

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Prove sperimentali su componenti per motore a combustione interna:
fatica dei materiali e rigidità dei componenti



Relatore
prof. Davide Salvatore Paolino

Candidato
Lorenzo Vigna

Tutor aziendale
Matteo Costantini

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Abstract	4
1. Treno valvola e bilancieri	5
1.1. Valvetrain tipo 2	6
2. Progettazione di un bilanciere	8
2.1. Condizioni di lavoro del bilanciere	8
2.2. Processo di progettazione del bilanciere	10
2.2.1. Simulazione strutturale agli elementi finiti	10
2.2.2. Calcolo del coefficiente di sicurezza sul bilanciere.....	12
2.2.3. Prove su prototipi e componenti	13
2.3. <i>Rocker arm design tool</i>	15
3. Caratterizzazione a fatica dell'acciaio 16MnCr5 carbonitrurato	16
3.1. Design of experiment.....	16
3.2. Caratteristiche del materiale.....	19
3.2.1. Geometria e produzione dei provini.....	19
3.2.2. Valutazione della distorsione dei provini.....	23
3.2.3. Proprietà meccaniche del materiale.....	27
3.2.3.1. Durezza superficiale	27
3.2.3.2. Resistenza a trazione del materiale	27
3.3. Caratterizzazione a fatica.....	40
3.3.1. Attrezzatura e condizioni di prova.....	40
3.3.2. Modalità di prova.....	41
3.3.3. Risultati sperimentali	42
3.4. Correzione dei risultati sperimentali.....	49
3.4.1. Modello per la valutazione dell'errore dovuto alla distorsione	49
3.4.2. Risultati corretti.....	54
3.4.3. Validazione del modello numerico di correzione.....	56
3.4.3.1. Prova di trazione su provini estensimetrati	59
3.4.3.2. Differenza tra le deformazioni sulle due facce del provino.....	60
3.4.3.3. Confronto tra la deformazione misurata dagli estensimetri e dall'estensometro della macchina di prova.....	61

3.4.3.4.	Confronto tra i risultati della simulazione FEM e i valori misurati tramite gli estensimetri.....	61
4.	Rigidezza dei bilancieri	64
4.1.	Misura sperimentale della rigidezza	64
4.1.1.	Strumentazione e condizioni di prova	66
4.1.2.	Calcolo della rigidezza netta	67
4.2.	Variabilità della rigidezza misurata sui componenti.....	69
4.2.1.	Test su un bilanciere tipo 2 di grandi dimensioni.....	70
4.2.2.	Test su un bilanciere tipo 2 di medie dimensioni	72
4.2.3.	Conclusioni.....	75
4.3.	Influenza delle condizioni di assemblaggio del bilanciere.....	76
4.3.1.	Design of experiment.....	77
4.3.2.	Risultati sperimentali	80
4.3.2.1.	Bilanciere 1.....	80
4.3.2.2.	Bilanciere 2.....	81
4.3.2.3.	Bilanciere 3.....	82
4.3.3.	Conclusioni.....	83
4.4.	Simulazione FEM e differenza rispetto ai risultati sperimentali	86
5.	Conclusioni e principali risultati	88
	Bibliografia.....	90
	Ringraziamenti	91

Abstract

Il treno valvola è un elemento chiave dei moderni motori a combustione interna. Si definisce treno valvola il sistema composto dalle valvole di aspirazione e di scarico, e tutti gli elementi adibiti alla trasmissione del moto dall'albero a camme alle valvole. Le tipiche configurazioni dei motori moderni richiedono una punteria e un bilanciere, che costituisce l'elemento di connessione tra camma, valvola e punteria.

Questo rende il bilanciere un componente critico. Un suo danneggiamento causa l'impossibilità di aprire le valvole e conseguentemente perdita di potenza e arresto del motore. Per questo motivo è necessario investigare attentamente il comportamento a fatica del componente. Una tipologia particolarmente diffusa di bilanciere è realizzata in lamiera d'acciaio carbonitrurata. Il processo produttivo e il trattamento di carbonitrurazione causano una variabilità notevole nella resistenza a fatica di questo componente.

In questa tesi viene indagato il comportamento a fatica della lamiera d'acciaio carbonitrurata, considerando l'effetto di diversi livelli di carbonitrurazione e di spessore della lamiera. L'indagine sperimentale è stata effettuata eseguendo prove di trazione e di fatica assiale secondo il metodo staircase. I risultati hanno mostrato che i campioni con minore spessore dello strato carbonitrurato esibiscono migliori proprietà nei test statici, mentre la resistenza a fatica risulta leggermente più alta nel materiale con profondità di carbonitrurazione maggiore.

Anche la distorsione del provino dopo il trattamento termico è stata presa in considerazione nell'analisi. Per compensare la distorsione è stato proposto un modello di correzione per tenerne conto nei risultati finali. La procedura di correzione consiste in una misurazione della distorsione del provino, una valutazione numerica degli stress causati dall'afferraggio della macchina di trazione, e infine la correzione dei risultati di fatica. Il modello di correzione è stato validato tramite una misura con estensimetri durante un test di afferraggio del provino. Questo ha mostrato una corrispondenza tra le deformazioni rilevate sul provino e i risultati del modello numerico.

Anche la rigidità del bilanciere è stata investigata in questa tesi, poiché è una proprietà critica richiesta per ragioni sia strutturali che dinamiche.

La rigidità è fortemente dipendente dalla geometria, ma possono esserci variazioni degne di nota anche tra campioni prelevati da uno stesso lotto produttivo. Per quantificare la variabilità della rigidità, sono stati testati molti campioni di alcuni modelli di bilanciere, ed è stata effettuata un'analisi statistica della rigidità misurata. Risulta che la rigidità misurata presenta una distribuzione normale, con valore medio e deviazione standard che dipendono dal modello di bilanciere preso in considerazione. L'analisi statistica dei dati non ha evidenziato errori sistematici.

1. Treno valvola e bilancieri

Si definisce treno valvole (valvetrain) il sistema di attuazione dell'apertura e chiusura delle valvole di un motore a combustione interna. Si tratta di un sistema fondamentale per il funzionamento del motore, in cui un malfunzionamento causa nella maggior parte dei casi un arresto del motore. Scopo del sistema è sincronizzare l'apertura e chiusura delle valvole di aspirazione e scarico con il comando dato dall'albero a camme tramite una conversione del moto rotatorio di quest'ultimo in una traslazione della valvola che determina l'apertura o chiusura del condotto. Si tratta di un sistema dalle caratteristiche ben note e consolidate, ma ancora oggi terreno di studi volti a migliorarne il funzionamento e l'affidabilità.

Le possibili architetture del valvetrain sono cinque, ciascuna con caratteristiche diverse e destinata a tipologie di utilizzo diverse.

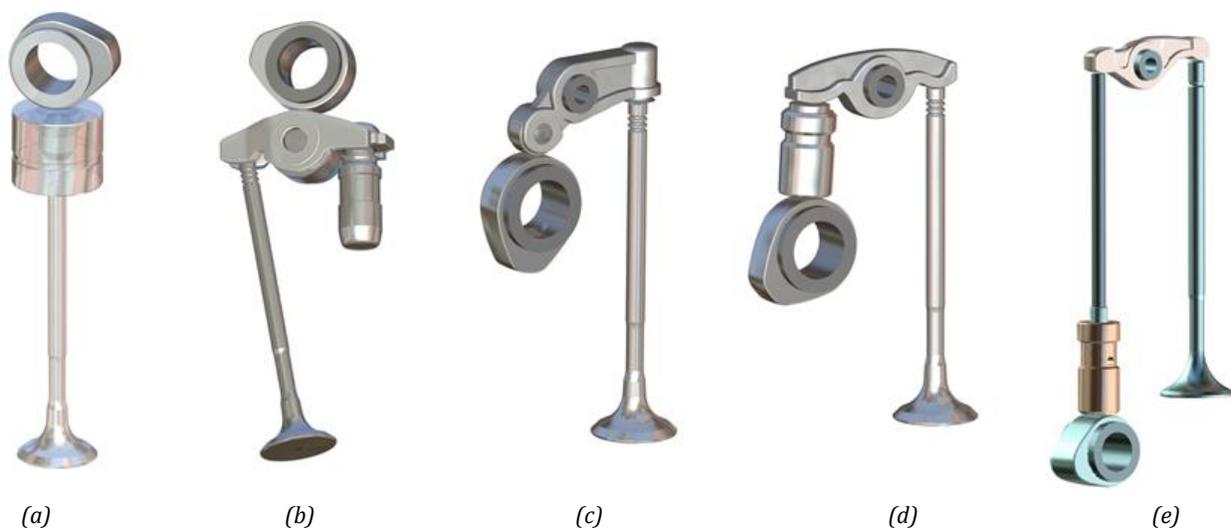


figura 1- Diverse tipologie di valvetrain, denominate rispettivamente tipo 1 (a), tipo 2 (b), tipo 3 (c), tipo 4 (d), tipo 5 (e)

Oggi sono utilizzate prevalentemente architetture di tipo 2, 3 e 5. Il tipo due è il più utilizzato nel settore automobilistico per motori Diesel o benzina, mentre il tipo 3 è utilizzato soprattutto per veicoli commerciali Diesel. Il tipo 5 è invece destinato prevalentemente a motori Diesel di grosse dimensioni per applicazioni pesanti. In questo lavoro si prenderanno in considerazione bilancieri di tipo 2, che risultano i più diffusi nelle applicazioni autoveicolistiche.

Gli elementi che costituiscono il valvetrain sono:

- l'albero a camme, che con la sua rotazione controlla il sistema
- la valvola di aspirazione o di scarico
- il bilanciere (rocker arm), che trasmette il moto dalla camma alla valvola

- una punteria idraulica, che serve a garantire il contatto tra le varie parti e fa da perno di rotazione del bilanciere tipo 2
- un cuscinetto, che può essere ad aghini oppure un rullo pieno
- una molla, che garantisce la chiusura della valvola
- nelle tipologie 3, 4, 5 il perno di rotazione dei bilancieri è costituito da un asse denominato rocker shaft, non presente nei tipi 1 e 2.

Le caratteristiche fondamentali dei componenti del valvetrain sono numerose, e rendono il sistema piuttosto complesso da progettare. È infatti richiesto un know how di alto livello, che poche aziende nel panorama automobilistico possono vantare. Infatti, accade spesso che i costruttori di motori si affidino ai fornitori sia per la produzione che per la progettazione del sistema valvetrain. Le principali caratteristiche del sistema possono essere così riassunte:

- elevata resistenza meccanica di tutti i componenti
- elevata resistenza a fatica
- resistenza a usura in corrispondenza dei punti di contatto tra le parti
- rigidità del sistema sufficiente a garantire la tenuta della valvola
- geometria e cinematica studiate in modo da ottenere il profilo di alzata della valvola desiderato
- resistenza a impatti e alte temperature per la valvola.

1.1. Valvetrain tipo 2

Il valvetrain di tipo 2 è caratterizzato da dimensioni compatte e massa ridotta. La posizione di lavoro del bilanciere può essere schematizzata come una trave sottoposta a flessione a tre punti: la punteria idraulica e lo stelo della valvola agiscono come appoggi, mentre il carico è fornito dalla camma circa a metà della sua lunghezza. Il componente viene realizzato tramite tranciatura, piegatura e imbutitura di una lamiera di acciaio di spessore variabile tra 2,5 mm e 3 mm. Dopo un trattamento di carbonitrurazione i pezzi vengono assemblati con gli altri componenti costituendo l'assieme (b) in figura 2.

Il bilanciere assemblato comprende anche una clip necessaria per l'accoppiamento con la punteria durante il trasporto e l'assemblaggio e un cuscinetto pieno o ad aghini collocato su un asse. L'asse viene vincolato al rocker arm tramite cianfrinatura, operazione necessaria per bloccare la rotazione dell'asse (asse fisso) o in alcuni casi lasciandolo libero di ruotare in modo da distribuirne l'usura su tutta la circonferenza (asse flottante).

I materiali da stampaggio utilizzati per realizzare i bilancieri di tipo 2 ottengono buone proprietà meccaniche grazie all'incrudimento durante lo stampaggio a freddo. Il processo di tranciatura, piegatura e imbutitura avviene con una sequenza di 10-15 stampi, che portano alla geometria finale senza necessità di ulteriori lavorazioni meccaniche o finiture. I materiali subiscono successivamente il trattamento di carbonitrurazione, seguito da tempra e rinvenimento. Questo trattamento fornisce

al componente un'elevata resistenza meccanica e a fatica, nonché un'elevata durezza che conferisce una buona resistenza a usura.

Il bilanciere tipo 2 può essere di diverse tipologie, geometrie e dimensioni. Sono molti i modelli in produzione, che differiscono soprattutto per la tipologia e sequenza delle operazioni di stampaggio, che possono portare a geometrie diverse. Ciò che tutti hanno in comune è tuttavia l'impostazione di base: il cuscinetto è sempre collocato nel mezzo, mentre alle due estremità trovano posto la punteria e lo stelo della valvola. La prima ha una superficie semisferica, che si accoppia con la corrispondente cavità a forma di ogiva del bilanciere mantenendolo in posizione, mentre lo stelo della valvola è in contatto con una parte del bilanciere (il pattino) disegnata con raggi di curvatura dimensionati in modo da ottenere un'impronta di contatto di dimensione controllata.

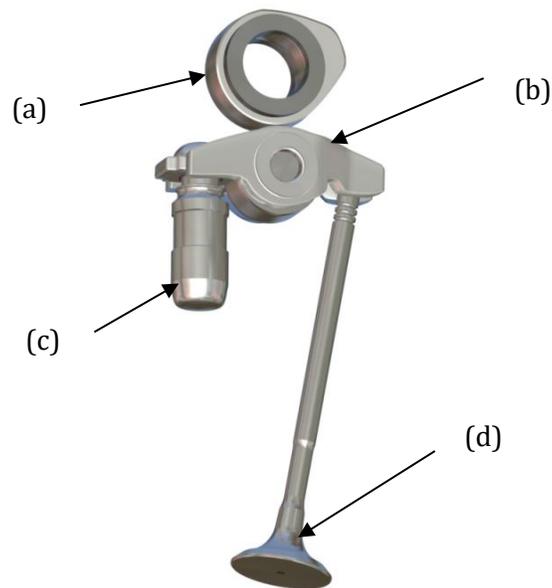


figura 2 - Valvetrain tipo 2, costituito da: (a) albero a camme, (b) bilanciere, (c) punteria idraulica, (d) valvola

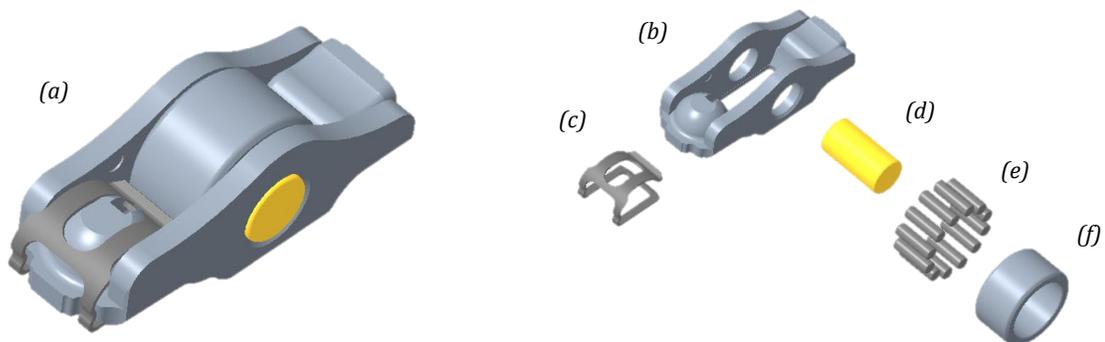


figura 3 - Bilanciere tipo 2 assemblato (a) ed in versione esplosa (a destra) composto da: body (b), clip (c), asse (d), aghini (e), anello del cuscinetto (f)

2. Progettazione di un bilanciere

Obiettivo di Eaton è semplificare il processo di design strutturale dei bilancieri creando una procedura standard da seguire durante la progettazione e verifica degli stessi. Per questo motivo l'obiettivo di questo lavoro è di cominciare a impostare la realizzazione di un tool informatico di supporto al progettista.

Non viene qui fatto riferimento alla progettazione cinematica o dinamica del sistema, che viene già eseguita con l'ausilio di appositi strumenti informatici, ma di quella strutturale. Sono infatti molti i fattori che vanno tenuti in considerazione durante la fase di design e di verifica strutturale, la maggior parte dovuti al processo produttivo, che portano a differenze non trascurabili tra il progetto ideale del CAD e il prodotto finito. Gran parte del lavoro è infatti basato sul know-how del progettista, il quale deve conoscere con grande accuratezza tutti i fenomeni in gioco per poterne tenere adeguatamente conto in fase di progettazione.

Per comprendere l'impostazione che sarà data al tool è necessario richiamare le principali caratteristiche del componente, ponendo l'attenzione su quelle di interesse strutturale.

2.1. Condizioni di lavoro del bilanciante

Da un punto di vista strutturale il bilanciante si può pensare come avente due caratteristiche fondamentali: la resistenza a fatica e la rigidità.

Si tratta infatti di un componente sollecitato a flessione, che subisce un ciclo di carico ad ogni apertura della valvola. Il modo in cui è vincolato al resto della struttura fornisce inoltre un carico minimo presente quando il bilanciante è in contatto col cerchio base della camma, anche a motore fermo. A motore in funzione, invece, ad ogni passaggio della camma si ha un ciclo di carico che porta fino a un livello di forza massima in funzione della velocità del motore, poiché a velocità più alte aumentano i carichi dovuti alla dinamica del sistema. Per questo motivo il bilanciante si può pensare come soggetto a cicli di fatica con tensione minima costante e massima variabile con la velocità (figura 4, figura 5)

Essendo quelle sopra descritte le modalità in cui il componente si trova a lavorare, risulta giustificata l'idea di testare il componente a fatica mantenendo un livello di carico minimo costante e facendo variare il carico massimo. Questa configurazione sarà utilizzata anche per i test sui materiali descritti nei capitoli seguenti.

La seconda caratteristica strutturale importante del rocker arm è la rigidità a flessione. Un'eccessiva deformazione del componente determina infatti un non corretto posizionamento della

valvola, condizione che deve essere evitata. Si tratta inoltre di un parametro importante per la dinamica del sistema, che è necessario conoscere per effettuare degli studi dinamici corretti. Per questo motivo si mantiene sotto controllo sia in fase di progetto che di testing la rigidità del componente, avendo cura di mantenerla sufficientemente alta.

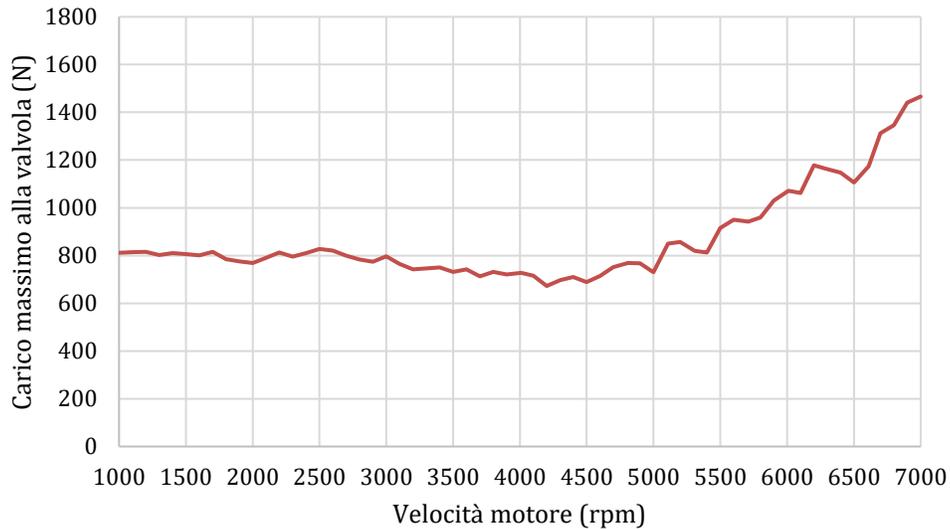


figura 4 – Carico massimo alla valvola su un bilanciere in funzione della velocità del motore. Risultato di un test firing su motore.

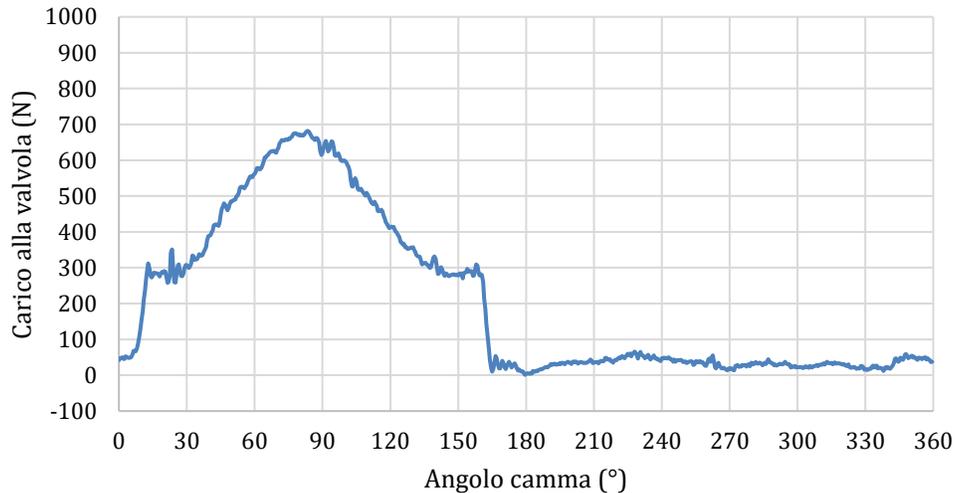


figura 5 - Ciclo di carico alla valvola di un bilanciere a velocità di 1500 rpm, con carico minimo circa costante dato dal precarico della molla di tenuta della valvola e un picco in corrispondenza del passaggio della camma. I picchi di carico possono variare in altezza e forma secondo la dinamica del sistema, la velocità di rotazione e il profilo camma.

2.2. Processo di progettazione del bilanciere

La progettazione di un nuovo bilanciere ha inizio dalle caratteristiche cinematiche del sistema valvetrain. I punti di contatto del bilanciere con gli altri elementi (punteria, camma e pattino valvola) sono infatti vincolati dal layout del motore e dal profilo di alzata della valvola che si desidera ottenere. Tali informazioni vengono solitamente fornite dal costruttore del motore.

Il passo successivo consiste nell'effettuare simulazioni cinematiche e dinamiche che analizzano il sistema del treno valvola, tenendo in conto la geometria del sistema, gli accoppiamenti e le masse in movimento. Molti costruttori utilizzano il software GT Power per creare modelli dinamici dell'intero treno valvola. Questi modelli possono essere anche molto complessi, e vengono largamente utilizzati per l'ottimizzazione del sistema e dei componenti. Tra i vari output si possono ottenere i carichi di lavoro del bilanciere alle diverse velocità e in diverse condizioni di lavoro. Questi carichi vengono utilizzati nella simulazione strutturale del bilanciere.

Dopo aver definito il materiale e le sue proprietà, si può procedere con una modellazione CAD iniziale del body del componente, tenendo conto degli ingombri e delle geometrie consentite dalle tecnologie produttive. In questa fase vengono anche scelti o disegnati gli altri elementi che compongono l'assieme: cuscinetto o rullo, asse e clip. La geometria così definita potrà essere testata tramite simulazione strutturale agli elementi finiti per verificarne la resistenza e la rigidità.

Durante l'intero processo di progettazione si ha quindi una serie di simulazioni statiche e dinamiche con varie geometrie e configurazioni, grazie alle quali si converge verso la geometria definitiva.

2.2.1. Simulazione strutturale agli elementi finiti

Le tensioni a cui lavora il materiale sono ottenute tramite simulazioni agli elementi finiti (FEM) dell'assemblato. I carichi in opera, risultato delle simulazioni dinamiche, vengono utilizzati nel modello FEM per ottenere le tensioni sul componente, trovando così gli estremi del ciclo di carico in opera previsto del bilanciere. Il modello FEM riproduce le condizioni in cui il componente viene testato nei laboratori, che corrispondono a loro volta alle condizioni di lavoro. In particolare, si procede come segue:

1. si importa sul programma di simulazione il CAD del bilanciere assemblato e si assegnano i contatti tra i vari componenti (body, asse, anello cuscinetto, aghini)
2. si aggiungono gli elementi con cui l'assieme entra in contatto: un supporto emisferico che simula la forma della punteria, un secondo supporto cilindrico che simula lo stelo della valvola, e un parallelepipedo al di sopra del cuscinetto, che simula il contatto con la camma
3. vengono imposti vincoli fissi sui supporti inferiori
4. viene imposta sulla superficie del parallelepipedo superiore una pressione corrispondente al carico dato dalla camma.

Da questo tipo di simulazione si possono ricavare le tensioni nel componente e la rigidezza dello stesso. Viene utilizzato il software ANSYS per tutti gli step della simulazione, dal preprocessing al postprocessing. Per assicurarsi della correttezza dei risultati vengono adottati alcuni accorgimenti:

- posizionamento del bilanciere 'ad H=0', ossia con punto di contatto col tip valvola alla stessa altezza del centro della semisfera della punteria
- utilizzo di una mesh di esaedri sufficientemente fitta (metodo *Hex dominant*)
- utilizzo di contatti di tipo *bonded* o *frictional* a seconda dei casi
- utilizzo di corpi rigidi per i componenti esterni dell'assieme (tip valvola, punteria e camma) per non avere influenza sul calcolo della rigidezza
- semplificazione del modello utilizzando un apposito vincolo di simmetria, in modo da ridurre il tempo di calcolo

Come output della simulazione vengono utilizzati soprattutto la tensione equivalente di Von Mises massima, utilizzata per il calcolo del coefficiente di sicurezza del componente, e lo spostamento verticale del parallelepipedo superiore, utilizzato per il calcolo della rigidezza del componente come:

$$\text{Rigidezza} = \frac{\text{Carico applicato}}{\text{Spostamento}}$$

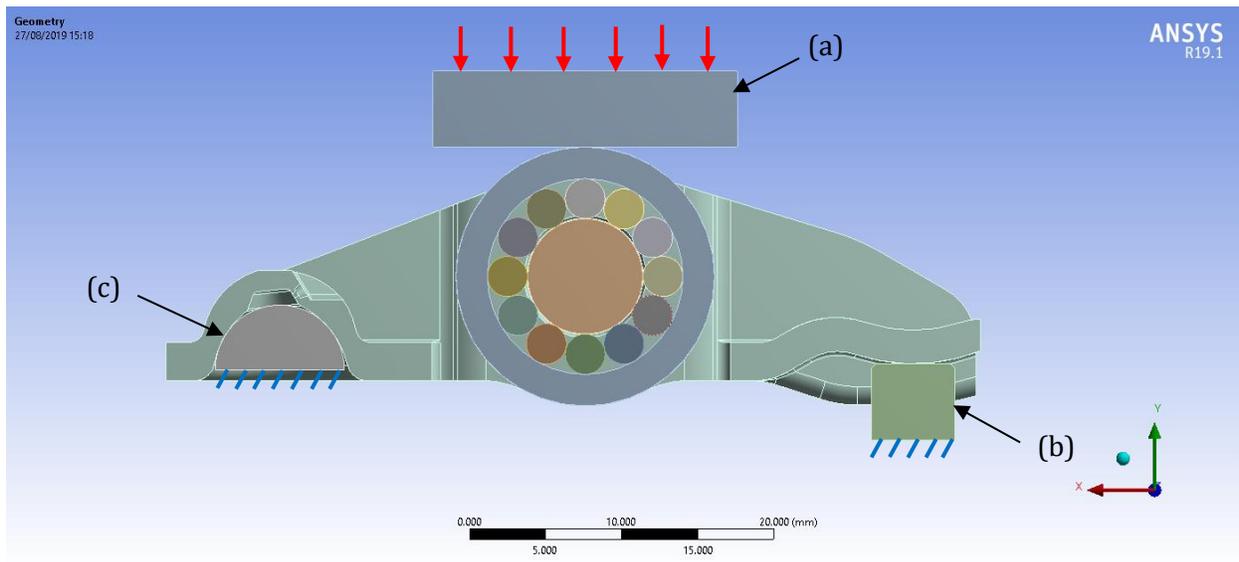


figura 6 - Impostazione di una simulazione strutturale di un bilanciere su ANSYS Workbench. All'assieme sono stati aggiunti i seguenti elementi per simulare i contatti con gli altri componenti: camma (a), tip valvola (b), punteria (c). Il carico viene applicato sul parallelepipedo superiore (in rosso), mentre i vincoli di incastro sono applicati sui due supporti inferiori (in blu).

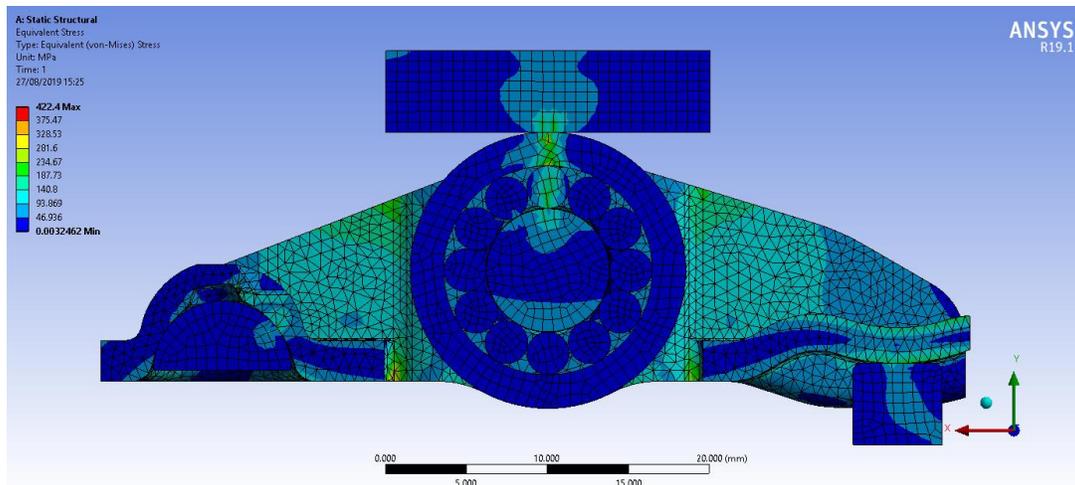


figura 7 - Risultati di una simulazione strutturale di un bilanciere su ANSYS Workbench (tensione equivalente di Von Mises)

2.2.2. Calcolo del coefficiente di sicurezza sul bilanciere

Per determinare il coefficiente di sicurezza a fatica è necessario costruire il diagramma di Haigh del componente nel punto più sollecitato. [1] A questo scopo sono necessari i dati sulla resistenza del materiale e le tensioni a cui è sottoposto il componente in opera. Le prime, corrispondenti a resistenza massima, limite elastico e resistenza a fatica del materiale sono note da prove effettuate sul materiale nelle stesse condizioni di trattamento termico in cui si trovano i componenti. Questi dati consentono di tracciare il diagramma di Haigh relativo al materiale, utilizzando il quale si può calcolare il coefficiente di sicurezza del componente. Nei capitoli che seguono è descritta un'attività sperimentale di aggiornamento dei dati sulla resistenza a fatica del materiale. Il limite di fatica del materiale è determinato tramite prove di fatica assiale, con prove sospese a 10 milioni di cicli. Le tensioni di lavoro del bilanciere sono invece ricavate tramite le simulazioni statiche descritte al paragrafo 2.2.1.

È quindi possibile tracciare il diagramma di Haigh del materiale e collocarvi il punto di funzionamento del componente. A questo punto si può determinare il coefficiente di sicurezza, valore che aumenta al crescere della distanza tra il punto di lavoro e la retta di Goodman, come indicato in figura 8. La formula utilizzata è la seguente:

$$S_F = \frac{1}{\frac{\sigma_A}{\sigma_e} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{UTS}}}$$

Dove:

- S_F indica il coefficiente di sicurezza del componente
- σ_A è la tensione alterna a cui è sottoposto il punto più sollecitato del bilanciere
- σ_M è la tensione media a cui è sottoposto il punto più sollecitato del bilanciere

- σ_e è il limite di fatica del materiale in condizioni di rapporto di carico R pari a -1
- σ_{UTS} è la resistenza massima a trazione del materiale
- R_{p02} è il limite elastico del materiale.

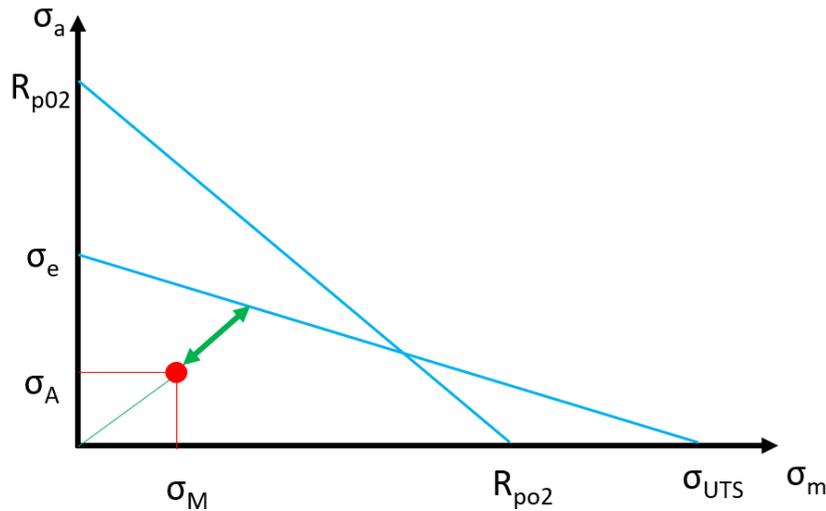


figura 8 - Diagramma di Haigh di un bilanciario. la distanza (in verde) del punto di funzionamento (in rosso) rispetto alla retta di Goodman rappresenta il coefficiente di sicurezza sul bilanciario in opera

Terminato il dimensionamento del componente si passa ad una fase di prove funzionali e di resistenza del componente, a partire da quando questo è ancora in fase prototipale. Proseguendo verso il lancio in produzione si possono effettuare diverse modifiche, fino a giungere al disegno definitivo. I test seguono l'intero processo di sviluppo prodotto e procedono anche dopo il lancio in produzione.

