



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

MISURAZIONE OTTICA DELLO SPOSTAMENTO E DELLA DEFORMAZIONE IN PROVE DI CREEP SU GIUNTI INCOLLATI

(OPTICAL MEASUREMENT OF DISPLACEMENT AND
DEFORMATION IN CREEP TESTS ON BONDED JOINTS)

TESI DI LAUREA

Relatore: MARCO ROSSI

Correlatore: GIANLUCA CHIAPPINI

Tesi di Laurea di FRANCESCO ZITO

Anno Accademico 2018/2019

INDICE:

	pagina
1 Introduzione	4
2 Il Creep	5
2.1 - Letteratura e studi del creep	5
2.2 - Il creep nei materiali metallici	6
2.3 - Cedimento dovuto al creep	7
2.4 - Il creep nei materiali viscoelastici	9
2.5 - Che cos'è la viscoelasticità.....	11
2.6 - La prova di creep.....	11
3 Giunzioni incollate	13
3.1 - Giunzioni strutturali	13
3.2 - Tipologie di giunzioni.....	14
3.3 - Incollaggi.....	16
3.4 - Configurazione dell'assemblaggio	17
3.5 - Materiale adesivo.....	19
3.6 - Preparazione delle superfici.....	23
3.7 - Applicazione dell'adesivo e verifica dell'incollaggio	24
3.8 - Fattori ambientali.....	25
3.9 - Vantaggi e svantaggi.....	26
3.10 - Modalità di cedimento.....	28
4 Programma di misurazione della distanza per prove a creep di giunti incollati	30
4.1 – Tirocinio	30
4.2 – Matlab.....	30
4.3 - Obbiettivo del tirocinio.....	31
4.4 - Strumenti per la misurazione del creep.....	32
4.5 - Analisi del programma.....	34
4.6 - Problemi e soluzioni.....	49
4.7 - Risultati dell'analisi dell'immagine.....	50
5 Applicazione del programma su di una vera prova di creep.....	54
5.1 – Informazioni sul creep test.....	54
5.2 – Risultati delle analisi	55

1 INTRODUZIONE

Attualmente per progettare una macchina sono necessari un insieme di fasi, prove e test non trascurabili per poter arrivare ad una corretta ed efficiente esecuzione del lavoro.

Tra queste troviamo lo studio di fattibilità, la scelta del ciclo produttivo e dei materiali, i metodi di giunzione tra più apparati e il test di collaudo.

Particolare attenzione meritano le prove meccaniche che vengono effettuate su materiali e giunzioni per stabilire la loro resistenza e attribuire una verosimile durata di esercizio.

Le principali prove meccaniche sono:

- Prove Statiche (trazione, compressione, torsione, flessione, durezza);
- Prove Impulsive (resilienza);
- Prove Cicliche (fatica);
- Prove a Carico Costante (creep, usura).

Durante il mio periodo di tirocinio svolto presso il DIISM ho avuto l'opportunità di approfondire la metodica dell'esecuzione di una prova di creep, prova che nel mio caso specifico consisteva nell'applicare un carico costante a temperatura ambiente su una giunzione realizzata tramite incollaggio.

Il mio compito finale è stato quello di elaborare un programma che riuscisse a rilevare le distanze, e di conseguenza gli spostamenti dovuti alla deformazione, verificatisi durante la prova col passare del tempo.

I risultati ottenuti possono essere giudicati soddisfacenti non essendoci un criterio di valutazione oggettivo in quanto la risoluzione necessaria dello spostamento varia a seconda del progetto.

2 IL CREEP

2.1 LETTERATURA E STUDI DEL CREEP

Il creep è un fenomeno ricorrente che mette in pericolo la sicurezza delle strutture.

Questo si verifica solitamente:

- Nei materiali metallici e ceramici quando, sottoposti a carico costante, si trovano in un ambiente con temperature abbastanza elevate in relazione alla loro temperatura di fusione. Molto spesso queste temperature si aggirano intorno allo $0,4T_F$ dove T_F indica la temperatura di fusione del materiale.
- Nei materiali polimerici quando, sempre sotto carico costante, si vengono a trovare in ambienti con temperature elevate rispetto alla loro temperatura di transizione vetrosa.

In questo elaborato tratteremo maggiormente dell'effetto di questo fenomeno su giunzioni incollate dove la maggior parte degli adesivi sono di natura viscoelastica e sono in grado di subire lo scorrimento viscoso anche a temperatura ambiente.

Parecchi studi e ricerche sono stati svolti sul fenomeno del creep tuttavia la maggior parte di essi sono finalizzati sull'esaminare la reazione dei metalli e degli acciai strutturali, pertanto non è disponibile una quantità elevata di letteratura sullo scorrimento dei materiali viscoelastici, per non parlare degli adesivi e delle giunzioni incollate.

2.2 IL CREEP NEI MATERIALI METALLICI

Il creep nei materiali metallici è un fenomeno di scorrimento viscoso dove un metallo, sottoposto ad un carico costante e ad una temperatura che si aggira intorno alla metà della sua temperatura di fusione, subisce una deformazione dipendente dal tempo.

Le temperature di inizio creep approssimativamente sono:

- a) Leghe di alluminio alto resistenti = $0,54T_F$ equivalente a 205°C ;
- b) Leghe di alluminio normali = $0,35T_F$ equivalente a 95°C ;
- c) Leghe di titanio = $0,30T_F$ equivalente a 315°C ;
- d) Acciai al carbonio e basso legati = $0,36T_F$ equivalente a 370°C ;
- e) Acciai ferritici 9-12 Cr = $0,48T_F$ equivalente a 530°C ;
- f) Acciai austenitici = $0,49T_F$ equivalente a 540°C ;
- g) Leghe di nichel = $0,56T_F$ equivalente a 650°C .

Dati presi dalle lezioni didattiche di UniRoma.

Il fenomeno del creep non è da sottovalutare anzi, potrebbe in periodi di tempo più o meno lunghi portare al collasso del materiale e della struttura specialmente in ambienti dove sono presenti temperature elevate e/o carichi pesanti come ad esempio nelle turbine a gas, sulle pale delle turbine, nelle linee di vapore e nelle caldaie.

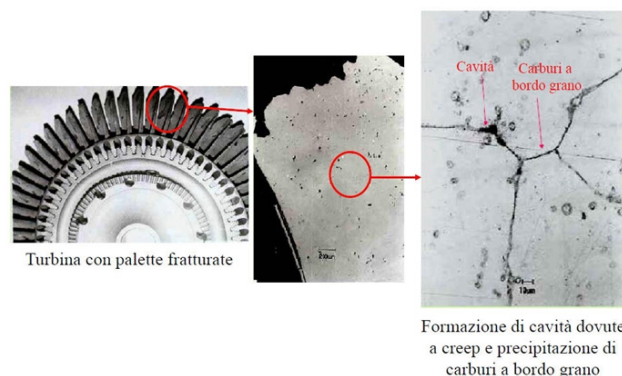


Figura 2.1: Frattura causata dal creep (Fonte: lezioni didattiche di UniRoma2)

2.3 CEDIMENTO DOVUTO AL CREEP

Come abbiamo appena detto, i metalli quando si trovano in ambienti con elevate temperature e con carichi costanti ma non tanto pesanti da portare allo snervamento, vanno incontro ad una deformazione plastica permanente conosciuta col nome di creep.

