché gioie, che questo percorso di studi porta con sé.

Infine, vorrei dedicare questo piccolo traguardo a me stesso, che possa essere l'inizio di una lunga e brillante carriera professionale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Slide di Antonio Gugliotta relative al corso “Costruzione di Macchine”, anno accademico 2017-2018.
- [2] Fracture Mechanics: Fundamentals and Application , Fourth Edition , T.L. Anderson.
- [3] ASTM E399 -19 - Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials.
- [4] ASTM E647 -15e1 - Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- [5] The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wire, I. Verpoest, E. Aernoudt, A. Deruyttere and M. De Bondt