2.2.3. Prove su prototipi e componenti

Prima della validazione del progetto vengono effettuati test su prototipi, e successivamente sui primi pezzi in produzione. Durante questi test il componente viene caricato in modalità simili a quelle che avrà in opera. Vengono in questo modo determinati:

- resistenza del componente a carico statico
- rigidità a flessione
- limite di fatica del componente.

La prova viene effettuata posizionando l'assieme su un supporto che riproduce la condizione di lavoro del componente. In particolare, vengono riprodotti i punti di contatto della punteria e dello

stelo valvola, collocati ad un'altezza tale da mantenere il bilanciere appoggiato in posizione orizzontale (posizione 'ad H=0', la stessa utilizzata nelle simulazioni FEM). E' infatti in questa posizione che il bilanciere risulta essere più sollecitato. Il supporto viene inserito in una macchina idraulica che agisce in compressione sul cuscinetto, caricando il campione. Il bilanciere lavora quindi in modo analogo ad una trave sottoposta a flessione a tre punti. In questa configurazione e sullo stesso tipo di macchina vengono effettuate prove statiche e a fatica. Si presta particolare attenzione non solo ai carichi di rottura (statica o a fatica), ma anche alla posizione ed alla tipologia di rottura a cui si è andati incontro durante la prova. La failure analysis può infatti dare molte informazioni sulle criticità del componente.

Vengono normalmente effettuate numerose analisi ulteriori, volte ad accertare la qualità del componente durante le fasi di prototipazione e lancio in produzione. Le analisi effettuate possono essere:

- metallurgiche (correttezza del trattamento termico, struttura cristallina, composizione chimica del materiale, difetti della microstruttura)
- dimensionali (controllo delle tolleranze)
- visive e funzionali dell'assemblato
- test su motore, in cui vengono valutati il comportamento dinamico, l'usura e la resistenza dei componenti

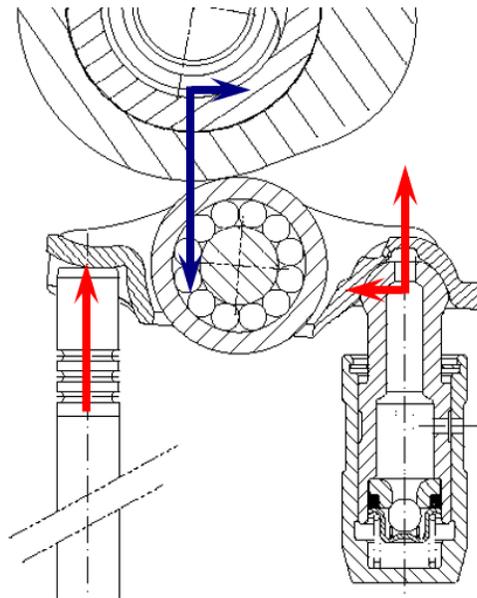


figura 9 - Posizionamento del bilanciere con carichi agenti in opera (in blu) e reazioni vincolari (in rosso).

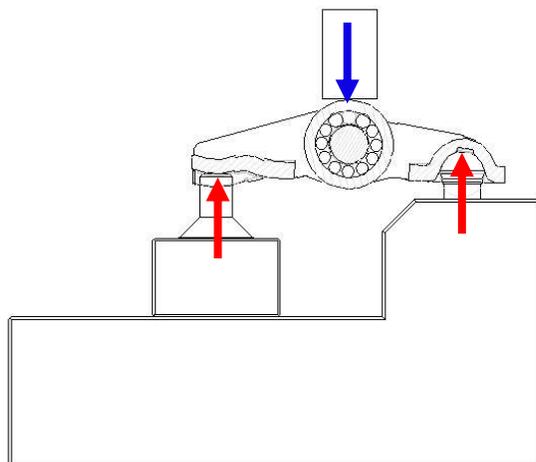


figura 10 - Posizionamento del bilanciere sulla bassetta nella macchina di prova, con indicazione del carico applicato (in blu) e della reazione della bassetta (in rosso)

2.3. Rocker arm design tool

Il tool di supporto al progettista che si desidera realizzare terrà conto di quanto descritto finora relativamente alle caratteristiche strutturali e alle procedure di calcolo e testing. Riassumendo, i parametri che si vuole tenere sotto controllo sono la rigidità del componente e la sua resistenza statica e a fatica.

Il tool verrà quindi strutturato in modo da fornire:

- il calcolo del coefficiente di sicurezza statico, in cui si terrà conto del materiale e delle sue condizioni di trattamento termico
- il calcolo del coefficiente di sicurezza a fatica, in cui si terrà conto del materiale e delle sue condizioni di trattamento termico
- una valutazione della rigidità reale del componente, che non sempre corrisponde esattamente a quella stimata tramite simulazione FEM per via di diversi fattori che non si possono tenere in conto, tra cui le condizioni di montaggio, i giochi, trattamenti e finiture superficiali, variazioni nelle proprietà del materiale dovute al trattamento di carbonitrurazione.

Per realizzare questo tool è quindi necessario pianificare una vasta campagna sperimentale destinata a raccogliere in modo sistematico le informazioni necessarie. Parte delle prove effettuate è descritta nei capitoli seguenti. Oggetto delle analisi riportate in questo lavoro sono il limite di fatica del materiale e la rigidità dei componenti.

Solo una parte delle prove effettuate è contenuta in questo lavoro, perché il totale delle prove programmate richiederà molto tempo per essere ultimato, soprattutto per via del tempo richiesto dalle prove di fatica. Saranno esposte nei capitoli seguenti la prima parte di prove di fatica sull'acciaio da stampaggio e le prove di rigidità sui componenti.

3. Caratterizzazione a fatica dell'acciaio 16MnCr5 carbonitrurato

Per la produzione di bilancieri tipo 2 vengono usati acciai da stampaggio carbonitrurati. I dati sulle caratteristiche dei materiali sono stati ottenuti tramite norme specifiche esistenti o attività interne di caratterizzazione. Ciò che è noto dall'azienda, ma che non è mai stato indagato approfonditamente, è che il materiale ha un comportamento diverso al variare di alcuni fattori [1]:

- Il tipo e la profondità del trattamento termico superficiale
- Le tensioni residue che nascono con la deformazione del materiale durante lo stampaggio
- La finitura superficiale
- Lo spessore iniziale della lamiera

Ciascuno di questi fattori influenza la resistenza statica e a fatica del materiale, ma non è ancora del tutto chiarito quali fattori siano i più influenti. Per avere quindi informazioni più dettagliate è stata programmata un'ampia campagna sperimentale di cui vengono raccolti qui alcuni risultati. In particolare, viene qui descritta l'attività di caratterizzazione dell'acciaio da stampaggio carbonitrurato 16MnCr5. I risultati numerici dei test effettuati sono stati volutamente nascosti per volere dell'azienda per motivi di riservatezza.

3.1. Design of experiment

Il 16MnCr5 è un acciaio da stampaggio caratterizzato da una buona facilità di lavorazione unita ad un'elevata resistenza meccanica ottenuta grazie al trattamento di carbonitrurazione. Si tratta di un acciaio da stampaggio largamente utilizzato da Eaton per la costruzione di bilancieri, motivo per cui è stata programmata un'indagine approfondita sulle sue proprietà meccaniche.

Scopo di questa attività sperimentale è comprendere la variazione delle proprietà del materiale secondo i diversi fattori che possono influenzarle. Per questo tipo di ricerca risulta utile sfruttare la tecnica del Design of Experiment (DOE), che permette di identificare i fattori influenti e quantificarne gli effetti sulle proprietà del materiale. [2]

Le proprietà del materiale di cui si vuole conoscere la variabilità sono:

- La resistenza a fatica (in particolare il limite di fatica)
- La resistenza massima a trazione
- Il limite elastico (R_{p02})
- Il modulo di Young (E)

I fattori che si ritiene possano influire su tali proprietà sono invece riassunti in tabella 1:

Fattore	Valore minimo	Valore massimo
Spessore lamiera	2,5 mm	3 mm
Profondità di carbonitrurazione (case depth)	basso	alto
Rugosità superficiale		costante
Incrudimento		costante
Tolleranze di lavorazione del campione		non controllabile
Temperatura di prova		costante
Errore della macchina di prova		non controllabile
Frequenza di applicazione del carico		costante

tabella 1 – Fattori di influenza sulle proprietà del materiale

I fattori di influenza che si è scelto di tenere in considerazione sono lo spessore del laminato da stampare e la profondità di penetrazione del trattamento termico. Gli altri fattori presenti in tabella 1 sono stati tutti mantenuti costanti per via della difficoltà nel tenerli in considerazione. Si è scelto di mantenere la finitura del materiale grezza perché più simile al prodotto finale, su cui non vengono effettuate operazioni di finitura. Non è invece stato possibile valutare se abbia una qualche influenza l'incrudimento a freddo che si ottiene durante la lavorazione, per via della difficoltà di realizzazione di un campione di materiale incrudito e di valutazione del livello di incrudimento del materiale nel prodotto finito. Va tuttavia sottolineato il fatto che una parte di materiale incrudito è sicuramente presente sulla superficie del pezzo, ed è dovuta alla laminazione ed alla tranciatura del campione.

I due fattori che sono stati contrassegnati come 'non controllabile' sono invece fattori che si presume possano influire sui risultati delle varie prove, ma che non si possono tenere sotto controllo.

È quindi stato impostato un *design of experiment* (DOE) che tenga conto della variazione dello spessore della lamiera da cui il provino è ottenuto per tranciatura e della profondità dello strato di materiale interessato dal trattamento di carbonitrurazione. Viene così a configurarsi un DOE a quattro punti, ottenuti facendo variare le grandezze di interesse. [2]

	Profondità carbonitrurazione	Spessore lamiera
Caso 1	Bassa	Basso
Caso 2	Bassa	Alto
Caso 3	Alta	Basso
Caso 4	Alta	Alto
Caso 5	Media	Medio

tabella 2 - Design of experiment per lo studio delle proprietà meccaniche del 16MnCr5

Per valutare l'influenza dello spessore della lamiera utilizzata si è scelto di utilizzare tre tipologie di provino del tutto uguali ad eccezione dello spessore. Sono stati adottati due valori di spessore corrispondenti a quello della lamiera utilizzata per realizzare i prodotti, pari a 2,5 mm e 3 mm. Lo spessore medio di 2,75 mm è poco utilizzato nella gamma di prodotti; tuttavia si è scelto di considerare anche questo spessore per ottenere un center point del design of experiment, utile per ottenere una funzione interpolante di secondo ordine e valutarne la curvatura, presente nei fenomeni che vengono meglio rappresentati da un modello quadratico piuttosto che lineare. [2]

Lo spessore dello strato superficiale di materiale trattato viene invece definito dalla norma ISO 18203:2016 [3] come la profondità a cui la durezza Vickers scende al di sotto di 550 HV. La misura viene effettuata mediante una serie di misure di microdurezza Vickers su una sezione del materiale effettuate a profondità crescente, ottenendo un profilo di durezza decrescente con la profondità. La durezza è maggiore vicino alla superficie, ossia nelle aree in cui il carbonio e l'azoto hanno una concentrazione maggiore ottenuta con la carbonitrurazione, e si riduce in profondità, dove carbonio e azoto hanno raggiunto minore concentrazione. L'aumento di durezza è ottenuto tramite tempra. La composizione del materiale, poco temprabile perché con bassa concentrazione di carbonio, fa sì che il materiale a durezza maggiore si limiti alla parte superficiale del componente interessata dalla carbonitrurazione, lasciando a cuore, nelle aree in cui carbonio e azoto non hanno avuto possibilità di penetrare, del materiale più tenero. [4]

La carbonitrurazione fornisce un notevole aumento della resistenza a fatica e a trazione rispetto al materiale grezzo, oltre che in aumento di durezza che migliora la resistenza a usura. Per contro, il materiale perde le sue caratteristiche di duttilità e lavorabilità che lo caratterizzano allo stato non trattato.

Dato che il trattamento di carbonitrurazione presenta una notevole incertezza sul valore di profondità ottenuta rispetto a quella prescritta, si ha normalmente un intervallo piuttosto ampio in cui il trattamento è considerato accettabile. Può quindi essere interessante valutare se ci siano effetti sulla resistenza a fatica del materiale al variare della profondità di trattamento. [5]

3.2. Caratteristiche del materiale

Il materiale oggetto di studio è denominato 16MnCr5 oppure 1.7131 secondo la norma EN 10263 [6]. La materia prima è in forma di coil di lamiera di vario spessore. Il materiale viene fornito allo stato ricotto e sferoidizzato come previsto dalla norma. [6] Per queste applicazioni vengono utilizzati spessori pari a 2,5 mm, 2,75 mm e 3 mm. La correttezza della composizione chimica del materiale utilizzato è stata verificata mediante analisi chimica su un campione prima della carbonitrurazione.

Elemento	Secondo EN 10263 %	Misurato su campione 2,5 mm %	Misurato su campione 3 mm %
C	0.14 ÷ 0.19	0.19	0.18
Mn	1.00 ÷ 1.30	1.03	1.02
P	0.035 max	0.006	0.015
S	0.035 max	0.026	0.026
Si	0.25 max	0.02	0.01
Cr	0.80 ÷ 1.10	0.83	0.83
Al	0.015 ÷ 0.050	0.030	0.029
Cu	0.25 max	0.01	0.02
Ni	0.10 max	0.07	0.03

tabella 3- Analisi della composizione chimica del materiale grezzo

3.2.1. Geometria e produzione dei provini

Trattandosi di uno studio focalizzato su un materiale destinato ad una precisa applicazione e lavorato sempre secondo le stesse tecnologie, si è scelto di utilizzare dei provini che potessero riprodurre il più fedelmente possibile le condizioni in cui si trova il materiale sul prodotto finito. I provini hanno quindi subito un processo di lavorazione simile a quello dei body dei bilancieri, che consiste nella sequenza di tranciatura, piegatura, carbonitrurazione. Le prove sono state effettuate sul provino in figura 11.

I provini, destinati alle prove di trazione e di fatica assiale, sono stati ottenuti da una lamiera dello spessore desiderato tramite tranciatura. Il materiale è stato orientato nello stampo in modo che le fibre risultino allineate alla direzione di trazione del provino, condizione in cui si trovano a lavorare i componenti. Non sono state previste altre lavorazioni meccaniche né sulle facce piane né sul bordo, in modo da rispecchiare il processo produttivo del bilanciere. L'unica ulteriore operazione che è stata

effettuata è una barilatura per rimuovere la bava di tranciatura senza alterare la finitura grezza delle superfici.

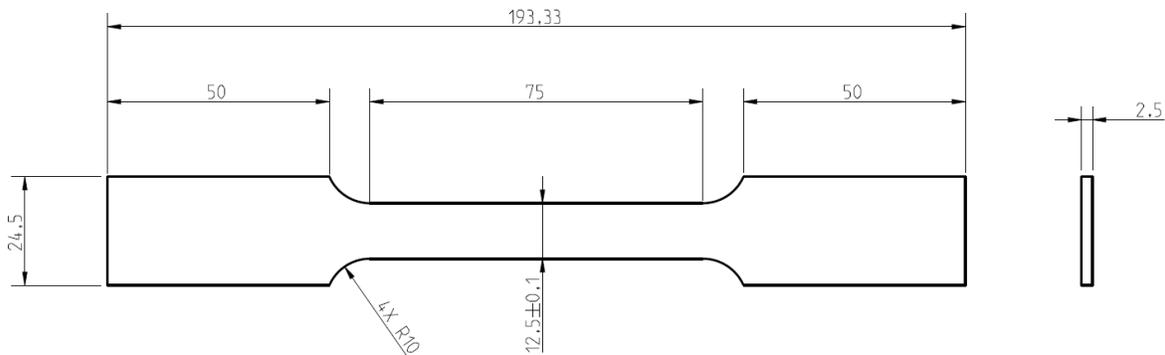


figura 11 - Provino in lamiera tranciata per prove di trazione e di fatica assiale nella versione a spessore 2,5 mm

Successivamente i materiali sono stati sottoposti al trattamento di carbonitrurazione. Per eseguirlo ci si è affidati a un fornitore esterno che ha operato secondo la sequenza:

1. carbonitrurazione
2. tempra
3. rinvenimento
4. barilatura

Non si hanno a disposizione dati sulla temperatura di trattamento o sulla composizione delle atmosfere di carbonitrurazione, perché mantenute riservate dal fornitore. Il tipo di trattamento viene richiesto al fornitore fornendo le specifiche di profondità di trattamento e durezza superficiale desiderate.

All'arrivo del materiale trattato sono stati eseguiti controlli relativi alla profondità dello strato trattato, alla durezza e alla microstruttura. Le specifiche sono state sempre rispettate per quanto riguarda la durezza, mentre la profondità di trattamento nei casi a profondità elevata è risultata leggermente inferiore a quanto prescritto. Nei calcoli relativi al DOE sono quindi stati utilizzati i valori effettivamente misurati sui campioni.

Inoltre, è stata riscontrata una notevole distorsione dei provini. Tale distorsione, dovuta alle variazioni di volume del materiale e al tensionamento interno del materiale dopo la tempra [7], varia in tipologia ed entità tra i vari pezzi. Il fenomeno è particolarmente accentuato dalla forma allungata del provino abbinata ad uno spessore sottile. È quindi facile immaginare come il provino, durante l'afferraggio da parte della macchina di trazione, subisca una leggera deformazione di flessione. Lo stato di tensione interno al provino sarà quindi diverso da quello di sola trazione per cui il provino è stato disegnato. La presenza di una deformazione era attesa perché tipica del processo di tempra, tuttavia non sono stati adottati accorgimenti particolari per prevenirlo perché ogni possibile soluzione avrebbe rischiato di influire sul trattamento del materiale e falsare i risultati. Durante la carbonitrurazione i provini sono stati posizionati in modo tale da ridurre la deformazione, ma questo ha avuto un'efficacia piuttosto limitata. È stato quindi necessario valutare l'entità delle tensioni

dovute all'afferraggio della macchina per comprenderne l'influenza e correggere i risultati delle prove in un secondo momento.

La correttezza del trattamento è stata verificata come indicato dalla norma ISO 18203:2016 [3], cioè con una serie di prove di durezza Vickers su una sezione del materiale a livelli di profondità crescenti. I profili di durezza così ottenuti sono riportati nei grafici sottostanti (figura 13, figura 18), in cui emerge la differenza tra i livelli di profondità di trattamento che sono stati ottenuti. Il valore di *case depth*, che rappresenta la specifica di trattamento, è definito come la profondità (in mm) a cui il materiale raggiunge la durezza di 550HV. Le misure riportate in figura 13 e figura 18 sono state ottenute come media di quattro misurazioni effettuate su una sezione del provino in quattro aree diverse come indicato in figura 12a.

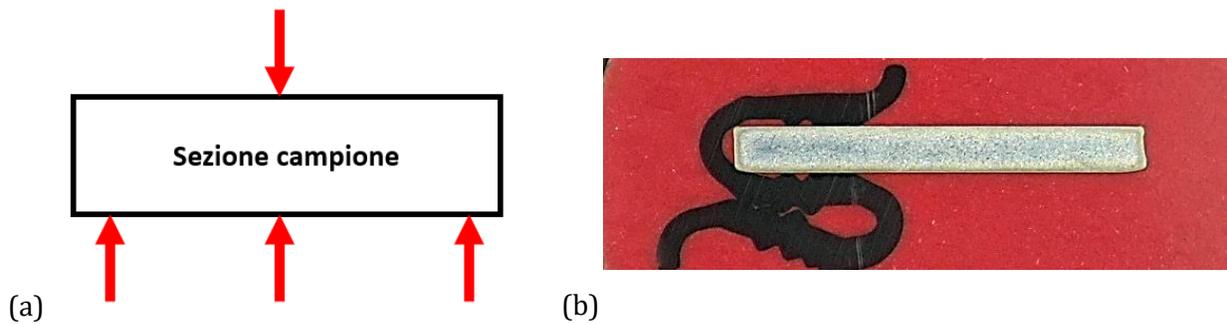


figura 12 – (a) punti della sezione del provino in cui è stata eseguita la misura del *case depth*; (b) provino sezionato e pronto per la misura del *case depth*.

Si nota dai profili di durezza in figura 13 che i campioni trattati con *case depth* 'basso' e 'medio' sono corrispondenti alla specifica, mentre per il livello 'alto' il valore è leggermente inferiore alla specifica. Si nota inoltre una certa differenza tra i profili ottenuti sui due campioni con profondità elevata che sono stati esaminati. Nel completare l'analisi del DOE, avendo bisogno di un valore preciso, verranno utilizzati i valori di profondità effettivamente misurati sui campioni.

A livello di microstruttura il materiale non ha evidenziato problemi; la struttura del materiale grezzo risulta essere prevalentemente ferritica, con piccole aree perlitiche (figura 14a, figura 15a). Dopo la carbonitrurazione la struttura risulta essere martensitica in prossimità della superficie (figura 15b), ed è rimasta inalterata a cuore.

Non è stata prevista alcuna lavorazione di rettifica dopo il trattamento né sulle superfici laterali, per non perdere la finitura grezza della trancitura, né sulla larghezza per non perdere la finitura ottenuta in laminazione. Tali condizioni sono analoghe al processo produttivo del componente reale.

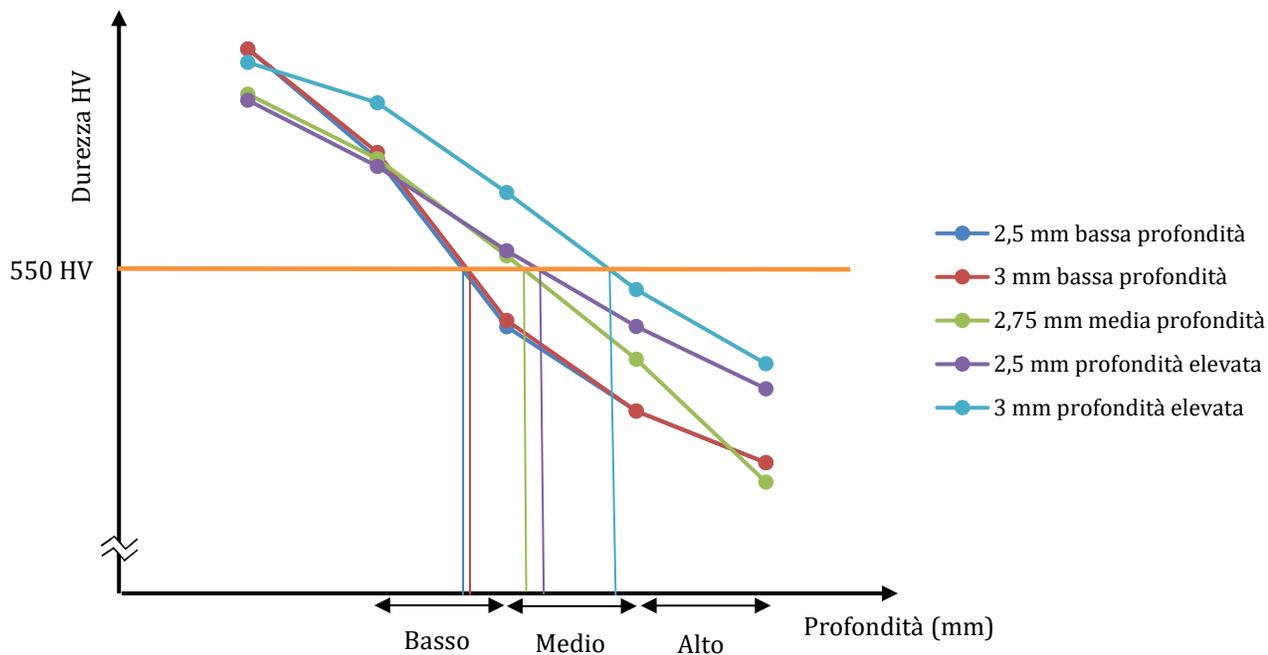


figura 13 - Andamento dei profili di microdurezza lungo la distanza dalla superficie del provino. L'intersezione con la linea orizzontale a 550 HV determina convenzionalmente il valore di profondità del case depth.

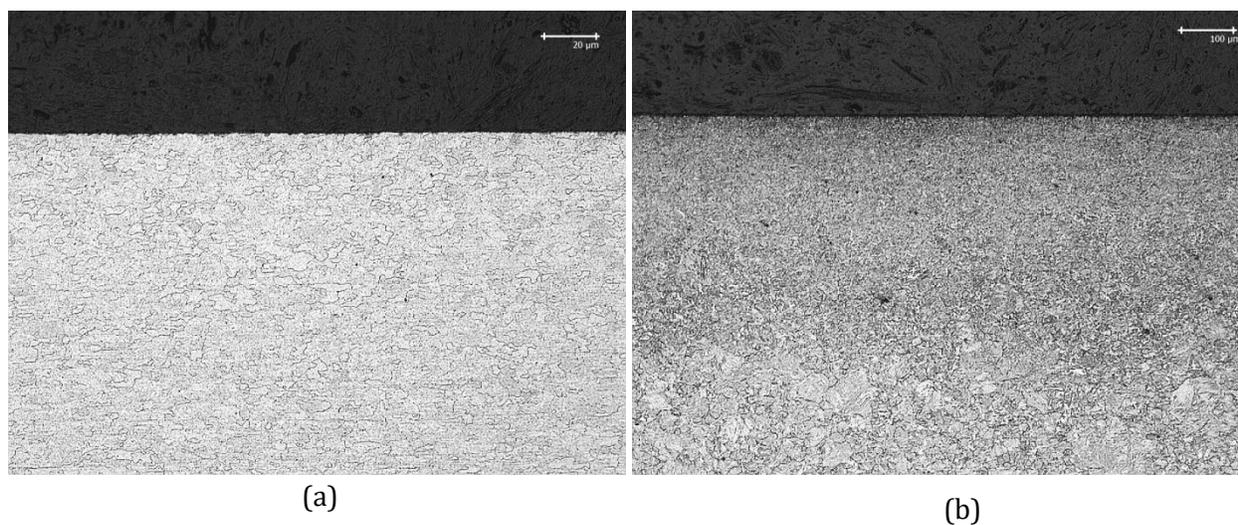


figura 14 - (a) sezione del provino prima della carbonitrurazione (100x); (b) sezione del provino dopo la carbonitrurazione (100x)

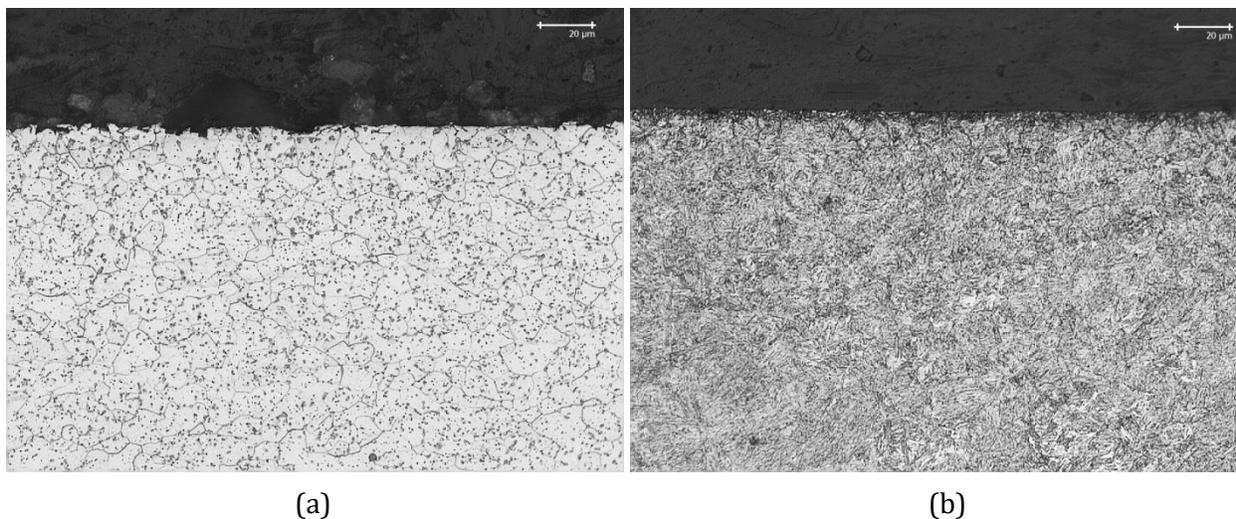


figura 15 – Ingrandimento a 500x delle aree già presentate in figura 14: (a) sezione del provino non trattato, in cui diventa chiaramente visibile la struttura cristallografica prevalentemente ferritica con dispersione di piccole sfere di perlite; (b) sezione del provino carbonitrurato, con struttura martensitica

3.2.2. Valutazione della distorsione dei provini

Per valutare l'entità delle tensioni dovute all'afferraggio della macchina è stata effettuata una simulazione agli elementi finiti della deformazione che è necessario imporre al provino per riportarlo in posizione piana, cioè nella posizione che assume quando afferrato dalla macchina di prova. La simulazione ha richiesto la modellazione CAD di un provino distorto, partendo dal quale è stato costruito il modello FEM. La descrizione dettagliata dell'analisi numerica è riportata nel paragrafo 3.4.1.

Dall'analisi effettuata su alcuni provini è risultato che la tensione dovuta alla deformazione imposta non è trascurabile rispetto a quella assiale di prova. Per questo motivo si è deciso di non trascurare la distorsione dei provini e di cercare un approccio utile per la correzione dei risultati sperimentali.

Come primo tentativo si è pensato di effettuare una distensione in forno dei provini per cercare di ridurre la deformazione. Si è scelto di aumentare l'efficacia del trattamento serrando i provini all'interno di un dispositivo ad hoc costituito da due piastre serrate tra loro tramite viti. I provini, in questo modo, vengono forzatamente mantenuti in posizione piana durante la permanenza in forno.

I provini così preparati sono stati mantenuti per 6 ore ad una temperatura di 180 °C. La temperatura è stata scelta perché tipica di un'operazione di distensione del materiale in oggetto. A questa temperatura si ha infatti una riduzione delle deformazioni evitando la diffusione di carbonio nel materiale e mantenendo inalterato lo strato indurito. [7]

Sono stati effettuati controlli metallurgici sul materiale prima e dopo il trattamento per verificare l'efficacia nella riduzione della deformazione e l'assenza di modifiche rilevanti alla struttura del materiale. Risulta una notevole riduzione della deformazione (in alcuni casi più che dimezzata),

mentre sul materiale è stata riscontrata una lieve riduzione di durezza dopo la distensione. Il profilo di durezza e il case depth non hanno subito variazioni significative (figura 17). Per tenere sotto controllo la deformazione è stata adottata come grandezza caratteristica la freccia del provino misurata appoggiandolo su un piano di riscontro (figura 16). La misura è stata fatta su piano di riscontro con un altimetro con risoluzione di 0,01 mm.

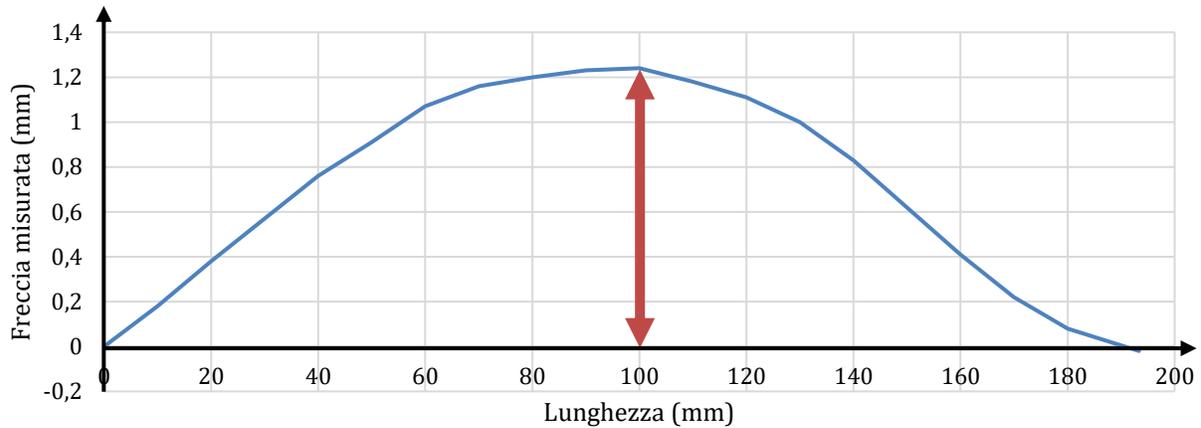


figura 16 – Profilo di un provino distorto. La freccia rossa indica la freccia massima misurata, valore che è utilizzato per caratterizzare la distorsione del provino

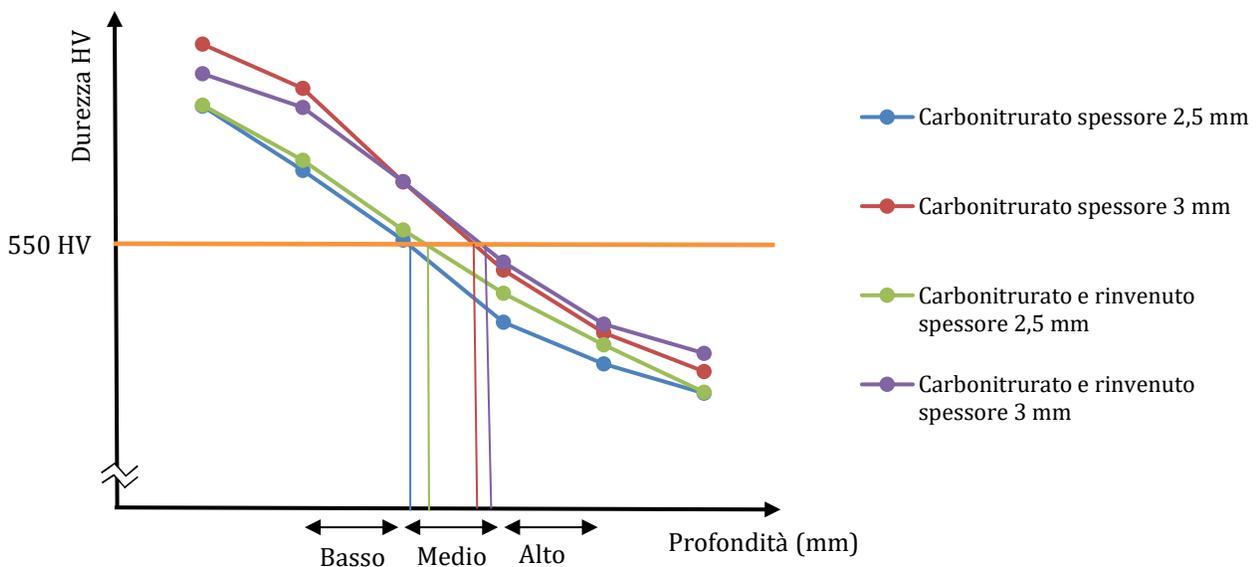


figura 17 – Confronto tra i profili di microdurezza prima e dopo il trattamento termico e tra due diverse profondità di case depth. L'intersezione del profilo con la retta orizzontale tracciata a 550 HV indica convenzionalmente la profondità di trattamento

Freccia (mm) provini spessore 2,5 mm			
Provino	Non trattato	Carbonitrurato	Dopo distensione
# 1	0,23	1,70	0,81
# 2	0,65	0,67	0,27
# 3	0,34	0,66	0,41
# 4	Non misurato	0,35	0,11
# 5	Non misurato	1,58	0,63

Freccia (mm) provini spessore 3 mm			
Provino	Non trattato	Carbonitrurato	Dopo distensione
# 1	0,19	3,55	1,88
# 2	0,15	1,72	0,80
# 3	0,65	1,30	0,66
# 4	Non misurato	0,88	0,42
# 5	Non misurato	0,96	0,52

tabella 4 - Valutazione della distorsione del provino in tre fasi della produzione: prima della carbonitrurazione, dopo la carbonitrurazione e dopo la distensione in forno

Successivamente, ritenendo di non aver ancora ridotto sufficientemente la distorsione della maggior parte dei provini, si è deciso di effettuare una correzione ad hoc dei risultati su ogni provino per tener conto della deformazione durante l'afferraggio della macchina. Il metodo utilizzato è descritto nel paragrafo 3.4. È stato necessario adottare una correzione diversa per ogni provino perché la deformazione non è uniforme né in termini di ampiezza né in termini di forma. Si vedano ad esempio i profili di alcuni provini riportati in figura 18. Tramite il calcolo agli elementi finiti si otterrà quindi un valore di tensione causata dall'afferraggio da parte della macchina di trazione, che potrà essere sommato ai normali carichi assiali della prova di fatica.