Questa deformazione aumenta nel tempo come mostrato nel grafico seguente.

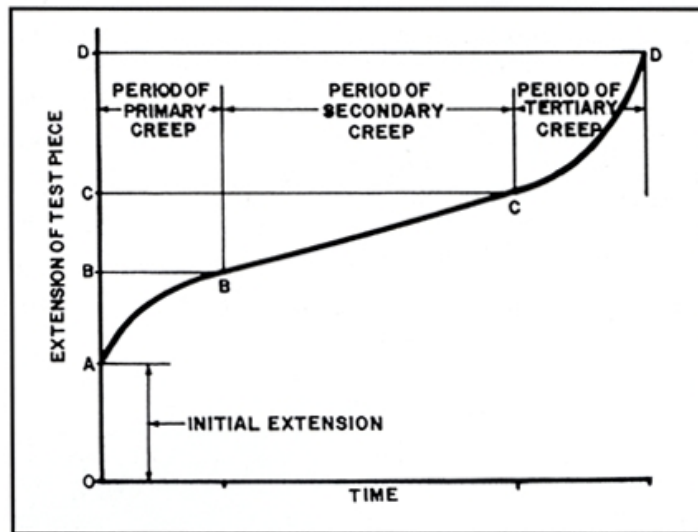


Figura 2.2: Grafico tempo-deformazione nel creep (Fonte: Internet)

Senza entrare nei particolari dei movimenti degli atomi, è sufficiente sapere che la deformazione per creep è dovuta allo scorrimento dei grani, ovvero grani e cristalli scorrono individualmente gli uni rispetto agli altri formando delle microcavità che crescono nel tempo e che collegandosi tra di loro danno origine a lunghe crepe, le quali porteranno poi alla frattura del materiale.

La frattura del materiale può assumere diverse morfologie:

- **FRATTURA INTERGRANULARE AD ASPETTO FRAGILE (FIF)**

La frattura, che ha luogo grazie alla formazione di cricche lungo i bordi di grano, si verifica dopo che il materiale ha subito poca deformazione plastica e poca strizione.

- **FRATTURA INTERGRANULARE AD ASPETTO DUTTILE (FID)**
La frattura, che ha luogo grazie alla formazione di cricche lungo i bordi di grano, si verifica dopo che il materiale ha subito una consistente deformazione plastica e poca strizione.
- **FRATTURA DUTTILE TRANSGRANULARE (FDT)**
Questo tipo di frattura non presenta più le caratteristiche della deformazione per creep poiché si espande attraverso le matrici dei grani e presenta, prima della sua avvenuta, una notevole deformazione plastica e strizione.

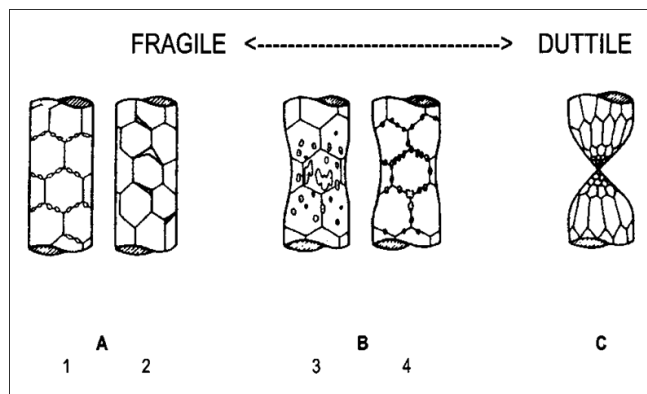


Figura 2.3: Rappresentazione pittorica dei meccanismi di frattura:
 A: Rottura apparentemente fragile (FIF)
 1. cavità (metalli puri e leghe che si comportano come metalli puri)
 2. strappi cuneiformi (wedge cracks). leghe complesse
 B: Rottura apparentemente duttile (FID) a seguito di coalescenza
 3. di vuoti,
 4. e strappi
 C: Rottura duttile (FDT) con forte strizione

(Fonte: "La Metallurgia Italiana" [8])

Dalla spiegazione di come avviene la deformazione per creep posso capire che i materiali con vaste superfici dei grani sono quelli che risentono di più di questo fenomeno, quindi per evitare o almeno ritardare la frattura è meglio utilizzare metalli con grani grossi in maniera tale da ridurre la superficie dei bordi.

2.4 IL CREEP NEI MATERIALI VISCOELASTICI

Sotto l'azione di carichi costanti e a temperature relativamente basse (temperatura ambiente), il creep impone nei materiali viscoelastici e viscoplastici delle deformazioni dipendenti dal tempo.

Poiché i giunti incollati sono molto sensibili al creep sono stati condotti alcuni studi per identificare la reazione del materiale ed il comportamento di questo fenomeno con lo scorrere del tempo.

I risultati hanno messo in evidenza tre distinte fasi di evoluzione:

0) Caricamento.

La fase di caricamento consiste soltanto nell'applicazione del carico sulla nostra giunzione.

1) Stadio primario.

Dopo il caricamento avviene lo stato transitorio dove la velocità di deformazione diminuisce al crescere della deformazione.

2) Stadio secondario.

La caratteristica di questo stadio è una velocità di scorrimento costante. Questa velocità costante è generalmente conosciuta come velocità minima di scorrimento ed è ampiamente usata per la modellizzazione avanzata del comportamento in deformazione in regime di creep.

3) Stadio terziario.

Il terzo stadio è quello con un incremento di velocità di deformazione e porta, eventualmente al collasso della giunzione.

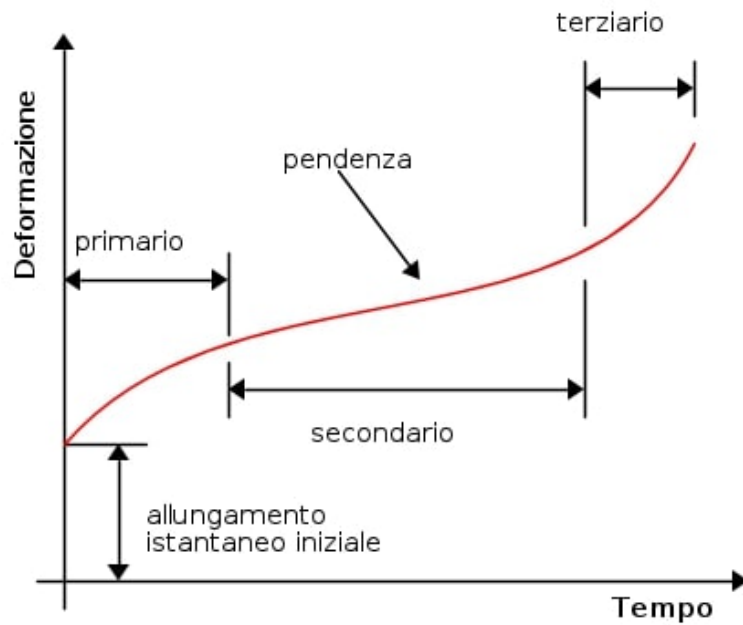


Figura 2.4: Grafico tempo-deformazione del creep (Fonte: Prove di creep - Electroyou)

