



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

ESECUZIONE ED ELABORAZIONE DI PROVE DI TRAZIONE
STATICHE E CICLICHE SU PROVINI IN ACCIAIO RIVESTITI
PER VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DELLO SMALTO

EXECUTION AND PROCESSING STATIC AND CYCLIC
TENSILE TESTS ON COATED STEEL SPECIMENS FOR
EVALUATION OF ENAMEL RESISTANCE

RELATORE:

PROF. MARCO SASSO

TESI DI LAUREA DI:

SANCHIONI NICOLÒ

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

*Ai miei genitori,
Mamma papà
non mi avete fatto mai mancare niente
spero di avervi reso orgogliosi di me
vi voglio un mondo di bene*

I. Ringraziamenti

Oggi, 7 luglio 2026, si conclude il percorso più difficile e più formativo mai affrontato in tutta la mia vita. Un percorso iniziato senza neanche sapere se fosse quello giusto per me. Un percorso che mi ha cambiato, che mi ha cresciuto e che mi ha fatto capire quanto sia importante credere nei propri obiettivi senza mai mollare.

Molto probabilmente da solo non sarei riuscito a concluderlo; in realtà, da solo, non so nemmeno se l'avrei iniziato questo percorso. Dico questo perché in questi anni ho capito quanto sia importante avere delle persone al proprio fianco che ti sostengano, che ti spronano a fare di più, che ti aiutino quando non sai che scelte prendere. Ci tenevo, dunque, a esprimere un ringraziamento speciale a tutte queste persone.

A Mamma papà

ogni giorno mi avete trasmesso l'amore che ogni figlio vorrebbe, non ce mai stato un momento in cui non avete pensato a me, non saprei mai come ringraziarvi abbastanza. Il vostro affetto e sostegno rappresentano le fondamenta di ogni mio percorso di vita. Vi amo con tutto il cuore.

A nonno Giorgio nonna Adriana

grazie che riuscite a trasmettermi la tranquillità e la serenità necessaria quando più ne ho bisogno. Questo percorso mi ha fatto capire quanto io sia fortunato a vedervi e stare vicino a voi tutti i giorni.

La vostra felicità è l'unica cosa che conta per me, vi voglio tanto bene.

A nonna Liliana e nonno Luciano

nonno so che mi sta guardando da lassù, mi dispiace per non esserti stato vicino quando avrei dovuto farlo, me lo rimpiangerò per sempre, ti voglio tanto bene anche se non sono riuscito a dimostrartelo abbastanza, mi mancano le tue battute a tavola, le patatine fritte buonissime che preparavi dentro la stanzetta fuori casa, mi manchi davvero tanto nonna grazie per la tua gentilezza e amore che mi dimostri ad ogni telefonata, ad ogni pranzo o cena di famiglia; mi dispiace di non venire a trovarti spesso, mi impegnerò di più per dimostrarti quanto io ti voglia bene.

Ai miei amici di compagnia e del tennis

grazie per tutti i momenti passati insieme fino ad oggi, per le risate che mi avete fatto fare e per la leggerezza che mi avete trasmesso nelle giornate più pesanti; quando sono con voi mi sento davvero me stesso e felice quindi vi ringrazio, spero di vivere tanti altri momenti da ricordare con voi, vi voglio bene a tutti.

Ai miei amici del corso

vi ringrazio per la compagnia mostrata in questi anni di studio e università, seguire le lezioni senza di voi non sarebbe stato lo stesso; grazie delle giornate passate a studiare insieme, grazie delle battute e degli scherzi che hanno alleggerito il grosso peso dei libri.

Alla mia ragazza Vanessa

nonostante tu sia entrata nella mia vita a percorso già avviato sei riuscita a rendermelo migliore giorno dopo giorno; grazie per l'affetto e il supporto mostrato in questi anni, grazie per la pazienza nei momenti più difficili, grazie per stare al mio fianco, sei mio posto sicuro.

II. Sommario

I. Ringraziamenti	1
II. Sommario	i
III. Elenco delle figure	iii
Abstract	5
1 Introduzione	6
1.1 Stato dell'arte del materiale	6
1.1.1 Generalità e produzione dello smalto ceramico	6
1.1.2 Proprietà degli acciai smaltati	8
1.1.3 Applicazioni dello smalto ceramico	11
1.2 Scaldabagni Ariston	12
1.2.1 Fatigue test sui serbatoi	14
2 Caratterizzazione meccanica	16
2.1 Generalità sulla caratterizzazione meccanica dei materiali	16
2.1.1 Prova di trazione statica	17
2.1.2 Fatica meccanica e prove di caratterizzazione	24
2.2 Macchina di trazione e funzionamento	28
3 Digital Image Correlation (DIC)	32
3.1 Principio di funzionamento della DIC	32
3.2 Calibrazione del sistema ottico	34
3.3 Applicazione del pattern speckle	36
4 Esecuzione delle prove sperimentali	38
4.1 Produzione e geometria dei provini	38
4.2 Preparazione prova di trazione statica	41
4.2.1 Preparazione e serraggio del provino	41
4.2.2 Allestimento area d'esecuzione della prova	44
4.2.3 Avviamento prova ed acquisizione dei dati	46
4.3 Preparazione prova di trazione a fatica	48
4.3.1 Allestimento provino e banco di prova	48
4.3.2 Avviamento prova ed acquisizione dati	50
4.4 Criticità riscontrate durante i test	52
5 Elaborazione dei dati e risultati	54
5.1 Elaborazione dati prove di trazione statiche	54
5.1.1 Curve caratteristiche del materiale e interpretazione	55

5.2	Elaborazione dati prove di trazione a fatica	66
5.2.1	Curve di fatica e interpretazione	67
6	Conclusioni	72
6.1	Obiettivi raggiunti	72
6.2	Sviluppi futuri	73
7	Bibliografia	74

III. Elenco delle figure

Figura 1: Processo produttivo	8
Figura 2: Componenti serbatoio.....	13
Figura 3: Ciclo di variazione della pressione.....	15
Figura 4: diagramma tensioni nominali-deformazioni nominali	19
Figura 5: Comportamento materiale allo scarico in fase anelastica	20
Figura 6: Confronto curva reale e nominale	24
Figura 7: Esempio di superficie di rottura per fatica	25
Figura 8: Sollecitazione ciclica prova di trazione a fatica	26
Figura 9: Curva di Wöhler	28
Figura 10: Macchina idraulica ItalSigma UNIVPM	29
Figura 11: Impianto prove di trazione	30
Figura 12: Pannello di controllo software di comando	31
Figura 13: Sistemi di acquisizioni immagini	33
Figura 14: Piastra di calibrazione utilizzata per le prove di trazione statiche	35
Figura 15: Pattern speckle applicato al provino	37
Figura 16: Provini PG e PP.....	40
Figura 17: Blocco provino e afferraggi metallici.....	42
Figura 18: Montaggio blocco su morse macchina	43
Figura 19: Allestimento area d'esecuzione prova di trazione statica	45
Figura 20: Pannello del generatore di rampe	47
Figura 21: Pannello di acquisizione dei dati.....	47
Figura 22: Allestimento banco prova a fatica	49
Figura 23: Pannello generatore di funzioni prove a fatica.....	51
Figura 24: Raccordi portagomma.....	52
Figura 25: Velocità rampa PG1.....	55
Figura 26: Velocità Rampa PG2	56
Figura 27: Curva F-S PG1	57
Figura 28: Inizio rottura smalto PG1	58
Figura 29: Fine rottura smalto PG1	59
Figura 30: Curva F-S PG2	59

Figura 31: Inizio rottura smalto PG2.....	60
Figura 32: Fine rottura smalto PG2.....	61
Figura 33: Curva sigma-epsilon PG1	61
Figura 34: Curva sigma-epsilon PG2	62
Figura 35: Mappa di deformazione PG1	63
Figura 36: Condizione smalto PG1	64
Figura 37: Mappa di deformazione PG2	64
Figura 38: Condizione smalto PG2	65
Figura 39: Grafico F-t zoom su 4 cicli	67
Figura 40: Grafico S-t zoom su 4 cicli	68
Figura 41: Inizio rottura smalto prova a fatica.....	69
Figura 42: Grafico F-t sottocampionato	70
Figura 43: Grafico S-t sottocampionato	70

Abstract

Gli smalti ceramici sono ampiamente utilizzati come rivestimenti protettivi per una vasta gamma di dispositivi, con campi di applicazione che spaziano dall'industria al settore sanitario. Tuttavia, a causa della loro fragilità, è fondamentale comprendere come questi rivestimenti rispondano alle deformazioni del substrato di materiale sottostante durante le condizioni di esercizio, al fine di prevedere e limitare al meglio l'innesco di cricche o distacchi.

Il seguente lavoro di tesi, svolto presso l'Università Politecnica delle Marche, negli uffici e nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e delle Scienze Matematiche, ha come obiettivo principale la caratterizzazione meccanica di provini in acciaio rivestiti con smalto ceramico protettivo. Nello specifico lo studio mira a valutarne la resistenza e a monitorare l'evoluzione del danneggiamento sotto diverse condizioni di carico.

L'indagine sperimentale si è basata sull'esecuzione di prove di trazione statiche e a fatica integrate con l'uso di tecniche ottiche avanzate non a contatto, come la Digital Image Correlation (DIC) che ha permesso di misurare e mappare gli spostamenti e le deformazioni dei campioni presi in esame.

Le attività svolte hanno compreso la preparazione dei provini, l'allestimento del setup sperimentale, l'acquisizione simultanea dei dati provenienti dai sensori della macchina e dalle telecamere e l'elaborazione delle informazioni raccolte tramite script MatLab dedicati che hanno permesso di correlare le curve caratteristiche del materiale con l'osservazione fisica del degrado dello smalto.

L'approccio adottato ha permesso di relazionare con successo le fasi di deformazione del substrato in acciaio con l'inizio e la propagazione delle rotture nello smalto, conferendo al lavoro svolto il ruolo di efficace strumento di analisi per l'ottimizzazione progettuale dei dispositivi smaltati.

1 Introduzione

1.1 Stato dell'arte del materiale

1.1.1 Generalità e produzione dello smalto ceramico

Lo smalto ceramico è, oggi, uno dei rivestimenti superficiali più apprezzati per proteggere metalli facilmente deteriorabili, quali acciaio o ghisa, o per conferire a manufatti di svariati materiali caratteristiche chimiche, fisiche ed estetiche di pregio.

Si parla di un rivestimento inorganico, di natura vetrosa, che viene applicato sulle superfici di materiali metallici a scopo protettivo, funzionale e/o decorativo. Il costituente primario del rivestimento è la *fritta* dello smalto, una miscela di materie prime inorganiche di origine minerale o artificiale, costituita principalmente da ossidi e sali semplici (silicati, borati, ecc.).

Fusa in appositi forni a temperature comprese tra i 1200 °C e i 1400 °C, viene raffreddata bruscamente mediante caduta diretta in acqua o attraverso il passaggio su rulli raffreddati a liquido per poi essere frantumata in scaglie. Queste fasi di lavoro inducono nel materiale elevata disomogeneità a causa della presenza di residui di materie prime non dissolte, bolle e tensioni anomale.

Al fine di correggere tali difetti, la fritta viene sottoposta a un processo di macinazione che può essere eseguito a secco oppure a umido; in quest'ultimo caso, la lavorazione porta alla formazione di una sospensione acquosa definita 'torbida'.

Durante questa fase, per ottenere lo smalto desiderato, alla fritta vengono aggiunti pigmenti, fondenti, materiali argillosi e altre sostanze. La formulazione specifica varia in funzione della tecnologia di applicazione (spruzzatura elettrostatica della polvere, flow coating, immersione a umido, ecc.), del substrato metallico e della relativa temperatura di cottura, nonché in base al colore e all'aspetto finale richiesti.

In questo modo, le numerose reazioni che avvengono all'interno della miscela la rendono un prodotto già stabilizzato.

Inoltre, per ottenere una buona aderenza nel tempo tra metallo e smalto e disporre di una superficie con caratteristiche chimiche e fisiche adatte, è importante che il supporto metallico venga precedentemente pretrattato.

Se il materiale del supporto è acciaio o ghisa allora si procede con un ciclo di pretrattamento caratterizzato da:

1. **Sgrassaggio:** volto all'eliminazione di oli, grassi e residui di lavorazione.
2. **Decapaggio acido:** necessario per l'asportazione degli strati di ossido superficiale come ruggine o calamina.
3. **Nichelatura:** fase in cui si deposita un sottile film di nichel metallico sulla superficie per favorire l'adesione chimica dello smalto.
4. **Neutralizzazione:** volta a neutralizzare gli eventuali residui acidi del decapaggio, prevenendo così la rapida ossidazione del metallo.
5. **Lavaggio e asciugatura finale:** si eseguono cicli di lavaggio interposti tra ogni singola fase chimica con conseguente asciugatura finale in forni ad aria calda per preparare il pezzo all'applicazione dello smalto.

Terminato il ciclo di pretrattamento, si procede con l'applicazione dello smalto, a secco o a umido, sulla superficie metallica da rivestire. Nel caso in cui si utilizzi la sospensione acquosa (torbida), il pezzo viene preventivamente sottoposto a una fase di essiccazione. Successivamente, il campione subisce un trattamento termico, denominato cottura o vetrificazione, per un periodo di tempo opportuno.

Per i componenti in acciaio, l'intervallo di temperatura è tipicamente compreso tra 780 °C e 850 °C, con picchi fino a 890 °C nel caso dei serbatoi. Durante questa fase, lo smalto fonde e interagisce con lo strato di ossido formatosi sulla superficie del metallo, innescando complesse reazioni chimico-fisiche che legano intimamente il rivestimento all'acciaio.

Il processo di smaltatura si conclude con la solidificazione del materiale indotta dal raffreddamento. Al fine di stabilizzare la matrice vetrosa e consolidare le fasi cristalline, il profilo termico prevede una velocità di raffreddamento iniziale più elevata. [1]

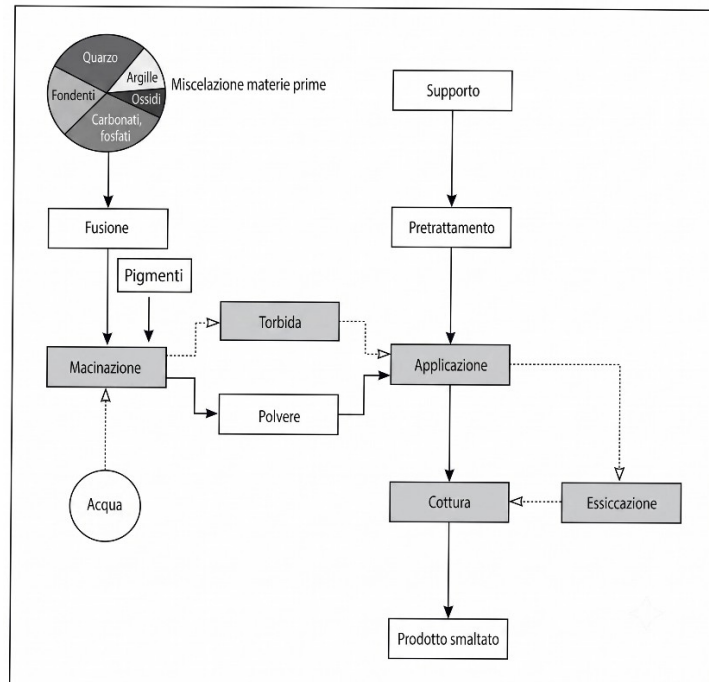


Figura 1: Processo produttivo

1.1.2 Proprietà degli acciai smaltati

L'applicazione dello smalto ceramico su un substrato di materiale metallico porta alla formazione di un nuovo materiale composito ad alte prestazioni, capace di coniugare le proprietà intrinseche del vetro con quelle del metallo di base.

Le caratteristiche degli acciai idonei a tale processo sono codificate dalla norma **EN 10209**. In particolare, in base alla loro attitudine alla smaltatura, si classificano in tre categorie principali: acciai al carbonio, acciai decarburati e acciai Interstitial Free (IF).

Le caratteristiche del rivestimento ceramico devono essere studiate tenendo conto delle trasformazioni chimico-fisiche che il materiale subisce a livello di interfaccia durante i cicli di produzione.

Il processo di cottura e vetrificazione comporta un cambiamento a livello di composizione, proprietà e struttura dello smalto di partenza generando uno strato vetrificato complesso e disomogeneo, caratterizzato dalla presenza di difetti, particelle residue, e bolle di gas.

Questa particolare morfologia post-cottura rende inaffidabile e approssimativo l'utilizzo di metodi matematico-empirici per poter stimare teoricamente le proprietà dello smalto a partire dalla semplice composizione percentuale degli ossidi originari. Dunque, per analizzarne qualità e resistenza, risulta indispensabile la caratterizzazione sperimentale pratica in laboratorio.

La *European Enamel Association* (EEA) ha redatto un manuale intitolato *Requisiti di Qualità*, il quale rappresenta lo standard industriale di riferimento a livello europeo per la produzione di componenti smaltati. Il documento raccoglie quasi 50 metodi di prova standardizzati, basati principalmente sulle normative **EN ISO**. L'applicazione di questi test permette di misurare le proprietà chimiche, termiche e meccaniche dello smalto, stabilendone i requisiti minimi di qualità.

La caratteristica più rilevante emersa dalle prove è la notevole resistenza meccanica del rivestimento. L'applicazione dello smalto, infatti, accresce in modo significativo la resistenza a compressione del metallo base vergine, garantendo al contempo discreti livelli di tenacità a frattura.

La principale ragione fisica di questo fenomeno risiede nell'incompatibilità termica dei due materiali costituenti, ovvero nella differenza tra i coefficienti di dilatazione termica dell'acciaio ($\sim 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e dello smalto ($\sim 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Di conseguenza, durante la fase di raffreddamento post-cottura, il maggior ritiro termico dell'acciaio esercita una forte azione di compressione sul rivestimento; quest'ultimo, essendo ormai solidificato e saldamente ancorato al substrato, sviluppa uno stato permanente di tensioni residue di compressione che conferisce eccellenti proprietà meccaniche all'acciaio smaltato.

Inoltre, le superfici smaltate risultano altamente resistenti all'usura e ai graffi, garantendo una durezza minima pari a 5 sulla scala di Mohs. Oltre alla durezza superficiale, questi materiali compositi si distinguono per l'elevata resistenza alla corrosione, riuscendo a sopportare l'esposizione a lungo termine ad acqua calda, vapore e umidità.

A queste proprietà meccaniche e chimiche si aggiunge un'eccellente resistenza termica. Difatti, lo smalto resiste alle alte temperature senza danneggiarsi o scolorirsi, mantenendo inalterate le sue caratteristiche in un intervallo operativo standard compreso tra i -60 °C fino a +450 °C.

Occorre tuttavia osservare che la natura vetrosa dello smalto lo rende intrinsecamente fragile e privo di comportamento plastico: urti meccanici istantanei di forte intensità o deformazioni eccessive del substrato possono causare l'insorgenza di cricche, scheggiature o distacchi locali del rivestimento, esponendo l'acciaio al deterioramento. Al fine di compensare tale svantaggio meccanico, il manuale sviluppato dall'EEA impone precisi vincoli progettuali e produttivi al metallo di base.

In particolare, i progettisti sono tenuti a rispettare spessori minimi e raggi di curvatura adeguatamente ampi per ogni categoria di prodotto, prestando inoltre estrema attenzione alle saldature, le quali potrebbero innescare tensioni anomale durante la cottura in forno. [1][2]

1.1.3 Applicazioni dello smalto ceramico

La morfologia del rivestimento finito, caratterizzata da un'elevata finitura superficiale e dalla totale assenza di porosità, rende il materiale facilmente sanificabile. Tale conformazione inibisce la proliferazione di colonie batteriche, garantendo ottime proprietà igieniche e la completa atossicità.

Queste caratteristiche, unite alle notevoli proprietà termiche e chimiche, hanno reso il settore domestico il principale e storico ambito di applicazione dello smalto. Tra i prodotti di maggior impiego spiccano piani di cottura, forni, stufe, componenti interni di frigoriferi, lavatrici e lavastoviglie, nonché pentolame e piccoli elettrodomestici.

In tempi recenti, il campo applicativo dello smalto, si è esteso a substrati meno corrodibili, come l'alluminio, il rame e l'acciaio inossidabile; tale evoluzione dimostra il valore estetico e funzionale di questo materiale, superando la mera esigenza protettiva.

Alla luce di queste novità, il materiale ha conosciuto una notevole diffusione in ulteriori settori di grande rilevanza: architettura per esterni e per interni, componentistica edilizia e arredo urbano.