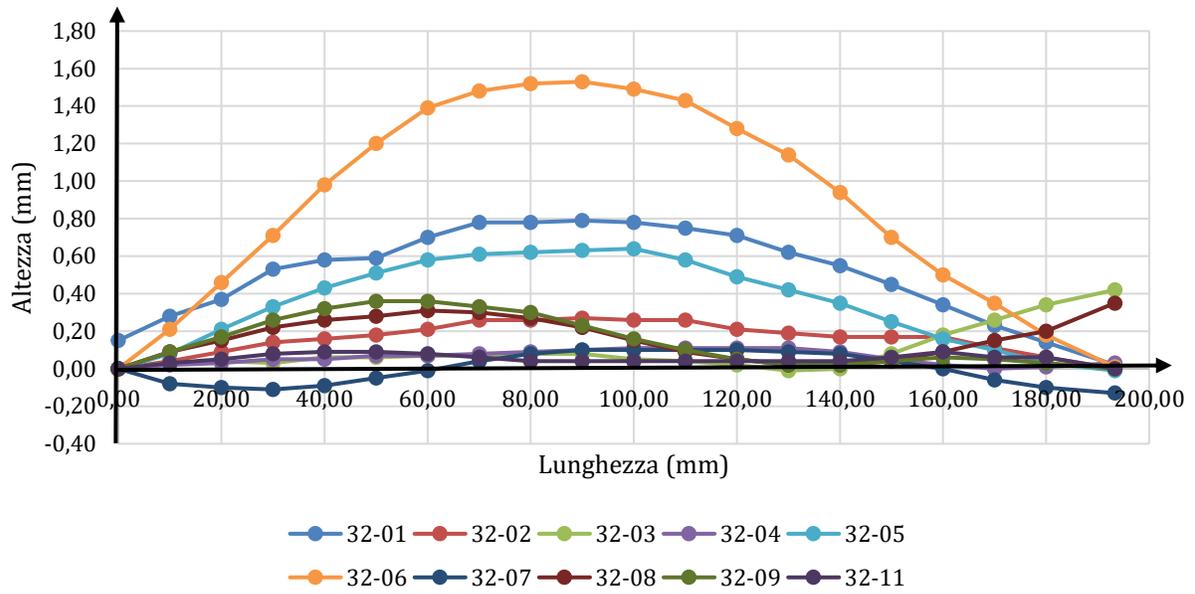


figura 18 - Profilo misurato di alcuni provini; si nota che i profili variano notevolmente sia come andamento che come valori misurati



figura 19 - Misurazione del profilo di un provino con altimetro su un piano di riscontro

3.2.3. Proprietà meccaniche del materiale

Nelle tabelle che seguono sono raccolte le principali proprietà meccaniche del materiale utilizzato allo stato grezzo e carbonitrurato ai due livelli di profondità considerati. Le stesse prove sono state fatte anche sul materiale non trattato per avere un controllo sul materiale in ingresso.

3.2.3.1. Durezza superficiale

Trattamento	Spessore lamiera	Case depth	Durezza superficiale HR15N
Non trattato	2,5 mm	-	47,8
Non trattato	3,0 mm	-	49,8
Carbonitrurazione	2,5 mm	Basso	90,8
Carbonitrurazione	3,0 mm	Basso	91,2
Carbonitrurazione	2,75 mm	Medio	91,3
Carbonitrurazione	2,5 mm	Alto	90,1
Carbonitrurazione	3,0 mm	Alto	90,3
Carbonitrurazione e distensione	2,5 mm	Alto	89,2
Carbonitrurazione e distensione	3,0 mm	Alto	89,5

tabella 5 – Durezza HR15N del materiale

I valori in tabella 5 sono stati ottenuti come media di 3 misurazioni effettuate in punti diversi su un provino scelto casualmente all'interno del lotto. Tutti i valori misurati ricadono all'interno delle specifiche; inoltre non si nota una correlazione tra la profondità di trattamento e la durezza superficiale. La lieve riduzione di durezza dopo la distensione, imputabile ad una lieve decarburazione della superficie durante la permanenza in forno, è considerata accettabile perché sufficientemente bassa da non fuoriuscire dall'intervallo dato dalla specifica.

3.2.3.2. Resistenza a trazione del materiale

Le prove di trazione, effettuate sugli stessi provini utilizzati per quelle di fatica, sono necessarie per il completamento del diagramma di Haigh del materiale. Le prove sono state effettuate con la stessa macchina utilizzata per le prova di fatica, una MTS idraulica da 250 kN.

Le prove sono state eseguite secondo la procedura indicata dalla norma ISO 6892:2016 [8], a temperatura ambiente e in controllo di velocità di deformazione, con tale velocità fissata a 0,00025 s⁻¹.

In questa sezione non vengono riportati i risultati numerici delle prove effettuate, ma si potrà fare un confronto tra le varie tipologie di spessore e trattamento termico effettuato sui campioni.

Nome macchina	MTS 250 kN 810 Material Test System
Nome estensometro	MTS 634.31F-24
Carico massimo	250 kN
Incertezza sul carico misurato	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Incertezza sulla deformazione misurata	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Incertezza sullo spostamento misurato	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Controllo velocità di deformazione	0,00025 s ⁻¹
Lunghezza di riferimento estensometro l_0	50 mm

tabella 6 – Dati della macchina utilizzata per le prove di trazione e principali parametri di prova

Il comportamento del materiale cambia drasticamente dallo stato grezzo a quello carbonitrurato. In particolare, si nota un incremento di durezza e resistenza a fronte di una vistosa riduzione dell'allungamento a rottura. Il materiale grezzo presenta il comportamento tipico di un materiale duttile: un'elevata deformazione plastica, una strizione pronunciata e una frattura con superficie inclinata a 45° oppure col tipico aspetto coppa-cono [9], (figura 22).

Il materiale è molto utilizzato per realizzare componenti stampati per via del basso limite elastico (R_{p02}), che consente di tranciarlo, piegarlo e imbutirlo facilmente a freddo. Al termine delle lavorazioni viene effettuata la carbonitrurazione, che incrementa notevolmente le caratteristiche meccaniche. La differenza di comportamento può essere notata mettendo a confronto le curve di trazione di un provino in materiale grezzo e uno in materiale trattato (figura 20).

Il materiale carbonitrurato va incontro a rottura improvvisa a carichi notevolmente più alti rispetto al materiale grezzo. Le superfici di frattura presentano l'aspetto particolare che verrà descritto in seguito. Si possono infatti notare differenze di comportamento tra i materiali che hanno subito trattamenti termici diversi (figura 26, figura 27), mentre lo spessore della lamiera non sembra essere influente sulla modalità di rottura. Dalle prove effettuate risulta una rottura improvvisa, senza raggiungimento dell' R_{p02} , per i materiali con trattamento a profondità media o elevata. I materiali con case depth basso hanno invece un maggiore allungamento prima della rottura e tensioni di rottura leggermente più alte. Ai fini della resistenza statica risulta quindi vantaggioso l'utilizzo di un materiale con case depth non eccessivamente profondo.

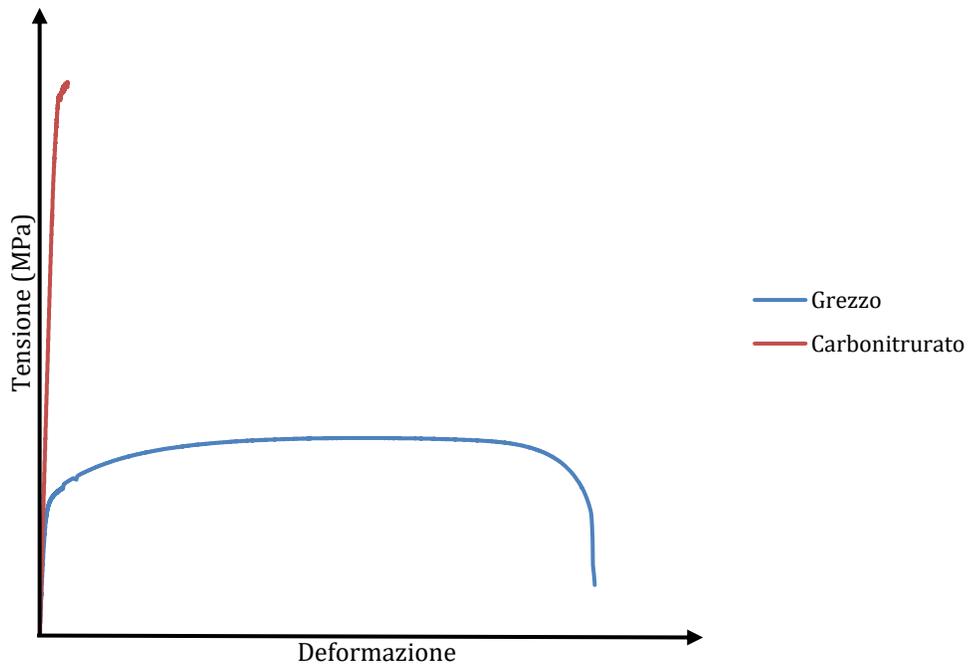


figura 20 - Esempio di curve di trazione ottenute durante le prove, in cui emerge la differenza di comportamento tra il materiale grezzo e quello carbonitrurato

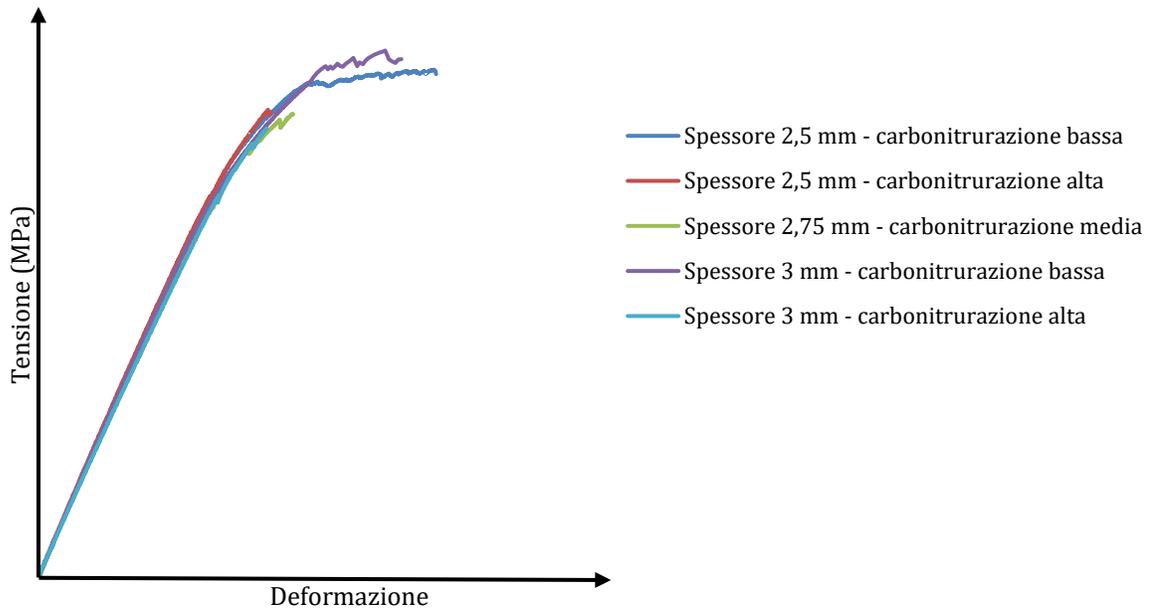


figura 21 - Confronto tra cinque curve di trazione ottenute con le diverse tipologie di provino, con diversi spessori e trattamenti termici.

La rottura non è sempre avvenuta nel tratto calibrato del provino: alcune rotture si trovano in corrispondenza del raccordo, e potrebbero quindi essere influenzate dal fattore d'intaglio causato dal raccordo stesso. Tuttavia, non sembra che i risultati ottenuti siano stati influenzati dalla posizione della rottura, poiché le rotture in corrispondenza del raccordo sono state rilevate a carichi paragonabili a quelle ottenute regolarmente sul tratto calibrato. In alcuni casi sono state rilevate rotture sul raccordo anche a carichi più elevati rispetto alle rotture sul tratto calibrato. Si ritengono quindi accettabili tutti i dati ottenuti, indipendentemente dal punto in cui è avvenuta la frattura. Si nota inoltre come la frattura sia avvenuta in alcuni casi particolari in due parti del provino, con una divisione del provino stesso in tre parti.

Quest'ultimo comportamento non sorprende se si osservano attentamente i provini dopo la trazione: con un adeguato ingrandimento diventano infatti visibili sulla superficie numerose cricche ortogonali all'asse di trazione, che non hanno portato a rottura il pezzo. (figura 27a, figura 28).



figura 22 - Provini in 16MnCr5 con spessore 2,5 mm, non carbonitrurati, dopo la prova di trazione.

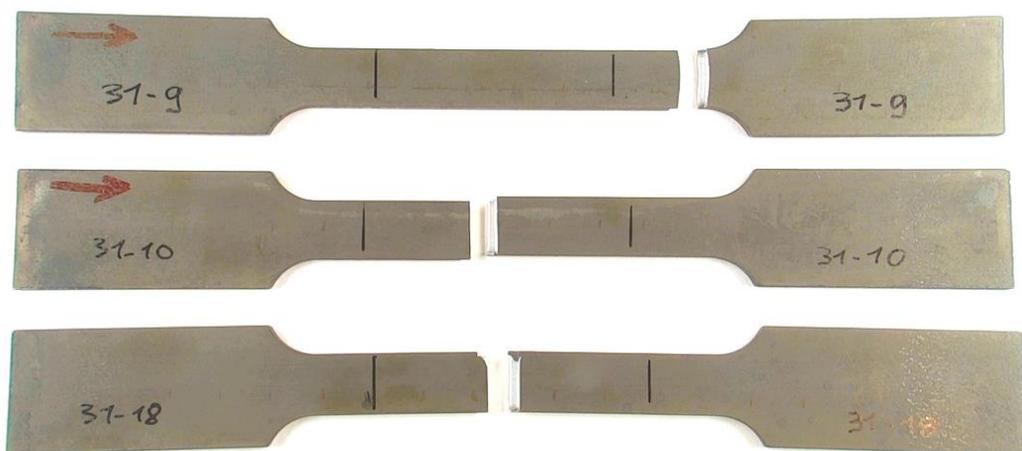


figura 23 - Provini in 16MnCr5 con spessore 2,5 mm, carbonitrurati con profondità bassa, dopo la prova di trazione



figura 24 - Provini in 16MnCr5 con spessore 2,5 mm, carbonitrurati con profondità alta, dopo la prova di trazione

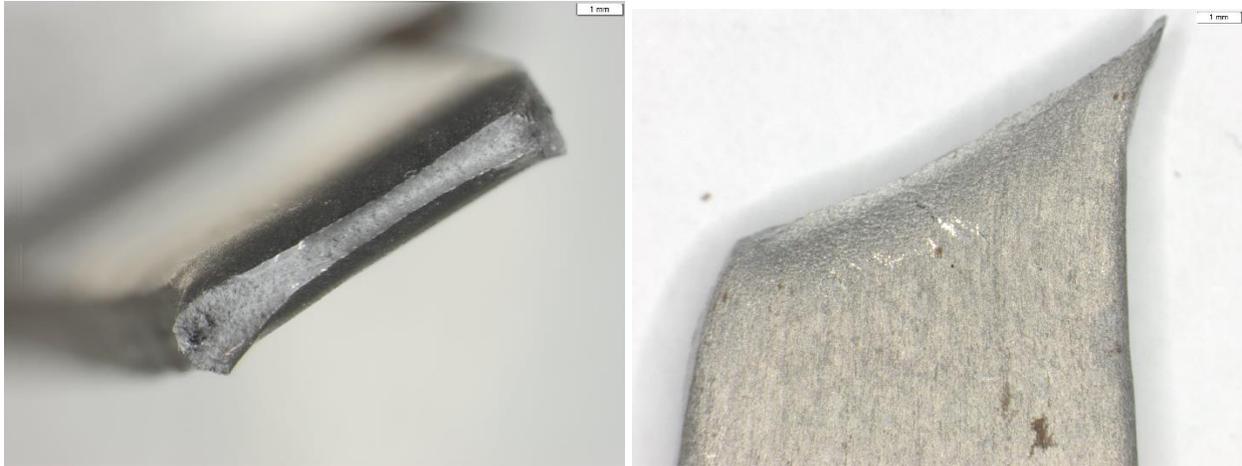
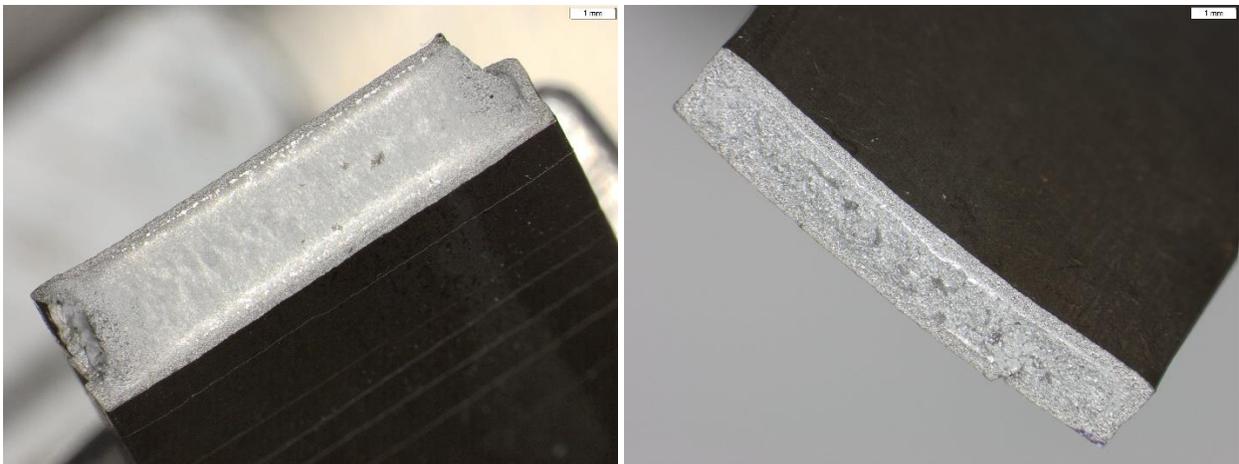


figura 25 – Rottura statica di un provino in 16MnCr5 non trattato (provino numero 37-03), in cui sono evidenti la strizione e l'inclinazione a 45° della superficie di rottura, caratteristiche tipiche di un comportamento duttile [9]



(a)

(b)

figura 26 – Confronto tra rotture durante prova di trazione su provini in 16MnCr5: (a) provino con basso case depth, (b) provino con alto case depth.

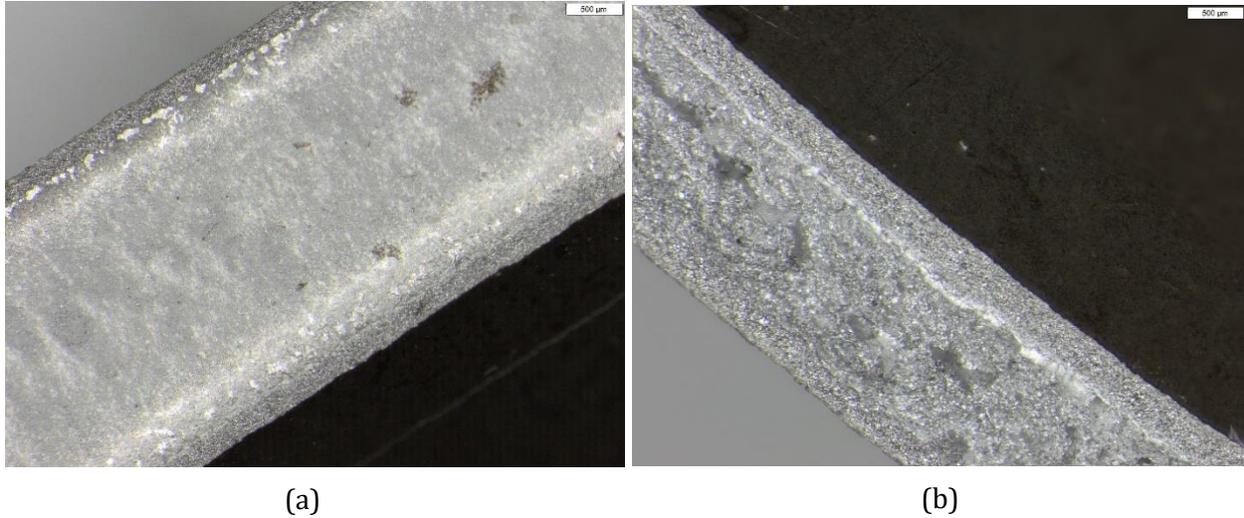


figura 27 – Ingrandimento delle immagini di figura 26: (a) a sinistra, nel provino con basso case depth, è visibile il sottile strato superficiale interessato dalla carbonitrurazione e un'ampia zona centrale inclinata a 45° rispetto all'asse di trazione con aspetto di frattura duttile; (b) a destra, nel caso di case depth elevato, tutta la superficie ha un aspetto frastagliato ed è perpendicolare all'asse di trazione.

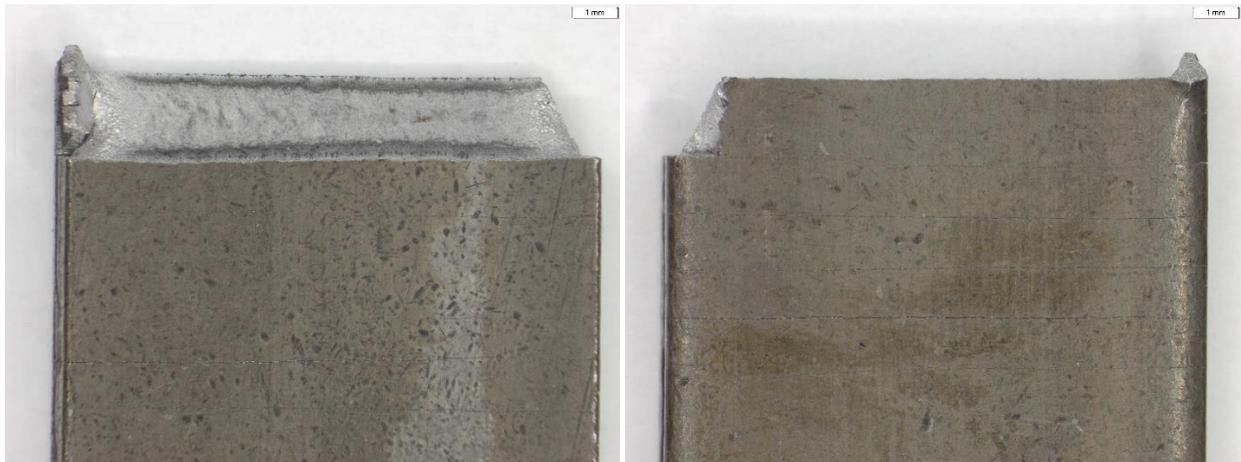


figura 28 – Fronte e retro della frattura del provino 31-10, avente spessore 2,5 mm e case depth basso; si nota come la zona a cuore tenda a rompersi con una superficie di frattura inclinata a 45° circa, mentre la parte superficiale, interessata da carbonitrurazione, abbia una frattura netta e perpendicolare all'asse di trazione. Con un'attenta osservazione delle immagini si possono notare numerose cricche sulla superficie del pezzo, rettilinee e ortogonali all'asse di trazione.



figura 29 - (a) frattura in un provino con case depth elevato, piana e perpendicolare all'asse di trazione; (b) frattura di un provino con case depth medio e spessore 2,75 mm, che presenta caratteristiche intermedie rispetto a quelle dei provini con carbonitrurazione superficiale e profonda.

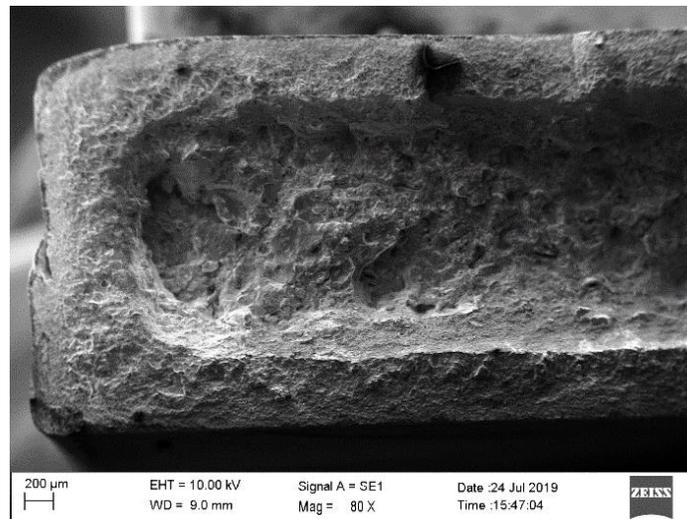


figura 30 - Ingrandimento di una parte della superficie di frattura del provino 35-01, (lo stesso di figura 29b)

Molto del comportamento del materiale si può capire grazie all'osservazione delle superfici di frattura. Si nota infatti che lo spessore del provino non ha particolare influenza sull'aspetto e sulla posizione della frattura, mentre risulta particolarmente influente il trattamento di carbonitrurazione.

Si nota infatti una superficie di frattura frastagliata e perpendicolare all'asse del provino per il caso a case depth più elevato. Il materiale con profondità di trattamento inferiore esibisce invece una superficie di rottura 'a gradino' nella parte esterna, come visibile in figura 28. La parte interna della superficie di frattura ha invece aspetto tipicamente duttile, con porosità ed una superficie inclinata di circa 45° , che indica come il materiale si sia rotto nella direzione della massima tensione tangenziale, come accade nei materiali duttili [9]. Emerge quindi una profonda differenza di

comportamento tra lo strato di materiale interessato dalla carbonitrurazione e quello interno, rimasto inalterato. La parte interna risulta infatti più tenera e duttile, e non ha subito alterazioni degne di nota rispetto al materiale grezzo anche a livello di microstruttura (paragrafo 3.2.1). Lo strato di materiale trattato è invece quello responsabile dell'aumento di resistenza e del passaggio ad una rottura improvvisa e con tratto plastico quasi o del tutto assente. Le aree carbonitrate esibiscono infatti una rottura con superficie liscia e generalmente perpendicolare alla direzione di trazione.

L'osservazione delle superfici di frattura tramite scanning electron microscope (SEM) ha evidenziato su tutti i campioni una rottura tipicamente duttile nella parte centrale non interessata dalla carbonitrurazione, con la formazione di microvuoti. Le aree superficiali invece, interessate dalla carbonitrurazione, esibiscono una rottura intergranulare (figura 31, figura 32). [9]

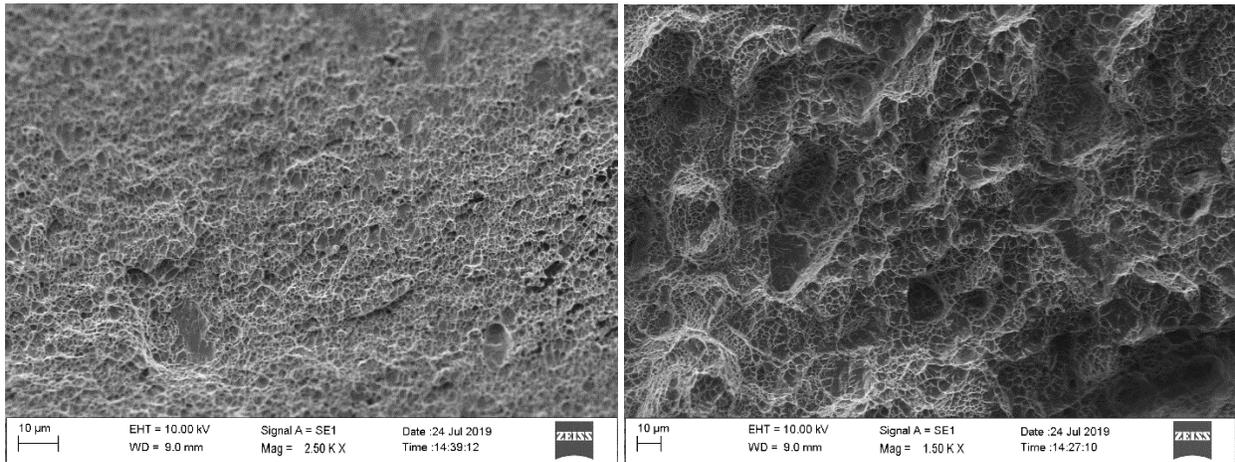
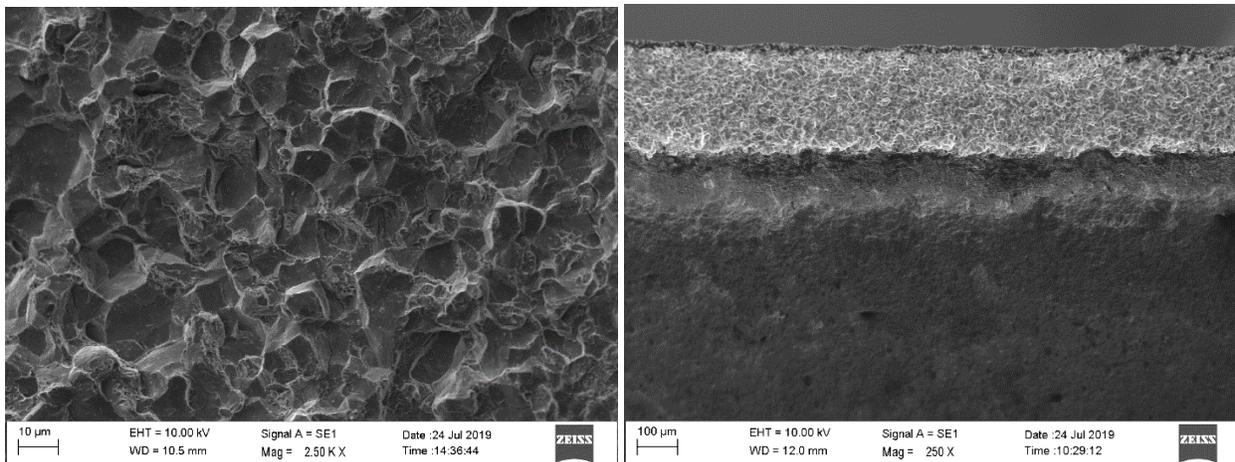


figura 31 – Ingrandimento al SEM della superficie di frattura a cuore del provino 38-25 (carbonitrurazione bassa), con porosità tipica delle rotture duttili



(a)

(b)

figura 32 – (a) ingrandimento di una zona superficiale del provino carbonitrurato 38-25, che presenta l'aspetto di una frattura intergranulare; (b) ingrandimento della superficie di frattura del provino 31-10 (spessore 2,5 mm, case depth basso); si nota in alto lo strato superficiale carbonitrurato con rottura intergranulare, di colore chiaro, mentre la parte inferiore scura presenta la microporosità tipica delle fratture duttili.

Per le tipologie di provino che esibiscono una certa deformazione prima della rottura (provino grezzo e con bassa carbonitrurazione) è stato valutato il limite elastico $R_{p0.2}$. Il software della macchina di prova ha calcolato automaticamente tale valore nel caso del provino grezzo, mentre non è stata in grado di identificare il punto richiesto nel caso del provino carbonitrurato. Per ottenerlo è stato quindi necessario calcolarlo manualmente basandosi sui dati di output della prova di trazione. Non è stato possibile effettuare il calcolo sui dati acquisiti dall'estensometro sulla *gauge length* perché il carico corrispondente viene raggiunto oltre il punto di rimozione dell'estensometro, motivo che probabilmente è anche alla base del mancato rilevamento dell' $R_{p0.2}$ da parte della macchina.