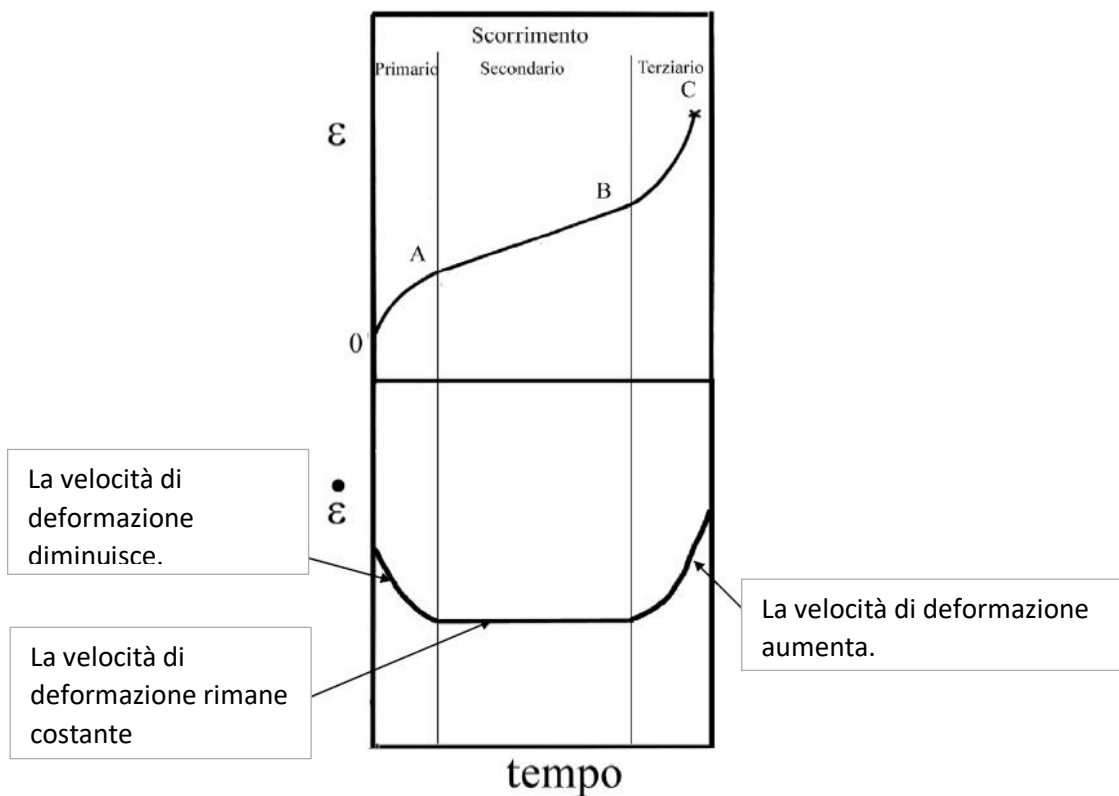


Figura 2.5: Grafico tempo-velocità di deformazione del creep (Fonte: Internet)

2.5 CHE COS'È LA VISCOELASTICITÀ

La viscoelasticità è la caratteristica di quei materiali che presentano sia un comportamento elastico, sia un comportamento viscoso.

Il comportamento elastico prevede che la deformazione del materiale sia direttamente proporzionale alla forza applicata su di esso.

Questo concetto viene espresso in linguaggio matematico dalla legge di Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

σ = Sforzo [MPa]
 E = Modulo di Young [MPa]
 ε = Deformazione percentuale [adimensionale]

Nel comportamento viscoso invece la tensione non è direttamente proporzionale alla deformazione, ma alla sua variazione nel tempo.

Per i materiali viscosi avremo dunque una diversa legge fisica:

$$\sigma = \mu \dot{\varepsilon}$$

σ = Sforzo [MPa]
 μ = Coefficiente di viscosità del materiale [Mpa·s]
 $\dot{\varepsilon}$ = Deformazione percentuale [1/s]

I materiali viscoelastici dunque presentano entrambi questi comportamenti.

Gli adesivi che si utilizzano nelle giunzioni incollate hanno spesso natura viscoelastica.

2.6 LA PROVA DI CREEP

La prova di creep spesso viene condotta con un normale provino simile a quello utilizzato per la prova di trazione, sul quale viene applicato un carico costante (di solito viene attaccato un peso su di esso) e tenuto a temperatura ambiente.

La durata di questa prova va di solito per le lunghe, infatti si possono impiegare anche diversi anni per effettuare un singolo creep test.

Durante lo svolgimento della prova, il campione è tenuto sotto controllo e la sua deformazione viene analizzata costantemente mentre i software sviluppano il grafico tempo deformazione.

Come letto in precedenza, il fenomeno di creep è molto lento, tuttavia se la temperatura comincia ad innalzarsi, la velocità di deformazione aumenta.

Questo è dovuto al fatto che l'innalzamento delle temperature provoca una crescita del tasso di deformazione causato dal carico e dunque, se non teniamo conto dei fenomeni termici, potremmo vedere collassare il nostro materiale molto prima del previsto.

Per questo motivo sono molto diffuse anche le prove di creep a temperature elevate.

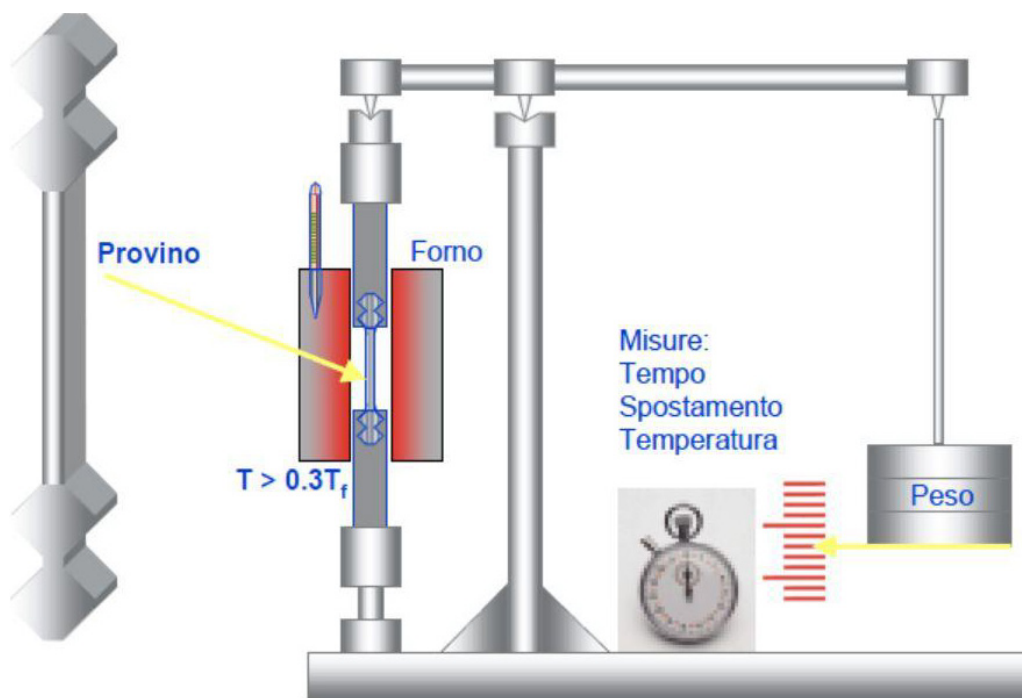


Figura 2.6: Provino e macchinario di creep test (Fonte: lezioni didattiche di UNIVPM)