Nel campo dell'industria, lo smalto trova un vasto e consolidato settore d'impiego come rivestimento protettivo per le leghe ferrose, quali acciaio e ghisa, soggette a fenomeni di ossidazione, corrosione e rapido deterioramento ambientale.

La lunga durata utile e le richieste di manutenzioni minime rendono lo smalto il materiale d'elezione per applicazioni industriali gravose come la protezione di serbatoi per scaldabagni ad alta pressione, reattori chimici, distributori di benzina e apparecchiature sanitarie. [3]

1.2 Scaldabagni Ariston

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un più ampio progetto di ricerca, commissionato dall'azienda Ariston Group, rivolto allo studio e all'ottimizzazione dei serbatoi per scaldabagni. Nello specifico, la campagna sperimentale descritta in questo elaborato si concentra sulla valutazione della resistenza a fatica dello smalto interno, operando la caratterizzazione meccanica su appositi provini. Tali campioni sono stati trattati con il medesimo rivestimento smaltato utilizzato per le superfici interne dei componenti in scala reale, destinati ad applicazioni sanitarie. Prendendo come riferimento i dispositivi ad accumulo prodotti da Ariston, il serbatoio interno costituisce infatti un eccellente caso studio per l'analisi del comportamento del materiale composito metallo-smalto.

Dal punto di vista costruttivo, il dispositivo è tipicamente realizzato in acciaio e si compone di tre elementi principali: una virola centrale cilindrica e le calotte superiori e inferiori, che chiudono le estremità del serbatoio.

Il collegamento tra questi componenti viene realizzato tramite una saldatura longitudinale, che unisce i lembi adiacenti della virola, e due saldature circonferenziali che vincolano le due calotte al corpo cilindrico centrale.

A completare la struttura del serbatoio vi sono i manicotti, necessari per il collegamento alle tubazioni di mandata e ritorno dell'acqua, e una controflangia. Quest'ultima funge da supporto per l'installazione della flangia principale, sulla quale trovano alloggio l'anodo di magnesio e la resistenza elettrica.



Figura 2: Componenti serbatoio

Nelle reali condizioni di funzionamento, il serbatoio è sottoposto ad un'alternanza continua di cicli di riscaldamento e di prelievo dell'acqua che generano, all'interno del componente, significative sollecitazioni meccaniche di pressione. Sebbene il picco massimo ammissibile di tali carichi sia opportunamente limitato dall'intervento di apposite valvole di sicurezza progettate per prevenire il cedimento plastico, essi risultano intrinsecamente variabili nel tempo.

Pertanto, al fine di impedire la rottura meccanica a regimi di pressioni inferiori al limite massimo di soglia consentito, è fondamentale che il serbatoio garantisca non solo l'opportuna resistenza statica ma anche un'adequata resistenza a fatica meccanica.

Difatti, l'ampio progetto di ricerca in cui si inserisce il presente elaborato prevede l'esecuzione di test ciclici, con lo scopo di valutare la resistenza a fatica dei componenti e verificarne l'idoneità all'esercizio.

Dati provenienti dai rientri di mercato evidenziano che una delle principali cause di fine vita del prodotto è rappresentata da perdite idrauliche, localizzate in varie zone del serbatoio, per corrosione. Tuttavia, il fattore di innesco di tale processo può essere strettamente legato ad un cedimento di natura meccanica: le sollecitazioni cicliche di pressione possono generare micro-cricche o causare il distacco locale dello smalto dalla superficie interna del serbatoio, specialmente in prossimità delle zone in cui vi è un'elevata concentrazione di tensioni come le saldature, che pur garantendo tenuta idraulica, introducono inevitabili discontinuità geometriche. Venendo a mancare lo strato vetroso, la diretta esposizione della superficie metallica all'acqua calda innesca un rapido processo di ossidazione che porta, inevitabilmente, alla perforazione del serbatoio. [4]

1.2.1 Fatigue test sui serbatoi

In questa sezione viene illustrato nel dettaglio il protocollo tecnico specifico adottato per l'esecuzione di una prova di fatica su un serbatoio, condotta internamente presso i laboratori di Ariston. L'obiettivo del test è controllare e verificare la resistenza a fatica dello smalto presente sulla superficie interna del serbatoio, la qualità delle saldature, lo spessore dei metalli utilizzati e la qualità della flangia, valutandone sia la resistenza che la tenuta geometrica.

Il test, inoltre, fa riferimento alla normativa europea **UNI EN 12897**, che specifica le modalità con cui uno scaldacqua ad accumulo in pressione chiuso, riscaldato indirettamente, di volume fino a 2000 L, idoneo al collegamento ad un'adduzione d'acqua avente pressione compresa tra 0,05 MPa e 1,0 MPa (0,5 bar e 10 bar), e dotato di dispositivo di controllo e sicurezza progettato per prevenire temperature dell'acqua potabile stoccata superiori ai 95 °C debba essere testato.

Il banco prova deve essere capace di stressare meccanicamente il serbatoio con cicli di pressione continui compresi tra quella atmosferica e quella operativa maggiorata di 1 bar.

Essendo quest'ultima pari a 8 bar per il prodotto analizzato, la pressione massima (p_1) del ciclo è di 9 bar.

È importante che l'impianto garantisca questi livelli di pressione con elevata accuratezza; deviazioni e incertezze oltre $\pm 0,05$ MPa, come da norma, invalidano il test comportando lo scarto del prodotto. Per simulare lo stress termico dell'acqua calda sanitaria, l'acqua all'interno del serbatoio deve mantenersi attorno agli 80 °C con un intervallo di tolleranza di ± 2 °C come descritto da norma.

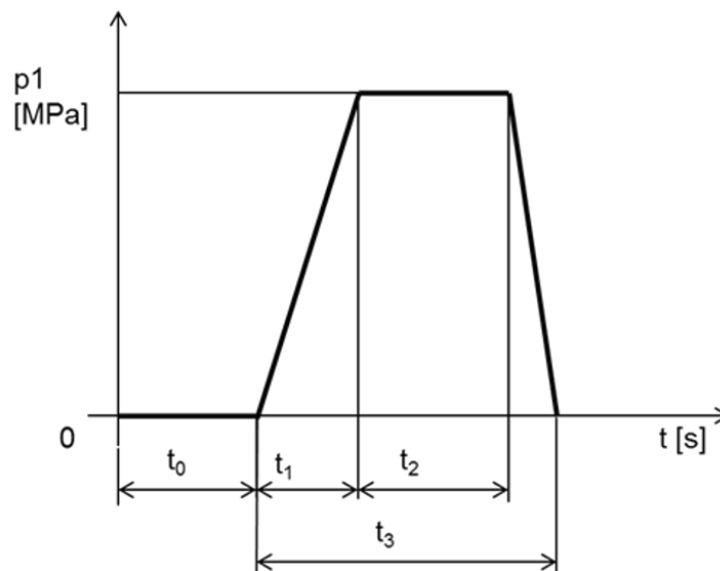


Figura 3: Ciclo di variazione della pressione

La procedura di preparazione del campione e di esecuzione dei cicli di fatica è sempre definita dalla norma. L'andamento della pressione nel singolo ciclo è descritto da un profilo trapezoidale, caratterizzato da una fase di incremento (rampa di carico), una fase intermedia di mantenimento costante della pressione massima e una fase finale di diminuzione (rampa di scarico). Per ciascuna di esse, la normativa prescrive con precisione l'intervallo temporale entro il quale dev'essere contenuta la rispettiva durata.

Il test prosegue ad oltranza fino all'insorgere della rottura meccanica, cioè quando lo smalto inizia a filare e mostrare delle cricche, o fino al raggiungimento del numero di cicli prefissati; se dopo il target di cicli non si riscontrano rotture il test è superato e il serbatoio è a norma e pronto ad essere applicato nel settore di interesse. [5]

2 Caratterizzazione meccanica

2.1 Generalità sulla caratterizzazione meccanica dei materiali

Il presente elaborato rivolge la sua attenzione all'analisi e alla caratterizzazione meccanica dei rivestimenti in smalto protettivo. Tuttavia, per comprendere appieno le metodologie, i setup sperimentali e i risultati ottenuti, risulta propedeutico inquadrare l'argomento da un punto di vista teorico.

La caratterizzazione meccanica costituisce un passaggio fondamentale per determinare *le proprietà meccaniche dei materiali*: costanti elastiche e ingegneristiche, limiti di resistenza, e parametri di deformazione plastica.

L'acquisizione di tali grandezze avviene tramite prove di laboratorio, il cui scopo è prevedere il comportamento del materiale assoggettato a sollecitazioni statiche o dinamiche, definendone così i limiti operativi.

Pertanto, queste analisi forniscono i dati necessari per progettare componenti durevoli e conformi sia alle specifiche di progetto sia agli standard normativi.

Poiché nel presente studio i provini sono stati sottoposti a prove di trazione monoassiale statiche e a prove di fatica, risulta di primaria importanza introdurre le fondamenta teoriche alla base di questi test.

2.1.1 Prova di trazione statica

La prova di trazione statica rappresenta una delle prove meccaniche distruttive più importanti e maggiormente utilizzate. Essa consiste nel sottoporre un provino a un carico di trazione monoassiale crescente, fino al raggiungimento di un valore tale da determinarne la rottura.

Solitamente, il provino è una barretta a sezione costante, rettangolare (di area iniziale A_0) o circolare (di diametro iniziale d_0), caratterizzata da una geometria cosiddetta a “osso di cane”.

Tale conformazione prevede estremità più robuste e allargate per facilitare la presa, e una porzione centrale a sezione ridotta che costituisce il tratto utile del provino, di lunghezza iniziale L_0 . La geometria e le dimensioni dei provini sono rigorosamente standardizzate da normative specifiche.

Durante la preparazione, il provino viene collegato ad una macchina di prova mediante due afferraggi, ovvero delle morse, idrauliche o meccaniche, che consentono il corretto posizionamento e serraggio del provino; un afferraggio è vincolato al basamento fisso della macchina, mentre il secondo è solidale alla traversa mobile. Lo spostamento di quest’ultima, azionata da un dispositivo idraulico o elettromeccanico, permette l’applicazione progressiva del carico.

La macchina è progettata per acquisire in ogni istante della prova, la forza applicata, mediante un apposito trasduttore di forza, quale una *cella di carico* posta in serie con il provino, e lo spostamento dell’elemento mobile Δh , tramite un trasduttore di posizione, solitamente *LVDT*.

L’allungamento subito dal tratto utile del provino viene stimato, approssimativamente, a partire dallo spostamento della traversa, semplicemente come $\Delta L = \Delta h$.

Poiché la misura dello spostamento della traversa è intrinsecamente affetta da errori dovuti agli assestamenti e ai giochi degli afferraggi, la deformazione reale del provino viene spesso misurata direttamente sul tratto utile tramite estensimetri.

I dati registrati vengono visualizzati in tempo reale da un sistema di acquisizione posto sul pannello di controllo della macchina.

Usualmente la prova viene condotta imponendo che la traversa della macchina si muova con velocità costante nel tempo (generalmente definita dalle normative): in tal caso, si definisce la prova in *controllo di spostamento*. Qualora, invece, si imponga una crescita a velocità costante della deformazione applicata, si definisce prova in *controllo di deformazione*.

In alternativa, esiste la possibilità di eseguire il test in *controllo di forza*, imponendo un incremento di carico costante nel tempo; tuttavia, come verrà chiarito in seguito, questa modalità risulta meno indicata per l'esecuzione completa delle prove di trazione statica fino a rottura.

I dati misurati vengono riportati su un grafico, in cui sull'asse delle ascisse si riporta la deformazione e su quello delle ordinate la tensione, noto come *diagramma tensioni nominali-deformazioni nominali*.

In particolare, la **tensione nominale**, detta anche “*stress*”, è una grandezza misurata in MPa che descrive il rapporto tra il carico applicato e l'area iniziale del provino:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

La **deformazione nominale**, chiamata anche “*strain*”, è una grandezza *adimensionale* che descrive il rapporto tra l'allungamento totale subito dal tratto utile del provino e la lunghezza iniziale:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

È importante notare come l'allungamento e la forza, ovvero le quantità effettivamente misurate in laboratorio, vengano trasformate in valori di tensione e deformazione in quanto caratteristiche più generalizzabili.

Occorre, inoltre, tener conto che la risposta del materiale alla prova è influenzata da altri fattori come ad esempio: temperatura, velocità di carico, dimensione del provino, trattamenti antecedenti alla prova e composizione chimica del materiale.

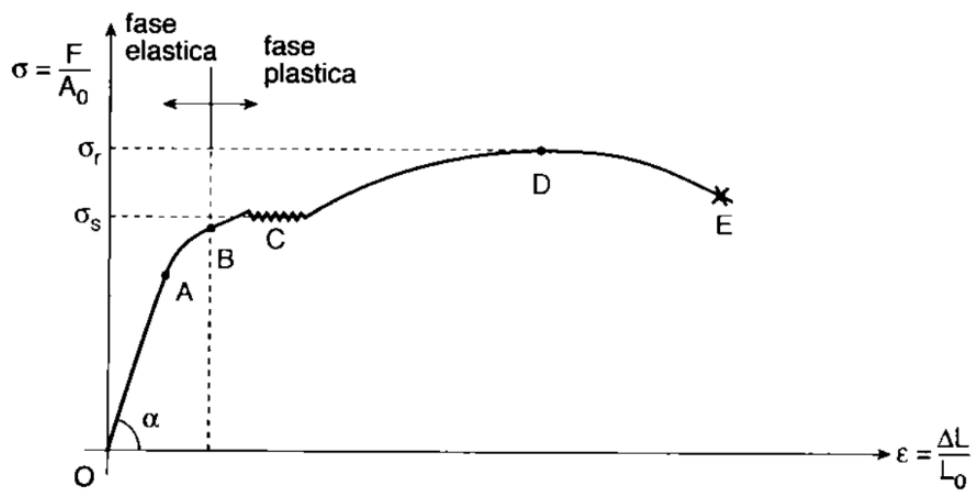


Figura 4: diagramma tensioni nominali-deformazioni nominali

Nel diagramma è possibile distinguere diverse fasi che descrivono come varia il comportamento meccanico del materiale durante l'intera durata del test.

Il primo tratto del diagramma, indicato con **OA**, è spesso approssimabile ad una retta ed è chiamato *tratto di elasticità lineare*. In questa zona il materiale presenta un comportamento lineare-elastico, nel quale le deformazioni misurate sono direttamente proporzionali alle tensioni agenti (linearità) e vengono totalmente recuperate alla rimozione del carico, con conseguente ritorno del provino alla configurazione iniziale indeformata (elasticità).

La relazione lineare che sussiste tra tensione e deformazione è nota come *legge di Hooke*:

$$\sigma = E \varepsilon$$

dove la costante di proporzionalità E è detta *modulo di Young* (o modulo di elasticità normale) espresso in MPa.

Il modulo di Young è una proprietà intrinseca del materiale, direttamente ricavabile dalle prove meccaniche, che ne quantifica la rigidità. Graficamente, esso rappresenta la pendenza del tratto lineare **OA** della curva:

$$\tan \alpha = E$$

Il punto **A** corrisponde al *limite di proporzionalità*, ovvero il valore massimo di tensione per il quale è mantenuta ancora la linearità; oltre questo valore, si entra nel tratto **AB**, chiamato *tratto di elasticità non lineare*. In questa fase il materiale si comporta ancora in modo elastico, ma il legame tra tensione e deformazione perde la sua linearità, non rispettando più la legge di Hooke.

Di conseguenza, il diagramma σ - ϵ inizia a deviare dall'andamento rettilineo incurvandosi verso l'asse delle ascisse, segnalando una crescita più rapida dello “*strain*” rispetto all'aumento dello “*stress*”.

Il punto **B**, detto *limite di elasticità*, definisce la soglia al di sotto della quale il comportamento del materiale può essere considerato ancora completamente elastico. Oltre questo punto, le deformazioni diventano plastiche, ovvero irreversibili: all'azzeramento delle sollecitazioni, il materiale non ripercorre a ritroso lo stesso percorso di carico, ma il suo scarico risulta descritto da una retta parallela a quella del tratto elastico-lineare.

Questo manifesta una deformazione residua permanente che impedisce al provino di recuperare totalmente la lunghezza originaria.

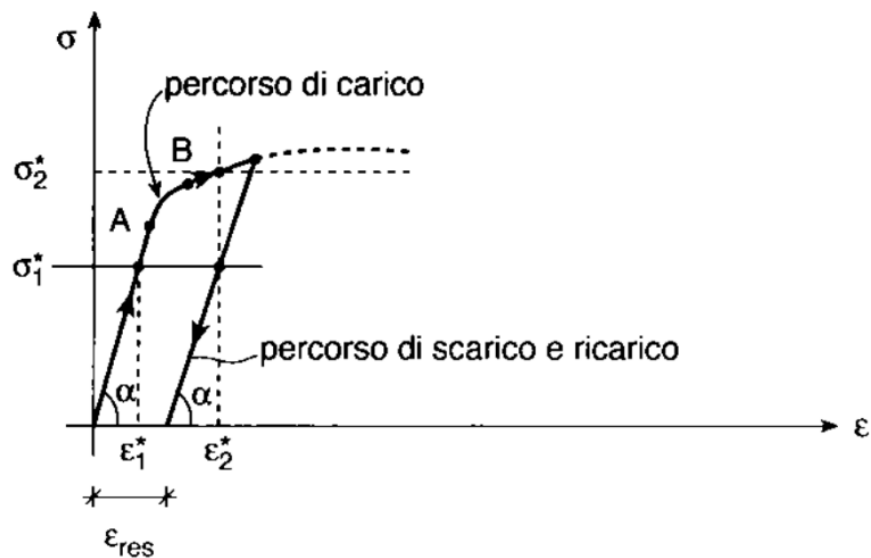


Figura 5: Comportamento materiale allo scarico in fase anelastica

Il superamento del punto **B** caratterizza il passaggio del materiale dallo stato elastico a quello plastico. L'inizio della fase plastica è strettamente legato al fenomeno dello *snervamento*, individuabile nel punto **C** del grafico.

Durante lo snervamento, il materiale va incontro ad una marcata condizione di instabilità: si nota un valore di tensione in corrispondenza del quale la deformazione comincia a crescere rapidamente senza un equivalente incremento di sforzo. Tale tensione, che oscilla attorno ad un valor medio costante, è definita **tensione di snervamento** σ_s .

Generalmente, nei materiali in cui questo fenomeno non si manifesta in maniera chiara sul diagramma, il reale punto di snervamento è difficile da stabilire; pertanto, per convenzione, si assume che esso avvenga in corrispondenza di una deformazione permanente pari allo 0,2% della lunghezza iniziale.

Nel tratto successivo, indicato come **CD**, si contrappongono due effetti fondamentali.

Il primo è la riduzione di sezione del provino (*effetto Poisson*), dovuta al fatto che l'applicazione di una tensione monoassiale longitudinale genera, oltre alla deformazione longitudinale imposta, una contrazione trasversale che diventa chiaramente visibile in fase plastica.

Il secondo effetto è il fenomeno dell'incrudimento, che comporta un aumento della resistenza del materiale al crescere della deformazione plastica.

Questi due effetti sono in competizione: la riduzione di sezione tenderebbe a far diminuire la forza richiesta per deformare il provino, ma, al contempo, l'incrudimento ne aumenta la resistenza. Di conseguenza, per continuare a deformare il materiale è necessario applicare una forza via via maggiore.

Poiché dopo lo snervamento la sezione del provino si riduce molto più lentamente rispetto alla crescita della resistenza, prevale l'effetto dell'incrudimento; ciò comporta un aumento della tensione nominale che continua a salire sul diagramma σ - ϵ fino a raggiungere il punto **D**.

Il punto **D** è chiamato *limite di resistenza a trazione* ed è definito come il punto in cui la tensione nominale sopportata raggiunge il suo valore massimo. Oltre tale punto, ovvero nel tratto **DE**, le dinamiche si invertono.

La deformazione plastica, anziché distribuirsi in maniera pressoché uniforme su tutto il provino, si localizza attorno a una precisa regione. Questo fenomeno, noto come *strizione*, indebolisce localmente il provino determinando una riduzione visibile e marcata dell'area effettiva della sezione resistente. Tale effetto geometrico prevale sull'incrudimento, portando a una diminuzione della tensione nominale necessaria per proseguire la deformazione, fino ad arrivare alla rottura del materiale. Il *limite di rottura*, indicato con la lettera **E** sul diagramma, corrisponde alla deformazione massima sopportata dal materiale.

È interessante notare come quest'ultimo tratto decrescente non si sarebbe manifestato se il test fosse stato eseguito in *controllo di forza*: imponendo una crescita continua del carico, superato il punto **D**, la tensione nominale crescerebbe in modo incontrollato a causa della rapida riduzione di sezione, portando il provino ad una rottura improvvisa.