Il calcolo può essere effettuato, seppur in maniera approssimata, sfruttando l'output corrispondente alla posizione dell'attuatore della macchina. Tale output è una lunghezza avente lo zero nel punto in cui è posizionato l'attuatore a inizio prova. Per ottenere un valore di deformazione è necessario dividere questa lunghezza per una lunghezza costante di riferimento, in modo analogo a quanto si fa con la lunghezza di riferimento dell'estensometro (*original gauge length* l_0 nelle norme [8]). Questa lunghezza di riferimento è però incognita, e non può essere scelta pari alla lunghezza del provino libera dalle griffe perché il provino ha larghezza non costante.

La lunghezza di riferimento può essere trovata confrontando il tratto di curva tracciato usando in ascissa la deformazione letta tramite l'estensometro con la curva completa che utilizza in ascissa il rapporto tra avanzamento dell'attuatore e lunghezza di riferimento di tentativo. Con alcuni tentativi si trova la lunghezza di riferimento desiderata, cioè quella che fa sovrapporre le due curve. A questo punto si ha a disposizione la curva di trazione completa nelle coordinate tensione e deformazione.

Dopo questo passaggio si può seguire la nota procedura per il calcolo dell' $R_{p0.2}$, tracciando una retta con pendenza pari al modulo elastico del provino e distante dalla curva di trazione di una deformazione pari a 0,2%. L'intersezione tra la retta così tracciata e la curva di trazione determina il valore di $R_{p0.2}$. [8]

Nel caso dei provini carbonitrurati con bassa profondità di trattamento risulta un limite elastico molto vicino al carico di rottura, con una deformazione estremamente bassa. Nel caso di carbonitrurazione media e profonda il limite elastico non è presente, poiché la rottura avviene prima dell'intersezione tra la curva di trazione e la retta dell' $R_{p0.2}$.

L'allungamento a rottura risulta molto elevato nel materiale grezzo e praticamente assente nel materiale carbonitrurato.

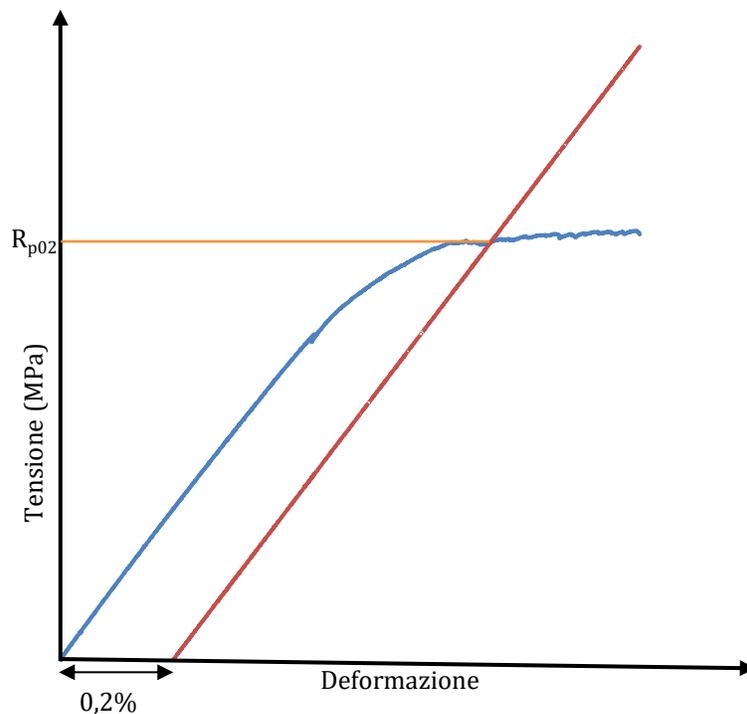


figura 33 – Calcolo dell' R_{p02}

Terminata la raccolta dati si può effettuare un'analisi statistica per ottenere le informazioni desiderate, cioè quelle relative al comportamento del materiale al variare dei parametri del DOE. Per effettuare questo tipo di analisi si è fatto uso del software Minitab e dei suoi numerosi strumenti per l'impostazione e l'analisi di un design of experiment. In particolare, l'analisi è focalizzata su due proprietà del materiale, il modulo elastico e la resistenza massima.

Riguardo il modulo elastico non è stato possibile dire molto, dato che risulta statisticamente insensibile sia al valore di case depth che di spessore della lamiera (il livello di confidenza adottato è del 95%). Tutti i valori misurati sono infatti molto vicini ai 200 GPa, valore tipico negli acciai.

La resistenza massima del materiale ha invece una variazione legata soprattutto al case depth. Il fattore carbonitrurazione risulta infatti determinante, mentre il fattore spessore della lamiera e l'interazione tra i due fattori risultano non significativi. Il center point indica la presenza di una curvatura nell'andamento della funzione interpolante (p-value corrispondente 0,034).

Il risultato principale che si è riusciti a ottenere è che i campioni con profondità di carbonitrurazione più bassa hanno carico di rottura leggermente superiore, nonché un limitato tratto di deviazione rispetto alla proporzionalità che è del tutto assente nei campioni con carbonitrurazione media e profonda. Un confronto tra i carichi di rottura dei provini in tutte le varianti considerate è visibile in figura 36.

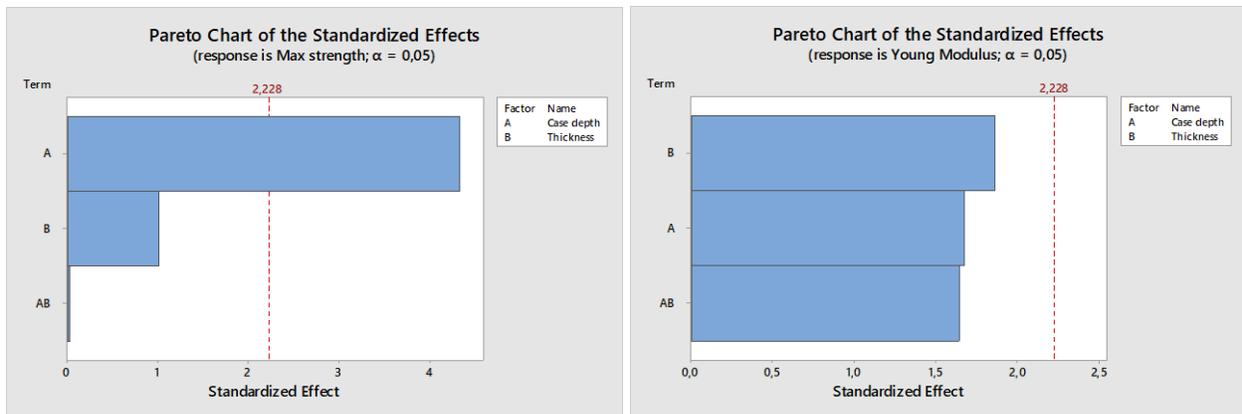


figura 34 – Diagrammi di Pareto per l'identificazione dei fattori rilevanti nel DOE. (a) il fattore profondità di carbonitrurazione risulta essere l'unico statisticamente rilevante nei confronti della resistenza massima del materiale. (b) nessuno dei fattori esaminati risulta influente sul modulo di Young del materiale.

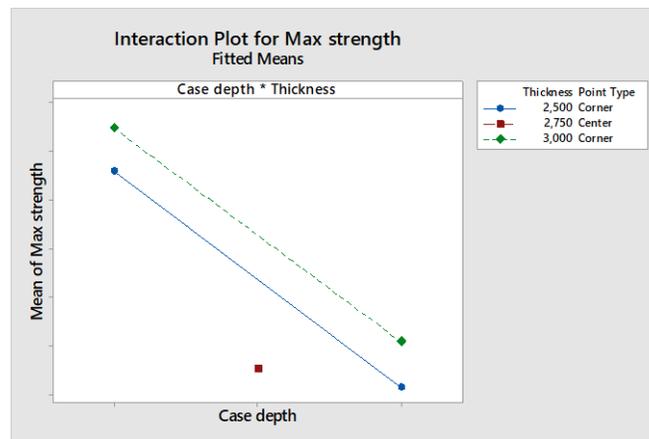


figura 35 – Grafico riportante la resistenza massima del materiale in funzione della profondità di carbonitrurazione per i diversi casi analizzati. Il disallineamento del centre point rispetto alle due rette indica la presenza di una curvatura nell'andamento.

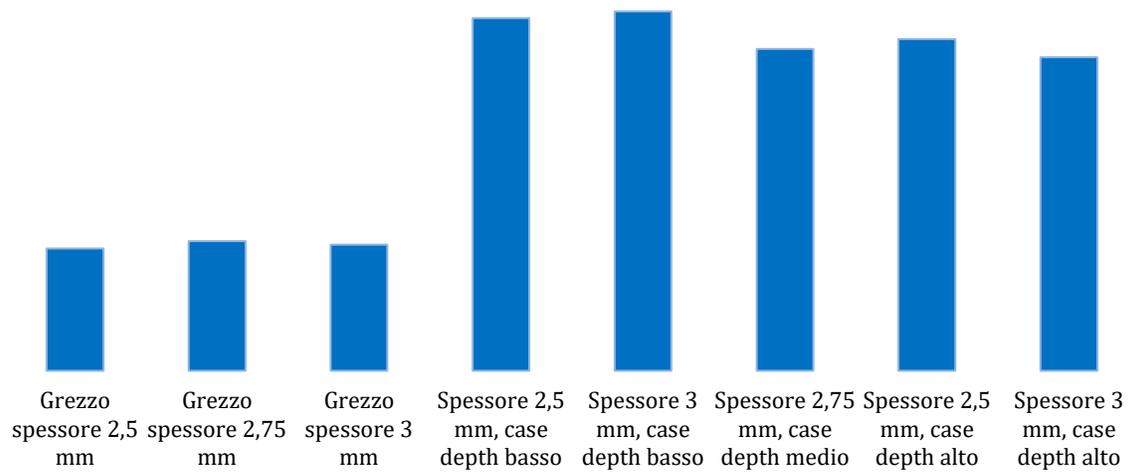


figura 36 – Confronto tra i carichi di rottura per i vari tipi di provino utilizzato; ogni valore è ottenuto come media di tre risultati di altrettante prove di trazione.

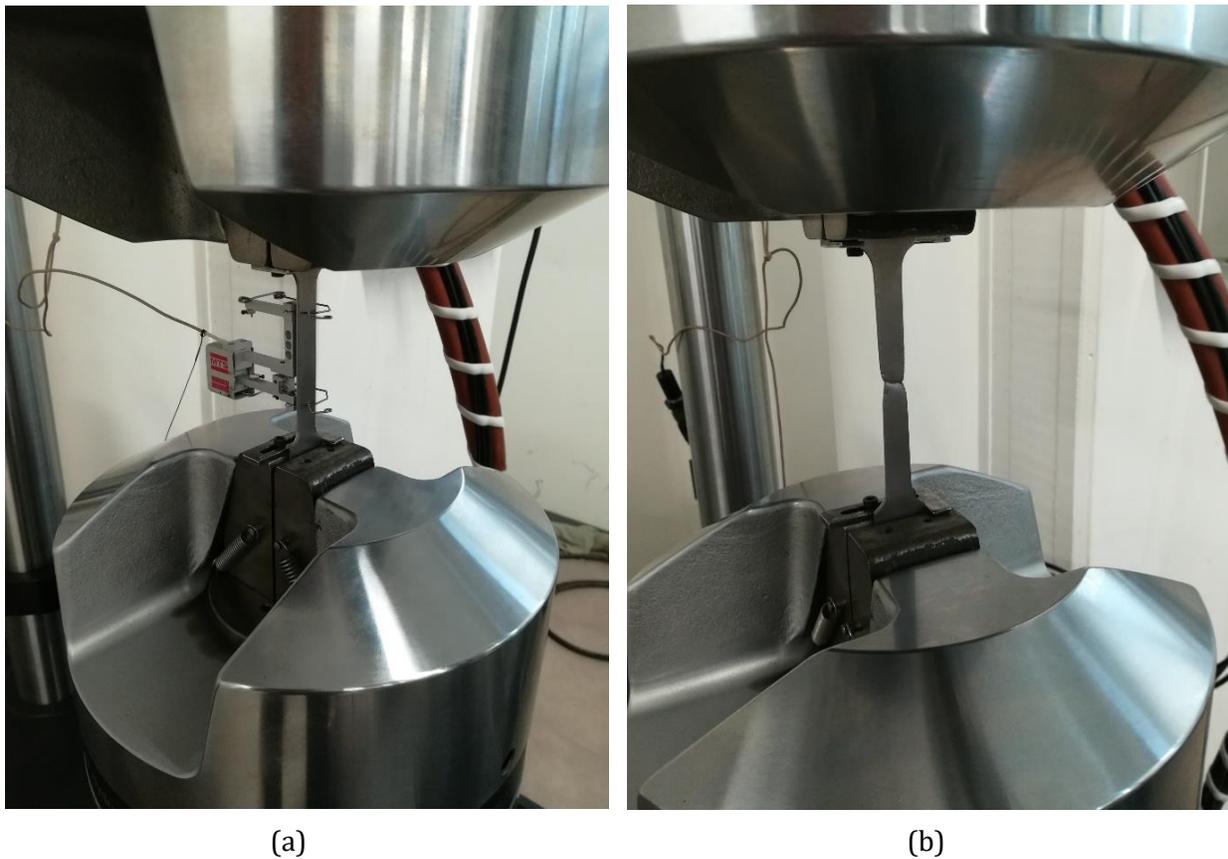


figura 37 – Prova di trazione su un provino non carbonitrurato: (a) inizio prova, (b) prova terminata.

3.3. Caratterizzazione a fatica

L'impostazione delle prove di fatica ha seguito quanto indicato dalla norma ISO 12107:2012 [10] per la programmazione delle prove e l'analisi dei risultati. La prova su ogni variante di materiale presa in considerazione è stata eseguita in due fasi:

- Una prima parte di prove per tracciare la curva relativa alla vita a termine e identificare una tensione di partenza per la parte successiva
- Una seconda parte per valutare il limite di fatica secondo il metodo staircase.

La prima parte si è svolta testando i provini a carico decrescente fino all'ottenimento del primo test con sospensione a 10 milioni di cicli. Quest'ultima prova è stata quindi considerata come prima prova utile per la fase successiva, basata sul metodo staircase [10].

3.3.1. Attrezzatura e condizioni di prova

Le prove di fatica assiale sono state eseguite utilizzando gli stessi provini e la stessa macchina già utilizzata per le prove di trazione descritte al paragrafo 3.2.3. Le principali caratteristiche della macchina e le condizioni di prova sono riportate in tabella 7.

La procedura di prova prevede di testare i provini a carico minimo costante, con carichi scelti in modo da avere una tensione minima di 20 MPa su tutti i provini, indipendentemente dallo spessore. Il livello di carico a cui ogni provino è testato è quindi definito dal carico massimo; tale valore è quello utilizzato per tracciare la curva di Wöhler e per applicare il metodo staircase. Si tratta quindi di prove con rapporto di carico non costante, condizione piuttosto inusuale per una prova di fatica, ma giustificata dal fatto che il bilanciere in opera è sottoposto a cicli di carico con tensione minima costante (paragrafo 2.1). Tutti i pezzi sono stati testati con carico sinusoidale ad una frequenza di 30 Hz e a temperatura ambiente. La sospensione della prova avviene al raggiungimento di 10 milioni di cicli.

Trattandosi di prove di fatica assiale il valore di tensione a cui è sottoposto il materiale è determinato semplicemente come:

$$Tensione = \frac{Carico}{Sezione resistente}$$

Il montaggio del provino sulla macchina di prova è effettuato con l'aiuto di due riscontri che permettono un buon allineamento verticale del pezzo. La procedura di montaggio del provino e avvio della prova è la seguente:

1. Portare alla distanza desiderata le griffe della macchina
2. Inserire il provino nella corretta posizione sfruttando gli appositi riscontri
3. Chiudere le griffe inferiori, afferrando l'estremità inferiore del provino
4. Passare al controllo di carico imponendo carico assiale nullo
5. Chiudere le griffe superiori, completando l'afferraggio del provino
6. Portare il provino al carico medio previsto

7. Impostare un carico alterno di pochi kN, portarlo gradualmente ad una frequenza di 30 Hz e successivamente al carico alterno previsto dalla prova

Il completamento dell'afferraggio (punti 4 e 5) avviene imponendo un carico nullo per evitare l'insorgere di carichi indesiderati e incontrollati durante la chiusura del secondo afferraggio.

Nome macchina	MTS 250 kN 810 Material Test System
Incertezza sul carico misurato	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Incertezza sullo spostamento misurato	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Modalità di applicazione del carico	Onda sinusoidale
Frequenza di applicazione del carico	30 Hz
Numero cicli di runout	10 ⁷
Criterio di rilevamento della rottura	Spostamento superiore a 2 mm
Temperatura media	Ambiente
Tensione minima in ogni prova	20 MPa

tabella 7 - Caratteristiche della macchina usata per le prove di fatica e principali parametri di prova

3.3.2. Modalità di prova

La prima parte delle prove ha indagato la vita del provino a carichi elevati e con rottura del campione prima del raggiungimento di 10 milioni di cicli. Tali rotture sono state rappresentate sul grafico in figura 38 e rispecchiano l'andamento tipico di una tipica curva di Wöhler. La retta che interpola i dati relativi alla vita a termine può essere ricavata secondo il procedimento indicato dalla norma ISO 12107 [10], che permette di ricavare la retta con probabilità di rottura al 50%:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_i$$

In cui \hat{Y}_i rappresenta la variabile indipendente, mentre X e Y sono i logaritmi del carico e della durata in cicli:

$$X_i = \log_{10}(S_i)$$

$$Y_i = \log_{10}(N_i)$$

Dove N è il numero di cicli e S la tensione, in questo caso quella massima.

La norma fornisce anche le formule per valutare la deviazione standard e il coefficiente di correlazione R², che permette di valutare la qualità con cui la retta interpola i dati sperimentali. Un R² maggiore di 0,9 indica generalmente una buona interpolazione.

Dopo aver avuto un certo numero di rotture a carichi decrescenti si è arrivati ad ottenere i primi provini sospesi a 10⁷ cicli. A questo punto si è passati ad utilizzare il metodo staircase, anch'esso noto

in letteratura [1] e previsto dalla norma ISO 12107 [10]. Lo step di carico che si è rivelato adatto al materiale studiato è pari a 25 MPa. L'elaborazione dei dati, effettuata secondo la procedura prevista dalla norma, ha fornito i seguenti risultati:

- Un limite di fatica con probabilità di rottura al 50%
- La corrispondente deviazione standard
- Un valore di limite di fatica con livello di confidenza del 95% e probabilità di rottura al 10%

Nel paragrafo seguente sono riportati grafici e tabelle relative ai risultati trovati. I soli dati che vengono riportati sono quelli relativi al materiale con spessore minore e due diversi livelli di case depth, poiché le prove relative alle altre condizioni previste dal Design of Experiment devono ancora essere effettuate.

Si può notare che la prima tipologia di provino testata, quella a case depth maggiore, ha richiesto un numero maggiore di prove per la parte della vita a termine, motivo che ha costretto ad effettuare una sequenza di prove più breve con i pochi provini rimanenti. Testando invece la seconda tipologia di provino è stato possibile scegliere i livelli di carico con maggiore efficacia, consentendo di effettuare un maggior numero di prove con il metodo staircase.

3.3.3. Risultati sperimentali

In questa sezione vengono riportati solo gli andamenti ottenuti tramite le prove effettuate. I risultati numerici vengono nascosti poiché riservati. Il principale risultato è che il comportamento del materiale ai due livelli di case depth è molto simile sia per quanto riguarda la vita a termine sia per quanto riguarda il limite di fatica. L'applicazione del metodo staircase fornisce un limite di fatica al 50% di probabilità di rottura leggermente più alto per il materiale a case depth elevato. Considerando l'elevata dispersione dei risultati, che hanno in entrambi i casi una deviazione standard poco inferiore allo step di tensione utilizzato, pari a 25 MPa, si può dire che una maggiore profondità di trattamento ha un effetto benefico sulla resistenza a fatica, ma di entità praticamente trascurabile ai livelli di case depth considerati. L'aumento di resistenza media a fatica rilevato è infatti minimo, se confrontato con quello che si ha rispetto al materiale non trattato.

In linea generale, si può affermare che il materiale carbonitrurato ha un comportamento caratterizzato da elevata variabilità, come visibile in figura 38 e testimoniato anche da due prove concluse con sospensione a carichi molto elevati, che non sono state considerate nella sequenza di prove prevista dall'applicazione del metodo staircase. In riferimento alla curva tensione-durata, la notevole dispersione dei dati ha causato anche dei valori piuttosto bassi del parametro R^2 (rispettivamente 0,38 e 0,48 nei casi con case depth basso e alto), che indica una scarsa congruenza tra il modello di regressione lineare utilizzato e i dati sperimentali. Una buona interpolazione dei dati si avrebbe infatti con R^2 compreso tra 0,9 e 1 [10]. Si possono inoltre osservare i residui, che mostrano in entrambi i casi un andamento crescente all'aumentare del numero di cicli, rappresentando un'ulteriore prova della bassa qualità del modello lineare adottato per l'interpolazione dei dati sperimentali. Un modello più complesso fornirebbe risultati migliori, ma in questa fase si è scelto di non procedere con ulteriori analisi sull'interpolazione della curva di vita a termine in quanto l'interesse è prevalentemente rivolto al limite di fatica. Un'analisi della curva

completa verrà inoltre effettuata al paragrafo 3.4.2 secondo un approccio innovativo che sfrutta il principio della massima verosimiglianza.

Altro aspetto notevole è l'andamento particolarmente "ripido" della curva di tensione-durata; l'intersezione tra la curva rappresentante la vita media a termine e la tensione limite di fatica media avviene a durate piuttosto basse, pari a circa 100.000 cicli. Inoltre, nessuna delle prove concluse con la rottura del campione ha mai superato la durata di 300.000 cicli.

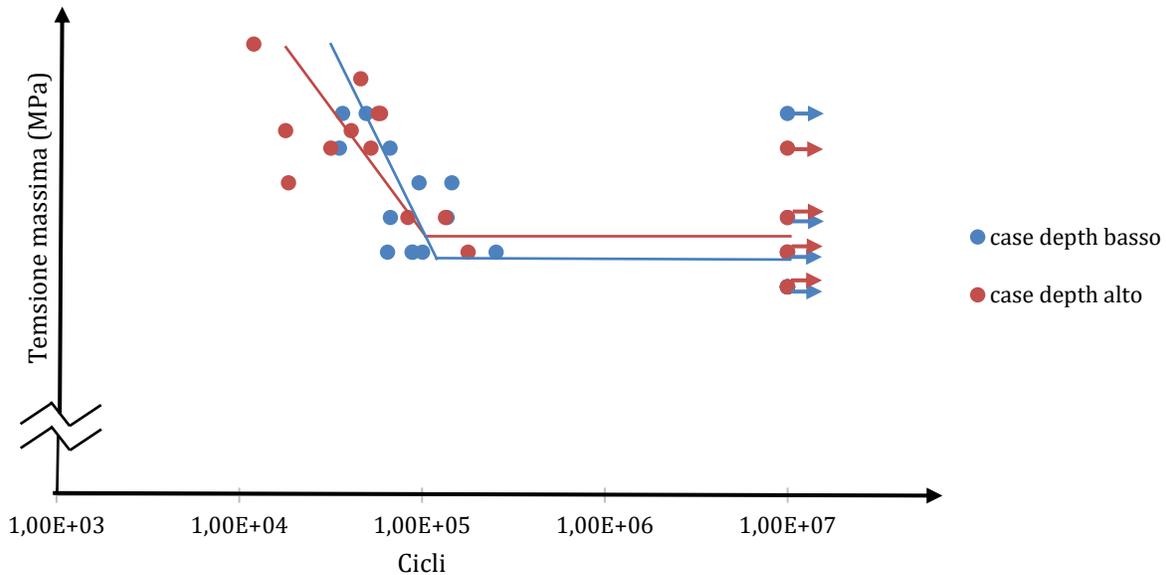


figura 38 – Risultato dei test di fatica effettuati sui provini con spessore 2,5 mm e due livelli di profondità di carbonitrurazione. Le frecce indicano le sospensioni a 10^7 cicli, mentre le rette tracciate indicano rispettivamente la curva di Wöhler (parte inclinata) e il limite di fatica (parte orizzontale) al 50% di probabilità di rottura.

Livello stress (MPa)	Sequenza test - case depth basso, spessore 2,5 mm															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
S4	X		X													
S3		0		X										X		
S2					X		X		X		X		0		X	
S1						0		0		0		0				0

figura 39 – Sequenza delle prove effettuate a vari livelli di carico secondo il metodo staircase nella configurazione a basso spessore e basso case depth (provini contrassegnati dal numero 31). Con 'X' vengono indicate le prove concluse con rottura del provino, con '0' quelle concluse con sospensione a 10^7 cicli.

Livello stress (MPa)	Sequenza test - case depth alto, spessore 2,5 mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S4										X
S3			X				X		0	
S2		0		X		0		0		
S1	0				0					

figura 40 - Sequenza delle prove effettuate a vari livelli di carico secondo il metodo staircase nella configurazione a basso spessore e alto case depth (provini contrassegnati dal numero 32). Con 'X' vengono indicate le prove concluse con rottura del provino, con '0' quelle concluse con sospensione a 10^7 cicli.

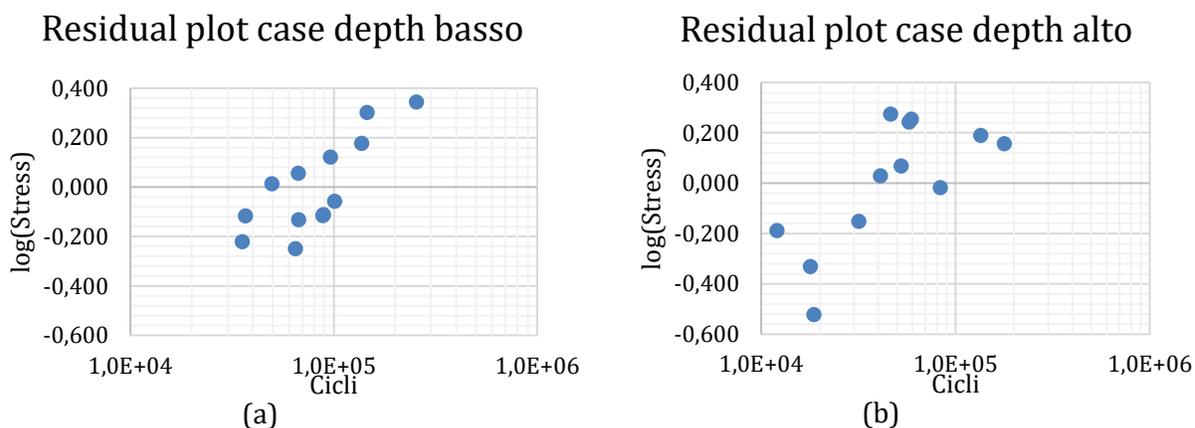


figura 41 - Grafico dei residui in funzione del numero di cicli: (a) nel caso di carbonitrurazione poco profonda, (b) nel caso di carbonitrurazione profonda. In entrambi i casi risulta un andamento crescente che indica uno scarso adattamento del modello lineare utilizzato rispetto ai dati sperimentali.

Una migliore analisi del fenomeno di fatica che si sta studiando può essere effettuata grazie all'osservazione delle superfici di frattura. Tale analisi risulta anche indispensabile per poter effettuare la correzione dei dati che si desidera per eliminare il contributo della distorsione dovuta al trattamento di carbonitrurazione. Un'accurata identificazione del punto di innesco della cricca è infatti necessaria per conoscere la posizione di tale punto e determinare, grazie al modello agli elementi finiti, la componente di tensione dovuta alla distorsione.

Un primo passo per l'analisi delle superfici di frattura può essere la classificazione dei diversi aspetti che la frattura assume a seconda del meccanismo di frattura in atto. In particolare, è necessario distinguere tra aree in cui si è avuta la propagazione della cricca e aree in cui è avvenuta la rottura finale che ha posto termine alla prova (queste ultime, trattandosi di una rottura finale di schianto, dovranno avere aspetto analogo a quelle viste nel paragrafo 3.2.3 relativamente alle prove di trazione). Le tipologie di frattura riscontrate sono visibili nelle immagini seguenti.

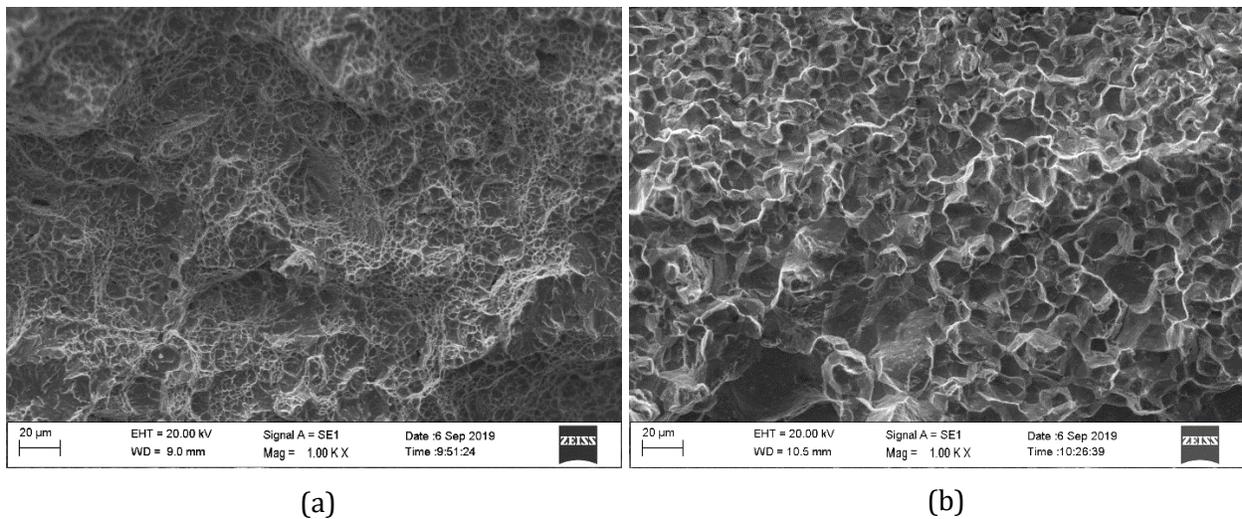


figura 42 - Aspetto tipico delle superfici di frattura finale: (a) frattura duttile nelle aree a cuore, (b) frattura intergranulare tipica delle aree carbonitrate osservate su provini sottoposti a test di fatica

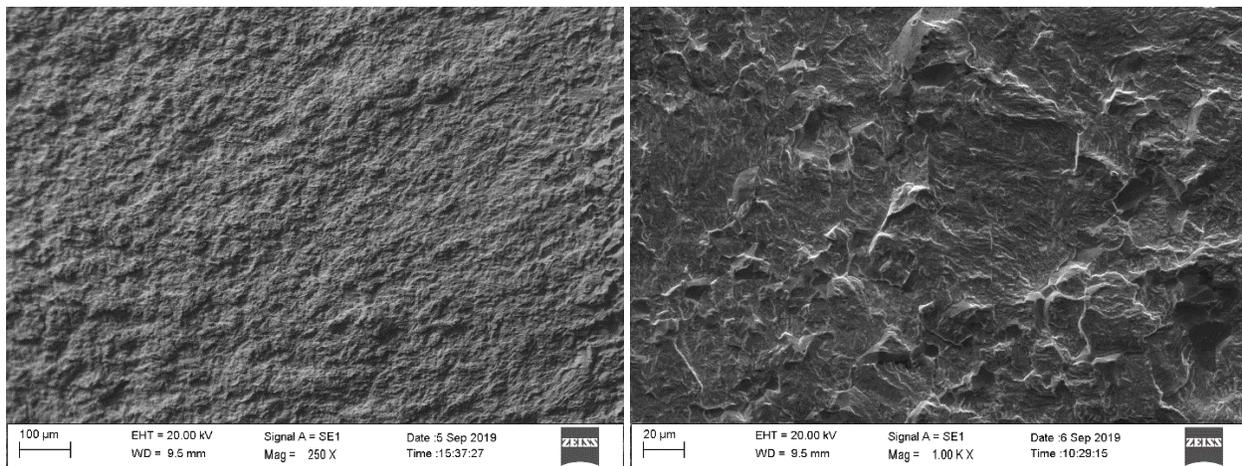


figura 43 - Aspetto delle aree carbonitrate vicine alla superficie in cui si è verificata la propagazione della cricca di fatica, a due diversi ingrandimenti

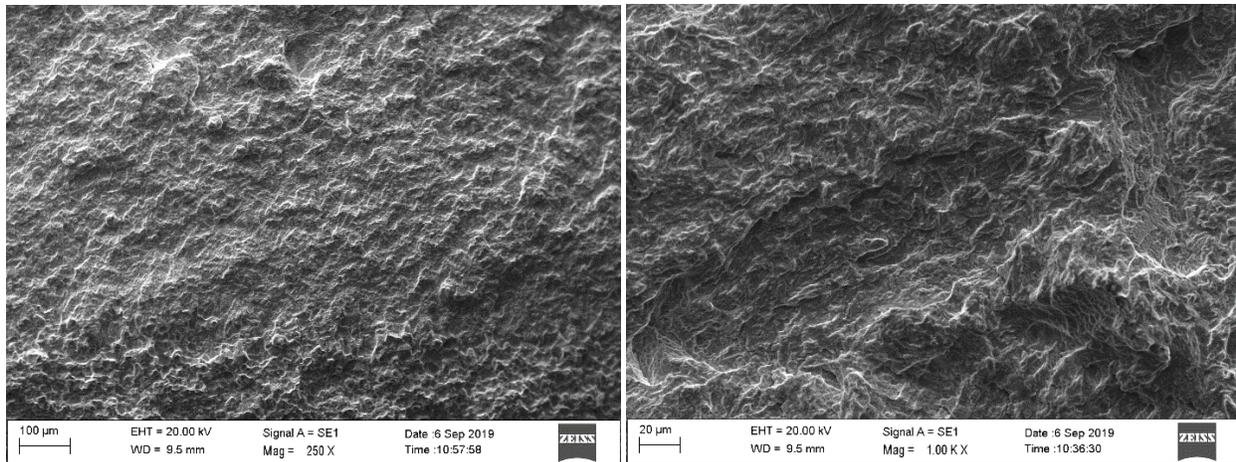


figura 44 – Aspetto delle aree tenere a cuore in cui si è verificata la propagazione della cricca

Dalla superficie di frattura è possibile individuare il punto di inizio propagazione della cricca di fatica. Nella maggior parte dei casi è stato facile identificare tale punto in prossimità di un difetto superficiale piuttosto evidente sul lato corto della sezione resistente, dovuto al processo di tranciatura del campione. Tale difetto appare più o meno grande a seconda del provino osservato, e risulta in tutti i casi osservati il punto di origine della frattura. La cricca avanza poi verso l'interno del provino sfruttando la minore resistenza opposta dalla parte tenera del materiale e non penetrando più in quella carbonitrurata. Tale comportamento è visibile dalle immagini SEM: risulta un'estesa superficie piana a cuore in cui è visibile l'avanzamento della cricca invece della porosità tipica della rottura di schianto. Le aree carbonitrate mostrano invece una frattura intergranulare lungo tutto il profilo esterno ad eccezione della zona di nucleazione della cricca, collocata in prossimità del difetto superficiale già citato. La situazione tipica è riportata ad esempio in figura 45, in cui è visibile la direzione e l'area di avanzamento della cricca. L'avanzamento continua finché il pezzo non giunge al cedimento finale, che avviene con la rottura improvvisa della parte rimanente di sezione resistente.