3 GIUNZIONI INCOLLATE

3.1 GIUNZIONI STRUTTURALI

Il termine “giunto” nell’ambito meccanico sta ad indicare una zona di continuità tra due o più superfici diverse ottenuta collegando i due aderenti con varie tecniche che vedremo nei paragrafi successivi.

Una giunzione è costituita dalle superfici, messe una accanto all’altra, dei corpi che si vogliono collegare e dagli elementi meccanici o adesivi che hanno la funzione di collante.

Il compito del sistema appena descritto è quello di unire i corpi e trasmettere gli sforzi.

Si possono distinguere giunzioni strutturali continue e discontinue.

In via teorica, le tecniche di giunzione continua (saldatura ed incollaggio) sono da preferirsi a quelle discontinue (chiodatura e bullonatura) per collegare qualsiasi tipo di materiale.

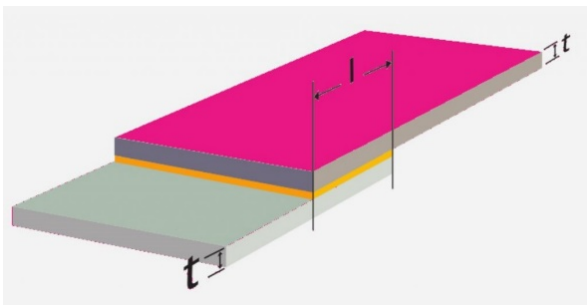


Figura 3.1: Giunzione continua – giunzione incollata
(Fonte: Il Progettista Industriale [25])

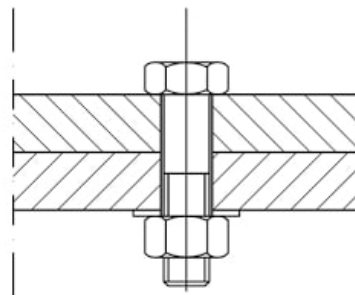
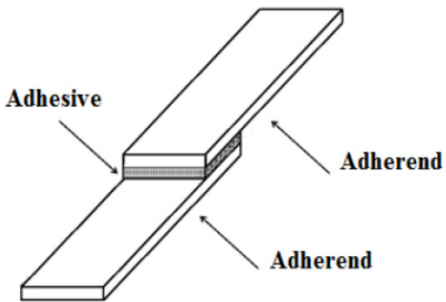
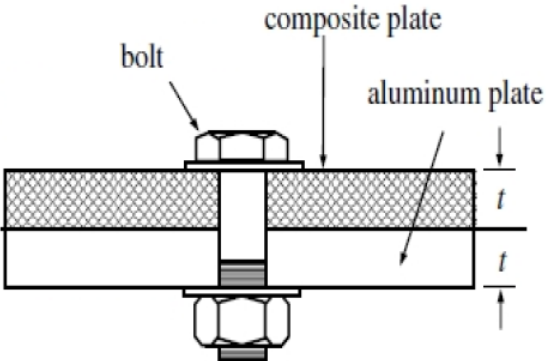


Figura 3.2: Giunzione discontinua – bullonatura
(Fonte: Internet)

3.2 TIPOLOGIE DI GIUNZIONI

Per consentire l'unione tra materiali compositi oppure tra materiali compositi e metalli si possono identificare tre diverse tipologie di giunzioni:

- 1) **Giunti incollati**, dove il carico viene trasmesso attraverso le superfici incollate degli elementi con sforzi prevalentemente di taglio sull'adesivo;
- 2) **Giunti meccanici**, nei quali il carico viene trasmesso attraverso elementi metallici (bulloni, rivetti), con sforzi prevalentemente di compressione sugli elementi collegati;
- 3) **Giunti ibridi**, dove il carico viene trasferito in tutti e due i modi.

	<p>Figura 3.3: Giunto incollato.</p> <p>I due aderenti sono uniti dal solo adesivo.</p> <p>(Fonte: Tesi Matteo Montagnin, Unipd [22])</p>
	<p>Figura 3.4: Giunto meccanico.</p> <p>I due aderenti sono uniti tramite bullonatura.</p> <p>(Fonte: Tesi Matteo Montagnin, Unipd [22])</p>

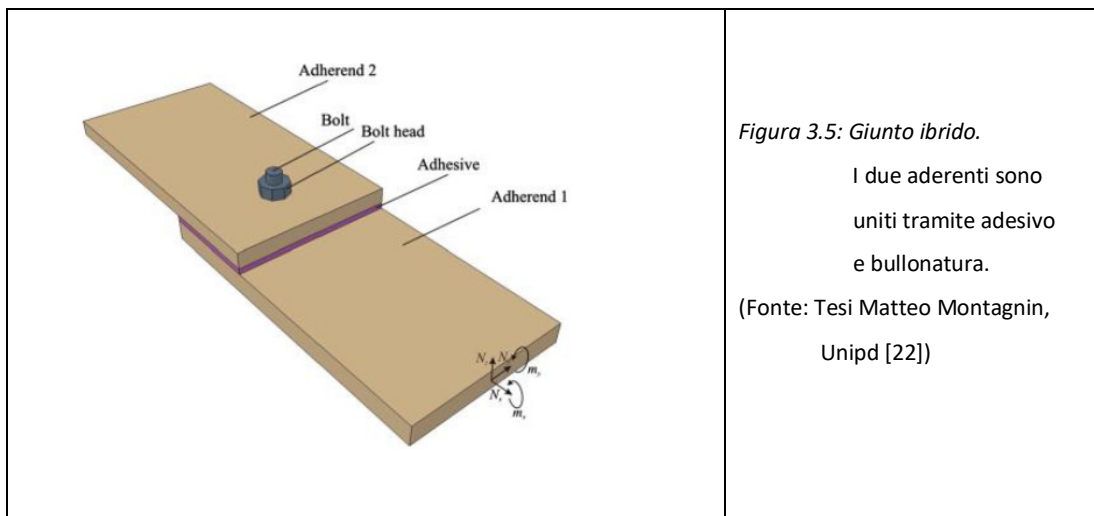


Figura 3.5: Giunto ibrido.

I due aderenti sono uniti tramite adesivo e bullonatura.