Inoltre, è facile osservare che la tensione nominale non coincide con quella realmente agente sul provino durante l'esecuzione del test poiché, generalmente, l'area della sezione iniziale del provino A_0 risulta maggiore di quella istantanea che si ha sotto carico, a causa della strizione; per tale motivo, oltre alle grandezze nominali, si rende necessario definire le corrispondenti grandezze reali.

La **tensione reale**, a differenza di quella nominale, viene definita rapportando il carico applicato al valore istantaneo dell'area della sezione resistente del provino:

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

La **deformazione reale** è ottenuta integrando gli incrementi di deformazione, ognuno valutato sulla lunghezza istantanea:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{L} \rightarrow \varepsilon_R = \int_{L_0}^L \frac{dl}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Si possono fare delle considerazioni riguardo alle relazioni che esistono tra le grandezze reali e nominali:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \rightarrow \frac{L}{L_0} = 1 + \varepsilon \rightarrow \varepsilon_R = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\sigma_R = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{A_0}{A_0} = \sigma \frac{A_0}{A}$$

In campo elastico, essendo le variazioni geometriche contenute, le tensioni e deformazioni reali risultano pressoché coincidenti con le rispettive grandezze nominali; esse possono dunque essere utilizzate indistintamente senza introdurre grossi errori significativi, garantendo in ambo i casi la legge di Hooke.

Il comportamento devia invece sensibilmente nel dominio delle deformazioni plastiche; poiché gli allungamenti reali nella zona deformata sono difficili da misurare è spesso necessario ricorrere all'ipotesi di costanza del volume del materiale in campo plastico. Trascurando le minime variazioni di volume di natura elastica, la conservazione del volume del tratto utile del provino può essere espressa dalla seguente relazione:

$$V_0 = V_f \rightarrow A_0 L_0 = A L \rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} \rightarrow \sigma_R = \sigma \frac{L}{L_0} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

Ricapitolando, si possono sfruttare le seguenti relazioni per passare dai valori reali a quelli nominali:

$$\sigma_R = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \varepsilon_R = \ln(1 + \varepsilon)$$

Dalle espressioni matematiche ricavate si deduce che, in campo plastico, le due curve presentano comportamenti significativamente differenti, in quanto $\varepsilon_R < \varepsilon$ e $\sigma_R > \sigma$.

Quindi l'impiego delle tensioni reali al posto di quelle nominali permette di ottenere la curva di risposta vera del materiale ovvero un diagramma *sforzo-deformazione* sempre crescente, che tuttavia non si distingue da quella nominale nel campo delle piccole deformazioni, dove il materiale è solitamente utilizzato nelle applicazioni. [6] [7]

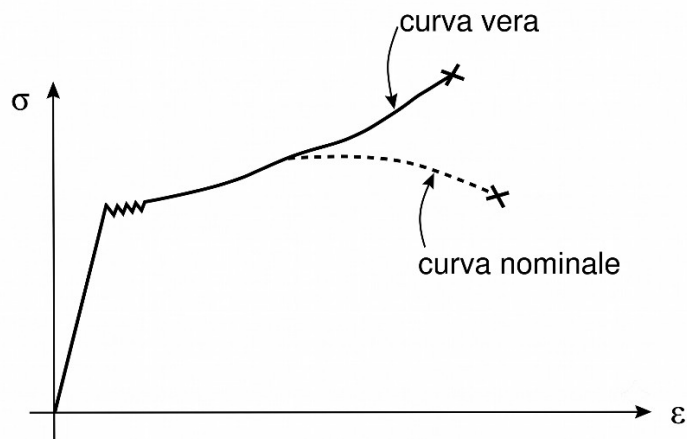


Figura 6: Confronto curva reale e nominale

2.1.2 Fatica meccanica e prove di caratterizzazione

La fatica è definita come un fenomeno di danneggiamento progressivo del materiale, soggetto a sollecitazioni variabili nel tempo in modo ciclico. Queste storie di carico, identificabili da delle successioni alternate di valori massimi (picchi) e minimi (valli) possono portare al cedimento del materiale anche se si mantengono inferiori al suo limite di rottura o persino di snervamento.

A differenza della rottura fragile o duttile, che avviene in modo improvviso sotto un carico statico crescente, la rottura a fatica si manifesta gradualmente, attraverso una serie di fasi ben definite:

1. La prima fase è caratterizzata dalla formazione di microcricche, difficilmente rilevabili ad occhio nudo. L'innescò avviene tipicamente in corrispondenza di zone critiche ad elevata concentrazione locale di tensione, come intagli, bordi, rugosità superficiali o inclusioni non metalliche. A livello microscopico, il fenomeno è causato dallo scorrimento dei piani cristallini del materiale dovuto alle continue inversioni di carico. Quando la densità delle bande di scorrimento raggiunge un livello critico, le più severe si evolvono in microscopici cretti.

2. Una volta formata, la cricca si propaga lentamente a ogni ciclo di carico, avanzando in direzione pressoché perpendicolare a quella della sollecitazione principale. In questa fase, la superficie di frattura assume un aspetto caratteristico, presentando delle striature, che testimoniano l'avanzamento progressivo del fronte di rottura. La velocità di propagazione dipende dall'ampiezza del carico ciclico, dalle proprietà del materiale e dall'ambiente operativo.
3. Quando la cricca raggiunge una dimensione critica, la sezione resistente residua non è più in grado di sostenere il carico applicato, provocando una rottura improvvisa del componente.

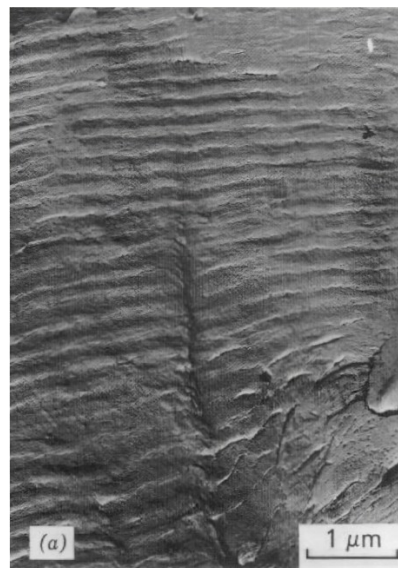


Figura 7: Esempio di superficie di rottura per fatica

Risulta evidente che la fatica è un fenomeno molto più complesso e insidioso rispetto al cedimento per carichi statici. La sua evoluzione, infatti, dipende simultaneamente dal livello di tensione alternata locale e dalla presenza di difetti localizzati nel materiale. Ad oggi non esiste un modello matematico in grado di descrivere in modo totalmente soddisfacente il comportamento a fatica dei materiali.

Tuttavia, i principali parametri che vengono determinati durante una prova di fatica sono:

- **N numero di cicli** per il quale si ha una rottura di un provino.
- La **resistenza a fatica σ** ovvero il valore dell'ampiezza dello sforzo che provoca la rottura in corrispondenza del numero di cicli N.
- Il **limite di fatica σ_{LF}** che è il valore di resistenza a fatica al di sotto del quale il materiale non subisce danneggiamento ed è in grado di resistere per un numero teoricamente infinito di cicli.

Per valutare sperimentalmente tali parametri, i provini vengono sottoposti a sollecitazioni cicliche fino alla rottura. Nel caso specifico delle prove di fatica a trazione il carico varia periodicamente da un valore minimo a uno massimo, escludendo così l'insorgere di sollecitazioni di compressione.

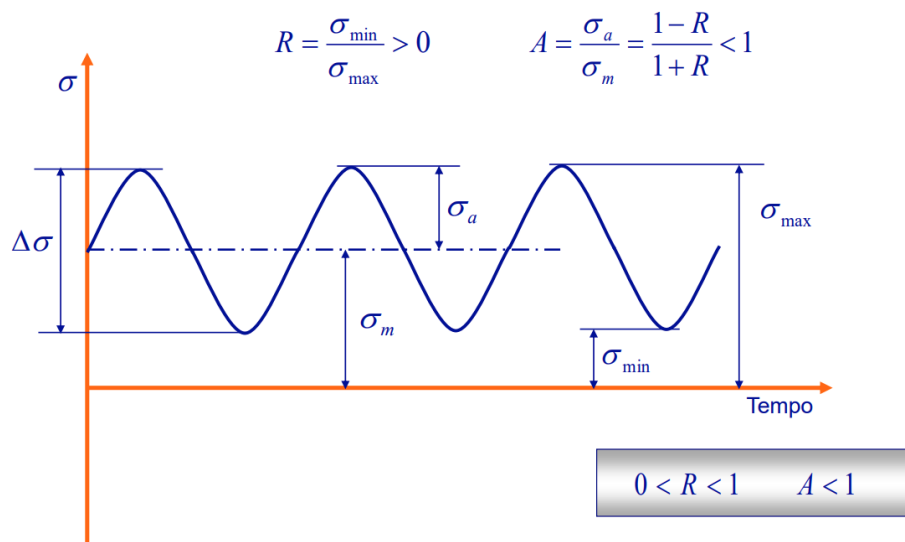


Figura 8: Sollecitazione ciclica prova di trazione a fatica

Per ogni provino sottoposto a test si misura il carico ciclico imposto e si registra il numero di cicli trascorsi al momento della rottura. Le prove iniziano applicando una tensione leggermente inferiore al limite di rottura statica del materiale, per poi procedere con ulteriori serie di provini testati a tensioni via via decrescenti.

Poiché i risultati del fenomeno della fatica presentano una notevole dispersione, è necessario testare più provini per ogni livello di carico al fine di garantire l'affidabilità statistica dei dati ottenuti.

I risultati delle prove vengono riportati in un *piano semilogaritmico* $\sigma - \log N$ e la curva interpolante i punti sperimentali è nota come **curva di Wöhler o curva tensione-vita**.

Sull'asse delle ordinate si riporta l'ampiezza della tensione, mentre sull'asse delle ascisse, in scala logaritmica, si riporta il numero di cicli a rottura. È importante sottolineare che il valore della resistenza a fatica perde di significato se non viene associato al numero di cicli di riferimento.

Questa curva descrive in modo completo il comportamento a fatica del materiale, permettendo di stimare la vita utile di un componente sollecitato a tensioni inferiori al limite di snervamento, ma superiori alla soglia definita dal limite di fatica σ_{LF} .

La curva di Wöhler individua diverse regioni di comportamento del materiale:

- **Zona della fatica oligociclica:** in questa regione le prove effettuate non sono molto lunghe, in genere la rottura avviene dopo un numero ridotto di cicli, $N < 10^3$. In quest'area i provini vengono stressati con dei carichi tensionali ciclici che superano il limite di snervamento; pertanto, a ogni ciclo il materiale subisce marcate deformazioni plastiche che portano a un rapido cedimento iniziale.
- **Zona di transizione:** zona che definisce il passaggio fisiologico dalla fatica oligociclica alla fatica ad alto numero di cicli, stimata intorno a $10^3 \div 10^4$ cicli.
- **Zona della fatica ad alto numero di cicli:** in questa regione, utile per la “progettazione a tempo”, i provini resistono per un numero elevato di cicli. Le sollecitazioni applicate sono inferiori al limite di snervamento, rendendo le deformazioni prevalentemente elastiche a livello macroscopico. Tuttavia, a livello microscopico si verifica comunque un progressivo danneggiamento che porta, infine, alla rottura.
- **Zona di progettazione a vita infinita:** in questa regione il materiale può sopportare un numero teoricamente illimitato di cicli di carico senza subire rotture, a condizione che l'ampiezza della tensione rimanga al di sotto del limite di fatica. [8]

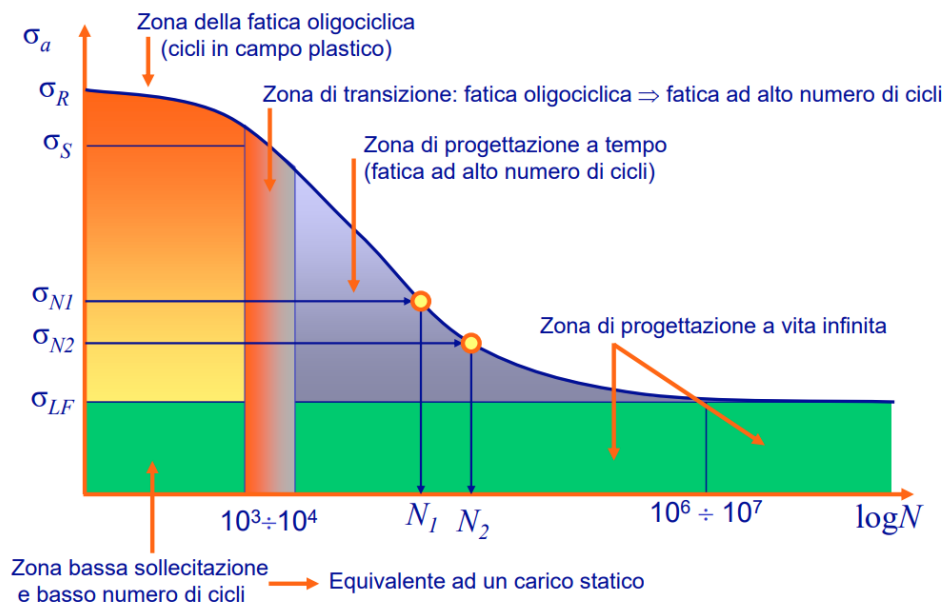


Figura 9: Curva di Wöhler

2.2 Macchina di trazione e funzionamento

Sia le prove statiche che quelle a fatica sono state eseguite utilizzando la macchina ItalSigma, disponibile presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e delle Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

Si tratta di una macchina servoidraulica a due colonne con servocilindro montato sotto la traversa inferiore, specificatamente progettata per l'esecuzione di test sperimentali statici e dinamici su materiali e componenti.

La struttura della macchina ItalSigma è costituita dai seguenti elementi:

- **Telaio di carico a due colonne:** rappresenta l'intera struttura portante visibile ed è composto dal basamento inferiore, dalla traversa superiore e da due colonne cilindriche argentate che fungono da guide.

- **Trasduttore di spostamento (LVDT):** permette di rilevare lo spostamento del pistone. È incorporato nell'attuatore idraulico e si trova, insieme al pistone, all'interno del basamento inferiore.
- **Trasduttore di forza (cella di carico):** ha la funzione di misurare il carico applicato durante la prova. È ancorato alla traversa superiore, alla quale è collegata la morsa superiore adibita al serraggio del provino.
- **Cilindri laterali e superiori per il sollevamento e bloccaggio:** situati in corrispondenza della traversa rossa superiore, consentono lo sbloccaggio idraulico della stessa, il suo posizionamento verticale e il successivo bloccaggio rigido in posizione prima dell'inizio del test.
- **Piedi antivibranti:** supporti opportunamente dimensionati per assorbire gli urti e smorzare le forti vibrazioni trasmesse al terreno durante i test.



Figura 10: Macchina idraulica ItalSigma UNIVPM

Il principio di funzionamento si basa sull'impiego di un sistema oleodinamico ad alte prestazioni. Date le elevate portate e capacità dinamiche richieste alla macchina, l'elemento motore primario, ovvero la *pompa idraulica*, presenta dimensioni e livelli di rumorosità tali da richiederne l'installazione in un locale tecnico separato. Pertanto, il sistema di prova non si limita al solo telaio della macchina, ma si configura come un vero e proprio impianto composto da tre gruppi principali:

- **Centrale oleodinamica:** ha la funzione di prelevare l'olio dal serbatoio e fornirlo in pressione per alimentare il servocilindro della macchina.
- **Gruppo frigorifero "chiller":** raffredda l'olio tramite un apposito scambiatore di calore, al fine di mantenere stabili le proprietà del fluido ed evitare surriscaldamenti del sistema.
- **Elettronica di comando:** costituisce il pannello di controllo che pilota le servovalvole e monitora in tempo reale i valori di forza e spostamento.

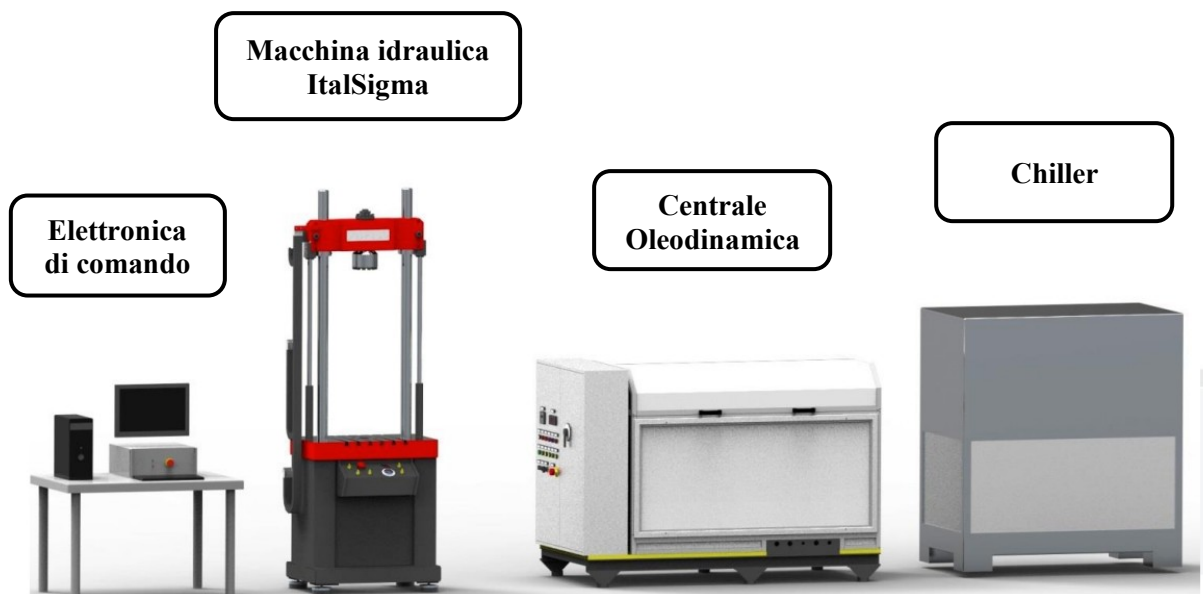


Figura 11: Impianto prove di trazione

Nel caso di una prova di trazione, la macchina idraulica opera secondo una successione continua di fasi. Dopo aver completato l'allestimento del setup sperimentale e fissato il provino agli afferraggi della macchina, il test viene avviato tramite l'elettronica di comando.

Un motore elettrico aziona la pompa, che mette in pressione l'olio facendolo fluire dal serbatoio al cilindro attraverso tubazioni flessibili ad alta tenuta. Regolando la portata del fluido tramite una servovalvola, l'impianto è in grado di modulare con precisione la forza applicata.

Contemporaneamente, il gruppo frigorifero fa circolare il fluido refrigerante in uno scambiatore di calore per mantenere l'olio a una temperatura operativa ottimale e costante.

L'ingresso dell'olio in pressione spinge il pistone, trascinando con sé la traversa mobile. Questo spostamento determina la trasmissione del carico di trazione al provino tramite i morsetti che collegano la traversa all'afferraggio.

Terminata la prova, l'impianto interrompe l'alimentazione dell'olio in pressione al cilindro. L'apertura di un'apposita valvola di scarico permette all'olio di rifluire verso il serbatoio; di conseguenza, il pistone risale gradualmente e la traversa ritorna nella posizione iniziale, pronta per un nuovo test.

Durante l'intero processo, l'elettronica di comando registra in tempo reale le grandezze meccaniche rilevanti mediante i sensori posti sulla macchina, generando automaticamente i grafici caratteristici del materiale, essenziali per lo studio del comportamento del materiale in esame. [9]

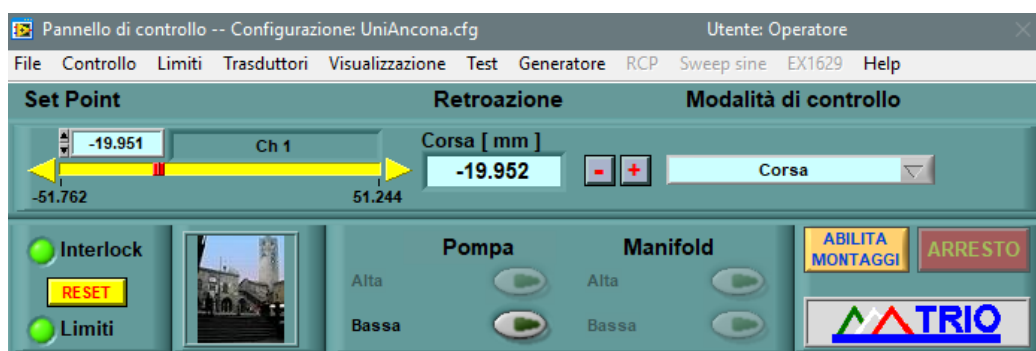


Figura 12: Pannello di controllo software di comando

3 Digital Image Correlation (DIC)

3.1 Principio di funzionamento della *DIC*

La *Digital Image Correlation (DIC)* è una tecnica ottica avanzata, non invasiva e non a contatto. Nel presente lavoro di tesi, tale metodologia è stata impiegata per monitorare e misurare le deformazioni del substrato metallico del provino durante le prove di trazione statica, mediante l'acquisizione e l'elaborazione sequenziale di immagini digitali.