Tutti i campioni hanno avuto fratture simili, ad entrambi i livelli di carbonitrurazione considerati. L'area in cui propaga la cricca risulta di dimensioni minori nel caso dei campioni con case depth più alto.

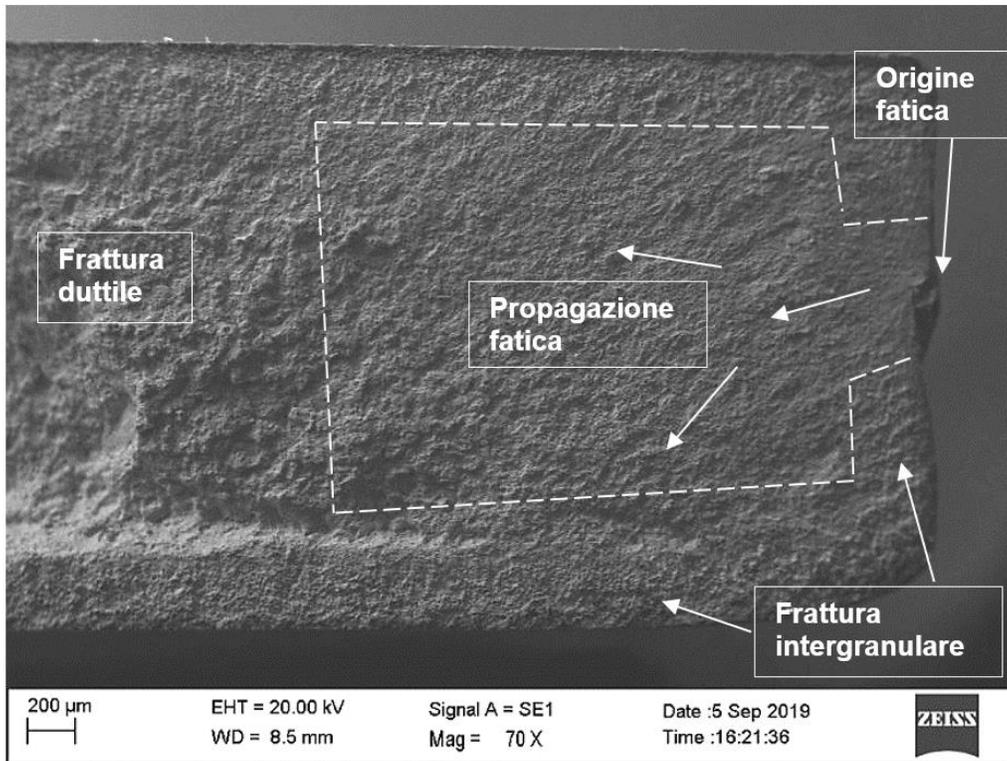


figura 45 – Avanzamento della cricca in un provino carbonitrurato sottoposto a prova di fatica. La frattura ha origine dal difetto superficiale visibile sulla destra, avanza per un breve tratto nello strato carbonitrurato e successivamente si allarga fino a coprire una vasta area nella zona centrale, costituita da materiale più tenero. La frattura finale avviene di schianto, con aspetto duttile a cuore e intergranulare vicino alla superficie.

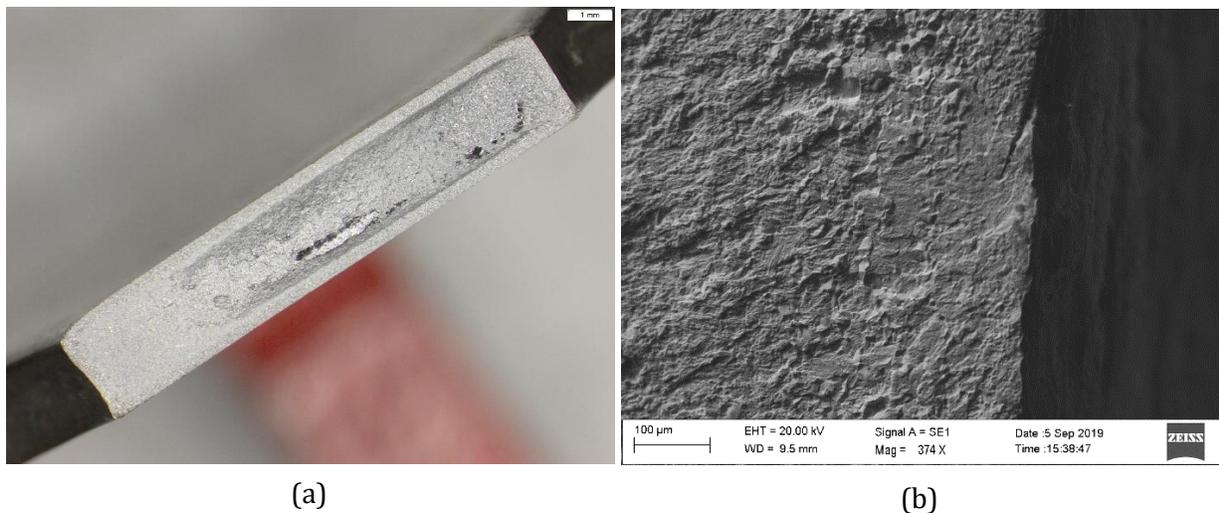
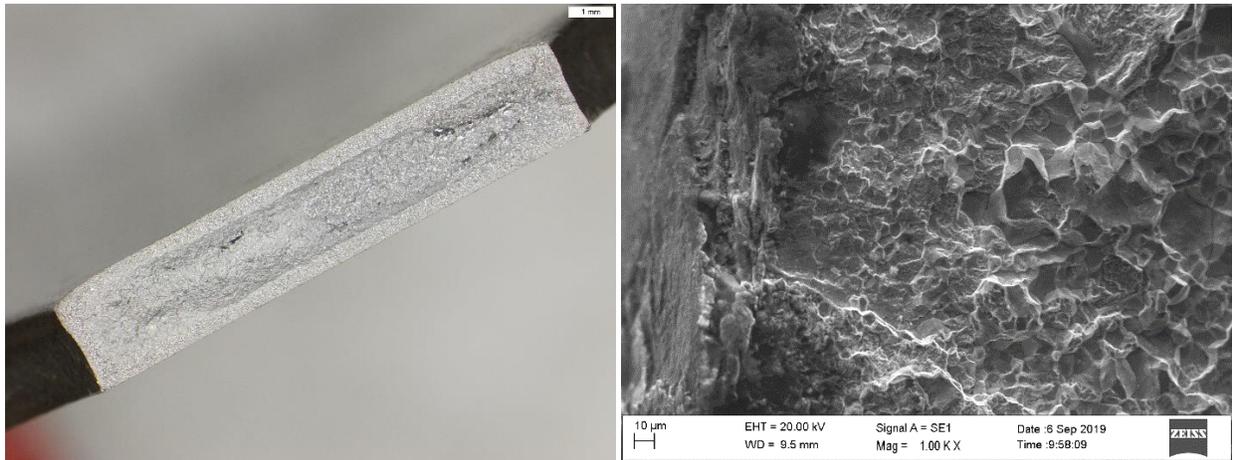


figura 46 – Frattura del provino 31-1 dopo test di fatica: (a) macro e (b) dettaglio al SEM del difetto da cui ha origine la frattura. Si tratta di un campione con profondità di carbonitrurazione bassa, con una vasta area di propagazione della cricca di fatica visibile in (a) perché di aspetto liscio e chiaro (area in basso a sinistra).



(a)

(b)

figura 47 - Frattura del provino 32-21 dopo test di fatica: (a) macro e (b) dettaglio al SEM del difetto da cui ha origine la frattura. Si tratta di un campione con profondità di carbonitrurazione elevata, che presenta un'area di propagazione della cricca di fatica molto ridotta. Anche il difetto superficiale da cui ha origine la cricca ha piccole dimensioni che ne rendono difficile l'individuazione.



figura 48 - Frattura di alcuni provini dopo prova di fatica

3.4. Correzione dei risultati sperimentali

La distorsione dovuta al trattamento di carbonitrurazione ha condizionato i risultati della campagna sperimentale, motivo per cui si è scelto di effettuare una correzione dei risultati ottenuti. Come anticipato al paragrafo 3.2.2, si è scelto di procedere in questo modo dopo aver misurato la deformazione dei provini ed aver effettuato una prima simulazione agli elementi finiti, da cui è emerso che, imponendo una deformazione ad un provino distorto in modo da riportarlo in piano con forza assiale nulla, le tensioni che nascono non sono trascurabili rispetto a quelle assiali di prova. Si è quindi scelto di modellare la deformazione di ogni provino e di correggere lo stato tensionale dello stesso sommandogli quello valutato tramite FEM, dovuto alla distorsione. In particolare, l'ipotesi che sta alla base della correzione è che durante l'afferraggio da parte della macchina il pezzo venga riportato forzatamente in piano, con un conseguente stato di tensione di flessione che rimarrà costante durante la prova. Per avere una verifica della correttezza del metodo utilizzato si è ritenuto necessario effettuare una validazione sperimentale del modello FEM. A questo scopo sono state effettuate delle prove su alcuni provini appositamente dotati di estensimetri, in modo da ottenere una corrispondenza tra le deformazioni calcolate nel modello numerico e quelle misurate sperimentalmente.

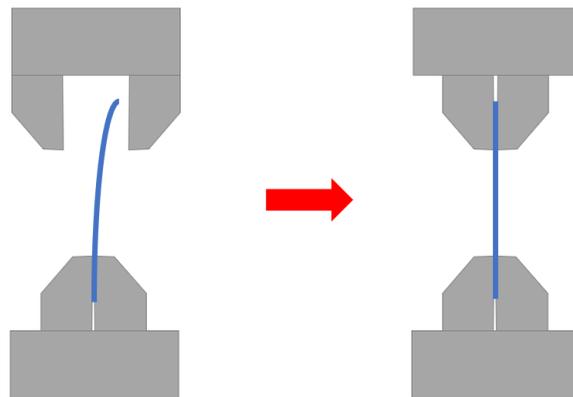


figura 49 – Con la chiusura delle griffe superiori della macchina di prova il provino, in origine distorto, viene forzatamente riallineato

3.4.1. Modello per la valutazione dell'errore dovuto alla distorsione

Per tenere conto del contributo di tensione che influenza la prova ed è causato dalla distorsione del provino, è stata utilizzata una procedura di correzione dei dati sperimentali che prevede le seguenti fasi:

1. misura del profilo del provino deformato, prima di effettuare la prova
2. calcolo delle condizioni al contorno da imporre al modello FEM, che dipendono dal profilo misurato
3. modellazione su CAD tridimensionale del provino deformato
4. importazione del modello CAD sul software per le analisi strutturali e calcolo degli stress che nascono con l'afferraggio della macchina
5. esecuzione della prova di fatica senza tener conto della distorsione
6. correzione delle tensioni di prova dei singoli provini sommando alla tensione di prova il contributo dovuto alla distorsione
7. nuova valutazione del limite di fatica secondo un metodo che non richieda di utilizzare uno step di carico costante.

Il primo passo necessario è stata la modellazione su CAD del provino deformato. Il software utilizzato è il CAD tridimensionale Creo Parametric. Per disegnare il profilo deformato è stata utilizzata una spline passante per punti situati in posizione nota. La posizione di tali punti è stata determinata tramite misure con altimetro sul provino interessato. In particolare, il provino è stato appoggiato su un piano di riscontro su cui sono state prese 19 quote lungo l'asse del provino utilizzando l'altimetro. Alcuni esempi di profili così ottenuti sono riportati in figura 18. Il procedimento di misura qui descritto è stato seguito perché ritenuto il miglior compromesso tra accuratezza e rapidità tra quelli possibili con gli strumenti a disposizione.

Undici dei diciannove punti acquisiti sono stati utilizzati per tracciare la spline corrispondente al profilo superiore del provino. Trattandosi di una geometria a spessore uniforme è stato possibile utilizzare il comando offset per tracciare il profilo inferiore, dopodiché la geometria è stata completata con le estrusioni necessarie. La scelta di utilizzare solo 11 punti per tracciare la spline è motivata dal fatto che un numero di punti superiore rendeva difficile la gestione della spline da parte del software, correndo il rischio di ottenere un andamento poco realistico della linea. Il modello CAD è stato successivamente importato in ANSYS Workbench per l'analisi FEM.

Il modello FEM è stato mantenuto il più semplice possibile per ridurre al minimo le possibilità di errore. È stata utilizzata una mesh di esaedri con dimensioni tali da avere un minimo di 3 elementi sullo spessore del provino. Si è inoltre verificato che la mesh presentasse una convergenza del valore di tensione massima all'aumentare del numero di elementi, riscontrando che il numero di tre elementi sullo spessore è un buon compromesso che consente una buona rapidità di calcolo abbinata ad un errore minimo rispetto al valore di convergenza (figura 55).

Volendo simulare la deformazione imposta al provino durante l'afferraggio nella macchina di trazione è necessario vincolare una delle due estremità del modello con un incastro e caricare l'altra estremità imponendo una freccia tale da riportare in piano il provino. Si deve inoltre imporre una rotazione della seconda estremità tale da posizionarla parallelamente alla prima. Le condizioni al contorno imposte nel FEM sono schematizzate in figura 50.

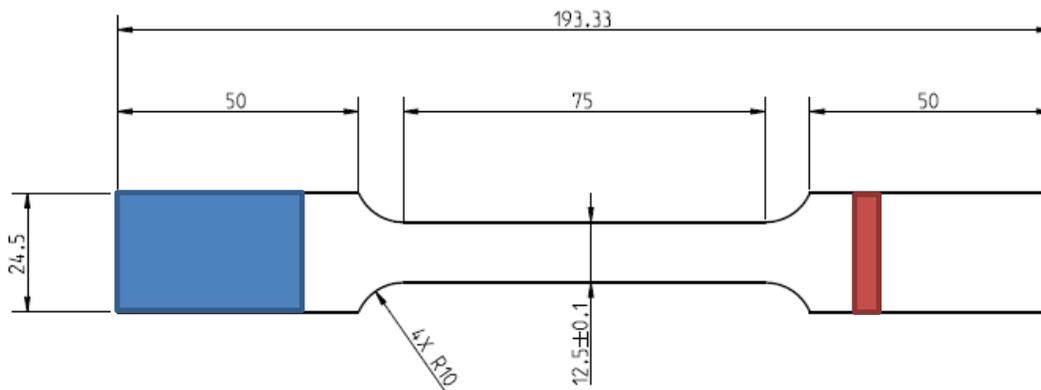


figura 50 – Aree del modello in cui vengono imposte le condizioni al contorno: in blu l'incastro corrispondente all'afferraggio sulle griffe inferiori, in rosso l'area in cui sono imposte la traslazione e la rotazione necessarie per ottenere l'allineamento del provino

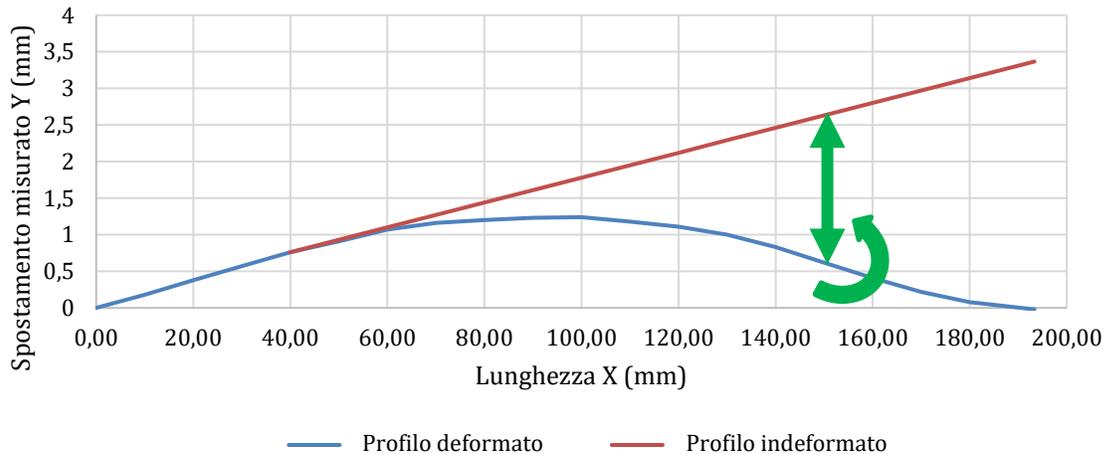


figura 51 – Calcolo della traslazione e della rotazione da imporre su una delle estremità del provino

A questo punto è necessario determinare i valori di freccia e rotazione da imporre nella zona del provino che corrisponde al punto di afferraggio della seconda griffa. Per farlo si è sfruttato il profilo del provino misurato e riportato su un grafico come quello di figura 51.

Per determinare lo spostamento si può pensare di calcolare la distanza tra le posizioni assunte dal punto di interesse nelle configurazioni deformata e non deformata. Tale valore è stato determinato come differenza tra la quota del profilo del provino come rappresentato in figura 51 e la quota della retta tangente al profilo nel primo punto di afferraggio, quello sulla sinistra. Si ipotizza che questa retta tangente corrisponda alla posizione rettilinea assunta dal provino quando è afferrato da entrambe le griffe della macchina.

La corretta rotazione da imporre nella zona di interesse è invece data dall'angolo tra la retta tangente già citata in precedenza e la pendenza del profilo del provino nella zona corrispondente. La pendenza del profilo del provino è stata calcolata come rapporto incrementale tra il punto precedente e il successivo al punto di interesse. I risultati di una simulazione sono visibili in figura 52.

Coordinate profilo misurate			Calcolo freccia e rotazione			
Numero punto	X (mm)	Y (mm)	Pendenza profilo provino	Angolo rotazione (°)	Y retta (mm)	Distanza retta/profilo (mm)
0	0	0				
1	10	0,18	0,019	0,11	0,25	0,07
2	20	0,38	0,020	0,14	0,42	0,04
3	30	0,57	0,019	0,11	0,59	0,02
4	40	0,76	0,017	0,00	0,76	0,00
5	50	0,91	0,016	-0,09	0,93	0,02
6	60	1,07	0,013	-0,26	1,10	0,03
7	70	1,16	0,006	-0,60	1,27	0,11
8	80	1,20	0,004	-0,77	1,44	0,24
9	90	1,23	0,002	-0,86	1,61	0,38
10	100	1,24	-0,003	-1,12	1,78	0,54
11	110	1,18	-0,006	-1,35	1,95	0,77
12	120	1,11	-0,009	-1,49	2,12	1,01
13	130	1,00	-0,014	-1,78	2,29	1,29
14	140	0,83	-0,019	-2,06	2,46	1,63
15	150	0,62	-0,021	-2,18	2,63	2,01
16	160	0,41	-0,020	-2,12	2,80	2,39
17	170	0,22	-0,017	-1,92	2,97	2,75
18	180	0,08	-0,010	-1,56	3,14	3,06
19	193	-0,02	-0,008	-1,40	3,37	3,39

tabella 8 – Esempio di calcolo delle condizioni al contorno imposte sul modello del provino 32-29. Il quarto punto di cui è stata misurata la freccia (a $x=40$ mm) è quello in cui termina l'area di afferraggio del provino da parte delle griffe inferiori. In tale punto è calcolata la pendenza della retta che rappresenta il profilo del provino raddrizzato (in verde). Le condizioni al contorno (rotazione e freccia) sono invece calcolate a $x=150$ mm (in rosso).

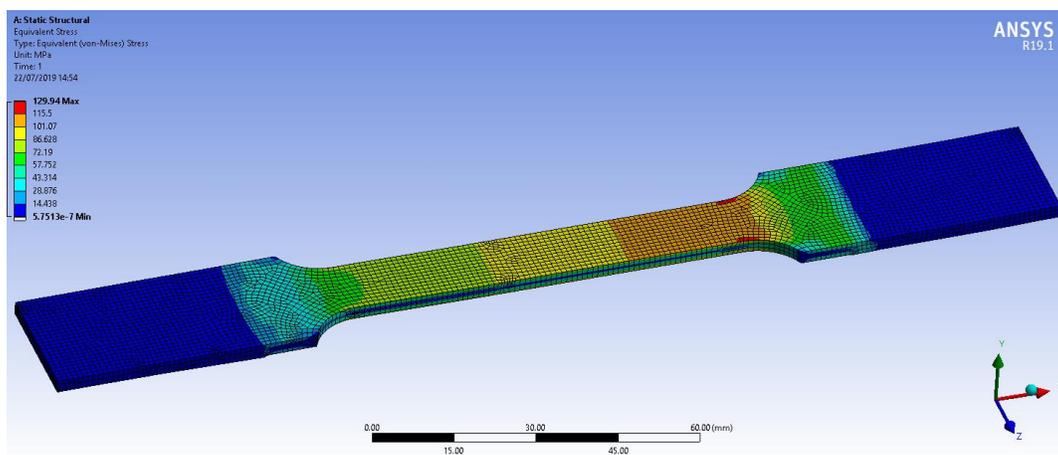


figura 52 – Risultati della simulazione numerica sul provino 32-29: tensione equivalente di Von Mises (MPa)

La tensione a cui è sottoposto il materiale durante la prova non sarà quindi solamente quella assiale, imposta dalla macchina di prova, ma a questa andrà aggiunto il contributo della tensione costante che ha origine con l'afferraggio del provino. Bisogna quindi trovare un modo per sommare il contributo tensionale costante dovuto alla distorsione a quello alterno di prova. Un espediente per ottenere quanto necessario può essere utilizzare il diagramma di Haigh per calcolare la tensione a rapporto di carico $R=-1$ per ogni provino (carico alterno simmetrico). Si ottengono in questo modo due insiemi di dati tra cui si può fare un confronto, uno corrispondente a i dati non corretti ed un secondo in cui alla tensione media di prova è stata sommata quella di correzione.

Trattandosi di una tensione non uniforme sulla lunghezza del provino, il valore di correzione viene letto sul modello numerico nella zona di innesco della cricca di fatica che ha portato a rottura. In particolare, utilizzando la seguente notazione:

- σ per la tensione
- F per il carico imposto dalla macchina
- A per la sezione resistente del provino
- $\sigma_{R=-1}$ per la tensione limite di fatica con rapporto di carico $R = -1$
- R_m per la resistenza massima a trazione del materiale

Lo tensione di trazione per un provino perfettamente rettilineo è:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Da questa derivano le componenti di tensione media e alterna:

$$\sigma_{med} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2A} \quad \sigma_{alt} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2A}$$

Nelle varie prove viene mantenuta costante la σ_{min} , facendo variare la σ_{max} . Ogni prova è quindi caratterizzata da valori diversi di σ_{med} e σ_{alt} . Per correggere i dati sperimentali, alla componente media andrà sommata la componente di tensione assiale letta sul modello agli elementi finiti nel punto di innesco della cricca (σ_{fem}), ottenendo:

$$\sigma_{med,corr} = \sigma_{med} + \sigma_{fem}$$

Si ottiene così un nuovo limite di fatica corretto $\sigma_{R=-1,corr}$ mediante il modello della retta di Goodman [9]:

$$\sigma_{R=-1,corr} = \frac{\sigma_{alt}}{\left(1 - \frac{\sigma_{med,corr}}{R_m}\right)}$$

La procedura di correzione potrebbe dirsi conclusa in questo modo nel caso in cui si avesse uno stesso valore di σ_{fem} per tutte le prove effettuate. Tuttavia, avendo riscontrato che i provini hanno tutte distorsioni diverse tra loro, è necessario utilizzare un valore di σ_{fem} specifico per ogni provino. In questo modo si perde la possibilità di effettuare un'analisi del limite di fatica tramite il metodo staircase, poiché se la tensione di ogni prova viene modificata in modo diverso per ogni prova si perde la possibilità di mantenere lo step di carico costante.

Per determinare il nuovo limite di fatica dopo la correzione dei dati si può utilizzare un approccio diverso, basato sull'applicazione del principio della massima verosimiglianza [11]. Questo approccio è stato introdotto in [12] per effettuare un'analisi completa delle curve di Wöhler che rappresentano il comportamento di campioni con diversi meccanismi di frattura. Questo tipo di campioni dà infatti origine a una curva di Wöhler costituita da più tratti inclinati collegati da tratti orizzontali, denominati plateau. Ogni tratto di curva decrescente col numero di cicli è caratterizzato da un proprio meccanismo di frattura, mentre i plateau hanno significato di tensioni di transizione tra due diversi meccanismi. Il metodo qui utilizzato consente di effettuare un'analisi di una qualunque curva stress-durata, indipendentemente dal numero di meccanismi di frattura e plateau, e considerando anche il limite di fatica, nel caso sia presente. [12]

La potenzialità di questo metodo risiede nella possibilità di applicarlo a qualunque set di risultati sperimentali si abbia a disposizione, indipendentemente dai carichi che si è scelto di utilizzare e dalle durate o dai runout che sono stati ottenuti. Nel caso in esame risulta utile utilizzare questo metodo in sostituzione dello staircase per analizzare i risultati corretti, poiché non è necessario avere uno step di carico costante. I risultati ottenuti secondo questo approccio sono riportati al paragrafo 3.4.2.

3.4.2. Risultati corretti

Agendo come descritto ai paragrafi precedenti si ottengono dei nuovi risultati, indipendenti da quelli trovati prima di mettere in atto la correzione. Le proprietà del materiale risultano quindi diverse rispetto al caso precedente sia per quanto riguarda la curva della vita a termine, sia per quanto riguarda il limite di fatica.

Il valore di correzione utilizzato è la tensione presente nel punto di innesco della cricca di fatica dovuta al solo afferraggio della macchina di trazione, quindi a carico assiale nullo. Come meglio spiegato al paragrafo 3.4.1, si tratta di una componente di tensione di flessione che rimane costante durante la prova.

La zona di origine della fatica non corrisponde al punto in cui la tensione imputabile alla distorsione è massima. La fatica ha infatti origine sul lato corto della sezione resistente, sul quale è spesso visibile un difetto superficiale, dovuto alla tranciatura, associato all'origine della fatica (paragrafo 3.3.3). Poiché il provino afferrato risulta sollecitato a flessione e il difetto da cui ha origine la fatica si trova generalmente in prossimità dell'asse neutro, la correzione da adottare risulta minore rispetto a quanto ipotizzato prima dell'esecuzione delle prove; a questa conclusione si può arrivare solo dopo aver identificato la zona di origine della fatica grazie all'osservazione delle superfici di frattura di ogni campione.

Per identificare tale punto nel caso delle prove concluse con sospensione a 10 milioni di cicli è stato necessario effettuare delle nuove prove a carichi più elevati con i rispettivi provini. La procedura seguita prevede di incrementare leggermente il carico rispetto alla prima prova ed effettuare una nuova prova fino a runout. Si procede in questo modo con prove a carichi crescenti fino ad arrivare alla rottura del provino per fatica.

In alcuni casi la zona di origine della fatica è stata identificata nella parte della sezione che si trova in compressione, perciò il valore risulta negativo. In alcuni casi, inoltre, la distorsione del provino

risulta minima, tanto da essere ritenuta trascurabile: in questi casi il valore di correzione è stato imposto pari a zero.

La procedura di correzione ha quindi modificato la tensione di prova in positivo o negativo, modificando i risultati ottenuti come visibile in figura 53 e figura 54. La tensione riportata in ordinata è quella relativa al carico alterno simmetrico (rapporto di carico R pari a -1), ed è stata calcolata tramite il diagramma di Haigh come spiegato a pagina 53. Il passaggio a questo tipo di tensione è stato necessario per poter sommare la tensione costante di correzione a quella alterna di prova. I dati così ottenuti sono stati analizzati grazie al metodo basato sul principio della massima verosimiglianza [12], ottenendo i risultati presentati di seguito.

Il primo risultato notevole, ottenuto applicando il principio della massima verosimiglianza sui risultati prima della correzione, è che sembra esserci una maggiore differenza a livello di limite di fatica ai due livelli di case depth. Questo risultato può essere spiegato considerando il fatto che la nuova analisi secondo il principio della massima verosimiglianza è stata effettuata su tutte le prove, a differenza del metodo staircase, che non tiene conto delle prove utilizzate per valutare la curva della vita a termine. Si tratta quindi di un diverso tipo di calcolo, effettuato su un insieme di dati più ampio. Un'ulteriore differenza tra i due case depth è dovuta al fatto che la formula utilizzata per calcolare $\sigma_{R=-1}$ (pagina 53) comprende il valore di resistenza massima a trazione del materiale: poiché il materiale a case depth minore ha una resistenza massima maggiore, il calcolo fornisce un $\sigma_{R=-1}$ inferiore.

Infine, il confronto tra valori corretti e non, effettuato applicando il principio della massima verosimiglianza, ha mostrato dei limiti di fatica leggermente più alti per i risultati corretti, e deviazioni standard analoghe. Si tratta comunque di un'influenza minima, che non influenza eccessivamente i risultati nel caso venga trascurata.

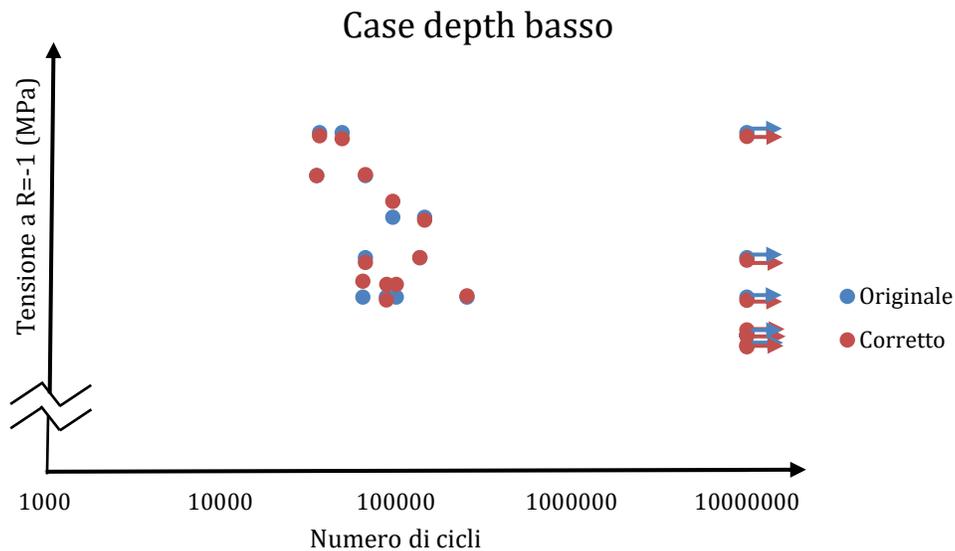


figura 53 – Risultato delle prove di fatica sui provini a carbonitrurazione bassa: confronto tra i dati prima e dopo la correzione.

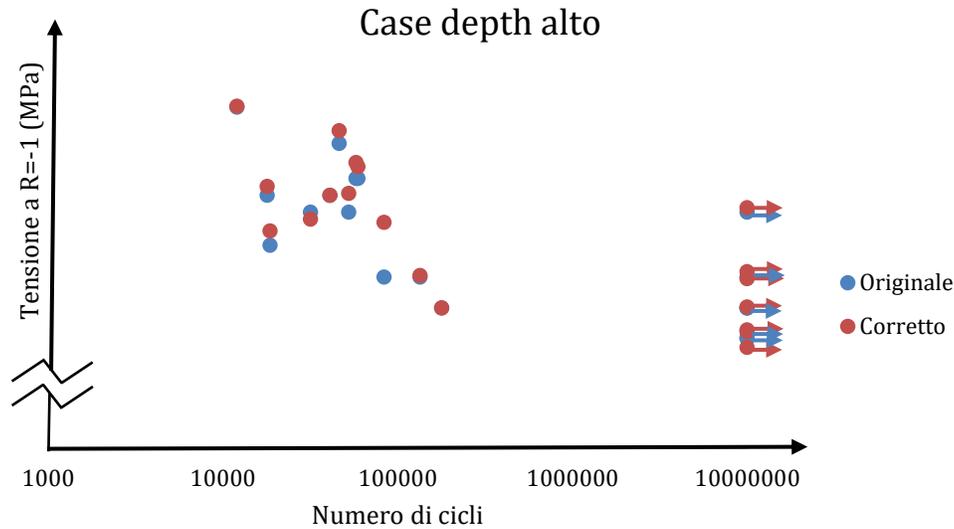


figura 54 - Risultato delle prove di fatica sui provini a carbonitrurazione alta: confronto tra i dati prima e dopo la correzione.

3.4.3. Validazione del modello numerico di correzione

Il modello agli elementi finiti descritto nel paragrafo precedente è apparentemente piuttosto semplice. Tuttavia, lavorando con tale modello si nota che sono sufficienti piccoli errori nelle condizioni al contorno imposte per avere importanti variazioni delle tensioni nel provino. Nasce quindi l'esigenza di verificare la correttezza del modello per non incorrere in una stima errata delle tensioni di correzione. Per farlo sono state eseguite delle prove di afferraggio da parte della macchina su provini dotati di estensimetri. In questo modo è stato possibile verificare la corrispondenza tra i valori di deformazione nel modello FEM e durante la prova sperimentale, confermando la correttezza delle ipotesi adottate nella costruzione del modello FEM.