(Fonte: Tesi Matteo Montagnin, Unipd [22])

Un'ulteriore tipologia di giunzione è la *saldatura* che permette l'unione fisico/chimica di due giunti mediante la fusione degli stessi, o tramite metallo d'apporto.

Tale materiale può essere il materiale componente le parti stesse che vengono unite, ma può anche interessare materiale estraneo a esse, detto materiale di apporto.

Questa tecnica, usata per collegamenti di materiali compositi a matrice termoplastica, tuttavia non viene utilizzata nei giunti portanti.

Una particolare giunzione incollata è quella definita co-cured.

Nei giunti co-cured la resina del composito non ancora curato funge essa stessa da adesivo.

Con questa tecnica, la cura del composito e della giunzione non avvengono più in due fasi separate bensì simultaneamente (co-cured).

Il vantaggio presentato da questa tecnica è che non serve applicare una preparazione superficiale del materiale in quanto non è più distinguibile una vera e propria interfaccia tra il composito e l'adesivo.

Lo strato di resina rilasciato durante la cura ha uno spessore dell'ordine di $10\mu\text{m}$ cioè un ordine di grandezza più piccolo dello spessore minimo ottenibile con la tecnica dell'incollaggio tradizionale con adesivo.

Lo svantaggio di questa metodologia è che per unire le superfici in materiale composito, le devo accostare sin dal momento in cui la resina si trova in uno stato di parziale polimerizzazione.

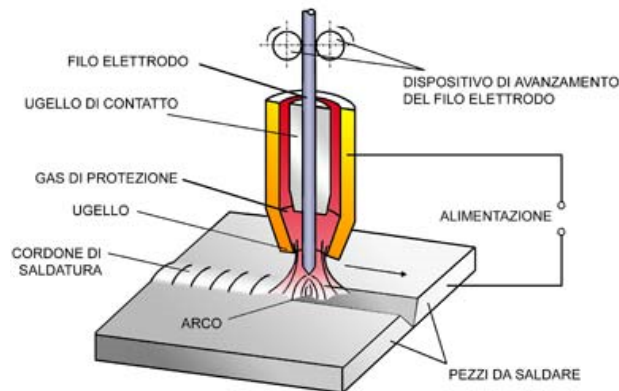


Figura 3.6: Giunto saldato (Fonte: Costruzioni Metalliche Icomet [26])

3.3 INCOLLAGGI

Secondo la norma EN 923, l'incollaggio è la giunzione di due superfici per mezzo di un adesivo, ovvero una sostanza non metallica in grado di far aderire tra loro più materiali tramite la propria forza interna chiamata coesione.

Gli assemblaggi tramite incollaggio sono più economici rispetto a quelli convenzionali, tuttavia presentano una criticità in quanto una piccola imperfezione nella loro realizzazione può causare un drastico calo delle prestazioni meccaniche.

Durante la realizzazione di giunzioni incollate è necessario, per garantire una buona presa, tenere conto di alcuni accorgimenti.

Per prima cosa è molto importante decidere la configurazione dell'assemblaggio poiché l'adesivo resiste bene agli sforzi di taglio ma non agli sforzi trasversali e quindi per evitare la formazione di momenti flettenti si tende ad evitare asimmetrie nella geometria del giunto.

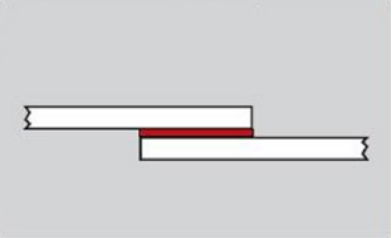
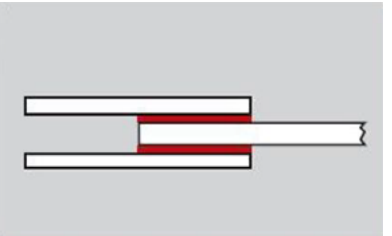
Il secondo step consiste nella scelta del materiale adesivo che deve essere adeguata all'ambiente in cui esso verrà utilizzato e deve anche essere compatibile con le due superfici da congiungere; il tutto tenendo conto delle possibilità economiche.

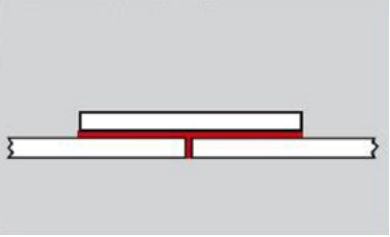
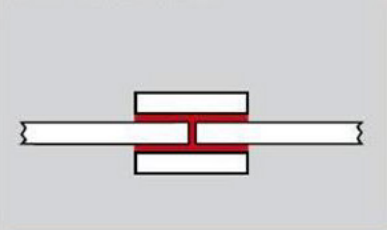


La terza fase consiste nella preparazione delle superfici che formano il giunto. Un passaggio delicato durante la preparazione della giunzione è quello dell'applicazione della colla e la verifica del suo corretto indurimento.

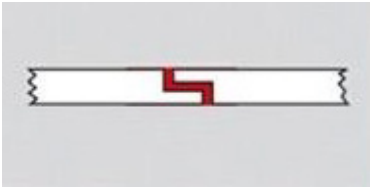
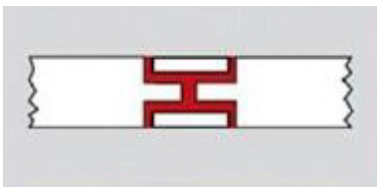
L'ultimo passaggio consiste nella verifica delle proprietà meccaniche e dell'affidabilità del giunto tramite prove sperimentali su alcuni campioni.

3.4 CONFIGURAZIONE DELL'ASSEMBLAGGIO

La forza di un determinato tipo di giunto incollato dipende, a seconda del carico, dalla distribuzione delle sollecitazioni al suo interno, pertanto esistono diverse configurazioni di assemblaggio:

 <p>Figura 3.7: Giunto a sovrapposizione singola (Fonte: Internet)</p>	<p>GIUNTO A SOVRAPPOSIZIONE SINGOLA <i>Single-Lap Joint</i></p> <p>Questa configurazione viene utilizzata in presenza di sezioni sottili.</p>
 <p>Figura 3.8: Giunto a sovrapposizione doppia (Fonte: Internet)</p>	<p>GIUNTO A SOVRAPPOSIZIONE DOPPIA <i>Double-Lap Joint</i></p> <p>Con questa tipologia di giunto si ottiene una resistenza maggiore rispetto al Single-Lap Joint.</p>

 <p data-bbox="379 539 730 607">Figura 3.9: Giunto a spallina singola (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 327 1214 409">GIUNTO A SPALLINA SINGOLA <i>Single-Strap Joint</i></p> <p data-bbox="855 488 1321 622">Con questo giunto si possono ottenere superfici lisce senza lavorazioni aggiuntive.</p>
 <p data-bbox="379 976 730 1043">Figura 3.10: Giunto a spallina doppia (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 757 1198 840">GIUNTO A SPALLINA DOPPIA <i>Double-Strap Joint</i></p> <p data-bbox="855 918 1270 1052">Presenta più resistenza rispetto al Double-Strap Joint ma è anche più complesso da realizzare.</p>
 <p data-bbox="379 1402 730 1469">Figura 3.11: Giunto a spigolo smussato (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 1189 1230 1216">GIUNTO A SPIGOLO SMUSSATO</p> <p data-bbox="855 1294 1337 1377">Realizzabile solo con sezioni abbastanza spesse, presenta una buona resistenza.</p>
 <p data-bbox="379 1704 730 1771">Figura 3.12: Giunto di testa (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 1547 1066 1574">GIUNTO DI TESTA</p> <p data-bbox="855 1653 1222 1680">Presenta una bassa resistenza.</p>