A differenza delle tecniche di misura tradizionali di tipo puntuale, la *DIC* è una metodologia *full-field* (a tutto campo). Questa caratteristica le consente di restituire una mappatura continua e ad alta definizione dei campi di spostamento e di deformazione dell'elemento in esame, permettendo di individuare gradienti di deformazione locali che sfuggirebbero alle strumentazioni classiche.

Il sistema utilizza una o più telecamere per registrare l'intera prova. Le immagini acquisite vengono successivamente elaborate da un software dedicato (nel presente lavoro, **MatchID**), il quale ha il compito di identificare e seguire, in modo continuo, la posizione di ogni punto sulla superficie del provino, calcolandone l'esatto spostamento rispetto alla configurazione iniziale di riposo.

Per l'elaborazione dei dati, l'operatore definisce manualmente sull'immagine di riferimento una *ROI (Region of Interest)*, ossia l'area specifica all'interno della quale appositi algoritmi matematici di correlazione tratteranno lo spostamento della *texture* superficiale.

Inoltre, in base agli obiettivi di indagine, al tipo di spostamento atteso e alla geometria del provino, l'apparato sperimentale può essere allestito in configurazione *DIC-2D* o *DIC-3D*.

La configurazione *DIC-2D* prevede l'impiego di una singola telecamera, il cui sensore deve essere rigorosamente allineato parallelamente alla superficie del campione. Pur essendo una tecnica ampiamente consolidata, essa presenta intrinseche limitazioni cinematiche: consente infatti di rilevare esclusivamente gli spostamenti e le deformazioni che avvengono nel piano del provino (*in-plane*), escludendo qualsiasi componente di movimento lungo l'asse ortogonale (*out-of-plane*).

Tuttavia, la *DIC-2D* offre il vantaggio pratico di una maggiore semplicità di *setup*, in quanto necessita unicamente di un fattore di scala metrico, non richiedendo la complessa procedura di stereo-calibrazione preventiva del campo di misura.

La tecnica *DIC-3D* supera i limiti del *2D* impiegando due telecamere sincronizzate in configurazione stereoscopica. I due dispositivi ottici sono disposti frontalmente rispetto alla superficie di analisi del provino, distanziati tra loro e orientati con angoli di convergenza tali da ottimizzare la risoluzione spaziale della *Region of Interest*.

L'elaborazione incrociata delle acquisizioni consente la ricostruzione della superficie del campione in tre dimensioni, permettendo al software di valutare sia il campo deformativo complanare (*in-plane*) sia gli spostamenti ortogonali (*out-of-plane*), fornendo una descrizione spaziale completa e rigorosa. [10]

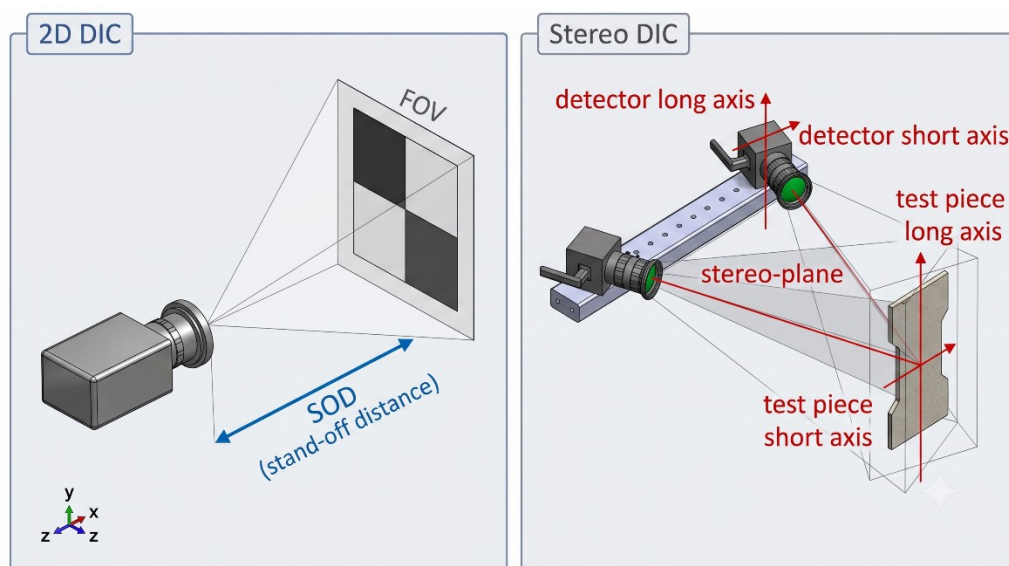


Figura 13: Sistemi di acquisizioni immagini

3.2 Calibrazione del sistema ottico

Nel presente lavoro di tesi si è scelto di adottare la configurazione *DIC-3D*, al fine di ottenere un quadro di informazioni più completo e di maggior qualità. Tuttavia, l'impiego di due telecamere per la ricostruzione stereoscopica comporta un allestimento del sistema ottico più complesso rispetto alla controparte bidimensionale. Per tale ragione, al fine di garantire l'accuratezza e l'affidabilità delle misurazioni, risulta indispensabile eseguire una rigorosa procedura di stereo-calibrazione preliminare.

Questa operazione fornisce al sistema un riferimento dimensionale affidabile, permettendo al software di convertire le coordinate immagine in coordinate metriche spaziali. Una calibrazione approssimativa, infatti, comprometterebbe l'intera analisi, generando errori sistematici inaccettabili. A tale scopo viene utilizzato un apposito pannello standardizzato (noto anche come piastra o carta di calibrazione). Questo strumento presenta una geometria nota e rigorosamente definita: nello specifico, una griglia planare composta da 9×12 punti distanziati tra loro da un intervallo costante di 5 mm.

Dal punto di vista operativo, il pannello viene posizionato all'interno del campo inquadrato da entrambe le telecamere per acquisire simultaneamente una sequenza di circa 50-60 fotogrammi.

Durante questa fase di cattura, il pannello viene progressivamente inclinato, ruotato leggermente e spostato in diverse posizioni. Questa variazione spaziale è essenziale per fornire al software una vasta gamma di prospettive, che gli consentano di mappare con precisione le coordinate spaziali dei punti e costruire un modello calibrato.

Successivamente, il software MatchID elabora l'intera sequenza di immagini raccolte. Attraverso algoritmi di riconoscimento automatico, il programma individua i punti della griglia in ogni fotogramma e, analizzando le differenze prospettiche tra i due sensori ottici, determina con precisione la loro posizione relativa (distanza reciproca e angoli di orientamento).

Grazie a questo processo, il sistema acquisisce la capacità di interpretare correttamente lo spazio tridimensionale: diventa in grado di calcolare la distanza esatta tra due punti generici del provino esaminato e di quantificarne, di conseguenza, gli spostamenti durante il test.

Solo al termine di questa fase, e unicamente se la calibrazione risulta valida secondo i parametri di qualità del software, il sistema ottico può considerarsi pronto per dare inizio alla prova sperimentale e all'acquisizione delle immagini definitive. [10]

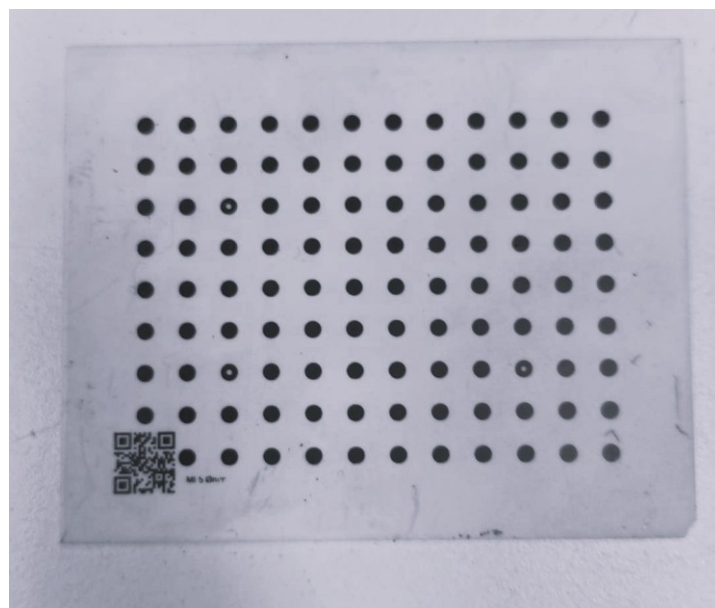


Figura 14: Piastra di calibrazione utilizzata per le prove di trazione statiche

3.3 Applicazione del pattern speckle

Per garantire un'analisi accurata e consentire al software MatchID di calcolare correttamente il campo di deformazione, è fondamentale preparare in modo mirato la superficie del provino.

Tale operazione si rende necessaria in quanto la maggior parte dei materiali, presentando superfici visivamente omogenee e uniformi, non offre punti di riferimento sufficientemente definiti per essere tracciati dagli algoritmi di correlazione ottica.

Tra le diverse tecniche disponibili per fornire un riferimento visivo al software (quali, ad esempio, l'impiego di griglie deterministiche incise o stampate), nel presente studio si è optato per la realizzazione di uno *speckle pattern*.

Questa soluzione consiste nel generare una *texture* ad alto contrasto cromatico, la quale permette al sistema ottico di identificare e tracciare con estrema precisione lo spostamento dei punti durante l'intera prova, confrontando la loro posizione istantanea con la configurazione indeformata di riferimento.

L'applicazione dello *speckle pattern* prevede una procedura in due fasi:

1. **Stesura del fondo:** il primo passaggio consiste nell'applicazione di un sottile strato di vernice spray bianca opaca. L'opacità della base è un requisito fondamentale per creare un fondo omogeneo e antiriflesso, evitando ombre o bagliori speculari indesiderati indotti dal sistema di illuminazione durante l'acquisizione delle telecamere.
2. **Creazione del *pattern*:** successivamente, al di sopra del velo di fondo bianco, viene nebulizzata una vernice spray nera. Operando con movimenti rapidi e leggeri, si va a generare una *texture* stocastica formata da una fitta distribuzione di macchioline scure (*speckle*).

È opportuno precisare che tale scelta cromatica può essere invertita, ad esempio stendendo un fondo nero con *pattern* bianco, o basata su altre combinazioni di colori, purché venga garantito un adeguato gradiente di contrasto ottico.

La precisione della *DIC* dipende fortemente dalla qualità di tale pattern. La densità, la distribuzione casuale e, in particolare, la dimensione dei punti superficiali neri rappresentano infatti parametri cruciali.

Un'applicazione non ottimale della vernice, caratterizzata ad esempio da macchie eccessivamente ridotte, o al contrario, troppo estese, rischia di impedire al software di tracciare correttamente i microscopici spostamenti del materiale. Un simile difetto comporterebbe la generazione di correlazioni errate, compromettendo di fatto l'affidabilità dell'intera misurazione. [10]

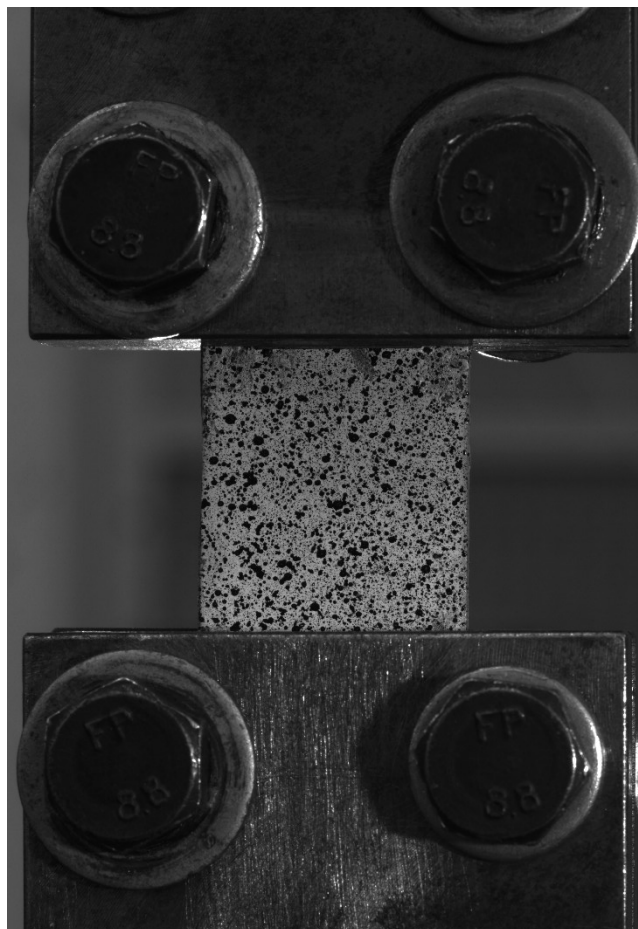


Figura 15: Pattern speckle applicato al provino

4 Esecuzione delle prove sperimentali

4.1 Produzione e geometria dei provini

I campioni analizzati in questo studio sperimentale sono stati interamente prodotti e forniti da Ariston Group, partner industriale della ricerca.

Affinché anche il substrato metallico risultasse pienamente rappresentativo delle reali condizioni operative, i provini sono stati ricavati direttamente dai *coil* (nastri di lamiera in acciaio) impiegati abitualmente dall'azienda per la produzione dei propri serbatoi.

Il processo di realizzazione dei campioni si articola in tre fasi principali:

1. **Taglio e foratura della lamiera:** i *coil* in acciaio sono stati tranciati per ottenere dei lamierini di forma rettangolare, sui quali è stato successivamente praticato un foro circolare passante in prossimità di una delle estremità.
2. **Smaltatura:** il rivestimento protettivo è stato applicato su una sola delle due superfici del lamierino. Come riscontrabile anche da un'ispezione visiva, lo smalto si presenta con una finitura vetrificata lucida e di colore blu scuro, tipica dei rivestimenti impiegati in ambito sanitario per resistere alla corrosione dell'acqua.
3. **Consolidamento termico:** in questa ultima fase, i provini vengono inseriti in appositi forni per la cottura dello smalto a temperature superiori agli 800 °C. Questa fase è seguita da un raffreddamento graduale, passaggio strettamente necessario per consolidare l'adesione del rivestimento al substrato metallico.

La fornitura comprendeva due diverse tipologie di provini, differenti per geometria e destinazione d'uso: i campioni di dimensioni minori, denominati nel seguente elaborato **PP**, caratterizzati da una maggiore robustezza e destinati ad applicazioni per serbatoi da 50 L, e quelli di dimensioni maggiori, indicati con la sigla **PG**, concepiti invece per i serbatoi da 15 L.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, l'azienda ha fornito i valori di **tensione di snervamento (σ_s)** relativi ai provini nella loro condizione finale smaltata.

Tali valori differiscono tra le due varianti: i provini PG presentano un limite di snervamento pari a 230 MPa, mentre per i provini PP il valore sale a 270 MP.

È importante precisare che questa differenza è dovuta al fatto che le due serie di campioni provengono da stabilimenti produttivi diversi, i quali utilizzano tipologie di acciaio distinte per la fabbricazione dei rispettivi serbatoi.

È, inoltre, di fondamentale importanza precisare che il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto sperimentale portato avanti insieme a un altro ricercatore. Al fine di suddividere il lavoro e analizzare aspetti diversi, si è deciso di concentrare questo specifico studio esclusivamente sul comportamento meccanico dei provini più grandi PG.

Prima di ogni test, sono stati misurati con un calibro i parametri geometrici dei provini quali larghezza, spessore e tratto utile.

Nello specifico, i provini impiegati per le due diverse tipologie di test che hanno fornito risultati utili ai fini della campagna sperimentale, presentavano caratteristiche dimensionali differenti.

Per quanto riguarda i campioni sottoposti alla prova di trazione statica, le misurazioni hanno restituito una larghezza di 25 mm e uno spessore totale di 1,7 mm. Poiché lo spessore del solo acciaio nudo, misurato a fine test, è risultato pari a 1,5 mm, è stato possibile dedurre che il rivestimento di smalto aggiungeva ai componenti uno spessore effettivo di circa 0,2 mm.

Dimensioni diverse sono state invece rilevate per il campione destinato al test di fatica. In questo caso, il campione presentava una larghezza di 22,5 mm e uno spessore complessivo, comprensivo di smalto, pari a 2,2 mm. Considerando che il substrato in acciaio vergine misurava 1,6 mm, lo strato di smalto applicato su questo componente risultava maggiore rispetto al precedente, con uno spessore utile di circa 0,6 mm. Infine, limitatamente a questo specifico provino a fatica, è stata misurata anche la dimensione del tratto utile centrale, risultata pari a 24,8 mm.

La presenza di dimensioni variabili tra i provini è imputabile ad un processo di tranciatura e smaltatura che non ha prodotto sempre gli stessi valori di larghezza e spessore.



Figura 16: Provini PG e PP

4.2 Preparazione prova di trazione statica

La valutazione della resistenza della smaltatura presente sui provini è iniziata cercando di caratterizzare il materiale sotto la condizione di trazione monoassiale statica.

L'obiettivo principale di questa fase è stato comprendere come la presenza del rivestimento vetroso, quindi rigido per natura, apportasse in qualche modo un cambiamento al comportamento meccanico del materiale.

Per questo motivo sono state eseguite prove di trazione a *strain rate lento* 10^{-3} [1/s] con l'ausilio della tecnica *DIC*. Questa ha permesso di correlare le deformazioni del substrato metallico con il distacco dello smalto, individuando i valori esatti di tensione e deformazione in corrispondenza dei quali si innesca il cedimento del rivestimento. A tale scopo, i provini non sono stati portati a rottura completa: le prove sono state interrotte subito dopo aver constatato il completo salto dello smalto dal tratto utile.

Affinché tali prove forniscano risultati affidabili, è indispensabile curare attentamente alcune operazioni preliminari; queste fasi di allestimento vengono affrontate nel dettaglio nei paragrafi successivi.

4.2.1 Preparazione e serraggio del provino

Un'accurata preparazione del provino costituisce un passaggio preliminare indispensabile per il corretto svolgimento del test. Poiché l'acquisizione dei dati avviene tramite la *Digital Image Correlation (DIC)*, è necessario che la superficie in acciaio non smaltata sia resa otticamente tracciabile dal software MatchID.

A tale scopo, è stato applicato uno *speckle pattern* utilizzando due vernici spray a finitura opaca, scelta appositamente per prevenire l'insorgenza di fastidiosi riflessi speculari causati dal sistema di illuminazione.

Nello specifico, è stata stesa dapprima una base di vernice bianca per creare un fondo omogeneo, sul quale è stato successivamente spruzzato un leggero strato di vernice nera.

Tale operazione ha permesso di generare una distribuzione casuale di macchie ad alto contrasto, fondamentale affinché il software possa riconoscere e tracciare le deformazioni locali.

È importante precisare che lo *speckle* è stato applicato esclusivamente sul tratto utile del provino, evitando con cura le estremità destinate al contatto con gli afferraggi per non comprometterne l'aderenza e la trasmissione del carico durante l'esecuzione della prova.

Terminata questa preparazione, si passa all'assemblaggio e al posizionamento del provino sulla macchina di prova.

Trattandosi di lamierini dalla geometria piana, per trasmettere lo sforzo si è scelto di fissarli rigidamente per attrito mediante un sistema di afferraggi dedicato.

Le estremità del provino vengono inserite tra due piastre metalliche lisce, predisposte per essere serrate tramite quattro bulloni per lato. In una prima fase, i bulloni vengono semplicemente accostati, in modo da trattenere il provino in sede e allineato senza serrarlo in via definitiva.