Una prima verifica sul modello è stata la convergenza dei risultati al variare della dimensione (e quindi del numero) degli elementi della mesh. Per la costruzione del modello viene usato l'elemento esaedro disponibile su ANSYS in modalità *program controlled*. La verifica è stata effettuata sul valore di tensione massima, localizzato in corrispondenza del raccordo più vicino alla parte incastrata. Si verifica che per dimensioni dell'elemento inferiori a 1,5 mm l'oscillazione del risultato è inferiore a 1 MPa (figura 55). Si ritiene quindi che la convergenza del modello numerico sia verificata. Nel modello finale è stato utilizzato un esaedro di dimensione 1 mm.

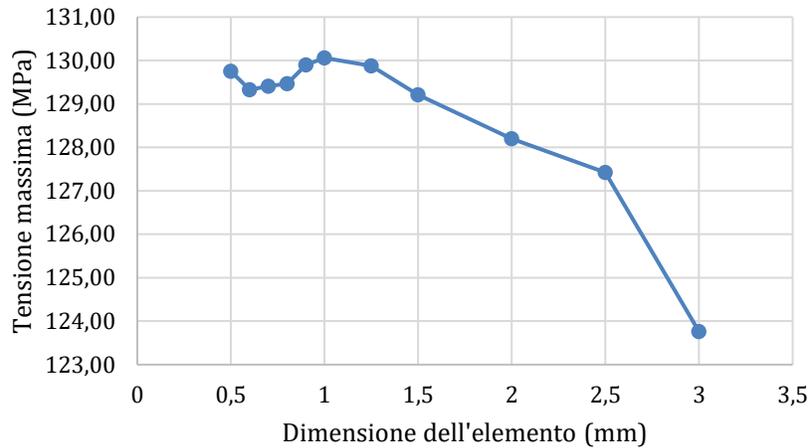


figura 55 – Andamento della tensione massima sul modello del provino 32-29 al variare della dimensione dell'elemento esaedro con cui è realizzata la mesh

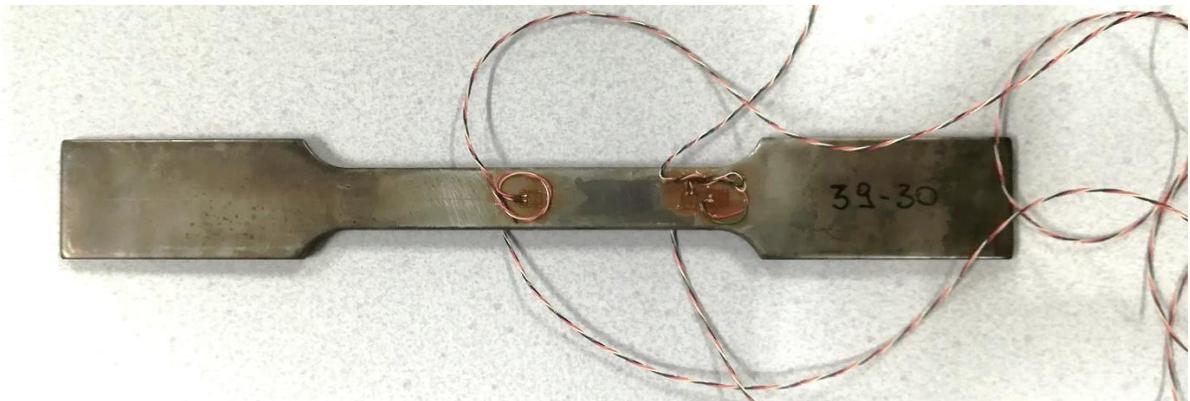


figura 56 – Provino in 16MnCr5 carbonitrurato, estensimetrato

Per verificare la correttezza della simulazione e dei relativi risultati è stata effettuata una misura con estensimetri delle deformazioni subite da alcuni pezzi durante l'afferraggio nella macchina.

Gli estensimetri sono stati applicati in due posizioni sul provino, entrambe sul tratto calibrato. Volendo comprendere se lo stato di tensione dovuto all'afferraggio della macchina sia costante lungo il tratto calibrato, le posizioni scelte sono a metà della lunghezza e in prossimità del raccordo, come visibile in figura 56. Inoltre, gli estensimetri sono stati collocati su entrambe le facce piane del provino (nella stessa posizione) per verificare che la deformazione rilevata sia effettivamente dovuta alla flessione e non a componenti assiali di trazione causate dalla macchina. Tutti gli estensimetri citati finora sono stati posizionati in modo da leggere la deformazione nella direzione di trazione. È stato aggiunto un quinto estensimetro vicino ad uno degli incastri in direzione perpendicolare a quella di trazione, per verificare la diminuzione di larghezza durante la prova di trazione. Quest'ultimo estensimetro ha solamente fornito una conferma del restringimento del materiale sottoposto a trazione per effetto Poisson.

La misura è stata effettuata in due diverse modalità:

- Misura della deformazione dovuta all'afferraggio della macchina
- Misura della deformazione locale durante una prova di trazione

Nel primo caso l'azzeramento del segnale letto è stato effettuato con il provino afferrato solo ad una delle estremità, con l'altra ancora libera. La lettura dei valori di deformazione avviene dopo la chiusura della seconda griffa della macchina. Tale risultato è quello che ci si attende di trovare, nelle aree corrispondenti, nel modello numerico, che tiene conto della sola flessione del provino.

Nel secondo caso la lettura è stata effettuata durante una prova di trazione a vari livelli di carico. Ciò che si vuole verificare in questo modo è se, come ipotizzato, la differenza di deformazione sulle due facce piane sia costante al variare del livello di carico. Se l'ipotesi fosse confermata risulterebbe corretta l'idea di utilizzare una tensione di flessione costante per la correzione delle tensioni durante le prove di fatica. Si può inoltre effettuare un confronto tra i valori di deformazione sulla *gauge length*, letti dall'estensometro della macchina di trazione, e quelli locali ricavati tramite gli estensimetri.

Il test è stato effettuato su quattro provini scelti con due spessori diversi. Per ogni spessore è stato utilizzato un provino scelto tra quelli più distorti e uno scelto tra quelli meno distorti.

Per le misure qui descritte sono stati utilizzati estensimetri Micro Measurement (MM) da 120 Ohm. Il sistema di acquisizione dati è costituito da una scheda di alimentazione e condizionamento del ponte National Instrument 1520. Le misure sono state effettuate utilizzando lo schema del quarto di ponte, in cui l'estensimetro è una delle resistenze del ponte di Wheatstone, mentre il resto del circuito è costituito da resistenze interne alla scheda. Il segnale dell'estensimetro è stato depurato dei contributi dovuti alla resistenza dei cavi grazie a un collegamento di due fili paralleli, in uno dei quali porta il segnale dell'estensimetro mentre l'altro solo quello relativo alla resistenza del cablaggio.

La scheda estensimetrica è inserita in uno chassis National Instrument SCXI 1000, che la mette in comunicazione con il sistema di acquisizione. La scheda di acquisizione (National Instrument 6133) amplifica il segnale del ponte, lo filtra da eventuali disturbi ed effettua la lettura per un tempo di 0,5 s ad una frequenza di acquisizione di 10 kHz. L'acquisizione avviene in contemporanea su tutti i 5 canali. Il valore di deformazione ad un certo step di carico è ottenuto come media dei valori letti durante il tempo di acquisizione impostato, intervallo in cui la macchina si trova in controllo di carico al livello di carico desiderato.

Passando ad analizzare i risultati della prova, si possono ottenere numerose informazioni, riportate nel seguito.

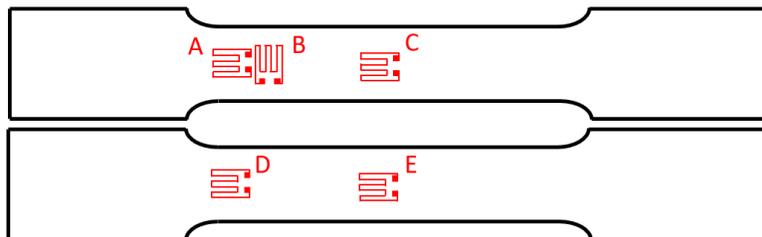


figura 57 – Posizionamento dei 5 estensimetri sulle due facce del provino

3.4.3.1. Prova di trazione su provini estensimetrati

I valori di deformazione acquisiti durante la prova su uno dei provini sono riportati in figura 58. L'andamento rilevato sugli altri tre provini è del tutto analogo. Dai grafici si nota un ripido passaggio dallo zero al punto iniziale, passaggio che avviene al momento della chiusura del secondo afferraggio della macchina. Successivamente, i valori di deformazione aumentano linearmente col carico, mantenendo circa costante la differenza tra i valori letti nella stessa posizione sulle due facce del provino.

Si nota anche che il segnale letto sulle coppie di estensimetri applicati sulle due facce del provino ha circa lo stesso valore con segno opposto. Questa è una conferma del fatto che il provino risulta sottoposto a flessione, condizione suggerita anche dalle distribuzioni di tensione calcolate tramite il modello FEM.

Valutando invece le differenze tra i dati ottenuti durante una prova a carico crescente e decrescente non si notano effetti rilevanti dovuti all'andamento del carico. In figura 59 è riportata la differenza tra i valori ottenuti allo stesso livello di carico in fase di salita e discesa. Tali differenze sono più piccole del valore misurato di almeno un ordine di grandezza, per cui non sono stati rilevati effetti di isteresi rilevanti del materiale.

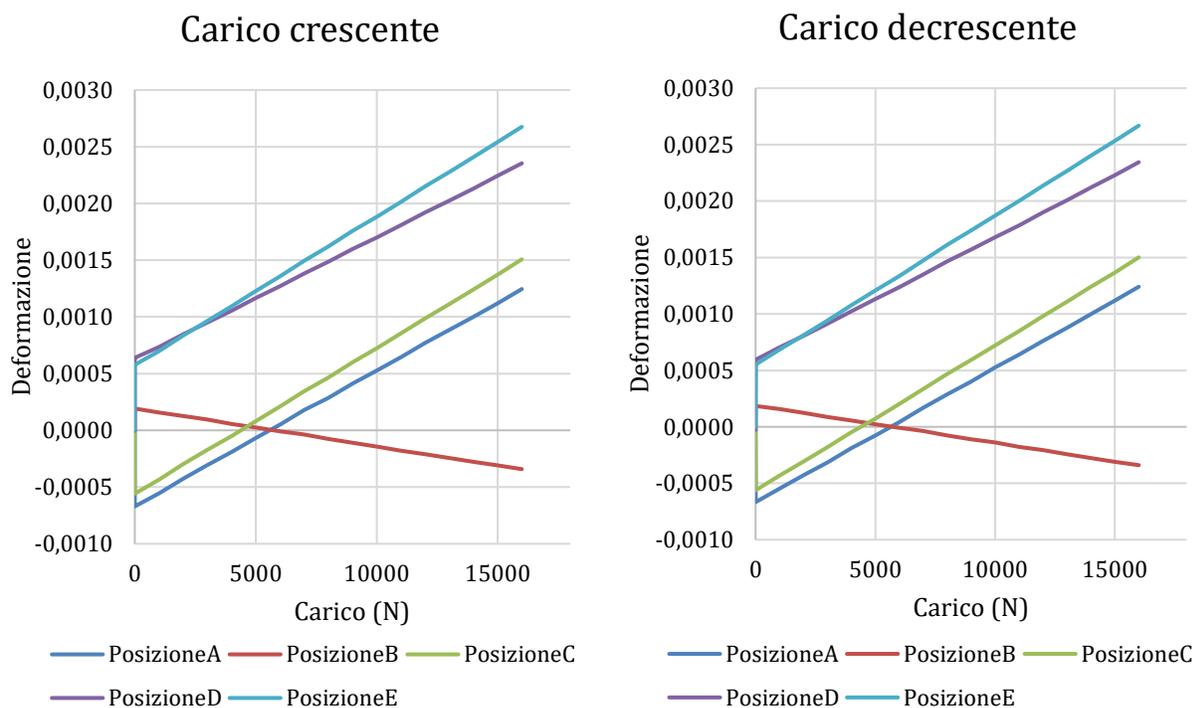


figura 58 – Prova di trazione su provini estensimetrati: acquisizione della deformazione dei 5 estensimetri a carico crescente e decrescente sul provino 39-15

Differenza tra carico crescente e decrescente

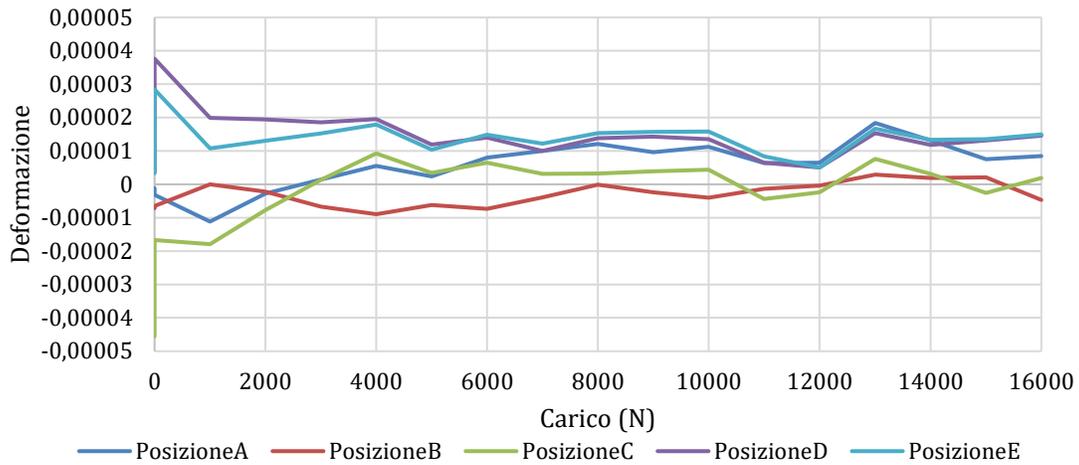


figura 59 – Andamento della differenza tra i valori di deformazione misurati durante le prove di carico e scarico del provino

3.4.3.2. Differenza tra le deformazioni sulle due facce del provino

Per verificare la correttezza dell'ipotesi che la distorsione causi uno stato di deformazione e tensione costante durante la prova di fatica si può osservare l'andamento della differenza tra le rilevazioni delle coppie di estensimetri nella stessa posizione (figura 60). I carichi imposti sono paragonabili a quelli utilizzati per le prove di fatica. L'andamento rilevato risulta sufficientemente simile a quello costante da poterlo considerare tale con buona approssimazione per via della piccola variazione riscontrata ai carichi di interesse.

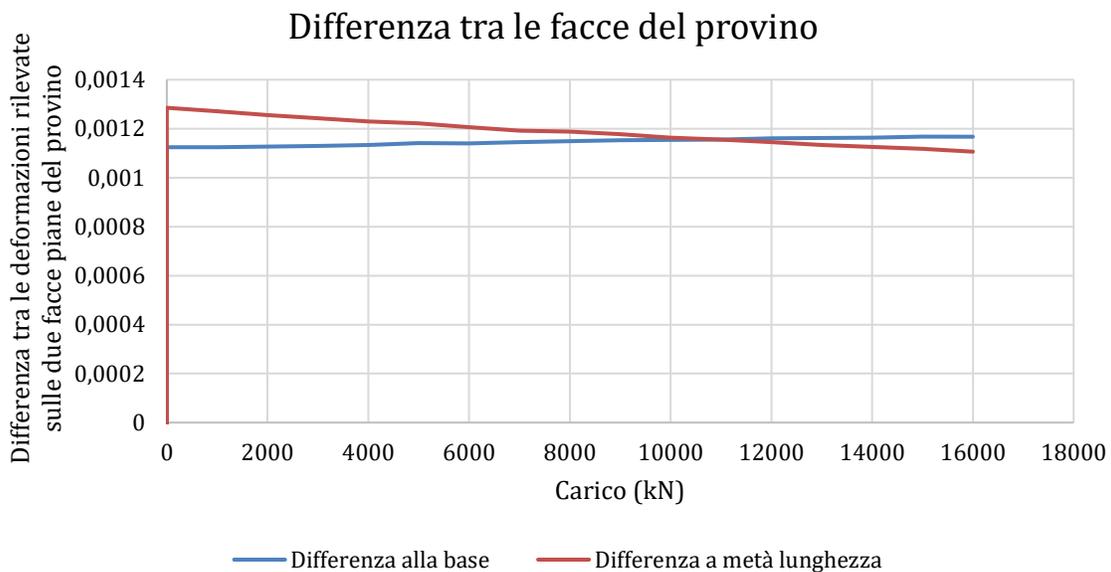


figura 60 – Differenza tra le deformazioni sulle due facce piane del provino, circa costante al variare del carico.

3.4.3.3. Confronto tra la deformazione misurata dagli estensimetri e dall'estensometro della macchina di prova

Come ulteriore verifica può essere interessante un confronto, a parità di carico imposto, tra la deformazione misurata dall'estensometro della macchina e quella letta dagli estensimetri applicati sulla superficie del provino. Si nota in figura 61 che i valori corrispondono quasi perfettamente nella posizione a metà del tratto calibrato. L'estensimetro posizionato in prossimità del raccordo sembra invece rilevare una rigidezza leggermente inferiore, probabilmente causata dalla vicinanza col raccordo con la sezione a larghezza maggiore. Anche sul modello agli elementi finiti emerge infatti una concentrazione di tensioni sui lati in corrispondenza di tale raccordo, a cui corrisponde un abbassamento di tensione e deformazione nella parte centrale del provino.

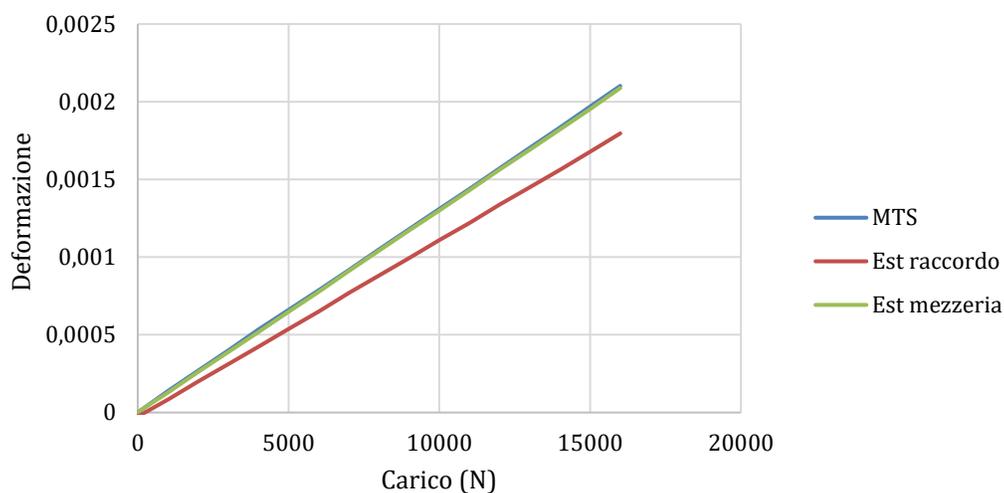


figura 61 – Confronto tra i segnali acquisiti dalle coppie di estensimetri nei due punti in cui sono stati applicati sul tratto calibrato del provino e dell'estensometro della macchina di prova

3.4.3.4. Confronto tra i risultati della simulazione FEM e i valori misurati tramite gli estensimetri

Scopo finale di questa esperienza è la validazione del modello FEM con cui verranno calcolate le tensioni utili a correggere lo stato di tensione del provino durante la prova di fatica. Il modello risulta validato se i valori ottenuti durante la prova con estensimetri corrispondono ai valori di deformazione calcolati con il modello FEM in posizioni analoghe. Come si può vedere dai risultati riportati in tabella 9, la corrispondenza è solo marginale. Mentre un 5% di errore è imputabile all'accuratezza della lettura degli estensimetri, la maggior parte dell'errore riscontrato può essere attribuita solo al modello numerico.

I numerosi tentativi effettuati, uniti alla verifica della convergenza della tensione massima sul modello all'aumentare del numero di elementi, fanno pensare che tali errori non siano dovuti al modello in sé, ma all'imposizione delle corrette condizioni al contorno. Il calcolo della freccia e della

rotazione da imporre al provino deve essere infatti preceduto da una misura del profilo del provino, che sicuramente comporta l'esecuzione di alcuni errori, e da una stima della posizione del provino dopo l'afferraggio della macchina (paragrafo 3.4.1). Con i mezzi a disposizione non è stato possibile migliorare questa stima, motivo per cui si utilizzerà il modello con la consapevolezza che gli errori derivati da questo possono raggiungere, nei casi peggiori, fino al 50% del valore stimato dal modello stesso.

Provino #32-29	Posizione A	Posizione C	Posizione D	Posizione E
Estensimetro	-3,73E-04	-4,65E-04	3,64E-04	4,53E-04
Risultato FEM	-4,27E-04	-4,63E-04	4,28E-04	4,64E-04
Differenza	5,42E-05	-1,87E-06	-6,50E-05	-1,06E-05
Errore	-12,7%	0,4%	-15,2%	-2,3%

Provino #32-02	Posizione A	Posizione C	Posizione D	Posizione E
Estensimetro	-1,17E-04	-9,08E-05	1,09E-04	8,45E-05
Risultato FEM	-8,78E-05	-7,58E-05	8,79E-05	7,60E-05
Differenza	-2,93E-05	-1,50E-05	2,14E-05	8,47E-06
Errore	33,4%	19,7%	24,4%	11,1%

Provino #39-15	Posizione A	Posizione C	Posizione D	Posizione E
Estensimetro	-3,37E-05	-1,71E-04	3,80E-05	1,87E-04
Risultato FEM	-6,33E-05	-1,57E-04	6,45E-05	1,56E-04
Differenza	2,96E-05	-1,37E-05	-2,64E-05	3,07E-05
Errore	-46,7%	8,7%	-41,0%	19,6%

Provino #39-30	Posizione A	Posizione C	Posizione D	Posizione E
Estensimetro	-6,69E-04	-5,66E-04	6,32E-04	5,63E-04
Risultato FEM	-4,94E-04	-4,69E-04	4,94E-04	4,70E-04
Differenza	-1,76E-04	-9,77E-05	1,38E-04	9,32E-05
Errore	35,6%	20,9%	27,9%	19,8%

tabella 9 – Confronto tra i risultati del modello agli elementi finiti e le deformazioni rilevate sul provino grazie agli estensimetri al momento della chiusura delle griffe superiori.

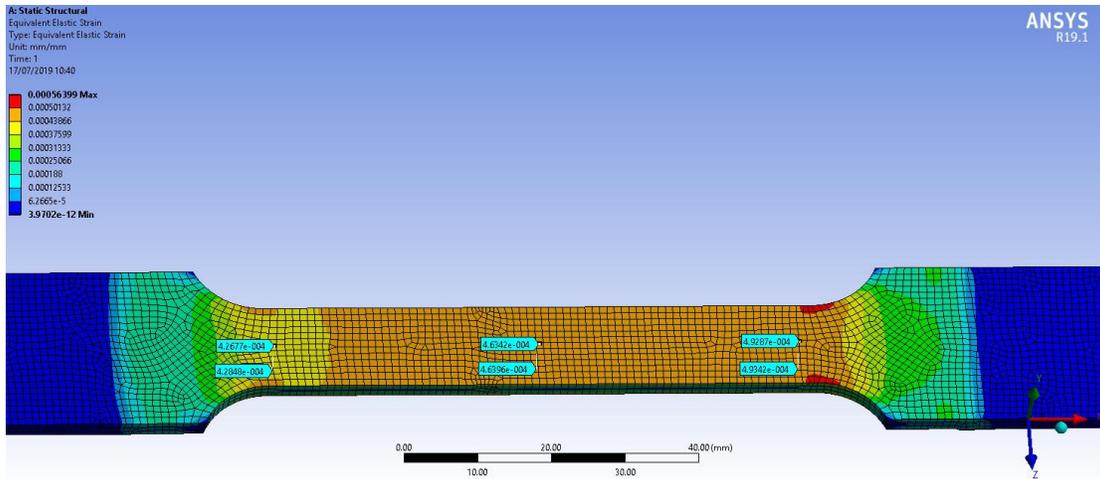


figura 62 – Lettura delle deformazioni equivalenti sul modello agli elementi finiti che simula il comportamento del provino 32-29

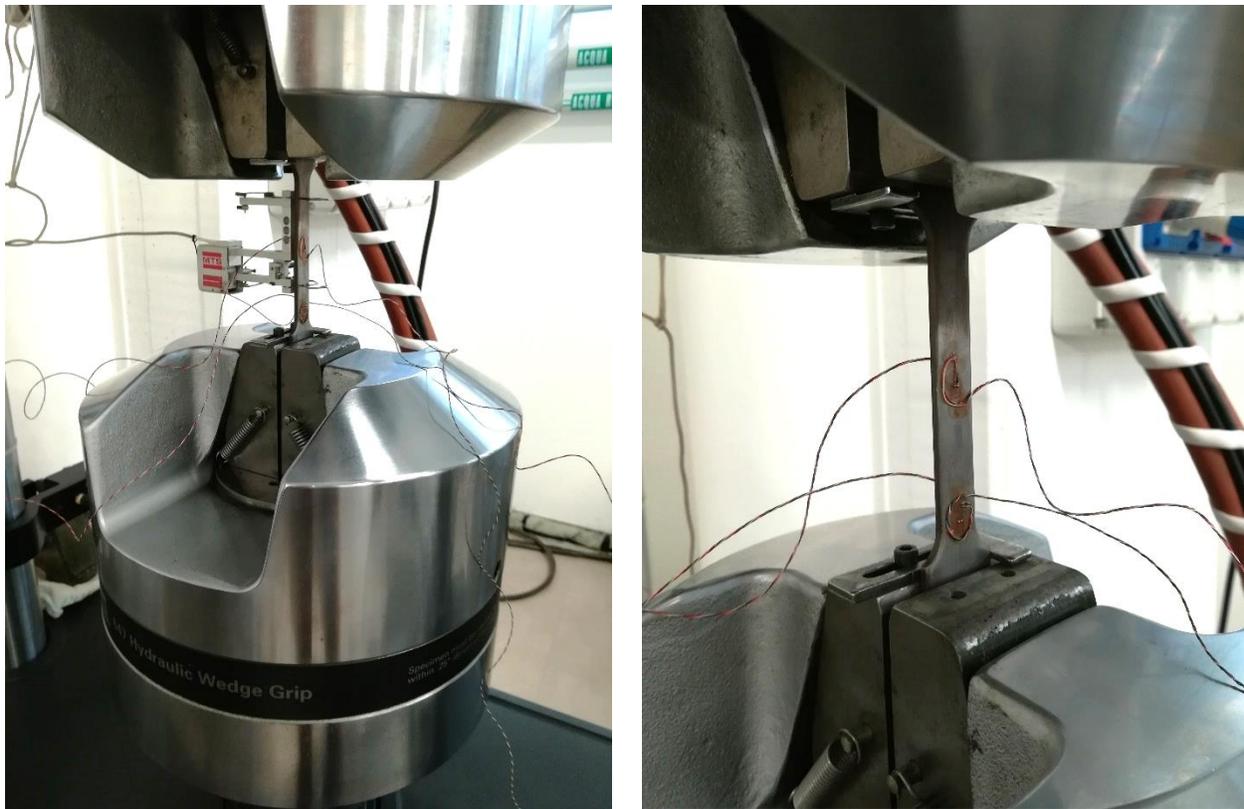


figura 63 – Prova di trazione su provini estensimetrati

4. Rigidezza dei bilancieri

La rigidezza è una caratteristica importante di tutti i componenti del treno valvola, essendo necessaria per garantire il corretto posizionamento della valvola e per assicurarne la corretta chiusura. Alla rigidezza sono inoltre legate le caratteristiche dinamiche del sistema, che vengono tenute in attenta considerazione date le alte velocità a cui lavora. La rigidezza viene calcolata tramite simulazione FEM in fase di progetto, e successivamente verificata durante le prove statiche sui componenti.

Si tratta di una grandezza che presenta una variabilità piuttosto elevata sui componenti, nonché piuttosto difficile da calcolare con precisione tramite una simulazione agli elementi finiti. Capita infatti di trovarsi di fronte a rigidezze misurate sperimentalmente in alcuni casi piuttosto lontane da quelle calcolate in fase di progetto.

In questa sezione viene quindi affrontato il tema della rigidezza secondo diversi punti di vista, cercando di fornire delle risposte su alcuni fenomeni il cui funzionamento non è ancora del tutto chiarito. In particolare, le aree di indagine saranno tre:

- una stima della variabilità del valore di rigidezza su un modello di bilanciere, analizzata mediante misure ripetute della grandezza su uno stesso lotto produttivo
- una valutazione della variazione di rigidezza che si ottiene su un componente cambiando le condizioni di assemblaggio e i sottocomponenti, come meglio spiegato in seguito
- un'analisi delle linee guida aziendali per la simulazione FEM e una valutazione dell'errore sul calcolo della rigidezza rispetto a quella misurata sperimentalmente

L'indagine richiede quindi l'esecuzione di numerose prove sperimentali, da cui si cercherà di ottenere le informazioni desiderate e di comprendere meglio la variabilità della rigidezza di questi componenti.

4.1. Misura sperimentale della rigidezza

La misura della rigidezza viene effettuata durante una prova statica su una macchina idraulica MTS da 25 kN che lavora in compressione. Il componente viene posizionato su una basetta appositamente costruita in modo da riprodurre la posizione in cui il bilanciere è più sollecitato. Il carico della camma viene esercitato sul cuscinetto dall'alto (figura 66). La prova prosegue fino alla rottura del componente o al raggiungimento del carico massimo della macchina, ma per il calcolo della rigidezza viene considerato il solo tratto compreso tra 2 e 5 kN, in cui il comportamento del componente è lineare e vicino ai carichi di esercizio.

La prova viene eseguita secondo la seguente procedura:

1. posizionamento del bilanciere assemblato sulla basetta
2. abbassamento del punzone della macchina fino ad entrare in contatto col componente
3. esecuzione di 5 cicli di carico e scarico per ottenere l'assestamento dei giochi
4. avviamento della prova, che prosegue fino a rottura del componente o al raggiungimento della massima capacità di carico della macchina.

Si ottiene così una curva carico-spostamento verticale avente l'aspetto di quella in figura 64. La rottura del componente può avvenire con una frattura improvvisa o più fratture minori che precedono quella finale. La modalità e il carico di rottura variano tra i diversi modelli di bilanciere, ma possono anche variare in modo non trascurabile tra campioni diversi di uno stesso modello di bilanciere.

La prova è preceduta da una serie di cinque cicli di carico da 0 a 5 kN (carico molto inferiore ai carichi di rottura tipici) per avere un assestamento dei giochi e dei piccoli errori dovuti al posizionamento. L'effetto di tale comportamento è visibile nell'esempio riportato in figura 65.

Dalla curva forza-spostamento ottenuta viene estrapolato il tratto tra 2 e 5 kN per la misura della rigidità lorda. Per ottenere il valore desiderato viene effettuata una regressione lineare tramite foglio di calcolo Excel sui punti costituenti quel tratto di curva, che risulta essere il più lineare (circa 20 punti). La pendenza della retta così ottenuta è il valore della rigidità lorda, cioè comprensivo dei contributi di rigidità della macchina e della basetta. Il metodo secondo cui dal valore così ottenuto vengono eliminati tali contributi descritto al paragrafo 4.1.2.

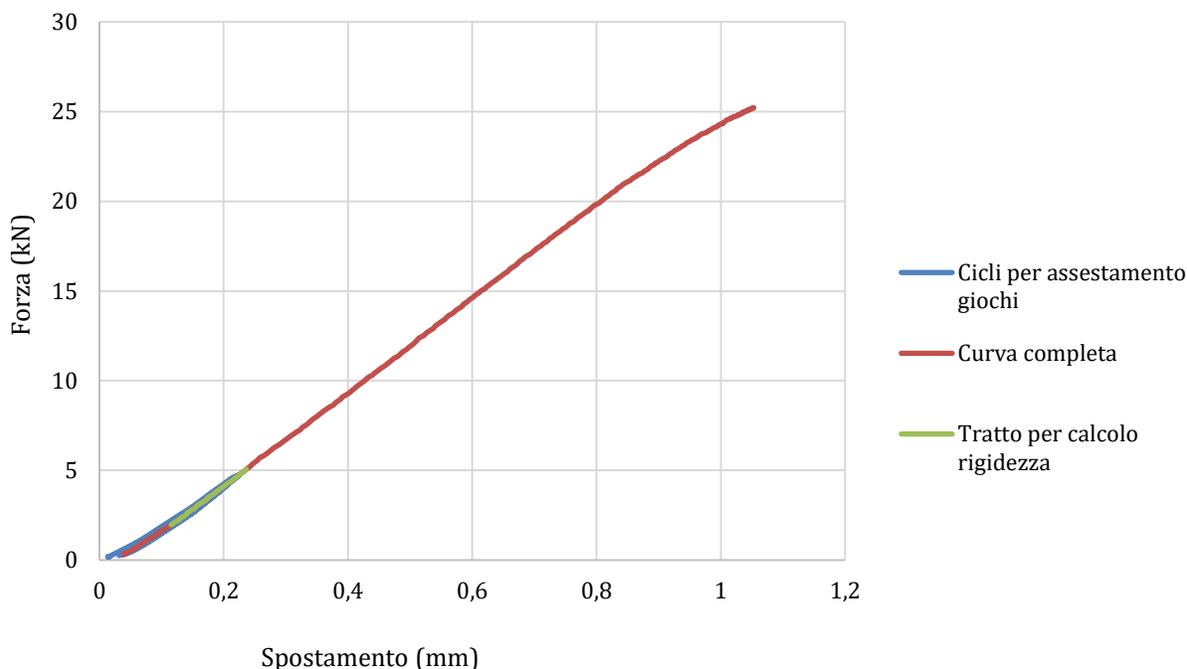


figura 64 – Curva forza-spostamento per un bilanciere, comprensiva dei cicli di assestamento dei giochi e con il tratto in cui è calcolata la rigidità evidenziato in verde

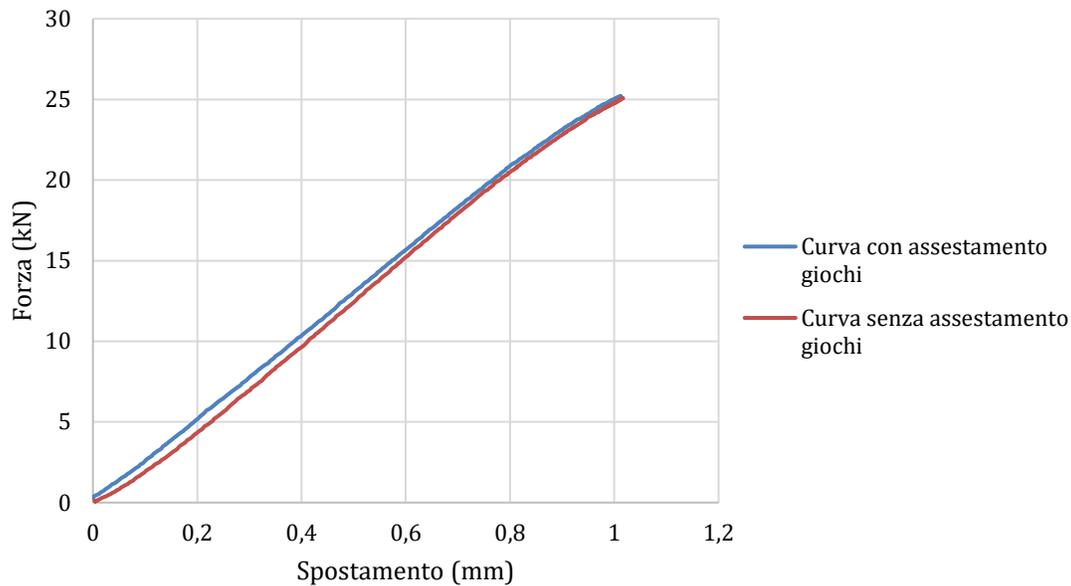


figura 65 – Confronto tra due curve ottenute su uno stesso modello di bilanciare, in blu quella effettuata con i cicli di assestamento dei giochi, in rosso una prova effettuata senza i cinque cicli di assestamento

4.1.1. Strumentazione e condizioni di prova

Le prove vengono eseguite su macchine idrauliche MTS da 25 kN. Tali macchine sono progettate per lavorare in compressione, e sono in grado di eseguire prove statiche oppure di fatica.