 <p data-bbox="421 483 687 555">Figura 3.13: Giunto a metà (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 322 1054 353">GIUNTO A METÀ</p> <p data-bbox="855 430 1347 512">Presenta una buona resistenza ma anche un costo elevato.</p>
 <p data-bbox="408 808 703 880">Figura 3.14: Giunto a tenaglia (Fonte: Internet)</p>	<p data-bbox="855 647 1102 678">GIUNTO A TENAGLIA</p> <p data-bbox="855 754 1347 837">Presenta una buona resistenza ma anche un costo elevato.</p>

3.5 MATERIALE ADESIVO

Il giunto incollato deve essere realizzato in maniera tale da trasferire gli sforzi da un corpo all'altro tramite delle tensioni di taglio, perciò i parametri fondamentali da tenere in considerazione sono la resistenza e la deformabilità a taglio.

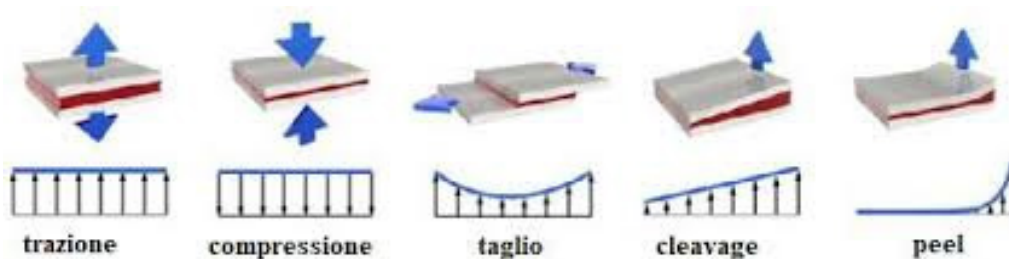


Figura 3.15: Sforzi sui giunti (Fonte: Tesi Matteo Montagnin, Unipd [22])

La classificazione principale dei materiali adesivi viene effettuata tenendo conto di queste due proprietà, infatti troviamo:

- *adesivi strutturali fragili*, i quali presentano elevata resistenza e rigidità a taglio ma una limitata deformabilità;
- *adesivi strutturali duttili*, dove resistenza e rigidità sono inferiori ma la deformazione ammessa è sicuramente maggiore.

Ovviamente si desidera ottenere uno strato adesivo con elevata resistenza e rigidità a taglio ma che comunque ammetta una elevata deformazione perciò ultimamente per combinare queste proprietà si sta utilizzando più di un adesivo nella zona di sovrapposizione.

In pratica si va a posizionare un adesivo duttile in corrispondenza della fine della zona di sovrapposizione, mentre un adesivo rigido e fragile è posizionato al centro.

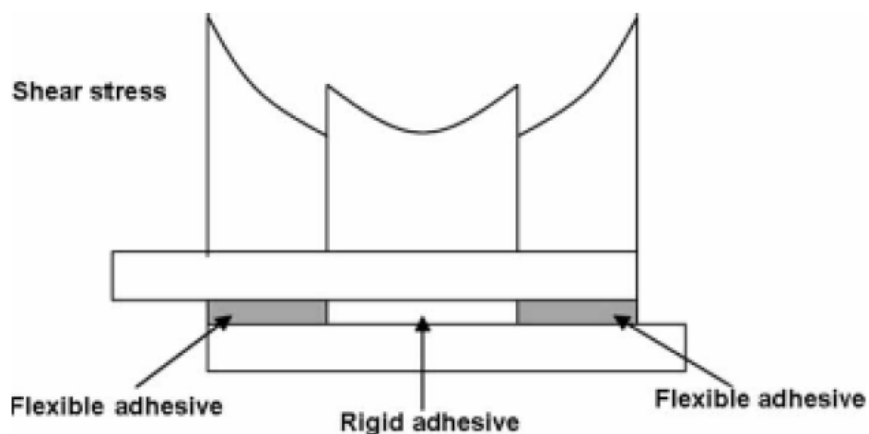


Figura 3.16: Giunto con adesivo rigido e flessibile (Fonte: Journal of material design and applications, [16])

La scelta del materiale da utilizzare come adesivo può essere più o meno complessa a seconda delle circostanze in quanto per ottenere delle efficaci proprietà meccaniche in una specifica circostanza bisogna tenere in considerazione vari fattori:

- *Natura degli aderendi* da collegare in termini di materiale, resistenza, rigidità, stato superficiale;
- *Metodo di applicazione* e cura dell'adesivo;
- *Caratteristiche dell'ambiente in cui il giunto si troverà a lavorare*;
- *Sollecitazioni* alle quali l'adesivo sarà sottoposto in esercizio;
- *Costo*, preso in considerazione con applicazioni convenzionali.

Nella tabella seguente sono analizzati i principali adesivi strutturali:

Tipologia	Commento	Range termico di impiego [°C]	Cura
Epossidico	Elevata resistenza meccanica e termica, temperatura di cura relativamente bassa, facile da usare, basso costo.	da -40° a +100°	Con epossidici monocomponente la cura viene eseguita semplicemente somministrando calore; con epossidici bi componente la cura avviene a temperatura ambiente.
Ciano-acrilati	Hanno una veloce capacità incollante, presentano un comportamento duttile, ma presentano una scarsa resistenza ad umidità e temperatura.	da -30° a +80°	Cura veloce (minuti o secondi) dopo un'esposizione ad umidità in condizioni termiche ambientali.
Acrilici	Categoria di adesivi versatili, presentano veloci tempi di cura. Possono essere impiegati anche con superfici non perfettamente preparate, tollerano la presenza di sporco.	da -40° a 120°	Cura attraverso un meccanismo a radicali liberi.
Poliuretani	Buona flessibilità alle basse temperature, buona resistenza a fatica ed impatti, buona durabilità. Grande capacità sigillante per applicazioni con basse sollecitazioni, grande flessibilità, ottima	da -200° a + 80°	Cura a temperatura ambiente.
Siliconici	resistenza termica; presenza però lunghi tempi di cura e resistenza meccanica scarsa	da -60° a +300°	Cura a temperatura ambiente.
Fenolici	Buona resistenza meccanica, limitata resistenza a shock termici.	da -40° a +175°	Cura con calore ed elevata pressione.
Bismaelidici	Ottima rigidità, basse proprietà di peel.	da -50° a +200°	Cura con calore ed elevata pressione.