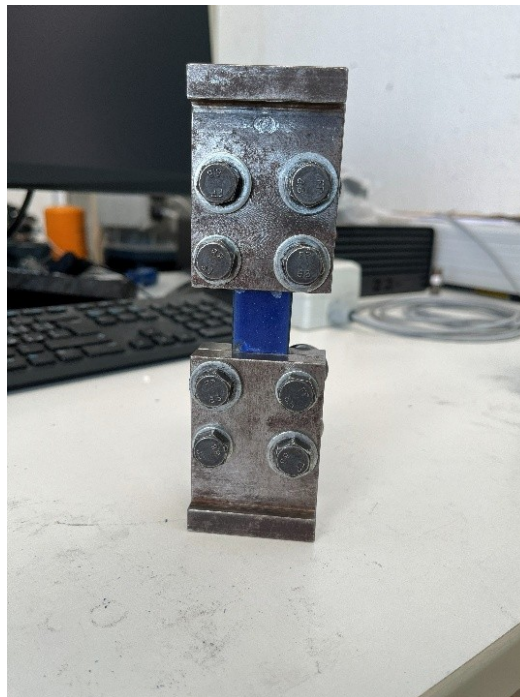


Figura 17: Blocco provino e afferraggi metallici

Successivamente, il blocco preassemblato viene inserito all'interno delle morse della macchina di trazione. Durante i primi test, questa fase ha evidenziato una specifica criticità operativa: inizialmente, infatti, l'installazione veniva effettuata a macchina spenta. Tuttavia, al momento dell'accensione dell'impianto, lo sbalzo improvviso di pressione generava un'anomala sollecitazione di compressione sul provino, causando il distacco indesiderato dello smalto.

Per ovviare a tale problematica, si è stabilito di eseguire l'operazione con l'impianto attivo: attraverso una regolazione fine della corsa dal pannello di controllo, è stato possibile allineare accuratamente il pistone per consentire agli afferraggi di scorrere all'interno delle guide.

Solo a questo punto, assicurato il corretto posizionamento, si procede al serraggio manuale dei bulloni, presenti sia sugli afferraggi del provino sia sulle morse della macchina, garantendo una pressione elevata distribuita su tutta l'area di contatto prima dell'applicazione del carico.



Figura 18: Montaggio blocco su morse macchina

4.2.2 Allestimento area d'esecuzione della prova

Per garantire la corretta esecuzione della prova e l'acquisizione di dati e immagini ad alta risoluzione risulta fondamentale l'impiego di un setup sperimentale dedicato.

L'allestimento dell'area di prova prevede l'utilizzo di due distinte postazioni informatiche.

La prima è interfacciata direttamente con la macchina di trazione per gestirne l'elettronica di comando e i parametri di prova.

Il secondo computer, posizionato nelle immediate vicinanze, è invece dedicato all'acquisizione ottica ed è collegato a un set di tre fotocamere ad alta risoluzione:

- **Due telecamere**, equipaggiate con appositi obiettivi, sono posizionate con distanza e angolazione calibrate per massimizzare l'accuratezza della misura stereoscopica. Esse sono orientate verso il tratto utile della superficie provvista di *speckle pattern*, al fine di studiare tramite *DIC* le deformazioni del substrato metallico.
- **Una terza telecamera** è posizionata sul lato opposto in modo da inquadrare la superficie smaltata. Questa permette di monitorare l'evoluzione del danno sul rivestimento, individuando visivamente l'istante esatto in cui inizia a rompersi e a distaccarsi dal provino.

Questa seconda postazione è dotata del software MatchID, impiegato per l'acquisizione sincronizzata e la successiva elaborazione delle immagini, sia della faccia provvista di *speckle pattern* sia del lato smaltato del provino.

Completato l'allestimento dell'apparato e il corretto montaggio del provino alla macchina, si procede con la messa a fuoco delle telecamere. Questa operazione è fondamentale per garantire immagini chiare e nitide in ingresso al software, condizione indispensabile per scongiurare errori di tracciamento nelle successive analisi *DIC*.

La regolazione viene eseguita manualmente operando sugli obiettivi delle telecamere e verificando in tempo reale la qualità dell'immagine direttamente sull'interfaccia del programma.

Bisogna sottolineare che in questo passaggio è necessario chiudere il diaframma delle telecamere, il quale però comporta una diminuzione della luminosità dell'immagine, motivo per cui è stato inserito un doppio sistema di illuminazione, progettato appositamente per garantire una luce uniforme e di alta qualità su entrambe le facce del provino.

Successivamente, si esegue la calibrazione del sistema stereoscopico *DIC-3D* già approfondita al paragrafo [3 *Digital Image Correlation (DIC)*]. Questa procedura restituisce in output un file che verrà poi inserito durante la fase di elaborazione delle immagini, consentendo di associare i corretti parametri a ogni set di fotogrammi registrati.

Una volta completate tutte le operazioni di preparazione del provino, del banco di prova e del sistema ottico, si può procedere con l'avvio della prova.

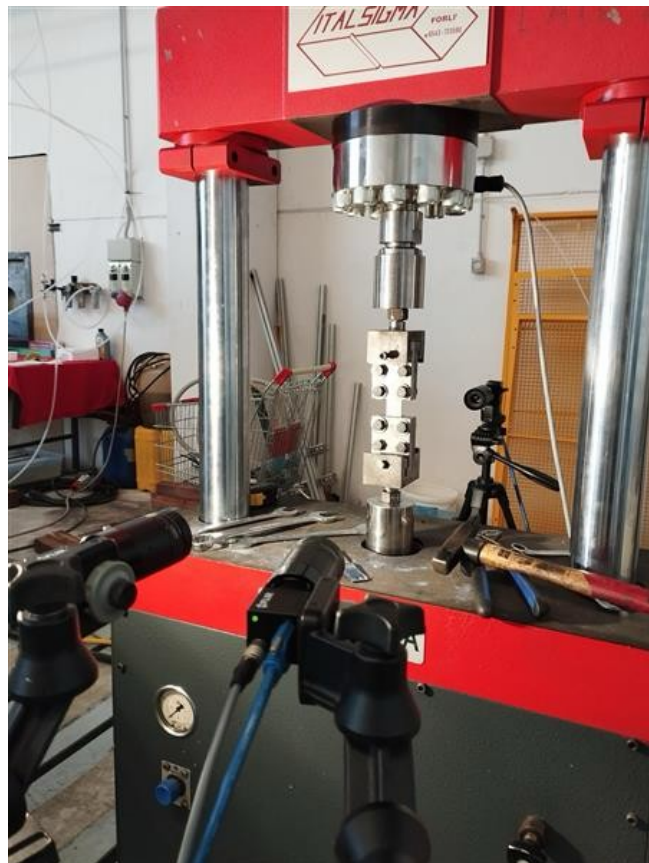


Figura 19: Allestimento area d'esecuzione prova di trazione statica

4.2.3 Avviamento prova ed acquisizione dei dati

La configurazione iniziale dei parametri di controllo rappresenta una fase centrale dell'attività sperimentale, poiché definisce le condizioni operative dell'intero test.

Operando dal computer collegato alla macchina di trazione, tramite l'elettronica di comando, si procede all'impostazione del generatore di rampa.

In ambito sperimentale, il termine "rampa" indica l'istruzione fornita al pistone per spostarsi o applicare una forza in modo lineare e costante nel tempo, partendo da zero fino a raggiungere un valore limite prestabilito, chiamato "setpoint".

Poiché i test in oggetto sono stati condotti in controllo di corsa, il parametro controllato rigidamente dalla macchina è lo spostamento della traversa mobile. Questa modalità operativa è essenziale, in quanto permette di imporre al provino una velocità di deformazione costante per tutta la durata della prova.

Una volta definito il setpoint, che nel setup utilizzato presenta segno negativo per convenzione dell'asse di trazione, la velocità di prova è stata impostata a un valore nominale di $0,008 \frac{mm}{s}$.

Parallelamente, sono stati definiti i parametri di registrazione dei dati provenienti dalla cella di carico posizionata sulla macchina. In particolare, si è deciso di adottare una frequenza di campionamento pari a 1000 Hz, con esportazione dell'output in formato ".dat".

Dal secondo computer, dedicato al sistema DIC, sono state configurate le impostazioni di acquisizione del software MatchID. In questa fase, un parametro importante è il "framerate", ossia la frequenza di campionamento delle telecamere, che determina la densità dei dati in ingresso e la risoluzione temporale dell'analisi.

Una frequenza eccessivamente elevata produrrebbe una mole di immagini tale da appesantire il processo del software e la memoria del computer; al contrario una frequenza troppo bassa, rischia di non cogliere adeguatamente istanti importanti per l'elaborazione.

Per ottimizzare tale compromesso e correlare visivamente l'evoluzione del danneggiamento, si è optato per una frequenza di acquisizione pari a 1 Hz.

Infine, poiché sia l'elettronica della macchina sia il sistema ottico registrano le rispettive grandezze in funzione del tempo, l'avvio dell'acquisizione dei due sistemi è stato sincronizzato manualmente. Questa accortezza è indispensabile per evitare disallineamenti temporali in fase di elaborazione.

Esegui	Nome canale	SetPoint 1 [UI]	Velocità 1 [UI/s]	Setpoint 2 [UI]	Velocità 2 [UI/s]	Modalità di ctrl.
No	Ch 1	-30	0.08	---	---	Corsa

☐

Tempo trascorso
da inizio rampa

Figura 20: Pannello del generatore di rampe

Grafico
 Parametri acquisizione

Frequenza di campionamento [Hz]

Durata acquisizione [s]

Ultimo file acquisito

Commento

Ricerca

Cliente

Nome tecnico

Avvio acquisizione da generatore
 ☐

Arresta acquisizione allo stop generatore
 ☐

Acquisizione con trigger
 ☐

Trigger slope

Canale trigger

Soglia di trigger [mm]

Durata pre-trigger [s]

Figura 21: Pannello di acquisizione dei dati

4.3 Preparazione prova di trazione a fatica

Oltre alle prove di caratterizzazione statica, la campagna sperimentale ha previsto l'esecuzione di prove di trazione ciclica, finalizzate a valutare la resistenza a fatica del provino smaltato.

L'obiettivo della ricerca consisteva nel condurre una serie estesa di test per determinare l'esatto numero di cicli in corrispondenza del quale si innescava la rottura dello smalto.

Nello specifico, l'intento era quello di tracciare una **curva di Wöhler ($\sigma-N$)** riferita esclusivamente al cedimento a fatica del rivestimento, allo scopo di comprendere come il danneggiamento di tale strato protettivo influenzasse la tenuta del substrato metallico e viceversa.

Come verrà discusso nei paragrafi successivi, il presente lavoro espone una prima serie di risultati utili; il completamento della curva sarà infatti oggetto di futuri sviluppi della ricerca.

Analogamente a quanto illustrato per i test statici, l'analisi dei risultati deve essere preceduta dalla descrizione delle operazioni preliminari e del *setup* di prova.

4.3.1 Allestimento provino e banco di prova

La preparazione del provino per la prova di trazione ciclica risulta pressoché identica a quella già descritta per la prova statica, a eccezione di un'importante differenza metodologica: in questo test non si è fatto ricorso alla tecnica *DIC* per il monitoraggio del campo deformativo.

Di conseguenza, la superficie in acciaio non è stata pretrattata con lo *speckle pattern*; il lamierino è stato quindi montato negli afferraggi direttamente nel suo stato di fornitura originario.

Successivamente, l'assieme preassemblato è stato alloggiato tra le morse della macchina di trazione.

Analogamente a quanto stabilito per le prove statiche, l'installazione è avvenuta a impianto attivo, al fine di prevenire l'innescò di colpi di compressione sul provino.

Per quanto riguarda il setup di acquisizione ottica, non essendo necessaria la ricostruzione stereoscopica *DIC*, è stata impiegata una singola telecamera ad alta risoluzione, supportata da un sistema a singola illuminazione.

L'obiettivo è stato orientato direttamente sulla superficie smaltata del campione, al fine di registrare visivamente l'istante esatto in cui si verificava il distacco dello smalto durante l'esecuzione dei cicli di carico.



Figura 22: Allestimento banco prova a fatica

4.3.2 Avviamento prova ed acquisizione dati

Analogamente a quanto descritto per i test statici, la configurazione dei parametri di acquisizione rappresenta un passaggio preliminare di fondamentale importanza, in quanto definisce le condizioni per il corretto avviamento della prova a fatica.

L'acquisizione dei dati è stata condotta in parallelo attraverso due sistemi distinti.

Il primo computer, direttamente interfacciato con la macchina di trazione, ha gestito l'acquisizione dei dati rilevati dalla cella di carico: in linea con le prove statiche, la frequenza di campionamento è stata mantenuta a 1000 Hz.

Il secondo computer, collegato al sistema ottico, ha gestito la registrazione delle immagini mediante il software SpinView. Anche per questa postazione si è scelto di mantenere continuità con i test precedenti, impostando un “*framerate*” di 1 Hz.

Definiti i parametri di acquisizione, si è proceduto alla configurazione dei parametri di prova.

I test a fatica sono stati condotti in controllo di forza; la macchina è stata pertanto configurata imponendo un'ampiezza di carico massima e mantenendo un carico minimo sempre positivo di circa 1 kN. Questa scelta ha permesso di garantire un regime di pura trazione durante le prove.

Per gestire questi cicli di carico si è utilizzato il generatore di funzioni integrato nel software.

Come forma dell'onda si è scelta la sinusoide e la frequenza è stata fissata a 20 Hz, in ogni test.

Un aspetto a cui si è prestata molta attenzione è stata la fase di avvio. Lavorando in controllo di forza, impartire immediatamente l'ampiezza di carico massima causerebbe un urto violento sul campione. Per evitarlo, il parametro di “*Span Rate*” è stato impostato al 100 [%/s]; in questo modo la macchina applicava le forze in modo graduale, raggiungendo i valori di carico di regime impiegando esattamente un secondo.

Infine, le prove sono state configurate per procedere a oltranza, impostando a zero il limite di cicli da eseguire. Lo scopo era mantenere ininterrottamente il carico ciclico così da aspettare il verificarsi del distacco completo dello smalto per poi successivamente interrompere la prova.

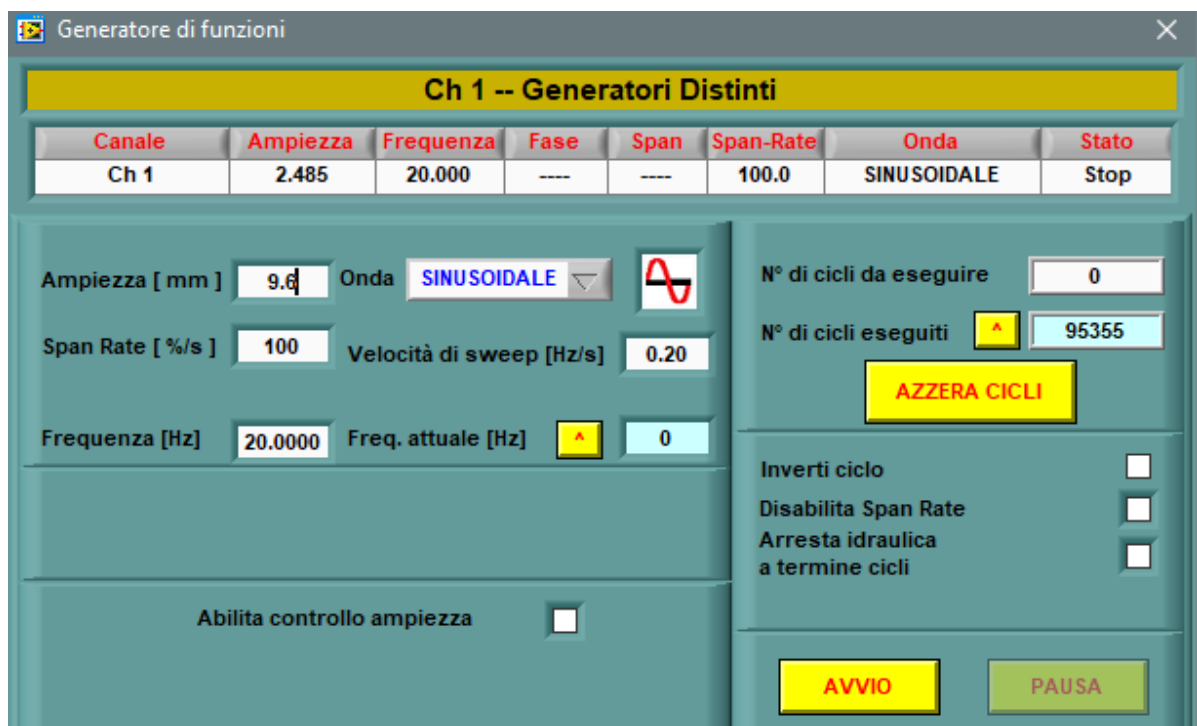


Figura 23: Pannello generatore di funzioni prove a fatica

4.4 Criticità riscontrate durante i test

Nel corso del presente lavoro di tesi, l'obiettivo primario di ottenere un'ampia base statistica di dati è stato parzialmente limitato dall'insorgenza di alcune criticità di natura tecnica e metodologica. Tali vincoli sperimentali, uniti alle ristrette tempistiche a disposizione, hanno ridotto il numero di test validi originariamente prefissato.

Oltre alla problematica relativa alla compressione del provino, già discussa al sottoparagrafo [4.2.1], un altro ostacolo emerso durante le prove ha riguardato il sistema di raffreddamento della macchina. In particolare, il chiller si è rivelato non abbastanza potente per smaltire il calore. La sua insufficiente potenza frigorifera causava il surriscaldamento dell'unità, che andava in blocco al raggiungimento della temperatura limite di circa 25 °C.

Di conseguenza, l'olio del circuito superava rapidamente la soglia critica dei 65 °C, provocando l'arresto forzato del sistema. Per risolvere il problema, si è deciso di raffreddare l'impianto usando la normale acqua di rete in ausilio al chiller. A tal proposito, sono stati progettati in ambiente CAD (Solid Edge) due appositi raccordi portagomma per il collegamento delle tubazioni.

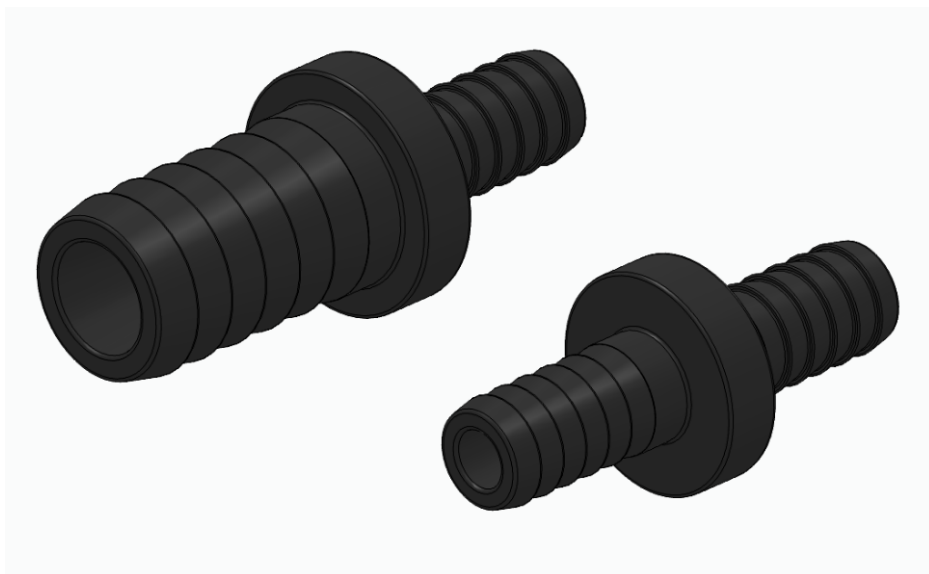


Figura 24: Raccordi portagomma

Un'ulteriore criticità emersa è legata alla elevata rigidità dell'acciaio utilizzato, la cui fase elastica si esaurisce in corrispondenza di deformazioni microscopiche. In queste condizioni, il sistema stereoscopico tendeva a sovrastimare il campo deformativo a causa dei propri limiti di risoluzione ottica, rendendo inaffidabile il calcolo del modulo elastico.

Parallelamente, si è aggiunto un limite fisico della macchina: la naturale presenza di giochi meccanici tra i componenti le impediva di seguire e imporre in modo sufficientemente microscopico e preciso gli spostamenti. A causa di tali fattori, si è rivelato difficile impostare le prove guardando la deformazione, scegliendo dunque di lavorare in *controllo di forza*.

Inoltre, anche la fase di allestimento del banco di prova ha evidenziato difficoltà legate al sistema di bloccaggio dei campioni. L'impiego di morse meccaniche piatte ha esposto i campioni di diversi test a fenomeni di scorrimento o "*slippage*" durante l'applicazione del carico.

Nelle prove statiche, eseguite in controllo di corsa, lo scorrimento si è tradotto in un errore di misurazione. Il software, infatti, registrava uno spostamento falso credendo che il materiale si fosse allungato, sfalsando così i dati del test.