La prova si svolge a temperatura ambiente senza l'utilizzo di olio per lubrificare le parti in contatto. La macchina lavora in controllo di spostamento ad una velocità di 0,05 mm/s e i dati vengono acquisiti con una frequenza di 10 acquisizioni al secondo.

Nome macchina	MTS 25 kN 858 Table Top System
Carico massimo in compressione	25 kN
Incertezza sulla forza misurata	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Incertezza sullo spostamento misurato	Classe di taratura 0,5 (0,5% del valore misurato)
Velocità controllo di spostamento	0,05 mm/s
Frequenza di acquisizione dati	10 Hz
Temperatura	Ambiente

tabella 10 – Caratteristiche della macchina utilizzata per le prove di rigidità sui bilanciari e principali parametri di prova

4.1.2. Calcolo della rigidità netta

La rigidità misurata in prova non corrisponde al valore di rigidità del componente. Nel valore misurato rientrano infatti anche altri contributi:

- la rigidità della macchina
- la rigidità del supporto che simula la valvola (tip end)
- la rigidità del supporto che simula la punteria (plunger).

Si ha quindi una rigidità misurata corrispondente al sistema di rigidità in figura 66.

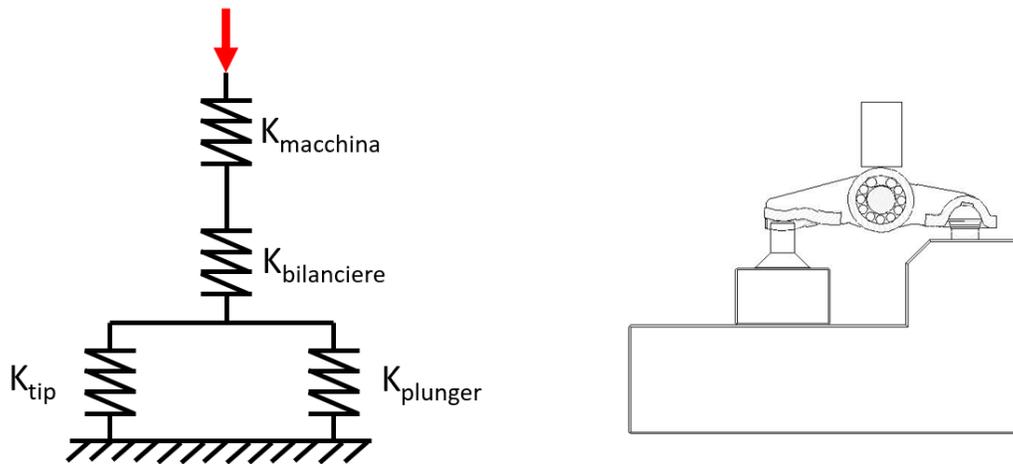


figura 66 – Schematizzazione del posizionamento del bilanciere sulla basetta per prove di rigidità

Per valutare la rigidità netta del solo bilanciere si può quindi pensare di eliminare i contributi non necessari delle altre rigidità nel modo descritto di seguito. La rigidità totale, misurata in prova, è la somma di tre contributi che possono essere considerati in serie:

- il bilanciere
- la macchina di prova
- la basetta che supporta il bilanciere.

La basetta è a sua volta costituita di due supporti su cui poggia il bilanciere, che risultano quindi in parallelo:

- il supporto valvola (tip)
- il supporto punteria (plunger).

Nel sistema di rigidità sussiste quindi la seguente relazione:

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{bilanciere}} + \frac{1}{K_{tip} + K_{plunger}} + \frac{1}{K_{macchina}}$$

Da questa formula, noti i contributi di bilanciere, tip e plunger, si può ricavare la rigidità netta del bilanciere. La rigidità della macchina viene misurata con un'apposita prova mettendo in contatto le due estremità della stessa. Analogamente a quanto spiegato al paragrafo 4.1, la rigidità viene determinata come pendenza della retta ottenuta tramite regressione lineare del tratto di curva

tra 2 e 5 kN. Le rigidezze di tip e plunger vengono misurate in modo simile, posizionando la basetta ed effettuando una prova di carico sui due elementi. Viene pertanto acquisita una rigidezza lorda del tipo:

$$\frac{1}{K_{tip,lorda}} = \frac{1}{K_{tip}} + \frac{1}{K_{macchina}}$$

$$\frac{1}{K_{plunger,lorda}} = \frac{1}{K_{plunger}} + \frac{1}{K_{macchina}}$$

Ricavate da queste le rigidezze nette di tip e plunger, è possibile ricavare la rigidezza netta del componente.

$$K_{tip} = \frac{K_{tip,lorda}K_{macchina}}{K_{tip,lorda} - K_{macchina}}$$

$$K_{plunger} = \frac{K_{plunger,lorda}K_{macchina}}{K_{plunger,lorda} - K_{macchina}}$$

$$K_{bilanciere} = \frac{K_{tot}K_{macchina}(K_{tip} + K_{plunger})}{K_{macchina}(K_{tip} + K_{plunger}) - K_{tot}K_{macchina} - K_{tot}(K_{tip} + K_{plunger})}$$



figura 67 – Prova di rigidezza su un bilanciere tipo 2

4.2. Variabilità della rigidità misurata sui componenti

Come prima indagine si è scelto di prendere in considerazione alcuni componenti già in produzione per valutarne la variabilità della rigidità. Tale tipologia di indagine è stata ispirata dall'osservazione dei dati storici ottenuti dalla Eaton nel corso degli anni su diverse tipologie di componente. Si nota infatti che i valori di rigidità risultano piuttosto distanti l'uno dall'altro sia all'interno di misure su campioni provenienti da uno stesso lotto, sia su lotti diversi testati in periodi di tempo diversi. Si riscontra inoltre una variazione non trascurabile tra i pezzi allo stato di prototipo, solitamente più rigidi, e quelli di produzione.

Ipotizzando quindi che il processo produttivo possa avere una certa influenza sul valore di rigidità, si è deciso di effettuare la misura su un campione più vasto rispetto a quello analizzato solitamente, pari a 2 o 4 pezzi. Con un maggior numero di prove si potrà osservare la distribuzione statistica della rigidità e cercare di comprendere se sia di tipo normale, e quindi se la variazione della grandezza sia casuale. [11] Si vuole inoltre verificare che il processo di misura non determini errori sistematici. Le stesse osservazioni potranno essere fatte sul carico di rottura del componente, nei casi in cui le prove di compressione procedano fino a rottura.

Questo genere di analisi risulta dispendioso sia in termini di tempo che di costi per via delle numerose misure ripetute. Si è quindi scelto di effettuare questo studio solo su alcuni modelli di bilanciante, ipotizzando che la validità delle informazioni acquisite possa essere estesa anche agli altri modelli. La misura viene effettuata su pezzi di produzione già assemblati. Si è scelto di testare 30 pezzi per ogni tipologia di bilanciante presa in considerazione, in modo da avere un campione sufficientemente ampio per verificare la normalità della distribuzione dei valori misurati. [11]

La prova viene effettuata su due part number, scelti per avere due componenti di dimensioni diverse e provenienti da due stabilimenti diversi. Per ognuno dei modelli scelti i 30 pezzi da testare sono stati prelevati da uno stesso lotto produttivo.

I dati ottenuti sono stati elaborati con l'aiuto del software Minitab. In particolare, sono stati osservati i principali parametri e grafici statistici, da cui si è cercato di trarre il maggior numero di informazioni possibile sul comportamento dei componenti.

4.2.1. Test su un bilanciere tipo 2 di grandi dimensioni

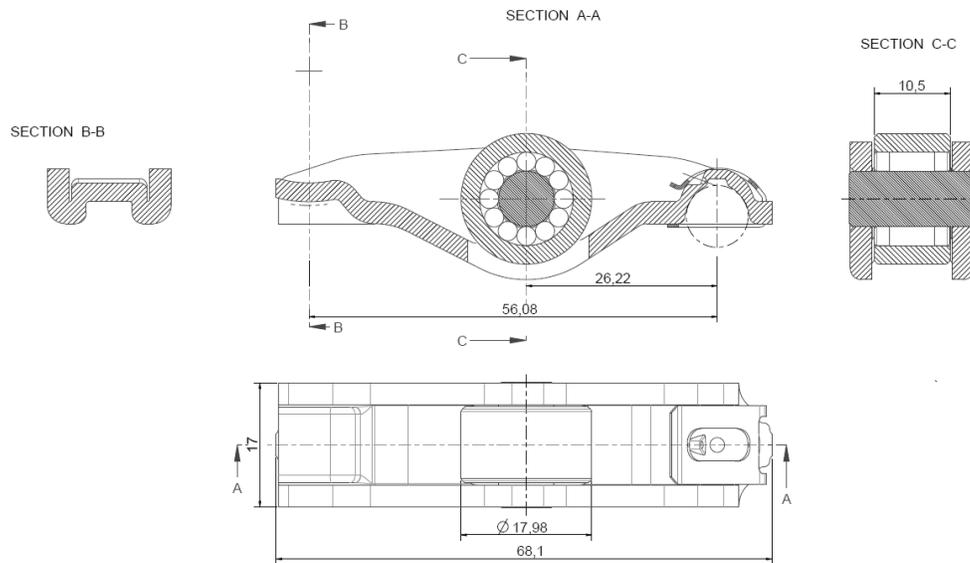


figura 68 – Bilanciere utilizzato per le prove di rigidità in questo paragrafo

Come prima analisi, si è scelto di considerare un bilanciere tipo 2 di grandi dimensioni. Si tratta di un bilanciere in lamiera di spessore 3 mm, con asse cianfrinato e cuscinetto a 12 aghini. Per via delle grandi dimensioni risulta avere una rigidità piuttosto bassa. La prova è stata effettuata su 30 pezzi, che dopo l'analisi effettuata per mezzo del software Minitab hanno fornito i parametri statistici indicati in tabella 11.

L'analisi dei dati sperimentali indica un valore medio della rigidità netta di 36,84 kN/mm con una deviazione standard di 0,789 kN/mm. Il valore di rigidità varia tra un massimo di 38,52 kN/mm e un minimo di 35,21 kN/mm. Osservando l'istogramma in figura 69 si nota una distribuzione dei dati apparentemente normale, ad eccezione dell'area con risultati più bassi, dove sono presenti meno dati rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare da una distribuzione normale. Il test di normalità ha dato esito negativo, con un p-value di 0,324 a fronte di un livello di significatività di 0,05, rifiutando l'ipotesi nulla di avere dei dati che non seguono la distribuzione normale. Tale risultato è confermato anche dal grafico di probabilità normale in figura 70, che presenta valori sufficientemente vicini alla retta inclinata. È stato effettuato anche il test di Grubbs, da cui risulta che non sono presenti outlier con un livello di confidenza del 95%.

Non sono state rilevate rotture, per cui è possibile affermare che il carico di rottura medio è sicuramente superiore a 25 kN, carico massimo applicabile dalla macchina di prova. Inoltre, il controllo metallurgico effettuato su un campione ha indicato che il trattamento di carbonitrurazione è stato effettuato correttamente.

Statistics

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Net stiffness	30	0	36.840	0.144	0.789	35.210	36.343	36.750	37.500	38.520
Gross stiffness	30	0	25.988	0.0718	0.393	25.170	25.740	25.945	26.320	26.820

tabella 11 – Principali risultati sulla distribuzione statistica della rigidità netta e lorda, ottenuti tramite il software Minitab

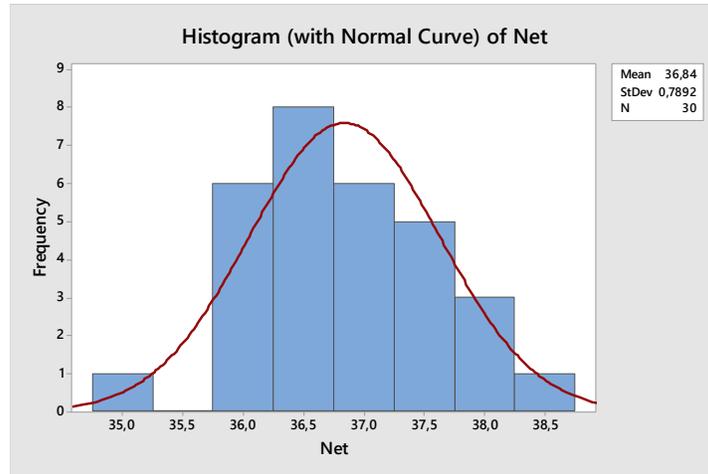


figura 69 – Istogramma della rigidità netta misurata sul componente

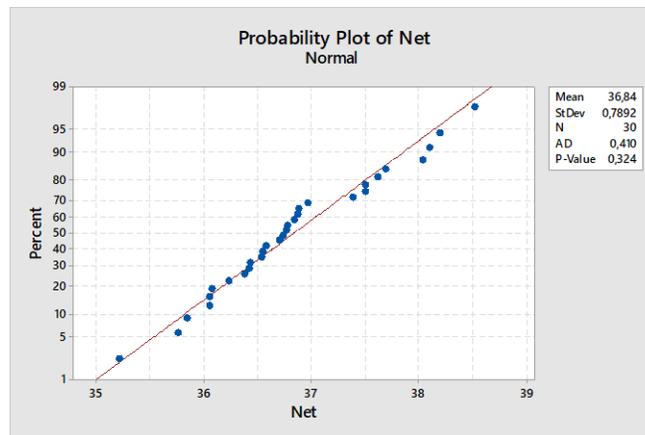


figura 70 – Grafico di probabilità normale della rigidità netta misurata sul componente

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	P
Net	30	36,840	0,789	35,210	38,520	0,828

tabella 12 – Risultati del test di Grubbs per l'identificazione degli outlier, che conferma l'assenza di outlier

4.2.2. Test su un bilanciore tipo 2 di medie dimensioni

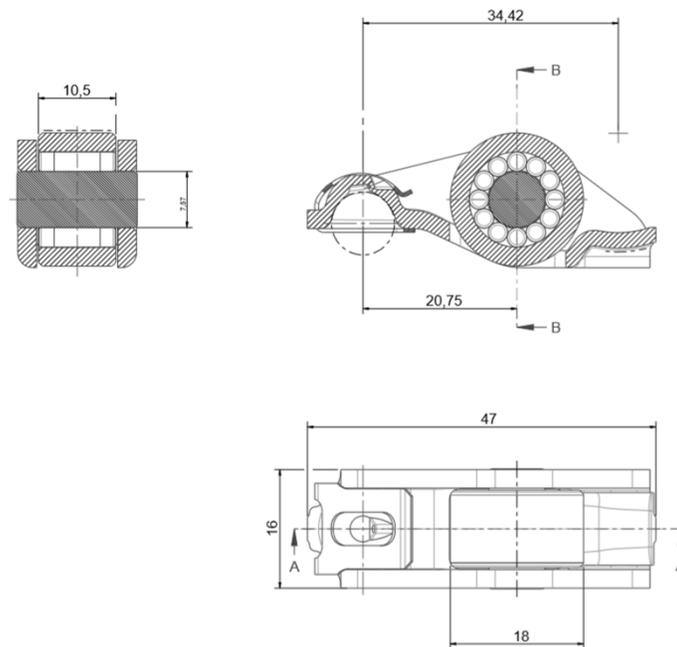


figura 71 - Bilanciore utilizzato per le prove di rigidità in questo paragrafo

Un secondo test analogo a quello del paragrafo precedente è stato effettuato su un bilanciore di minori dimensioni e con minore spessore della lamiera di partenza. Il materiale è lo stesso acciaio da stampaggio carbonitrurato, e anche in questo caso si tratta di un modello con asse cianfrinato e cuscinetto con 12 aghini. Si nota una rigidità sensibilmente più elevata rispetto al caso precedente e una resistenza inferiore. Essendosi infatti concluse tutte le prove con la rottura del componente è stato possibile analizzare anche il carico di rottura.

La rigidità di questo bilanciore sembra seguire una distribuzione normale, come visibile dai grafici e confermato dal p-value di 0,849 del test di normalità, valutato con un livello di confidenza del 95%. Il test di Grubbs non ha evidenziato la presenza di outlier.

Statistics

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Net stiffness (kN/mm)	29	0	65,184	0,246	1,326	61,646	64,445	65,200	65,991	68,100
Breakage load (kN)	29	0	22,194	0,150	0,807	20,532	21,519	22,252	22,967	23,273

tabella 13 – Principali risultati sulla distribuzione statistica della rigidezza, ottenuti tramite il software Minitab

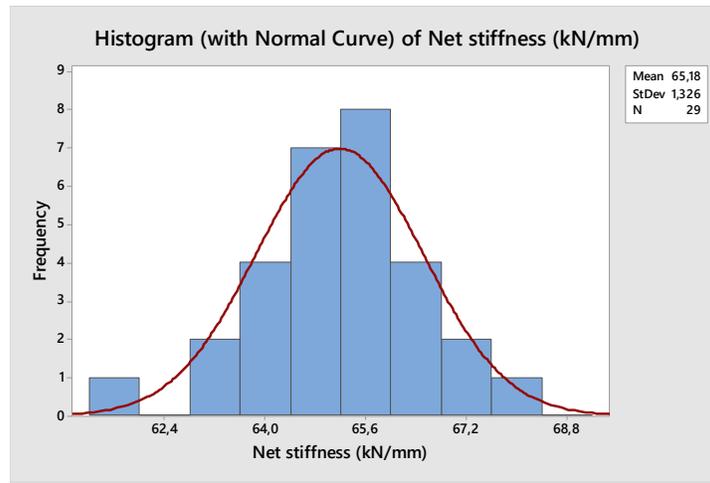


figura 72 – Istogramma della rigidezza netta misurata sul componente

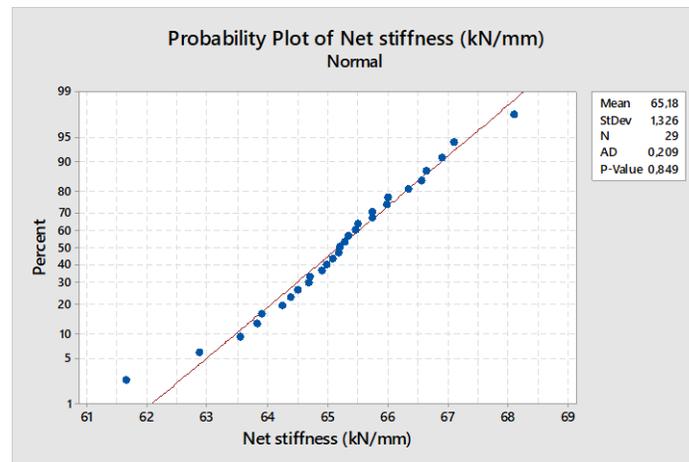


figura 73 – Grafico di probabilità normale per la rigidezza netta del component

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	P
Net stiffness (kN/mm)	29	65,184	1,326	61,646	68,100	0,128

tabella 14 – Test di Grubbs per l'identificazione di outlier, che indica l'assenza di outlier

L'istogramma del carico di rottura e il relativo grafico di probabilità normale mostrano invece una differenza non trascurabile rispetto alla distribuzione normale. Anche il test di normalità ha restituito, con un confidence level del 95%, un p-value di 0,049, sufficientemente basso da confermare l'ipotesi nulla di avere dati che non seguono la distribuzione normale. Si può quindi supporre che la rottura del componente non dipenda da un solo meccanismo di frattura ma da più meccanismi che hanno origine a carichi diversi. Le rotture risultano infatti avere origine tutte nella stessa zona, quella del pattino, ma hanno talvolta aspetto diverso tra loro (figura 76). Inoltre, non essendo verificata l'ipotesi di normalità, non è stata effettuata una ricerca dei possibili outlier.

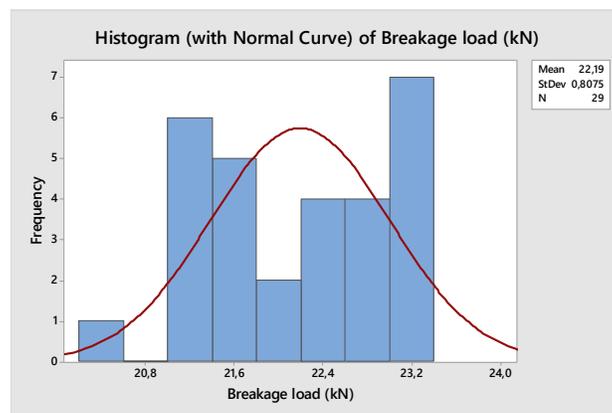


figura 74 – Istogramma del carico di rottura dei 29 pezzi testati; la distribuzione risulta visibilmente diversa da quella normale

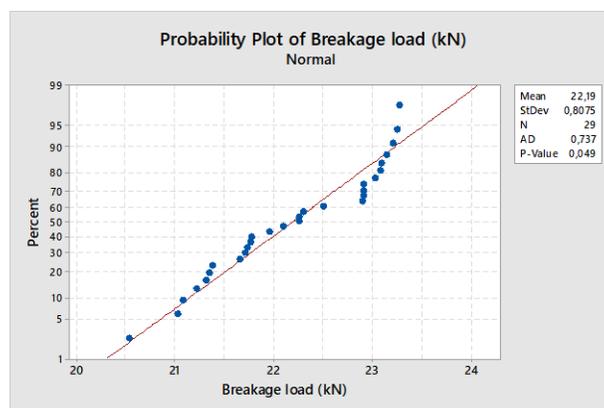


figura 75 – Grafico di probabilità normale per il carico di rottura

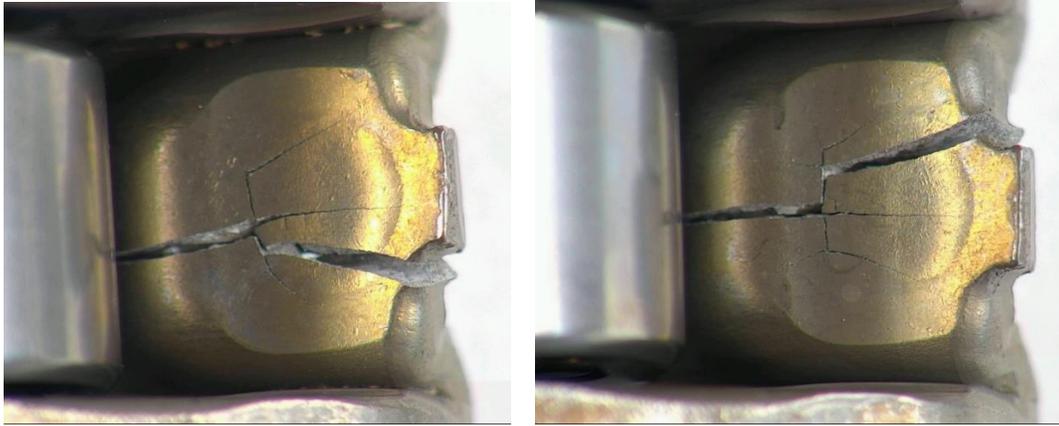


figura 76 – Due esempi di rottura sul pattino riscontrata sui pezzi testati. Tutti gli altri campioni hanno avuto rotture analoghe.

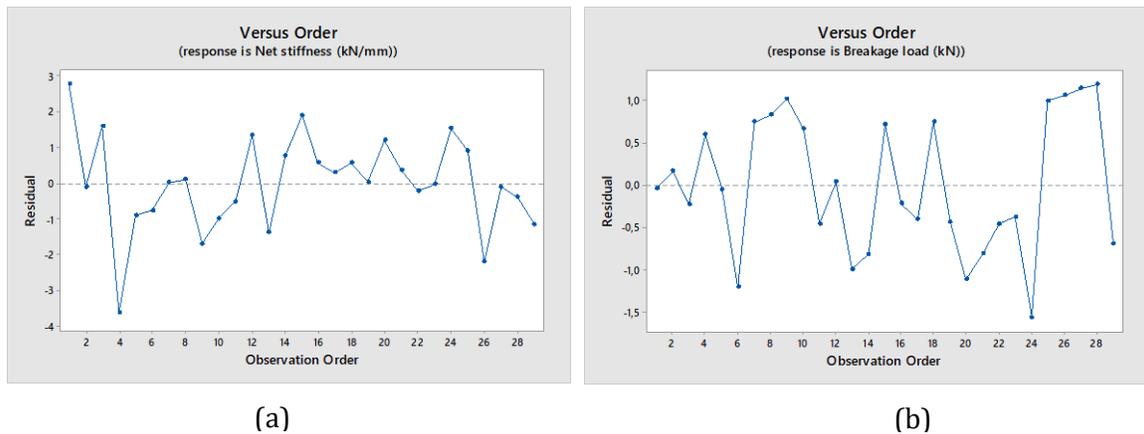


figura 77 – Grafico dei residui (a) per la rigidità netta, (b) per il carico di rottura. Non sono visibili effetti sistematici relativi all'ordine di esecuzione delle prove.

4.2.3. Conclusioni

Entrambi i modelli di bilanciare testati hanno mostrato una distribuzione della rigidità netta di tipo normale, come visibile graficamente dagli istogrammi alle pagine precedenti e come confermato dal test di normalità che è stato effettuato tramite software. Sfruttando quindi la proprietà di normalità si può considerare la deviazione standard come un parametro indicante l'ampiezza della dispersione dei dati [11].

La deviazione standard è pari a:

- 0,79 kN/mm per il bilanciare più grande, avente rigidità media 36,84 kN/mm
- 1,33 kN/mm per il bilanciare più piccolo, avente rigidità media 65,18 kN/mm.

Il valore aumenta quindi nel caso del bilanciare più rigido, ed è pari rispettivamente al 2,1% della rigidità media per il primo componente e 2,0% per il secondo. Come futuro sviluppo di questa indagine potrebbe essere interessante verificare se esista una relazione lineare tra deviazione standard e valore medio della rigidità, ripetendo il test su altri modelli di bilanciare.

Inoltre, non è stata riscontrata la presenza di outlier e non sono stati individuati errori sistematici. Si può quindi dire che il processo di misura sia corretto e non presenti problematiche particolari al di fuori della normale variabilità che la grandezza studiata presenta all'interno del campione testato.

A questo punto è anche possibile valutare quante misure di rigidità siano necessarie per ottenere un valore medio ragionevolmente vicino a quello della popolazione costituita da tutti i pezzi di un certo modello che vengono prodotti. A tale scopo risulta utile sfruttare la teoria degli intervalli di confidenza, secondo cui in una popolazione normale di media μ e varianza σ^2 , la media della popolazione μ appartiene con il 95% di livello di confidenza all'intervallo:

$$\left(\bar{x} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad \bar{x} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Dove \bar{x} rappresenta la media ottenuta da n osservazioni sperimentali [11]. Nei due casi in esame, se si considerano i parametri calcolati con le trenta misure ripetute come rappresentativi dell'intera popolazione, si può calcolare l'ampiezza dei rispettivi intervalli di confidenza in funzione del numero di misure. Si ottiene facilmente che per $n = 4$ misurazioni l'intervallo ha una semiampiezza circa pari alla deviazione standard, e quindi pari al 2% circa della rigidità media. Si ritiene quindi che quattro misurazioni siano sufficienti per ottenere una stima della rigidità media sufficientemente vicina a quella della popolazione reale.

Non si può invece dire che il carico di rottura abbia distribuzione normale. Tra il valore massimo e il minimo, rispettivamente pari a 23,27 kN e 20,53 kN, vi è una differenza di 2,74 kN, pari al 12,3% del carico di rottura medio.

4.3. Influenza delle condizioni di assemblaggio del bilanciare

I vari modelli di bilanciare possono essere assemblati utilizzando diversi sottocomponenti; su uno stesso body possono infatti essere assemblate diverse tipologie di asse e di cuscinetto. Si possono inoltre avere diversi livelli di carbonitrurazione del materiale costituente il body. Si è riscontrato più volte in passato che queste diverse condizioni possono avere effetti sulla rigidità del componente, ma non è stata mai effettuata un'analisi approfondita in merito. Risulta quindi interessante quantificare sperimentalmente con precisione quanto questi fattori possano influire sulla rigidità di un bilanciare assemblato.

Tale indagine può portare utili risultati sia in fase di progetto di un nuovo bilanciere, consentendo di scegliere correttamente i sottocomponenti, sia nel caso si decida di modificare un prodotto esistente utilizzando un componente diverso. Uno stesso body può infatti essere utilizzato su diversi motori, a patto che la geometria del treno valvola sia compatibile e che sia in grado di sopportare i carichi di lavoro. Motori diversi possono tuttavia richiedere delle caratteristiche diverse del bilanciere, portando a scegliere dei componenti diversi che causano una variazione nella rigidità del complessivo.

È necessario specificare che il fattore sicuramente più influente sulla rigidità dei bilancieri è la geometria del body. Tali geometrie possono essere anche molto complesse, con numerosi parametri che possono risultare influenti. È quindi impossibile considerare il fattore geometrico all'interno di un DOE, così come sarebbe impossibile considerare lo spessore della lamiera o le dimensioni del componente, dal momento che ogni modello di body ha le proprie. In linea generale, si sa che si può ottenere un incremento di rigidità aumentando lo spessore della lamiera e riducendo la lunghezza del componente.

Eliminando il fattore geometrico fissando una tipologia di body, la rigidità può ancora subire variazioni degne di nota assemblandolo con componenti di diverso tipo. Si procede quindi con la definizione di un *design of experiment* per valutare l'influenza sulla rigidità degli assi e dei cuscinetti utilizzati, e del tipo di trattamento di carbonitrurazione.

4.3.1. Design of experiment

In base all'esperienza aziendale, i fattori che si ritiene possano influire sulla rigidità di un componente sono indicati in tabella 15:

Fattore	Valore minimo	Valore massimo
Case depth carbonitrurazione	basso	alto
Tipo di asse	flottante	fisso
Tipo di cuscinetto	ad aghini	rullo pieno
Precisione e accuratezza della macchina di prova	non controllabile	
Posizionamento del componente sulla bassetta	non controllabile	
Geometria del bilanciere	costante	
Elasticità della macchina e della bassetta di supporto	costante	
Temperatura	costante	
Materiale	costante	
Tipo di bassetta utilizzato	costante	
Macchina di prova utilizzata	costante	
Spessore della lamiera del body	costante	

tabella 15 – Possibili fattori di influenza sulla rigidità del componente.

Fra tutti i fattori indicati in tabella 15, molti possono essere riferiti al processo di misura della rigidità. Tali fattori vengono mantenuti costanti per evitare possibili errori sistematici sul valore di rigidità, ad eccezione per i possibili errori dovuti alla macchina di prova e alla ripetibilità del posizionamento da parte dell'operatore, che non possono essere tenuti sotto controllo. Fattori riconducibili al bilanciante sono invece il materiale, lo spessore della lamiera utilizzata nel body e la geometria del body stesso, che vengono mantenuti costanti perché tipici del modello di bilanciante preso in considerazione.

Sono invece tre i fattori che si è scelto di tenere in considerazione:

- il case depth del trattamento di carbonitrurazione del materiale, che può variare anche sensibilmente tra diversi lotti produttivi per via delle caratteristiche intrinseche del processo
- l'utilizzo di un cuscinetto ad aghini o in alternativa di un rullo a strisciamento
- l'utilizzo di un asse fisso ottenuto per cianfrinatura oppure di un asse flottante.

Il *case depth* è già stato definito al capitolo 3. Sul disegno del componente è indicato un intervallo di accettabilità piuttosto ampio, perché il trattamento è molto sensibile ai parametri di processo (temperatura, composizione dell'atmosfera e tempo di trattamento), ed è molto difficile ottenere una profondità di carbonitrurazione precisa. [5] Si vuole quindi sapere se, nell'intervallo di accettabilità previsto, si possano riscontrare variazioni della rigidità. Durante le prove di trazione descritte al paragrafo 3.2.3.2 non sono state rilevate differenze notevoli a livello di modulo elastico, motivo per cui si attende una differenza minima del fattore carbonitrurazione sulla rigidità del componente.

Il bilanciante di tipo 2 richiede l'assemblaggio di un cuscinetto in contatto con la camma sul diametro esterno. Il cuscinetto può essere ad aghini (solitamente con 12 aghi), adatto a lavorare ad alte velocità e con basso attrito, oppure un rullo a strisciamento, più resistente ai carichi elevati (figura 78).