Figura 3.17: Tipologie di adesivi (Fonte: Internet)

3.6 PREPARAZIONE DELLE SUPERFICI

Quando parliamo di giunti incollati, dobbiamo tener sempre presente un passaggio molto importante, cioè la fase di preparazione che precede il vero e proprio incollaggio.

Per ottenere un incollaggio che duri nel tempo, è necessario che le superfici subiscano un'accurata pulitura nelle zone dove entreranno in contatto con l'adesivo per rimuovere i residui di sostanze utilizzate precedentemente, le impurità e gli strati di ossido presenti sui collanti.

Questa fase può richiedere però parecchio tempo perché per ottenere un giunto adesivo che abbia un ciclo di vita abbastanza lungo, vengono effettuati vari trattamenti chimici dalla durata di diverse ore.

La preparazione superficiale è dunque un passaggio obbligato ma non sufficiente in quanto, per ottenere una buona giunzione incollata si deve creare tra le pareti una forza adesiva che si ottiene dalla formazione di legami chimici tra gli atomi delle superfici aderenti ed i composti che costituiscono l'adesivo.

La tecnica di preparazione superficiale viene effettuata a seconda della natura degli aderenti:

- *METALLI:*
Vengono immersi in soluzioni fortemente acide (acido solforico e dicromato sodico, per l'alluminio) o fortemente alcaline (ipoclorito di sodio, per il rame). Segue un accurato lavaggio e l'asciugatura.
- *VETRI E CERAMICHE:*
Vengono immersi in una soluzione a 60°C di acido solforico e dicromato di potassio. Segue sempre il lavaggio e l'asciugatura.

- **POLIMERI TERMOPLASTICI:**
Si esegue, nel caso del poliolefine, un trattamento preliminare con plasma freddo seguito dall'immersione in soluzione di acido solforico e dicromato di potassio.
- **POLIMERI TERMOINDURENTI:**
Nel caso di resine fenoliche, poliestere ed epossidiche, si applica un'abrasione meccanica o con il laser seguita dal lavaggio con solvente per eliminare i detriti.

Una nota degna di attenzione merita il “primer”, un promotore di adesione che serve per preparare le superfici prima dell'applicazione dell'adesivo.

La sua caratteristica principale è quella di potenziare l'adesione ed il suo utilizzo non sempre è necessario ma diventa importante quando le superfici sono complesse o devono presentare una lunga durata di tenuta.

In conclusione possiamo dire che il primer resta un buon alleato per migliorare l'incollaggio specialmente sulla plastica.

3.7 APPLICAZIONE DELL'ADESIVO E VERIFICA DELL'INCOLLAGGIO

L'applicazione dell'adesivo può essere divisa in tre fasi:

- 1) *applicazione*, che dipende dalla natura dell'adesivo (liquido, pasta o film);
- 2) *morsettaggio*, indispensabile per mantenere nella giusta posizione le superfici da unire e per imprimere la giusta intensità di pressione;
- 3) *reticolazione*, durante la quale è necessario apportare calore affinché l'adesivo raggiunga la temperatura necessaria.

Per verificare le qualità del giunto si possono applicare:

- prove distruttive, che possono essere effettuate su:
 - a) provini standard elementari;
 - b) componenti rappresentativi del reale comportamento dell'assieme;
 - c) assieme vero e proprio in vera grandezza;
- prove non distruttive, incapaci di fornire valutazioni assolute sulle prestazioni del giunto, ma solo indicarne potenziali problemi.
Le tecniche possono essere: ispezione visiva, tapping-test, ultrasuoni.

3.8 FATTORI AMBIENTALI

Un aspetto che spesso si sottovaluta quando si stima il ciclo di vita di un giunto incollato è l'effetto che l'ambiente circostante può avere su di esso.

L'effetto ambientale ha conseguenze molto importanti sulla giunzione incollata in quanto vari fenomeni possono concorrere alla destabilizzazione e rottura di quest'ultima riducendo le proprietà dell'adesivo.

I principali effetti dell'ambiente circostante sono:

- *TEMPERATURA*

Le elevate temperature portano tutti i polimeri e di conseguenza anche gli adesivi di natura polimerica incontro alla degradazione, la quale prevede una riduzione di forza dei legami chimici all'aumentare della temperatura.

- *EFFETTI ELETTROCHIMICI IN ACQUA SALATA E NEBBIA SALINA*

Queste condizioni potrebbero portare alla rottura del giunto a causa dell'effetto corrosivo tra l'adesivo e le superfici incollate.

- *UMIDITÀ ED IMMERSIONE IN ACQUA*

Le molecole d'acqua allo stato liquido o aeriforme possono ridurre la rigidità e la resistenza dell'adesivo e addirittura riuscire a staccarlo dalle superfici che si vogliono unire.

- *ATTACCO BIOLOGICO*

I vari organismi biologici (funghi, batteri, muffe) possono attaccare gli adesivi.

3.9 VANTAGGI E SVANTAGGI

Secondo le normative ASTM INTERNATIONAL (American Society for Testing and Materials International), un adesivo è “una sostanza in grado di tenere assieme i materiali in maniera funzionale tramite l'adesione superficiale”.

Questa adesione superficiale è causata essenzialmente da forze provenienti dalla formazione di legami chimici che permettono alle zone in contatto con l'adesivo di rimanere attaccate tra loro.

Come si è potuto leggere nel paragrafo 3.2, i giunti incollati sono un'alternativa a quelli meccanici.

La principale distinzione tra questi due tipi di giunzioni è che con la tecnica dell'incollaggio non è necessaria l'applicazione di fori sui corpi da unire e pertanto si viene a parlare di continuità superficiale in contrapposizione alla discontinuità che per esempio presentano due lamine collegate tramite bullonatura.

Dalla caratteristica della continuità appena descritta, derivano molte proprietà delle giunzioni incollate, le quali, avendo una maggiore estensione di superficie da sfruttare rispetto a quelle meccaniche, hanno una distribuzione degli sforzi più uniforme.

Inoltre, senza l'applicazione di forature non ci sono concentrazioni di sforzi che mettono in pericolo il giunto.

Mettendo a confronto la tecnica dell'incollaggio con le altre alternative è possibile rilevare una serie di vantaggi e svantaggi.

I vantaggi sono:

- Grazie alla vasta superficie a disposizione è possibile avere una riduzione degli sforzi perché vengono distribuiti più uniformemente e dunque si possono applicare carichi abbastanza pesanti.
- Data l'assenza di forature e di qualsiasi altro tipo di discontinuità superficiale vengono evitate le concentrazioni degli sforzi nei punti critici.
- Sempre grazie alla continuità dell'incollaggio si ha la possibilità di unire sia superfici spesse che sottili.
- L'adesivo, benchè venga applicato su entrambi gli aderenti, non li modifica né chimicamente né fisicamente.
- L'adesivo è capace di collegare tra di loro anche materiali di natura diversa.
- Oltre che l'unione, l'incollaggio permette anche la sigillatura, il rallentamento della corrosione galvanica qualora i materiali presentassero potenziali diversi e, con il giusto adesivo, può anche garantire isolamento elettrico e termico.
- La giunzione incollata è in grado di attenuare le vibrazioni del corpo.
- Non aggiungendo altri elementi meccanici come viti e dadi, questi tipi di giunti sono meno pesanti
- Dal punto di vista economico sono meno costosi delle altre tecniche.