Nelle prove a fatica, invece, la macchina operava in controllo di forza. In questo caso, quando il provino scorreva, la resistenza tra le morse calava all'improvviso. Per compensare questa perdita e ripristinare il carico impostato, la macchina reagiva tirando bruscamente il pistone. Questo scatto improvviso rischiava di far staccare lo smalto in modo anomalo, invalidando la prova.

Per contrastare questo fenomeno si è reso necessario applicare maggiori forze di serraggio; tuttavia, l'elevata pressione delle morse generava dei piccoli difetti sul tratto smaltato in prossimità della zona di presa. Questi micro-danneggiamenti facevano sì che durante l'applicazione del carico la deformazione partisse da quell'area specifica, innescando il distacco dello smalto in quelle zone anziché nel tratto utile centrale del provino.

Questa condizione non è stata tecnicamente risolta ed è rimasta una costante per tutta la durata della campagna prove; tuttavia, durante ogni montaggio, si è operato con la massima attenzione per cercare di limitarla il più possibile.

5 Elaborazione dei dati e risultati

5.1 Elaborazione dati prove di trazione statiche

Al termine delle prove, l'elaborazione dei risultati ha richiesto la gestione parallela di due diverse tipologie di dati all'interno dell'ambiente MatLab.

Da un lato abbiamo i dati grezzi relativi alla forza applicata e allo spostamento del pistone, registrati in continuo dal software della macchina idraulica. Essi sono stati estratti dal sistema ed esportati sotto forma di file numerici con estensione .dat. Dopodiché, i file sono stati importati all'interno dell'ambiente MatLab. Attraverso lo sviluppo di un apposito script, è stato possibile estrarre le matrici di dati, associando le rispettive colonne alle grandezze fisiche di interesse. Questa fase è risultata cruciale perché ha permesso di studiare la grande mole di dati registrati dalla macchina e ricavarne le curve **Forza-Spostamento**.

Dall'altro lato, l'analisi delle immagini acquisite, condotta tramite il software MatchID, ha consentito di ricavare le mappe di deformazione assiale ϵ_{xx} e di vedere la distribuzione della stessa nel tratto utile.

Per poter elaborare queste informazioni, sono stati estrapolati i dati *export result as a Matrix* (file.mat) ovvero sotto forma di matrice tridimensionale, strutturata in modo tale che le prime due dimensioni rappresentassero le coordinate spaziali dei pixel (x, y) dell'area analizzata, mentre la terza dimensione corrispondesse alla sequenza temporale dei fotogrammi acquisiti.

Questa operazione ha consentito allo script MatLab di estrarre il valore medio di deformazione assiale per ogni singola immagine acquisita e tracciare la curva **Sforzo-Deformazione**. Nello specifico, i valori di forza estratti dalla macchina sono stati divisi per l'area della sezione trasversale iniziale del provino, ricavando così la tensione (σ). Questi valori sono stati poi incrociati, istante per istante, con i dati di deformazione calcolati dal sistema ottico *DIC*.

5.1.1 Curve caratteristiche del materiale e interpretazione

A seguito delle problematiche illustrate nel Paragrafo [4.4], le prove che hanno fornito i dati più attendibili per caratterizzare il comportamento del materiale sono quelle eseguite su due provini, le cui dimensioni sono state evidenziate al paragrafo [4.1].

Nel presente elaborato, per semplificare la trattazione, sono stati chiamati **PG1** e **PG2**.

Innanzitutto, per verificare l'esattezza dei parametri di prova, la velocità reale della rampa è stata ricavata analiticamente dai dati grezzi della macchina, calcolando la pendenza della retta "spostamento-tempo" del pistone. Il risultato di questa interpolazione, rispetto al valore nominale impostato, è illustrato nei grafici seguenti:

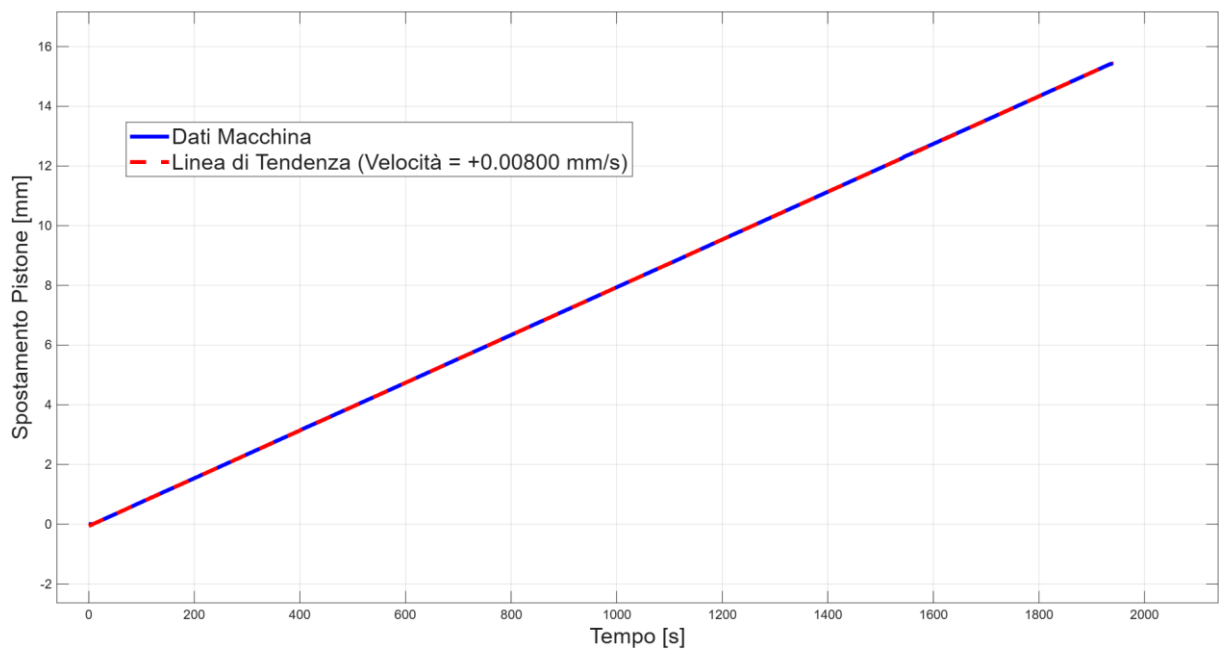


Figura 25: Velocità rampa PG1

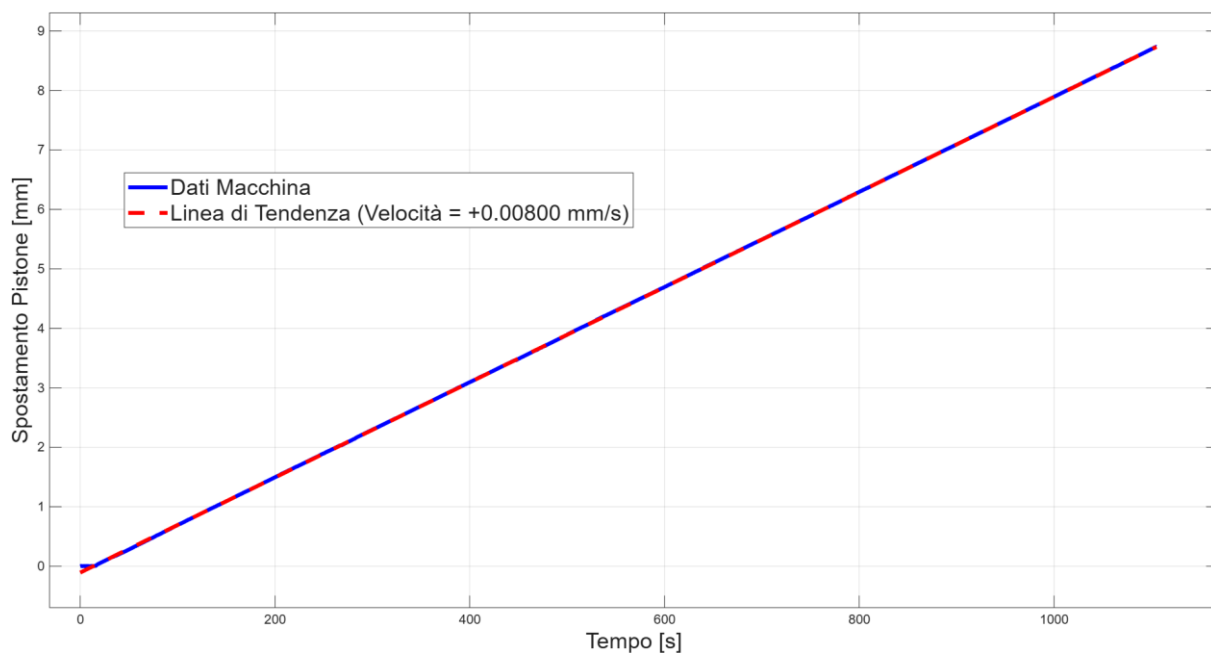


Figura 26: Velocità Rampa PG2

Come si evince dai grafici, l'interpolazione lineare dei dati ha restituito una pendenza costante pari a $0,008 \frac{mm}{s}$. Questo valore conferma che la velocità reale di trazione è risultata perfettamente coincidente con il set-point nominale di $0,008 \frac{mm}{s}$ impostato nel software.

Di seguito viene riportato il grafico forza-spostamento ottenuto elaborando i dati su MatLab del provino PG1:

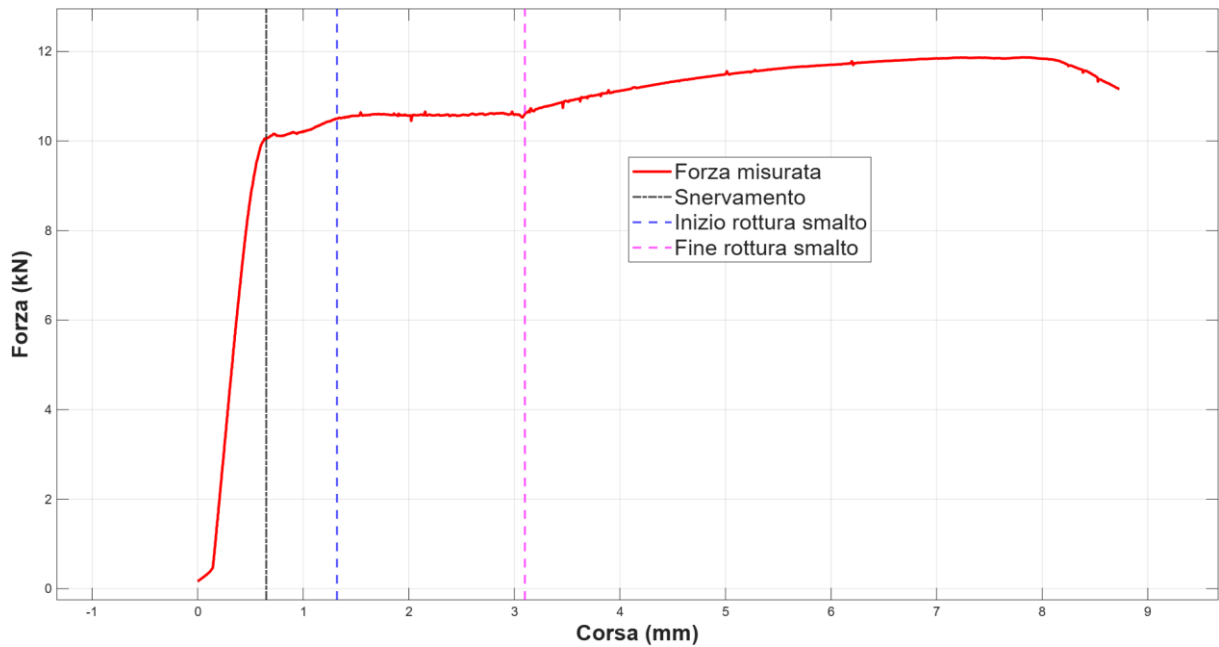


Figura 27: Curva F-S PGI

Il grafico mostra il comportamento del materiale composito sotto carico statico. Il tratto elastico lineare iniziale culmina con lo snervamento del substrato in acciaio (evidenziato dalla linea tratteggiata nera), individuabile a un livello di forza pari a circa 10 kN. Il dato di maggiore importanza emerso da questa curva è il fatto che lo snervamento dell'acciaio non comporta la rottura immediata dello smalto. Al contrario, l'inizio della cricatura e del distacco del rivestimento vetroso (linea tratteggiata blu) si verifica in una fase successiva, a deformazione plastica già avviata e in corrispondenza di un carico leggermente superiore, circa 10,5 kN, per poi esaurirsi procedendo lungo il tratto plastico (linea tratteggiata magenta).

Il posizionamento sul grafico delle rette relative all'inizio e alla fine della rottura dello smalto è stato ottenuto mediante una precisa correlazione tra i fotogrammi acquisiti dal sistema ottico e i dati meccanici della cella di carico.

Nello specifico, avendo impostato per le telecamere una frequenza di campionamento pari a 1 Hz, il numero sequenziale di ciascuna immagine acquisita corrisponde esattamente al secondo di prova in cui è stata scattata. Attraverso l'ispezione visiva dei fotogrammi è stato possibile individuare l'istante esatto di innesco e di esaurimento del danneggiamento superficiale; utilizzando tale riferimento, si è potuto estrapolare con precisione il corrispondente valore di forza registrato dai sensori della macchina nel medesimo istante.

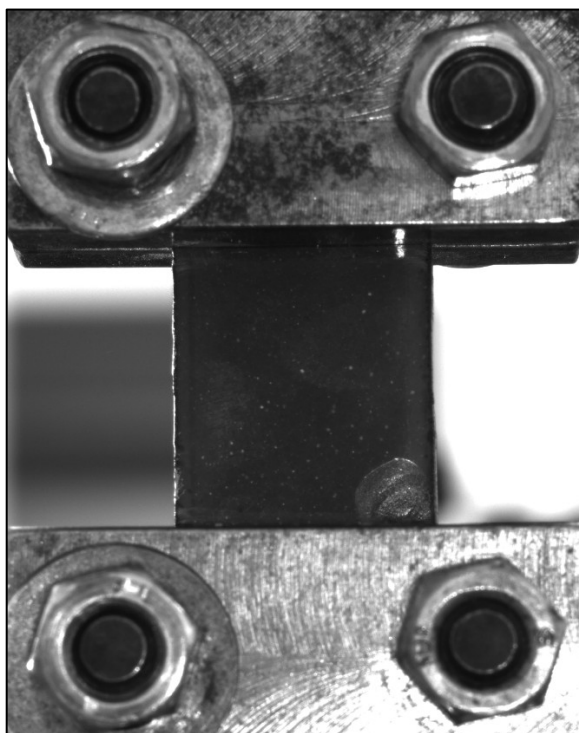


Figura 28: Inizio rottura smalto PG1

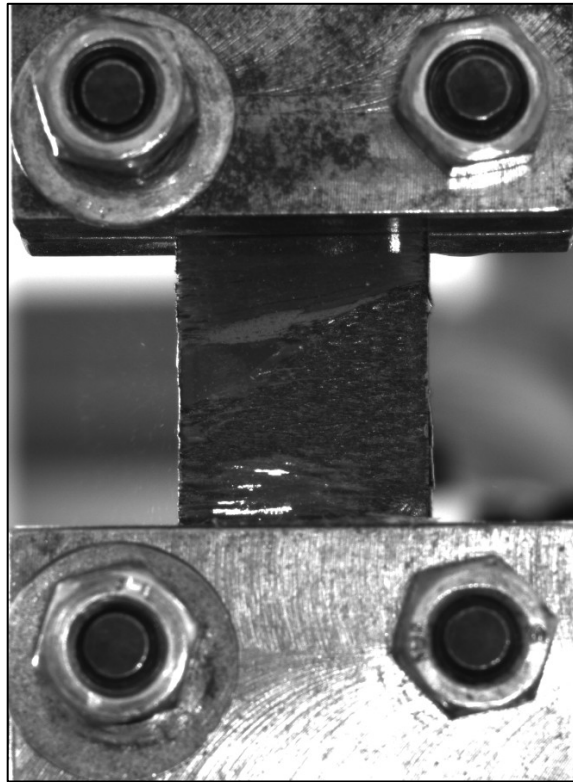


Figura 29: Fine rottura smalto PG1

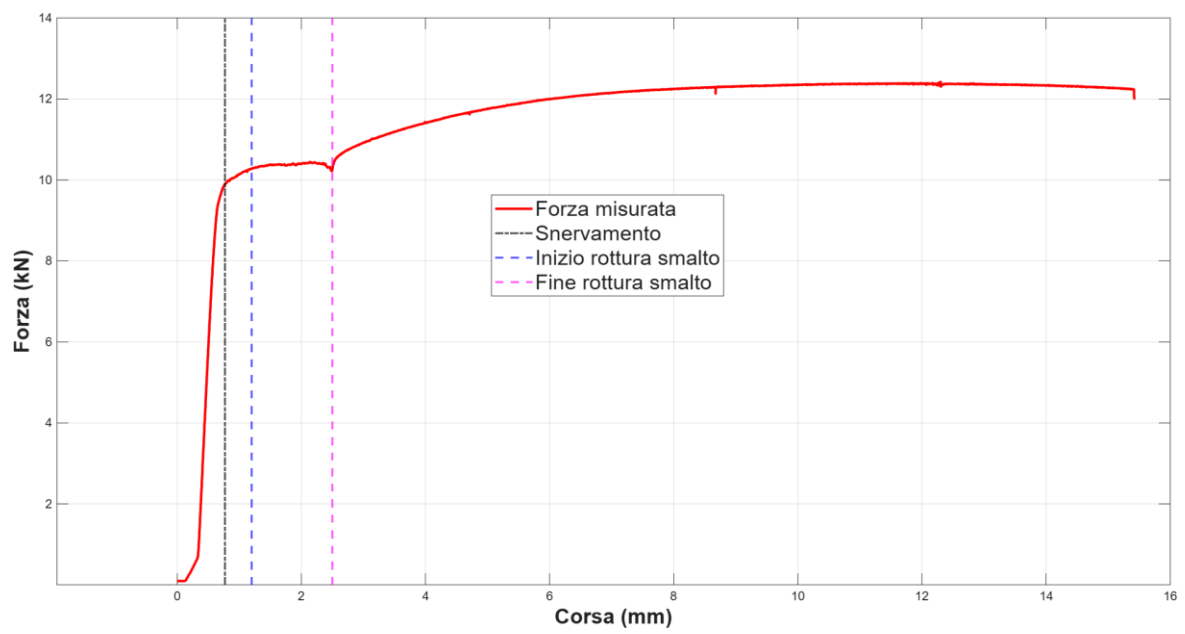


Figura 30: Curva F-S PG2

Il diagramma del secondo provino, PG2, conferma i risultati del primo, dimostrando un'ottima ripetibilità del test. Anche in questo caso, l'acciaio snerva a circa 10 kN (linea nera) e si nota lo stesso ritardo nella rottura: lo smalto non cede subito, ma inizia a rompersi (linea blu) solo quando il metallo sta già subendo una deformazione plastica, a una forza leggermente superiore.

Un dettaglio interessante, rilevabile anche sul grafico del provino PG1, si osserva alla fine della rottura dello smalto (linea magenta), dove il grafico registra un piccolo e improvviso calo della forza. Questo segna il momento esatto in cui il rivestimento vetroso si distacca del tutto, smettendo di colpo di contribuire alla rigidezza del provino.