L'asse intorno a cui ruota il cuscinetto può essere fissato alle pareti laterali del body tramite cianfrinatura oppure essere flottante, cioè libero di ruotare con gioco rispetto al foro. La prima configurazione è generalmente utilizzata in motori benzina, ed ha il vantaggio di contribuire alla rigidità del bilanciante grazie al vincolamento rispetto alle pareti del body. La configurazione ad asse flottante è invece spesso utilizzata in motori Diesel, poiché l'asse risulta più soggetto a usura per via della minore pulizia dell'olio lubrificante. La possibilità di ruotare dell'asse contribuisce a distribuire l'usura dell'asse su tutta la sua superficie, aumentandone la vita utile.



figura 78 – Cuscinetti per l'assemblaggio di bilancianti tipo 2: (a) cuscinetti ad aghini, (b) rulli a strisciamento



figura 79 – Due body di bilanciere assemblati con diverse modalità: a sinistra trattamento con case depth basso e assemblaggio con asse flottante e rullo pieno; a destra trattamento con case depth alto e assemblaggio con asse fisso e cuscinetto ad aghini

Per mettere in relazione tra loro questi fattori è stato impostato un *design of experiment* fattoriale, i cui risultati sono stati analizzati con l'aiuto del software Minitab. Abbinando tra loro i tre fattori si ottengono otto combinazioni. Per realizzare i campioni da testare sono stati effettuati due trattamenti di carbonitrurazione specifici sul body preso in considerazione. I body trattati sono poi stati assemblati con le due tipologie di cuscinetto ed asse ottenendo le otto varianti indicate in tabella 16.

Per avere delle informazioni che possano essere ritenute generalmente valide per tutta la gamma di bilancieri si esegue la prova su tre diversi body tra quelli in produzione negli stabilimenti Eaton, aventi caratteristiche dimensionali e geometriche diverse. Si spera in questo modo di avere una stima della variazione della rigidità che possa essere estesa anche ad altri componenti. I tre modelli utilizzati sono rispettivamente:

- bilanciere 1: un modello di grandi dimensioni, con bassa rigidità
- bilanciere 2: un modello di media grandezza e buona resistenza, destinato ad applicazioni ad alte prestazioni
- bilanciere 3: un modello di piccole dimensioni, particolarmente rigido

Inoltre, per avere dei risultati migliori è stato necessario ripetere più volte le prove. Il numero di misure replicate per ogni configurazione di assemblaggio è stato fissato a 5 per avere un buon compromesso tra accuratezza e tempo necessario per le prove.

La procedura di prova utilizzata è la stessa descritta al paragrafo 4.1.1. Per ridurre al minimo gli errori di misura le prove sono state effettuate su una stessa macchina e tutte nell'arco di una stessa giornata. I risultati ottenuti riguardano la rigidità del componente, il carico e la modalità di rottura. Delle cinque misure nelle otto configurazioni previste è stato utilizzato il valore medio, riportato nei grafici nelle pagine seguenti per confrontare la rigidità nelle varie configurazioni. Inoltre, è stata tenuta sotto controllo la deviazione standard in ogni configurazione, che nella maggior parte dei casi risulta sufficientemente bassa e paragonabile a quanto trovato durante le misure descritte al paragrafo 4.2, effettuate su un campione decisamente più ampio.

Nome configurazione	Case depth	Asse	Cuscinetto	Numero prove
A	Basso	Flottante	Cuscinetto	5
B	Basso	Flottante	Rullo	5
C	Basso	Fisso	Cuscinetto	5
E	Basso	Fisso	Rullo	5
F	Alto	Flottante	Cuscinetto	5
G	Alto	Flottante	Rullo	5
H	Alto	Fisso	Cuscinetto	5
I	Alto	Fisso	Rullo	5

tabella 16 – Design of Experiment per lo studio della variabilità della rigidità secondo le condizioni di assemblaggio

4.3.2. Risultati sperimentali

Vengono qui raccolti i principali risultati divisi per modello di body utilizzato. Le conclusioni generali dell'indagine sono riassunte al paragrafo 4.3.3.

4.3.2.1. Bilanciere 1

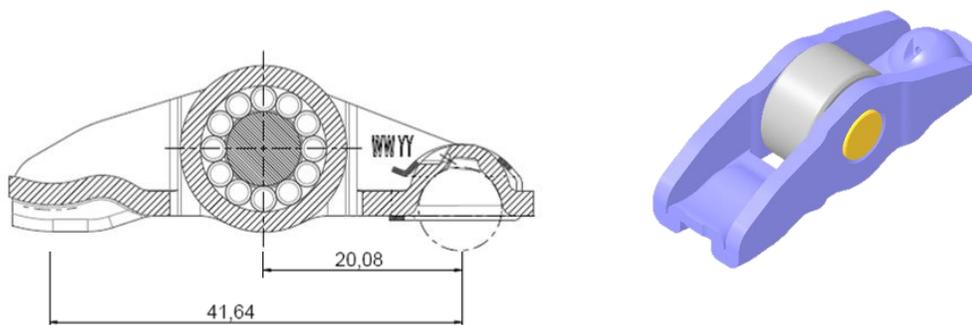


figura 80 – Bilanciere 1

Il primo body preso in considerazione risulta avere una certa variazione di rigidità secondo i componenti utilizzati per l'assemblaggio, con una differenza visibile tra la configurazione più rigida (che risulta essere asse fisso e rullo pieno) e quella meno rigida (asse flottante e cuscinetto ad aghini).

L'analisi dei risultati del DOE indica invece che è statisticamente ininfluenza sulla rigidità con livello di confidenza del 95% l'effetto del trattamento di carbonitrurazione (grafico in figura 86 a sinistra). Tale conclusione risulta in linea con quanto già affermato al paragrafo 3.2.3.

Un diverso comportamento ha invece il carico di rottura del componente, che è stato possibile tenere in considerazione nei casi in cui la prova si è conclusa con la rottura del componente. Nel caso del bilanciere 1 tutte le prove hanno portato il componente a rottura, ad eccezione di tre prove in cui il carico di rottura è risultato superiore a quello massimo della macchina, pari a 25 kN. Trattandosi di casi isolati, si è scelto di non considerare queste tre prove nell'analisi.

I risultati mostrano una scarsa variabilità dei carichi di rottura, con tutti i risultati compresi tra 20 e 25 kN. In particolare, il fattore predominante risulta essere il case depth, mentre gli altri fattori risultano poco o per nulla influenti. Anche in questo caso risulta confermato un risultato già riscontrato al paragrafo 3.2.3, cioè che una maggiore profondità di carbonitrurazione riduce leggermente la resistenza del materiale. Si nota inoltre una diversa modalità di rottura tra i componenti con diverso trattamento: nei body con carbonitrurazione bassa la frattura ha solitamente origine nelle aree sottostanti l'asse, mentre in quelli con carbonitrurazione elevata la rottura avviene in corrispondenza dell'ogiva (figura 81).

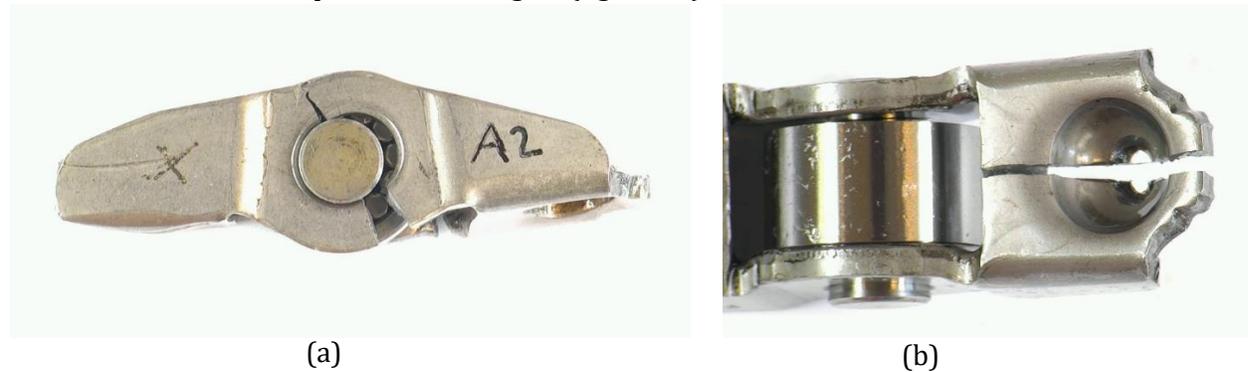


figura 81 – Rotture tipiche riscontrate sul bilanciere 1: (a) per i body con case depth basso, (b) per i body con case depth elevato

4.3.2.2. Bilanciere 2

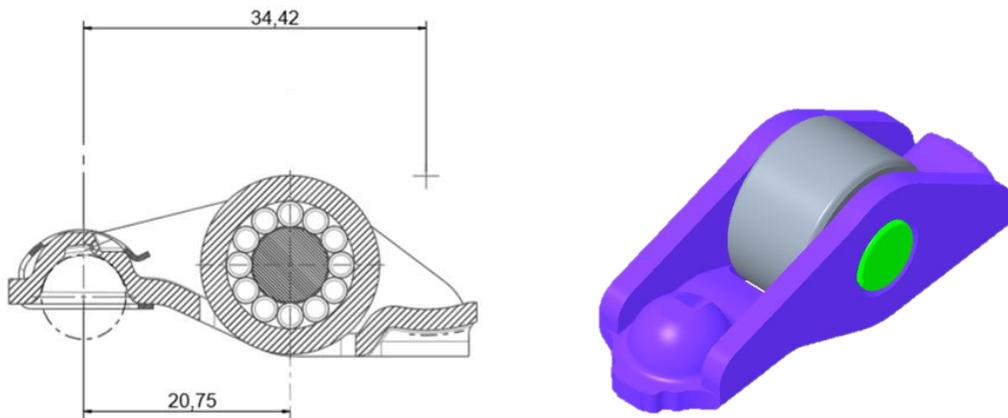


figura 82 – Bilanciere 2

Il secondo bilanciante considerato è caratterizzato da una buona rigidezza e resistenza, in quanto destinato ad applicazioni su motori benzina ad alte prestazioni. Come gli altri bilancianti qui presi in considerazione è ottenuto da una lamiera di spessore 2,5 mm, ma monta un cuscinetto di dimensioni diverse. Molti dei pezzi testati non hanno avuto rottura entro il limite massimo di carico della macchina di 25 kN, per cui l'analisi sul carico di rottura non è stata effettuata.

Questo componente mostra una variazione di rigidezza secondo i fattori considerati più pronunciata rispetto al caso precedente. In particolare, il grafico in figura 86 mostra che i tre fattori sono tutti influenti, anche se con contributi diversi. Il fattore asse risulta nuovamente il fattore più influente, mentre il fattore carbonitrurazione risulta scarsamente influente.



figura 83 – Rotture tipiche del bilanciante 2

4.3.2.3. Bilanciante 3

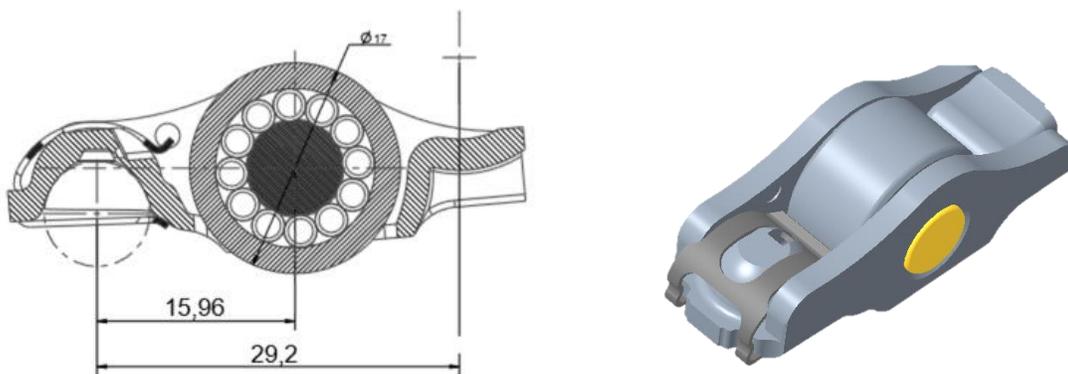


figura 84 – Bilanciante 3

Il terzo bilanciere analizzato è caratterizzato da piccole dimensioni ed elevata rigidità, pertanto risulta il più sensibile alla scelta dell'asse e del cuscinetto (figura 86). Anche in questo caso il fattore più influente sulla rigidità risulta essere il tipo di asse, mentre il case depth risulta ininfluente.

I carichi di rottura risultano sensibilmente più bassi rispetto a quelli degli altri bilancieri testati (figura 87). È stata riscontrata un'unica tipologia di frattura che ha origine nel materiale sottostante l'asse (figura 85). Anche in questo caso il case depth risulta l'unico fattore influente sul carico di rottura, con i componenti a case depth maggiore leggermente meno resistenti di quelli a case depth minore.



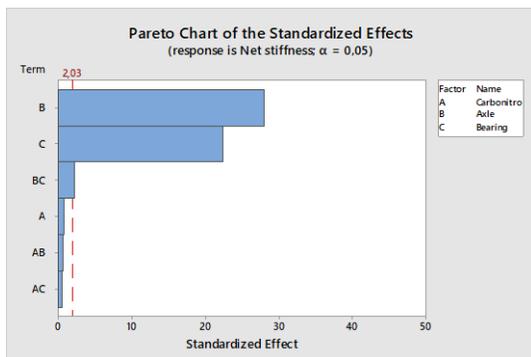
figura 85 – Rottura tipica del bilanciere 3

4.3.3. Conclusioni

L'indagine effettuata ha definitivamente chiarito quale sia l'influenza della scelta dei componenti sulla rigidità dell'assieme, e confermato che le variazioni dovute al trattamento di carbonitrurazione sono trascurabili. In particolare, le principali informazioni acquisite con questa attività sperimentale sono le seguenti:

- l'utilizzo di un asse fisso fornisce un notevole incremento di rigidità rispetto a quello flottante perché contribuisce ad evitare la flessione delle pareti laterali del bilanciere verso l'esterno
- l'utilizzo di un rullo pieno fornisce una maggiore rigidità rispetto a quello del cuscinetto ad aghini, anche se l'incremento è minore rispetto a quello ottenuto col passaggio da asse flottante ad asse fisso
- tale influenza varia a seconda del body utilizzato ed è maggiore su body più rigidi.

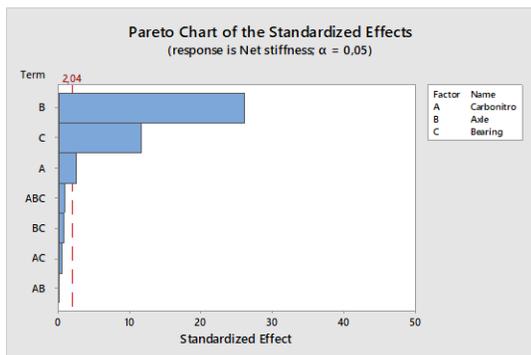
Il carico di rottura dei componenti è invece indipendente dai componenti utilizzati per l'assemblaggio, mentre è lievemente sensibile al case depth di carbonitrurazione. Come già notato nelle prove di cui al paragrafo 3.2.3 e 4.2.2, un case depth maggiore abbassa il carico di rottura medio di circa il 5-10% rispetto al case depth minore.



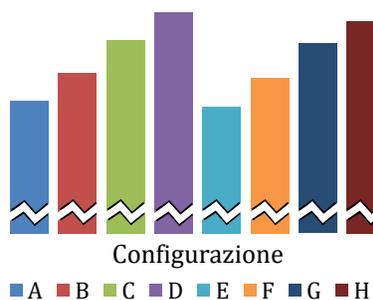
Rigidizza netta (kN/mm)



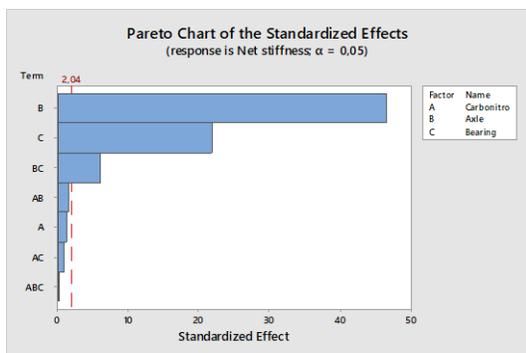
Bilanciere 1



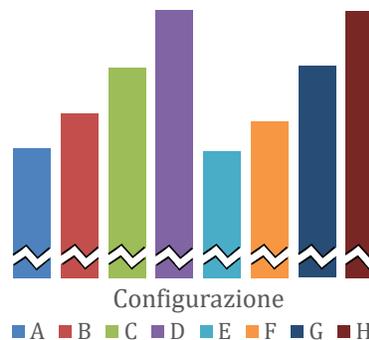
Rigidizza netta (kN/mm)



Bilanciere 2



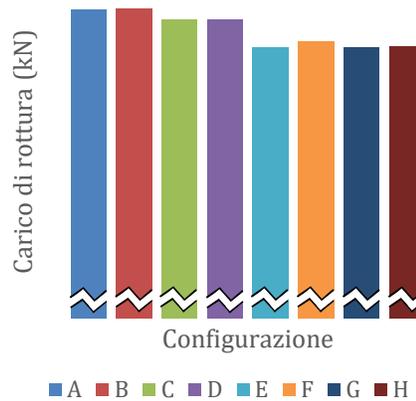
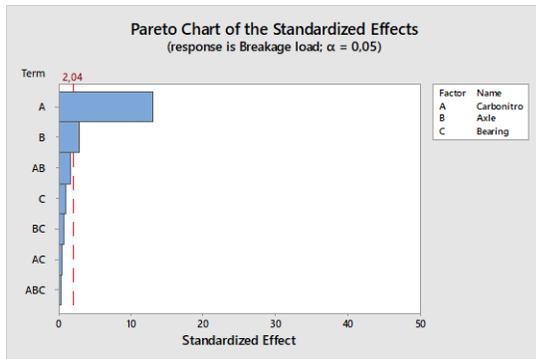
Rigidizza netta (kN/mm)



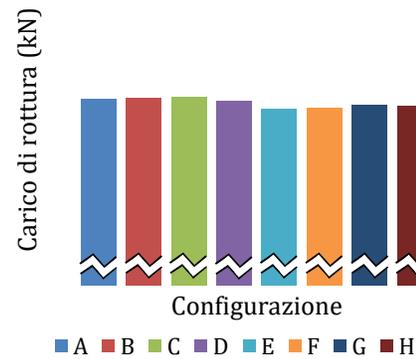
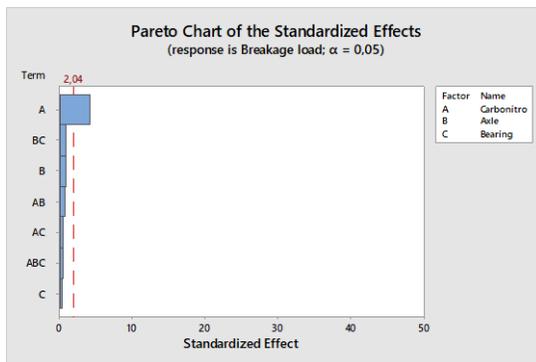
Bilanciere 3

Nome configurazione	Case depth	Asse	Cuscinetto
A	Basso	Flottante	Cuscinetto
B	Basso	Flottante	Rullo
C	Basso	Fisso	Cuscinetto
E	Basso	Fisso	Rullo
F	Alto	Flottante	Cuscinetto
G	Alto	Flottante	Rullo
H	Alto	Fisso	Cuscinetto
I	Alto	Fisso	Rullo

figura 86 – Confronto tra i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui tre bilancieri: a sinistra viene valutata la significatività dei fattori esaminati, a destra sono riportati i valori di rigidizza medi misurati nelle configurazioni prese in esame.



Bilanciere 1



Bilanciere 3

Nome configurazione	Case depth	Asse	Cuscinetto
A	Basso	Flottante	Cuscinetto
B	Basso	Flottante	Rullo
C	Basso	Fisso	Cuscinetto
E	Basso	Fisso	Rullo
F	Alto	Flottante	Cuscinetto
G	Alto	Flottante	Rullo
H	Alto	Fisso	Cuscinetto
I	Alto	Fisso	Rullo

figura 87 - Confronto tra i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui tre bilancieri: a sinistra viene valutata la significatività dei fattori esaminati, a destra sono riportati i valori di carico di rottura medio misurati nelle configurazioni prese in esame.

4.4. Simulazione FEM e differenza rispetto ai risultati sperimentali

Simulare il comportamento di un componente complesso come un bilanciante non è sempre facile. Le difficoltà stanno nella presenza di numerosi contatti tra i vari componenti, nella geometria complessa che talvolta è difficile trasformare in mesh, nella variabilità dimensionale dovuta al processo produttivo. Si desidera che i valori calcolati tramite una simulazione numerica siano il più possibile vicini a quelli misurati sperimentalmente con una prova statica, che avrà anch'essa una variabilità dovuta alla precisione ed accuratezza della misura effettuata. Si è visto inoltre al paragrafo 4.2 come il valore di rigidità sia una grandezza soggetta ad una certa variabilità quando viene valutata su diversi campioni.

Può quindi essere interessante cercare di legare i valori di rigidità ottenuti per via numerica con quelli sperimentali. Questo genere di attività può innanzitutto validare le linee guida per la simulazione del componente descritte al paragrafo 2.2.1. In secondo luogo, si può cercare di stabilire un intervallo corrispondente al possibile errore sulla rigidità valutata tramite simulazione FEM rispetto a quella misurata sperimentalmente.

Per ottenere le informazioni desiderate si è scelto di confrontare i risultati ottenuti in questo capitolo con i risultati delle corrispondenti simulazioni agli elementi finiti. Ad ogni modello è stato associato un errore percentuale tra il valore calcolato e quello sperimentale. I risultati sono raccolti in tabella 17.

	Rigidità netta (kN/mm)				
	FEM	Sperimentale media	Numero prove sperimentali	Differenza	Differenza %
Bilanciante 1	62,2	65,2	29	3,0	4,8%
Bilanciante 2	57,6	66,6	10	9,1	15,7%
Bilanciante 3	45,2	43,2	10	-2,0	-4,4%
Bilanciante 4	42,1	36,8	30	-5,2	-12,4%

tabella 17 – Confronto tra la rigidità netta calcolata per via numerica e determinata sperimentalmente su alcuni bilancianti

Si può quindi affermare che la procedura seguita per la realizzazione del modello FEM fornisce risultati abbastanza in linea con le misure sperimentali. Resta una componente di errore, che ha raggiunto il 15,7% nel caso peggiore, che si può attribuire a diversi motivi tra cui:

- differenza tra la geometria ideale e quella reale dovuta alle tolleranze di lavorazione
- intrinseca variabilità della grandezza misurata (paragrafo 4.2)
- errori di misura
- errori numerici del modello

In base ai dati finora a disposizione non si può dire quali motivi, tra quelli sopra riportati, siano i principali responsabili dell'errore nella valutazione numerica della rigidità. È stato verificato che il

modello numerico comporta degli errori dovuti alla formazione della mesh: provando infatti ad utilizzare diverse tipologie e dimensioni di elemento è stato possibile osservare una variazione della rigidità di alcuni kN/mm. Tale variazione è riconducibile alla difficoltà che l’algoritmo di generazione della mesh incontra in corrispondenza di alcune aree del body con geometria piuttosto complessa, che è stata riscontrata con numerosi messaggi di errore.

Inoltre, non è stato finora possibile associare l’entità dell’errore a caratteristiche particolari del bilanciante, per cui ci si limita ad affermare che la rigidità di un componente calcolata numericamente potrebbe essere maggiore o minore rispetto a quella reale e, in base alle informazioni ottenute finora, tale variazione può arrivare fino al 16% circa.

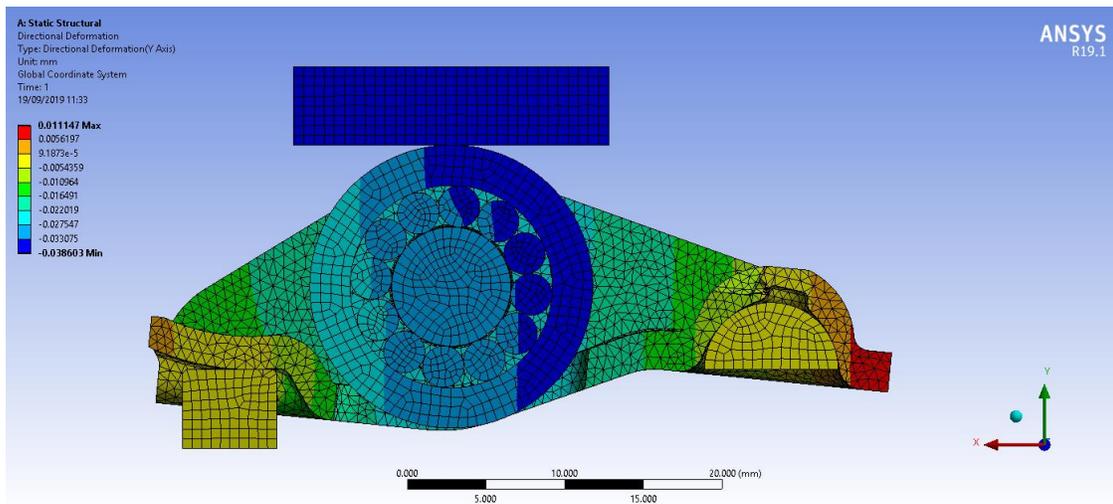


figura 88 – Spostamenti verticali calcolati tramite una simulazione strutturale su ANSYS, utilizzati per calcolare la rigidità

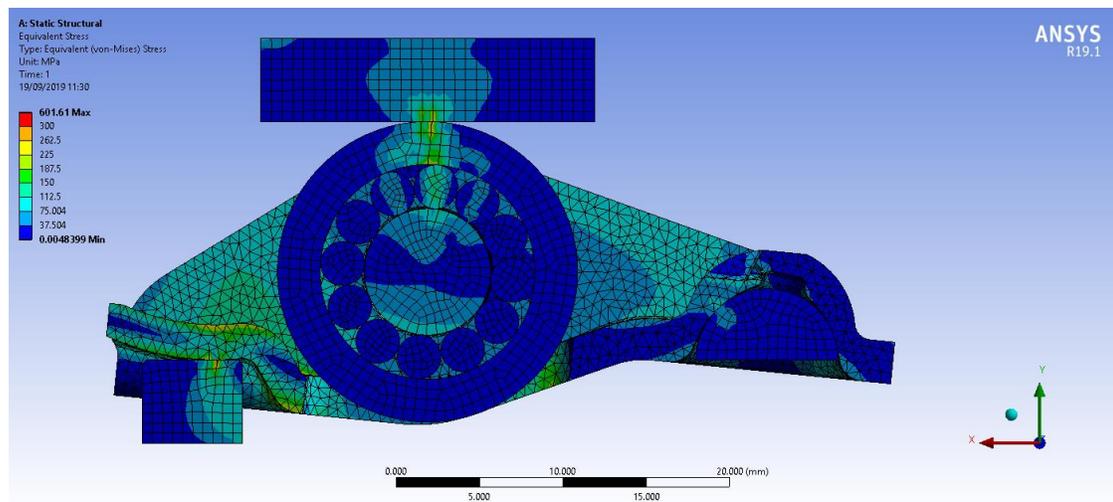


figura 89 – Risultato di una simulazione strutturale su ANSYS: tensione equivalente di Von Mises

5. Conclusioni e principali risultati

Al termine delle numerose prove sperimentali di cui si parla in questo lavoro può essere utile tentare di riassumere i principali risultati ottenuti, in modo da avere un quadro d'insieme sull'intero lavoro e su ciò che grazie a queste attività è stato possibile imparare. Si potrebbe infatti pensare che sia inutile effettuare delle ricerche su materiali già utilizzati da anni o componenti già in produzione, ma questo lavoro dimostra il contrario. Uno sguardo critico su informazioni e procedure consolidate può infatti portare a nuove informazioni o alla correzione di quelle di cui si è in possesso, come talvolta successo durante questo lavoro. Con i nuovi dati ottenuti grazie a queste prove sperimentali è stato infatti possibile aggiornare i database aziendali sulle proprietà dei materiali, modificare ed aggiornare alcune norme e procedure interne all'azienda, quantificare con precisione delle proprietà che precedentemente erano note solamente in modo qualitativo.

I dati acquisiti hanno permesso di iniziare a realizzare il *rocker arm design tool*, presentato al paragrafo 2.3. Tale strumento non è altro che un semplice foglio di calcolo che raccoglie tutte le proprietà di tutti i materiali utilizzati per la costruzione dei bilancieri, oltre ad una serie di funzioni per calcolare in modo automatico il coefficiente di sicurezza a fatica e per fornire una stima sulla variabilità presunta della rigidità basandosi sui risultati della simulazione FEM. In questo modo il progettista è guidato nella scelta dei giusti dati da utilizzare per la verifica del componente, e si ha anche un file in cui poter raccogliere tutte le principali informazioni sul componente progettato.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali, il lavoro si è per il momento concentrato solo sull'acciaio 16MnCr5, ma in futuro verrà portata a termine anche la caratterizzazione degli altri materiali utilizzati. I principali risultati ottenuti riguardano la resistenza statica e a fatica al variare della profondità di carbonitrurazione (capitolo 3).

La resistenza a trazione risulta più alta per i materiali con trattamento meno profondo, con una curva di trazione che mostra un piccolo tratto plastico prima della rottura. I materiali con trattamento profondo hanno invece una rottura a carichi più bassi e con tratto plastico sostanzialmente assente. Le superfici di frattura mostrano un aspetto tipicamente duttile per le parti a cuore, mentre nelle aree superficiali, interessate dalla carbonitrurazione, è stata osservata una frattura intergranulare.

La resistenza a fatica risulta invece leggermente maggiore per il materiale ad elevata profondità di trattamento. Si tratta tuttavia un incremento sorprendentemente basso rispetto a quanto ci si aspettasse prima di effettuare queste prove.

I provini utilizzati per le prove di trazione e di fatica assiale con cui sono stati ottenuti questi risultati hanno riportato delle distorsioni non trascurabili dovute al trattamento di carbonitrurazione. L'effetto di tale distorsione sui risultati è stato valutato tramite misure e calcoli che hanno portato alla conclusione che la distorsione causa un leggero abbassamento della resistenza del materiale. La procedura descritta al paragrafo 3.4 ha consentito di ottenere una correzione dei risultati, ottenendo dei valori in cui viene considerato anche l'effetto dovuto alla distorsione.

Le prove di rigidezza (capitolo 4) hanno invece evidenziato una distribuzione normale della rigidezza, che non presenta particolari errori sistematici o presenza di outlier. Il campo di variazione del valore risulta dipendente dal bilanciere testato.

Inoltre, è stata quantificata la variazione di rigidezza che il materiale subisce al variare dei sottocomponenti utilizzati per l'assemblaggio: mentre l'asse flottante e il cuscinetto ad aghini forniscono una bassa rigidezza, l'asse fisso e il cuscinetto pieno forniscono delle rigidzze maggiori. La variazione di rigidezza è tanto maggiore quanto più rigido il body su cui questi componenti vengono assemblati.

In ultima analisi, il confronto tra le rigidzze misurate sperimentalmente su alcuni componenti in produzione e i corrispondenti valori calcolati tramite simulazioni agli elementi finiti ha portato a trovare errori di questi ultimi che possono arrivare al 16% del valore calcolato.

Bibliografia

- [1] P. P. Milella, *Fatigue and corrosion in metals*, Springer, 2013.
- [2] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] *ISO 18203:2016 Steel — Determination of the thickness of surface-hardened layers*, Genève, Switzerland: ISO, 2016.
- [4] J. R. Davis, *Surface Hardening of steels: Understanding the basis*, ASM international, 2002.
- [5] ASM international, *Metals Handbook Ninth Edition*. Volume 4: Heat Treating.
- [6] *EN standard 10263:2017 Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion*, Brussels, Belgio: CEN-CENELEC, 2017.
- [7] C. Cibaldi, *I criteri di scelta e di trattamento degli acciai da costruzione e da utensili*, Analisi di Cibaldi Dr. Cesare & C. snc; Studio associato Biasi Dr. Antonia & C..
- [8] *ISO 6892:2016 Metallic materials — Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature*, Genève: ISO, 2016.
- [9] J. Roesler, H. Harders e M. Baeker, *Mechanical behaviour of engineering materials*, Springer, 2006.
- [10] *ISO standard 12107:2012 Metallic materials - Fatigue testing - Statistical planning and analysis of data*, Genève: ISO, 2012.
- [11] S. M. Ross, *Statistica per l'ingegneria e le scienze*, Apogeo, 2015.
- [12] D. S. Paolino, G. Chiandussi e M. Rossetto, «A unified statistical model for S-N fatigue curves: probabilistic definition» *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, n. 36, pp. 187-201, 2012.

Ringraziamenti

Un grazie alla Eaton S.r.l. e a tutti i suoi lavoratori per la grande opportunità che mi è stata concessa permettendomi di svolgere questo lavoro. Presso l'azienda ho trovato grande disponibilità, e una grande occasione per applicare ciò che ho studiato in questi anni ed imparare molto.

Grazie a tutti coloro che mi hanno aiutato in questi mesi, in particolare al tutor aziendale Matteo Costantini, che mi ha supportato in ogni fase di questo percorso. Insieme a lui è doveroso ringraziare tutti coloro che hanno lasciato una piccola o grande traccia in questo lavoro, e che sono troppi per essere nominati uno ad uno. Tra questi ringrazio soprattutto i membri dei reparti VT core engineering, laboratori, testing, machining, prototipi, design room, metrologia, acquisti. Un ringraziamento particolare a Ugo Virano, l'esecutore materiale di tutte le prove di cui si parla in questo lavoro.

Vorrei inoltre ringraziare il prof. Davide Paolino, il cui aiuto è stato fondamentale per lo svolgimento di tutto il lavoro, e il prof. Sandro Moos, grazie a cui questa esperienza ha avuto inizio.

Infine, un grande grazie alla mia famiglia, a Elena e ai miei amici, che mi hanno sempre sostenuto in questi cinque anni di Politecnico.