Figura 31: Inizio rottura smalto PG2

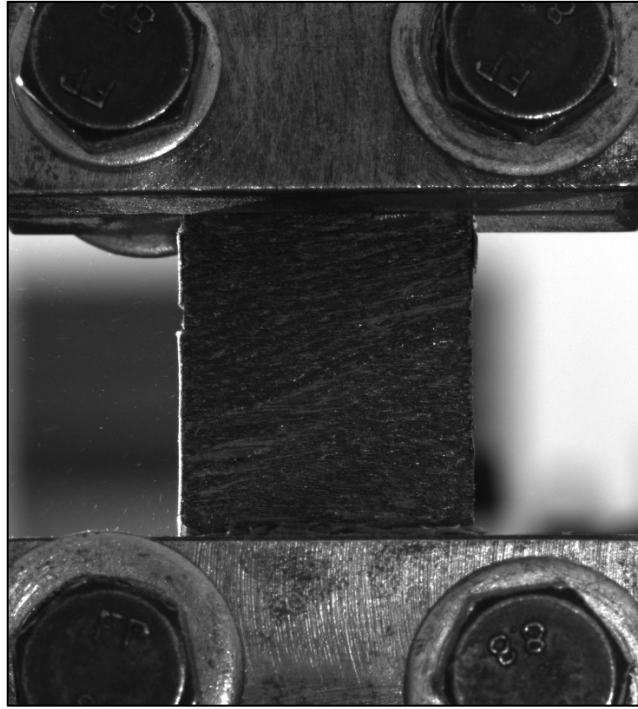


Figura 32: Fine rottura smalto PG2

Come spiegato al paragrafo [5.1] l'elaborazione dei dati della cella di carico con le misurazioni ottiche ha permesso di ricavare il diagramma *Tensione-Deformazione* ($\sigma - \epsilon$) per il provino PG1:

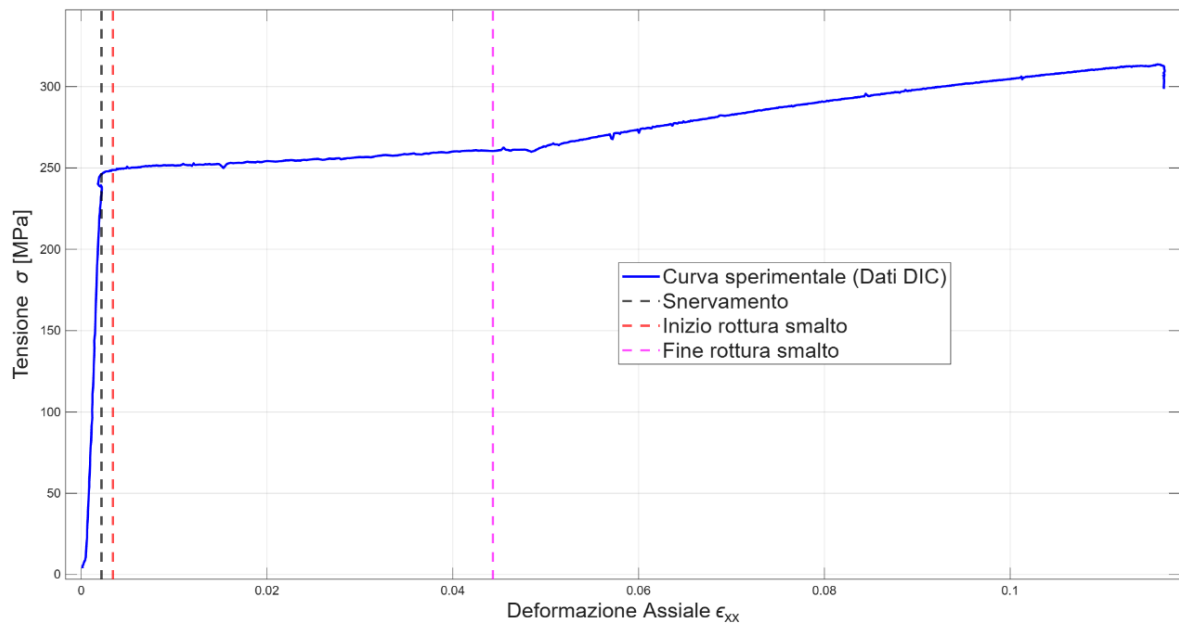


Figura 33: Curva sigma-epsilon PG1

Dal grafico è possibile osservare il tipico comportamento elasto-plastico del materiale. Il tratto elastico lineare iniziale si conclude in corrispondenza della tensione di snervamento dell'acciaio (linea tratteggiata nera), registrata a un valore di circa 230-235 MPa. Tale riscontro sperimentale risulta peraltro coerente con i dati nominali forniti dall'azienda costruttrice per la serie di provini PG. L'analisi della curva in funzione della deformazione assiale ϵ_{xx} offre un'importante conferma sul meccanismo di cedimento del rivestimento. L'innesco della rottura dello smalto (linea rossa) non coincide con il limite elastico del metallo, ma si manifesta solo successivamente, quando il substrato è già entrato in campo plastico.

Il processo di progressivo distacco dello strato vetroso si sviluppa lungo la prima fase di deformazione plastica, per poi esaurirsi definitivamente in corrispondenza della linea magenta, a un valore di deformazione ϵ_{xx} prossimo allo 0,045. Superata questa soglia, lo smalto risulta ormai completamente saltato; di conseguenza, l'ultimo tratto ascendente della curva descrive esclusivamente la fase di *incrudimento* del lamierino in acciaio nudo, la cui tensione continua a salire fino all'interruzione del test.

Analogamente a quanto osservato per il primo campione, il diagramma *Tensione-Deformazione* ($\sigma - \epsilon$) del provino PG2 conferma l'ottima ripetibilità dei risultati sperimentali:

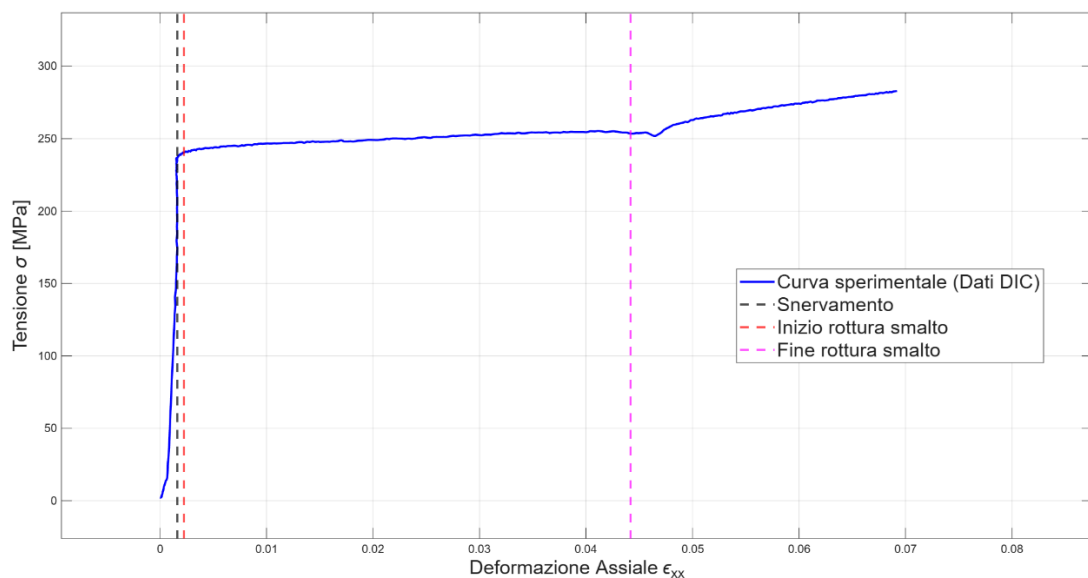


Figura 34: Curva sigma-epsilon PG2

Il software MatchID, oltre ad aver permesso di esportare i dati di acquisizione che sono poi stati elaborati da Matlab per ottenere le curve *sforzo-deformazione*, ha permesso di estrapolare le deformazioni registrate sul tratto utile del substrato metallico del provino e di generare delle **colormap**.

Una colormap o mappa cromatica è una rappresentazione grafica che associa a ciascun punto della superficie del provino una specifica tonalità, la cui intensità è proporzionale al valore della grandezza in esame, in questo caso, la deformazione. Per consentire un'immediata lettura quantitativa del grafico, la mappa è sempre affiancata da una barra graduata o colorbar che funge da legenda, traducendo la scala cromatica nei rispettivi valori numerici. [11]

Nella presente campagna sperimentale sono stati esportati, tramite il software, due video che consentono di visualizzare l'evoluzione temporale della deformazione dell'acciaio, una delle grandezze fornite dalla ricostruzione tridimensionale ottenuta tramite *DIC stereoscopica*, lungo la coordinata X del piano.

Di seguito si riportano due istanti estratti dalle registrazioni video *DIC* dei due provini, assieme ai corrispondenti fotogrammi che illustrano lo stato dello smalto. Tali immagini sono state acquisite in simultanea, al fine di garantire una perfetta corrispondenza temporale:

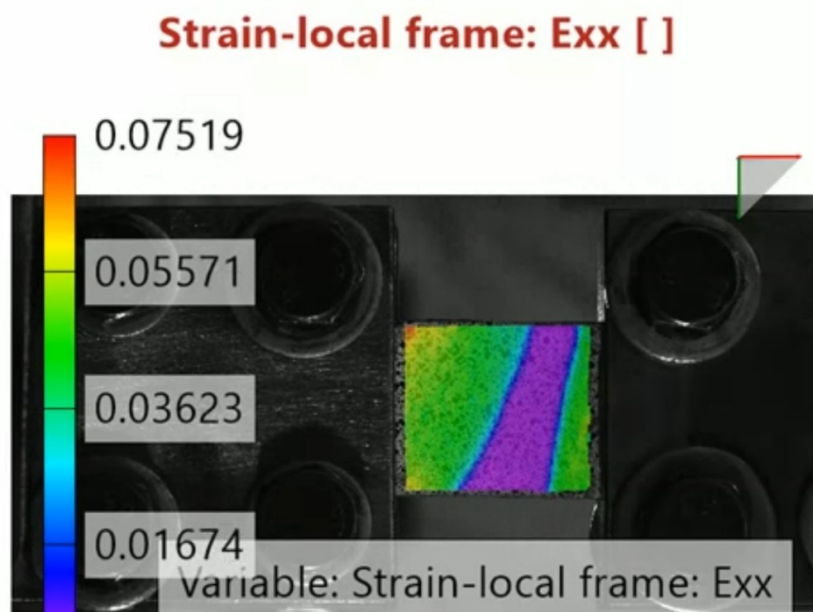


Figura 35: Mappa di deformazione PGI

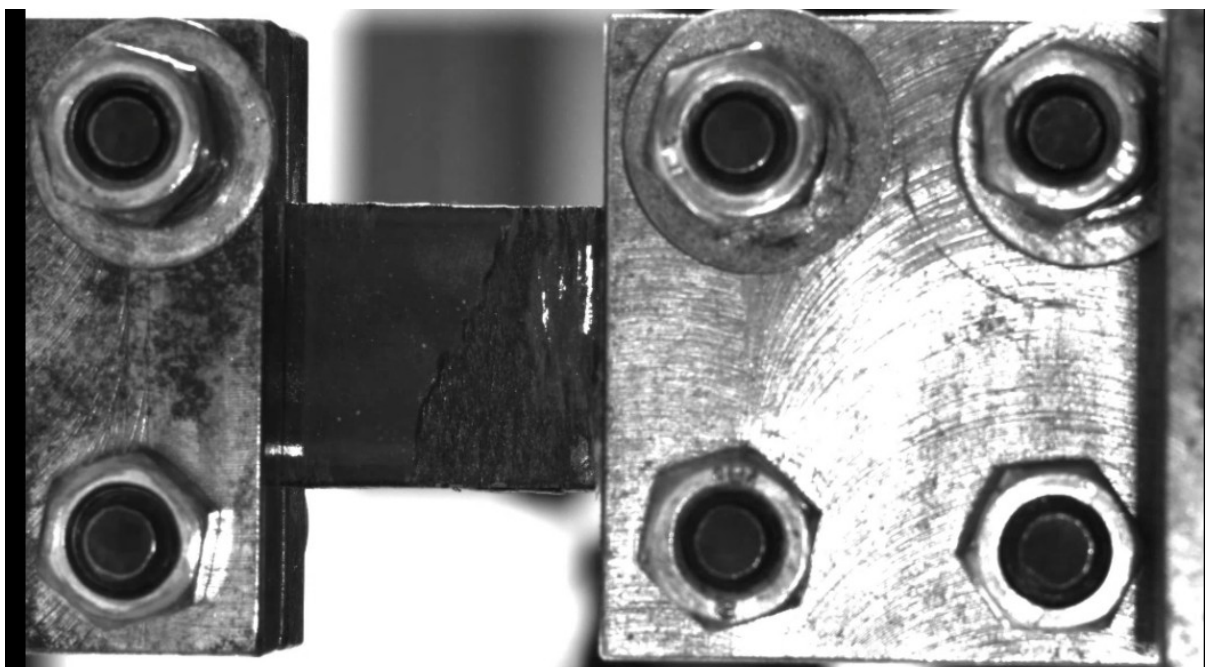


Figura 36: Condizione smalto PG1

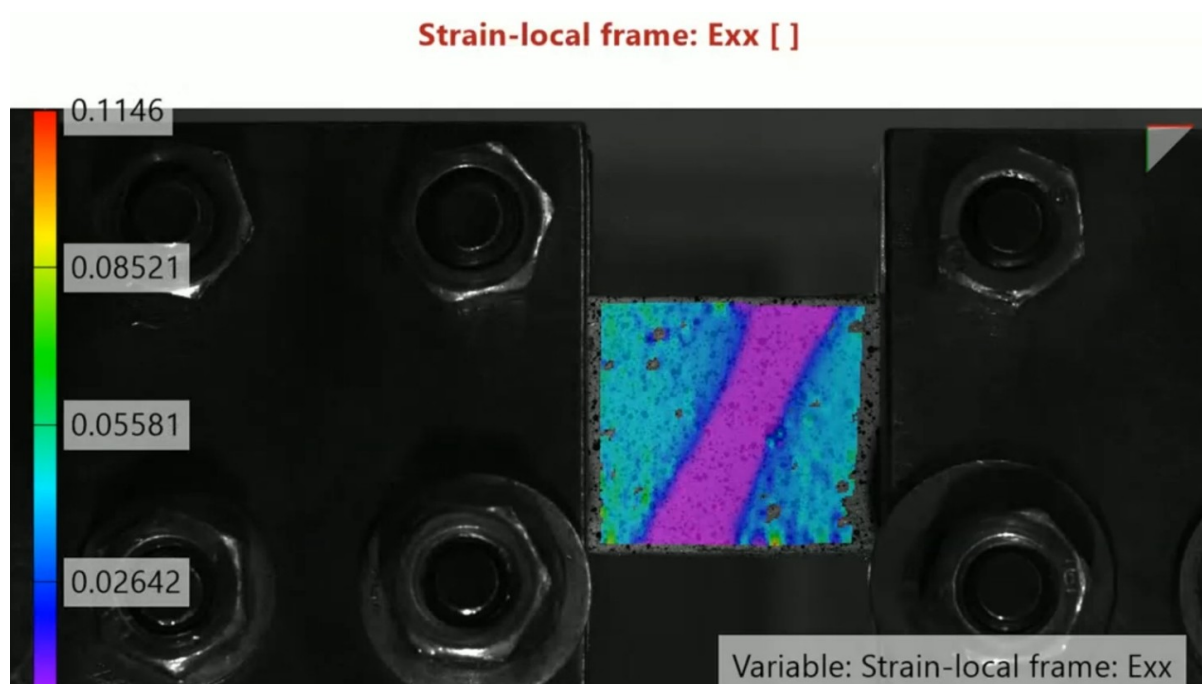


Figura 37: Mappa di deformazione PG2

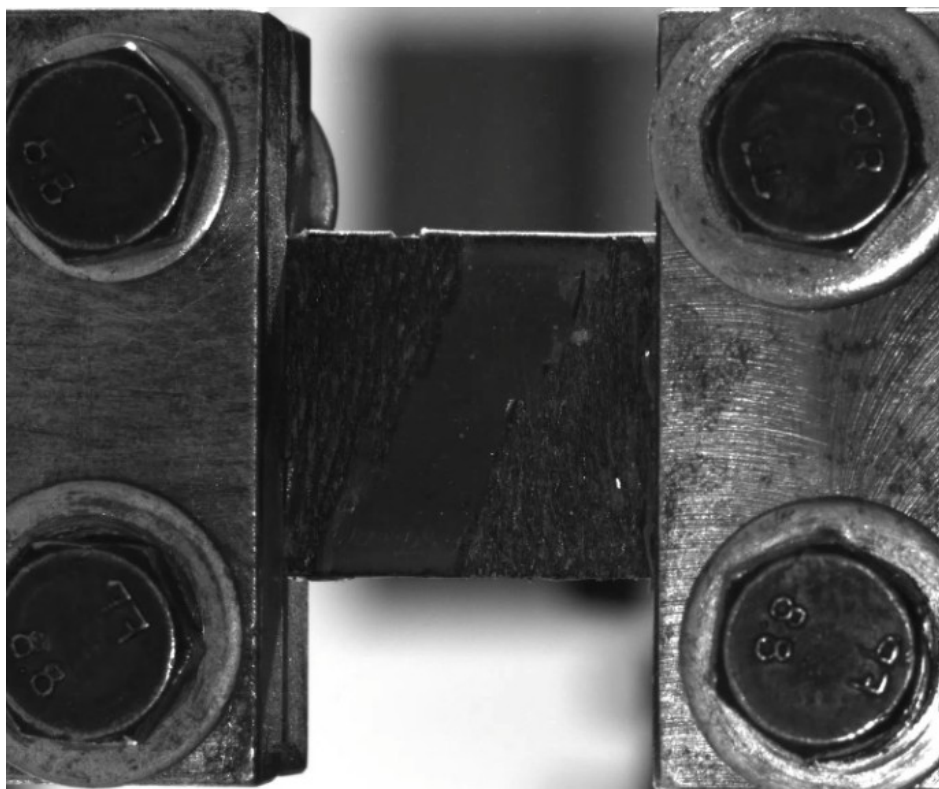


Figura 38: Condizione smalto PG2

Dall'analisi comparativa delle immagini, è possibile osservare come la geometria diagonale del distacco, visibile sulla superficie smaltata, coincida esattamente con la banda di deformazione plastica localizzata registrata sulla superficie metallica del provino.

Tale evidenza dimostra che le aree sottoposte a maggiore deformazione corrispondono proprio a quelle in cui il rivestimento cede in modo progressivo.

Questa sovrapposizione visiva conferma una chiara dinamica: il distacco del rivestimento risulta essere la diretta conseguenza del cedimento dell'acciaio sottostante. Infatti, quando l'acciaio del substrato subisce una deformazione eccessiva, lo smalto non è in grado di deformarsi di pari passo.

A causa della sua rigidità vetrosa, lo strato superficiale tende inizialmente a criccarsi, per poi arrivare al distacco completo lasciando scoperto l'acciaio vergine sottostante.

5.2 Elaborazione dati prove di trazione a fatica

All'inizio della campagna sperimentale, prima ancora di caratterizzare il materiale tramite le prove statiche, l'attenzione si è concentrata sui test a fatica per valutare se la presenza del rivestimento vetroso contribuisse in modo significativo alla rigidità complessiva del provino o se ne alterasse la risposta sotto carico ciclico.

L'ottenimento di risultati significativi ha richiesto una lunga fase di indagine. Impostando inizialmente sulla macchina carichi di prova inferiori al limite di snervamento dell'acciaio (in un intervallo compreso tra 7,5 e 8,5 kN), i provini non hanno mostrato alcun danneggiamento. Le prove si sono infatti concluse senza rotture dopo decine di migliaia di cicli, raggiungendo la tipica condizione di “*run-out*”.

Questo risultato, seppur non utile ai fini dell'obiettivo primario della ricerca, ha fornito una buona indicazione metodologica. Aver dimostrato che, finché l'acciaio si deforma esclusivamente in campo elastico, il rivestimento resiste efficacemente alle sollecitazioni cicliche senza subire distacchi, ha reso infatti evidente la necessità di impostare un *set* di carico maggiore.

Di conseguenza, per poter innescare e osservare l'effettiva rottura a fatica, è stato necessario modificare l'approccio sperimentale e ricalibrare l'ampiezza massima della sollecitazione.

A tal fine, si è proceduto all'esecuzione delle prove statiche: la loro analisi ha permesso di individuare il livello esatto di forza in corrispondenza del quale l'acciaio iniziava a deformarsi plasticamente, pur mantenendo, come precedentemente illustrato, lo smalto ancora completamente integro.

Utilizzando tale valore come target per il controllo di forza, è stato possibile ottenere il primo risultato utile della campagna prove, registrando il momento esatto in cui lo smalto iniziava a saltare. Nello specifico, l'ampiezza di carico nominale imposta è stata pari a 9,6 kN, con picchi massimi che raggiungevano i 10 kN a causa degli effetti inerziali intrinseci della macchina di prova. I restanti parametri di prova impostati corrispondono a quelli già illustrati nel paragrafo [4.3.2].

Successivamente, analogamente a quanto descritto per le prove statiche, i dati registrati dai sensori della macchina sono stati esportati sotto forma di file numerici con estensione *.dat* e importati nell'ambiente MatLab per la relativa elaborazione tramite un apposito script.

5.2.1 Curve di fatica e interpretazione

Il primo passaggio dell'elaborazione ha previsto l'estrazione di un intervallo temporale limitato, pari a circa 0,2 secondi (corrispondente a 4 cicli di carico), al fine di analizzare l'andamento temporale della forza e dello spostamento della traversa. Tale analisi è stata condotta con finalità di validazione e di controllo della qualità dei dati acquisiti:

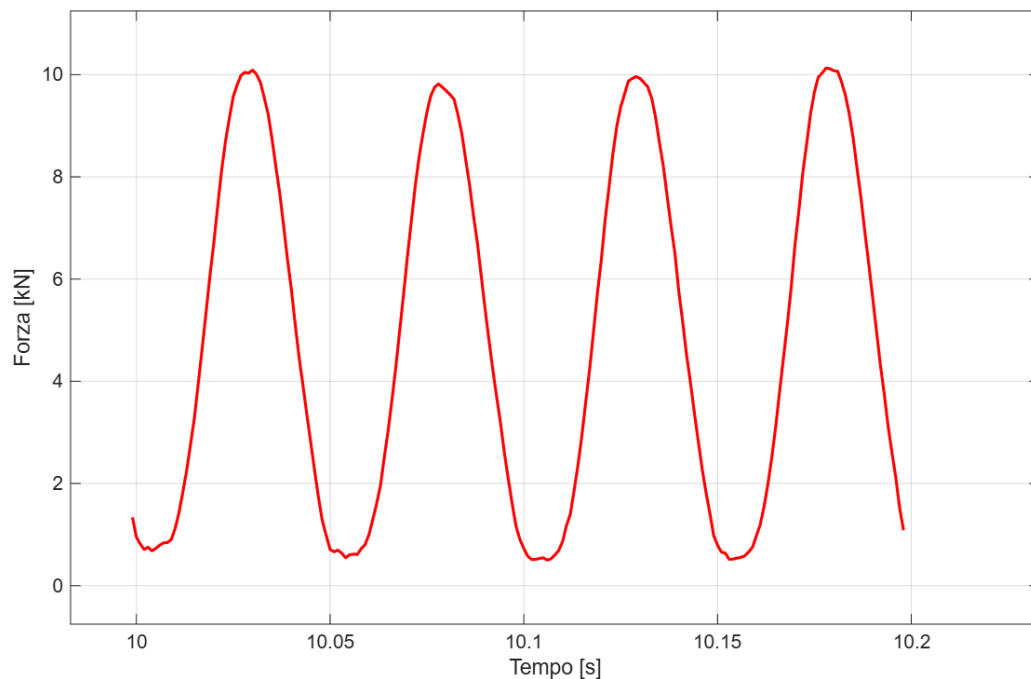


Figura 39: Grafico F-t zoom su 4 cicli

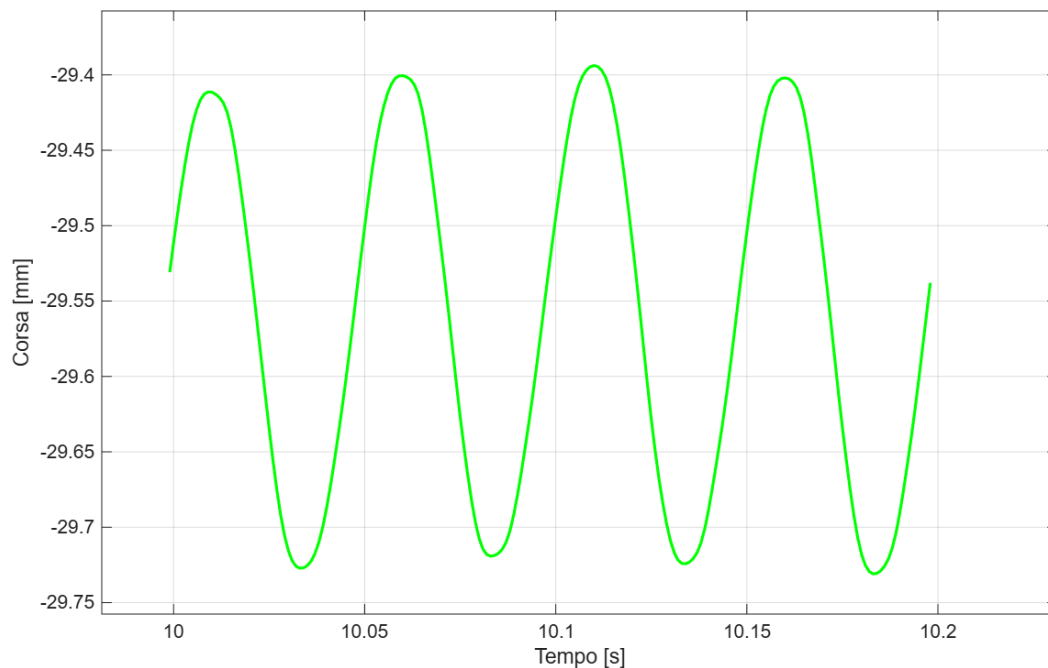


Figura 40: Grafico S-t zoom su 4 cicli

Osservando le curve, è emerso un andamento sinusoidale corretto. È stato possibile constatare visivamente che i picchi si ripetevano esattamente ogni 0.05 secondi, confermando che la macchina stava lavorando alla frequenza impostata di 20 Hz.

Inoltre, la sincronia in opposizione di fase tra la forza, che raggiungeva il picco massimo di 10 kN, e la corsa, che raggiungeva la massima estensione verso il basso, ha garantito che il provino stava subendo la corretta sollecitazione di trazione ciclica, senza slittamenti nelle morse o anomalie di acquisizione.

Dall'analisi delle immagini acquisite dalle telecamere a 1 Hz, è stato possibile risalire all'istante temporale in cui si è verificato il salto dello smalto, corrispondente al secondo 700 della prova. Correlando questo dato temporale alla frequenza di prova di 20 Hz, si è potuto dedurre il numero di cicli corrispondente, rilevando l'inizio della rottura a circa 14.000 cicli.

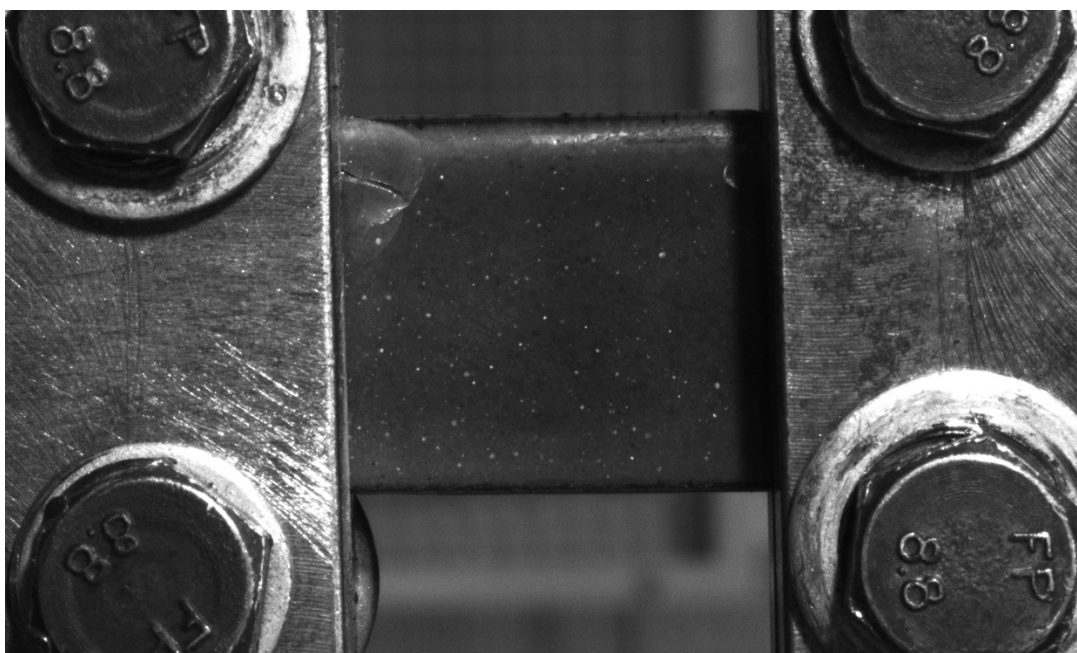


Figura 41: Inizio rottura smalto prova a fatica

Dopo aver verificato la corretta registrazione dei dati e ricavato il numero di cicli sopportati dal provino, si è resa necessaria l'analisi della prova.

In questa fase poiché il sistema salvava mille dati al secondo per tutta la durata del test, il file generato conteneva milioni di righe. La rappresentazione grafica simultanea di tutti questi punti avrebbe comportato un sovraccarico del software di elaborazione e avrebbe prodotto un grafico denso e illeggibile, incapace di mostrare il reale andamento del materiale.

Per ovviare a ciò, si è ricorsi a una tecnica di sottocampionamento. Sapendo che un ciclo di fatica durava 50 punti (1000 Hz / 20 Hz), il codice è stato istruito per elaborare "pacchetti" di 10 cicli alla volta (500 punti). All'interno di ciascun pacchetto, MatLab ha elaborato l'intero set di numeri, estraendo e salvando unicamente due valori: il picco massimo e il picco minimo registrati.

Questa operazione ci ha permesso di scartare le oscillazioni ad alta frequenza che sporcavano il segnale, trasformando i milioni di dati grezzi in una linea continua, capace di illustrare in modo immediato la storia del provino dall'inizio alla fine della prova.

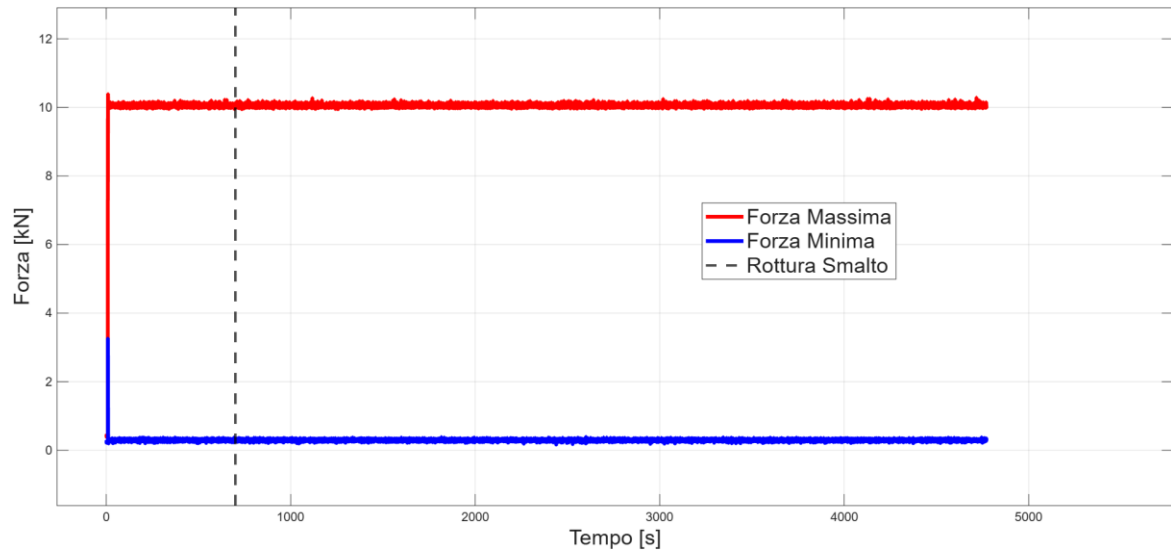


Figura 42: Grafico F-t sottocampionato

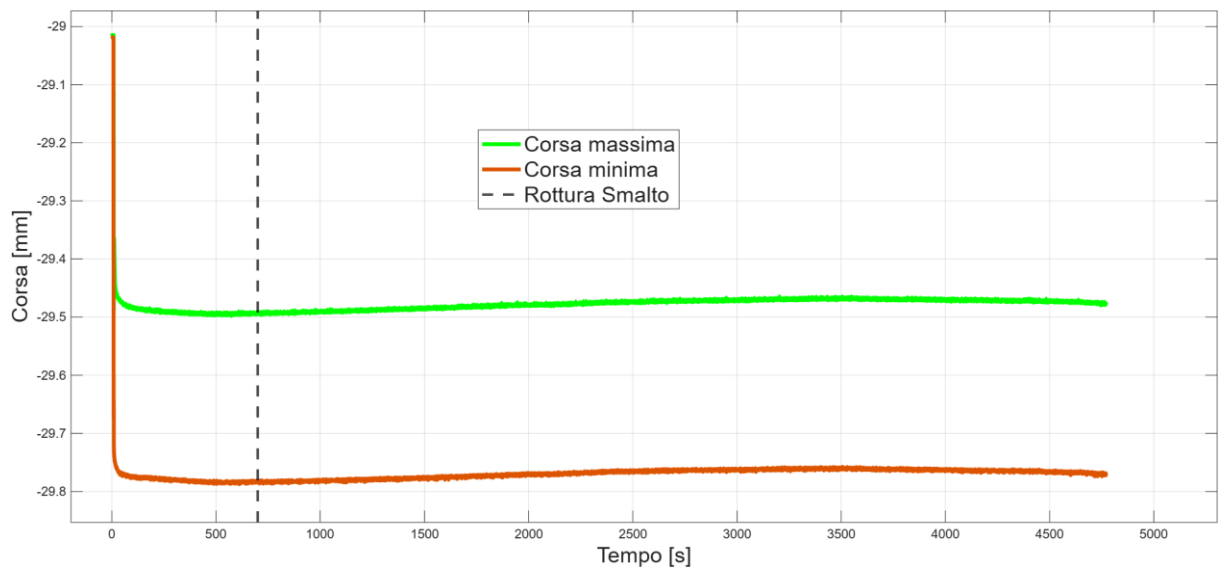


Figura 43: Grafico S-t sottocampionato

Il grafico *forza-tempo* conferma la validità tecnica del test. Esso mostra, infatti, che la macchina ha lavorato in modo impeccabile, mantenendo le bande di carico orizzontali e costanti per tutta la durata della prova, senza alcun calo di prestazione.

Il grafico *corsa-tempo* mostra un fisiologico assestamento iniziale seguito da una lenta deriva naturale. Non si osserva alcun gradino improvviso in corrispondenza dell'istante in cui avviene il distacco del rivestimento. Questa totale assenza di discontinuità porta ad ipotizzare che il salto dello smalto non causa perdita di rigidità nel provino.

Il motivo di questa ipotesi si spiega immaginando l'insieme di acciaio e smalto come due molle disposte in parallelo. Se la rigidità dello smalto non fosse trascurabile, la sua rottura improvvisa avrebbe reso il sistema più cedevole; di conseguenza, per riuscire a mantenere la forza costante, la macchina avrebbe dovuto "tirare" maggiormente, generando un evidente salto nel grafico. Poiché questo gradino non si verifica, è plausibile pensare che il rivestimento vetroso abbia un'influenza trascurabile sulla rigidità totale e che l'acciaio sostiene quasi interamente il carico fin dall'inizio.

Il cedimento dello smalto a 14.000 cicli fornisce il primo punto sperimentale utile per tracciare la *curva di Wöhler*, associando il carico di 10 kN alla vita a fatica del materiale, collocandosi nella zona della fatica ad alto numero di cicli, illustrata al paragrafo [2.1.2].

6 Conclusioni

6.1 Obiettivi raggiunti

Il presente lavoro di tesi ha consentito di analizzare il comportamento meccanico dei provini in acciaio provvisti di rivestimento in smalto ceramico. In particolare, lo studio si è concentrato sull'analisi del comportamento di questo materiale quando sottoposto a sollecitazioni di trazione, sia in campo statico che ciclico, per comprendere come si influenzassero le interazioni tra il substrato metallico e lo strato vetroso superficiale.

L'analisi dei dati raccolti durante la campagna sperimentale ha permesso di trarre considerazioni importanti sul comportamento del materiale composito.

Le prove di trazione statica hanno evidenziato che la presenza dello smalto non altera in modo significativo il comportamento elasto-plastico del provino, ma presenta una propria dinamica di cedimento. È emerso, infatti, che lo snervamento dell'acciaio, non comporta la rottura immediata dello smalto. Esso, non essendo in grado di seguire le eccessive deformazioni del metallo a causa della sua natura vetrosa, inizia a criccarsi e a distaccarsi solo a deformazione plastica già avviata, lasciando scoperto l'acciaio vergine sottostante.

L'impiego della *Digital Image Correlation (DIC)*, integrato ai dati della macchina di prova, ha permesso di mappare le deformazioni locali del provino e la successiva elaborazione tramite script MatLab ha poi tradotto queste informazioni in curve costitutive del materiale fondamentali per l'interpretazione dei dati.

Le prove a fatica impostate con carichi massimi inferiori al limite di snervamento dell'acciaio hanno messo in luce che finché il substrato lavora in campo puramente elastico, lo smalto resiste efficacemente alle sollecitazioni cicliche senza subire distacchi. Infatti, il materiale ha sopportato decine di migliaia di cicli raggiungendo la condizione di “*run-out*”.

Infine, sulla base dei risultati statici, si è identificato il corretto target per i test a fatica in controllo di forza, portando così il materiale a lavorare in prossimità del proprio limite di snervamento. Questo specifico setup assieme all'elaborazione dei dati su MatLab e l'interpretazione dei grafici ottenuti, ha permesso di ottenere il primo risultato utile della campagna di fatica.

6.2 Sviluppi futuri

I risultati ottenuti in questo lavoro, seppur significativi per comprendere le dinamiche di innesco della rottura dello smalto, rappresentano un solido punto di partenza per ulteriori approfondimenti. Per confermare l'affidabilità di tali osservazioni e ampliare il quadro conoscitivo sul comportamento del materiale, si propongono i seguenti sviluppi futuri per le successive campagne di ricerca:

- **Completamento della Curva di Wöhler:** il dato ricavato a 14.000 cicli costituisce attualmente un singolo punto sperimentale. Risulterà pertanto di fondamentale importanza eseguire nuove prove di fatica su numerosi provini a differenti livelli di carico vicino al target ricavato. Ciò permetterà di delineare l'intera curva $\sigma - N$ relativa al salto dello smalto e di individuare con precisione i parametri di fatica del materiale.
- **Prove su provini intagliati:** risulta di grande interesse applicare la medesima metodologia di prova a provini caratterizzati da un intaglio sulla zona centrale del tratto utile. Poiché l'intaglio agisce da concentratore di tensioni, l'obiettivo è analizzare come si distribuisce la deformazione a partire da tale area e valutare le conseguenti ripercussioni sulla resistenza complessiva del campione.
- **Ottimizzazione del sistema di bloccaggio:** le problematiche di scorrimento riscontrate tra le morse della macchina e il provino hanno richiesto forze di serraggio molto elevate, causando micro-danneggiamenti locali vicino alle zone di presa. Si rende quindi necessario l'esecuzione di test con un sistema di afferraggio o di interfacciamento migliorato, capace di garantire una presa salda senza intaccare l'integrità del rivestimento protettivo.

7 Bibliografia

[1] Luigi Rossetti, Relatori: Prof. Sergio Curioni, Prof. Vincenzo Dal Re, Dott. Ing. Andrea Zucchelli, [Dottorato di Ricerca, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna]: “Studio del comportamento meccanico di smalti porcellanati per substrati metallici”

[2] European Enamel Association, *Quality Requirements - Edizione 6.0*, Bruxelles, 2025. Reperibile su: www.european-enamel-association.eu

[3] CISP: “Lo Smalto”. Reperibile su: www.cisp.it/smalto

[4] Roberto Baglioni, Relatore: Prof. Ing. Michele Germani, Correlatore: Dott. Ing. Michele Badaloni, [Tesi di Laurea Magistrale, Università Politecnica delle Marche]: “Sviluppo di un modello predittivo per la vita di un serbatoio: il caso Ariston Thermo Group”

[5] UNI EN 12897:2006

[6] Lezioni di Prof. F. Clementi: “Legame costitutivo”, corso di “Scienza delle costruzioni” della laurea triennale in Ingegneria Meccanica UNIVPM

[7] Lezioni di costruzioni di macchine, Prof. G. Petrucci, Università degli Studi di Palermo
Reperibile su: <https://sites.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Materiali.pdf>

[8] Lezioni di Prof. M. Sasso: “Calcolo a fatica di componenti meccanica”, corso di “Costruzione di Macchine” della laurea triennale in Ingegneria Meccanica UNIVPM

[9] ItalSigma: "Brochure-FPF100.pdf", sezione Macchine Oleodinamiche.

Reperibile su: <https://www.italsigma.it/wp-content/uploads/2022/07/Brochure-FPF100.pdf>

[10] S. Poppinga, M. D. Mylo “Digital image correlation techniques for motion analysis and biomechanical characterization of plants”, 2024, reperibile su: https://www.researchgate.net/publication/377306477_Digital_image_correlation_techniques_for_motion_analysis_and_biomechanical_characterization_of_plants”

[11] Marco Gliaschera, Relatore: Prof. Marco Sasso, [Tesi di Laurea Triennale, Università Politecnica delle Marche]: “Progettazione, realizzazione ed esecuzione di test sperimentali di impatto di un pannello sandwich in materiale composito”