Oltre a questi pregi troviamo anche vari difetti:

- La produzione di un giunto incollato risulta abbastanza complessa qualora le superfici abbiano forme complesse.
- La preparazione degli incollaggi richiede molto tempo perché prima deve essere messa in atto una accurata pulitura superficiale.
- Non si possono effettuare controlli senza distruggere il giunto.
- Utilizzando un materiale adesivo siamo costretti ad avere una temperatura massima limitata perché superandola potrebbe perdere le sue funzionalità.
- La durata di una giunzione incollata dipende molto dall'ambiente in cui è situata perché l'adesivo è molto sensibile agli attacchi chimici di vari solventi e agli attacchi di microrganismi, per non parlare degli effetti che la temperatura e l'umidità hanno su di esso.

3.10 MODALITÀ DI CEDIMENTO

Una giunzione incollata può cedere per diverse cause che si possono accostare alla qualità dei legami formati dall'adesivo, alla configurazione adottata e al tipo di caricamento cui è sottoposta.

Si possono identificare varie tipologie di cedimento di una giunzione incollata, infatti secondo la normativa ASTM D5573 ne troviamo sei:

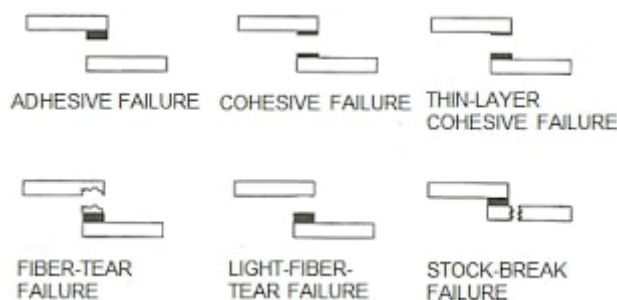


Figura 3.18: Tipologia di cedimento dei giunti incollati (Fonte: Internet)

Tuttavia i casi sopra raffigurati possono essere ricondotti a tre semplici cause:

- 1) Frattura, a causa del carico, di uno o di entrambi i corpi che sono stati uniti dall'adesivo;
- 2) Rottura dell'interfaccia aderendo-adesivo;
- 3) Cedimento coesivo nello strato adesivo.

Il giunto, dopo la rottura, può essere riparato sul posto anche se non si riusciranno più ad ottenere le proprietà meccaniche stimate in fase di progetto perché non sono possibili lavorazioni superficiali adeguate ed inoltre non posso apportare calore e pressione in condizioni ottimali.

4 PROGRAMMA DI MISURAZIONE DELLA DISTANZA PER PROVE A CREEP DI GIUNTI INCOLLATI

4.1 TIROCINIO

Durante il mio periodo di tirocinio, trascorso all'università del Politecnico delle Marche presso il DIISM (Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche) sotto la tutela dei professori Rossi Marco e Chiappini Gianluca, ho avuto l'opportunità di elaborare con Matlab un programma che analizzasse la distanza tra due zone contrassegnate da una griglia di punti, e che ripetendo la misurazione misurasse la variazione di distanza tra questi due punti.

I risultati ottenuti da questo programma sono in grado di analizzare le variazioni di posizione dei componenti meccanici presenti in una prova di creep su giunti meccanici incollati.

4.2 MATLAB

Il programma che ho utilizzato per misurare la variazione delle distanze è Matlab:

Matlab, abbreviazione di Matrix Laboratory, è un ambiente di programmazione per applicazioni scientifiche, di analisi numerica e per la simulazione di sistemi dinamici.

L'elemento base di Matlab è la matrice, infatti esso permette di manipolarle, implementare algoritmi, visualizzare dati e funzioni, creare interfacce utente e di interfacciarsi con altri programmi.

Per la sua completezza e relativa facilità d'uso, Matlab non è utilizzato solo nel campo universitario ma anche in ambito lavorativo per via dei suoi numerosi strumenti a supporto dei più disparati campi di studio applicati e perchè funziona, inoltre, su diversi sistemi operativi.

Tra le molteplici funzioni per cui può essere utilizzato, troviamo l'elaborazione di immagini digitali.

L'elaborazione di immagini digitali consiste nell'utilizzo di algoritmi informatici per creare, elaborare, trasmettere e visualizzare immagini digitali. Gli algoritmi di elaborazione di immagini digitali possono essere usati per:

- convertire segnali da un sensore d'immagine in immagini digitali;
- migliorare la chiarezza, eliminare il rumore e altri artefatti;
- estrarre le dimensioni, la scala o il numero di oggetti in una scena;
- preparare immagini per la visualizzazione o la stampa;
- comprimere immagini per la trasmissione attraverso una rete.

4.3 OBIETTIVO DEL TIROCINIO

L'obiettivo del tirocinio era quello di rilevare la distanza che mutava nel tempo a causa della deformazione impartita dalla prova di creep su dei giunti meccanici incollati.

Non essendoci recati in laboratorio, ho dovuto utilizzare strumenti che approssimassero il test, e dopo aver scattato alcune foto al sistema progettato per simulare la prova di creep, il mio compito è stato quello di elaborare un sistema che analizzasse quelle immagini.

4.4 STRUMENTI PER LA SIMULAZIONE DEL CREEP

Come detto precedentemente, non essendoci recati in laboratorio, ho dovuto studiare un modo per simulare la prova di creep e per attuarlo mi sono servito dei seguenti strumenti:

- Un ritaglio rettangolare di un foglio bianco da stampante contenente una griglia di punti neri distribuiti in 5 righe e 12 colonne per un totale di 60 punti;
- Un altro ritaglio rettangolare di un foglio bianco da stampante contenente una griglia di punti neri distribuiti in 3 righe e 3 colonne per un totale di 9 punti;
- Una lastra di vetro su cui attaccare il foglio con 60 punti;
- Una tavoletta in materiale plastico su cui attaccare il foglio con 9 punti;
- Un carrello per effettuare piccoli spostamenti abbastanza precisi nell'ordine del decimo di millimetro;
- Uno smartphone per scattare le foto;
- Spessori vari per livellare il sistema (libri, quaderni, carte, etc.).

Inizialmente ho incollato il carrello su un tavolo utilizzando un nastro biadesivo in maniera tale da renderlo il più stabile possibile, inoltre, sempre con il biadesivo, ho fissato la tavoletta in materiale plastico sul carrello.

In seguito ho posizionato la lastra di vetro sopra la tavoletta di plastica senza far gravare su di essa il peso del corpo poiché avrebbe potuto farla inclinare; tutto ciò è stato reso possibile dall'utilizzo di alcuni libri e quaderni su cui far poggiare il vetro una volta raggiunta l'altezza desiderata.

Una volta stabilizzato questo sistema, ho attaccato con dello scotch il foglio con 60 punti sulla lastra di vetro, ho effettuato lo stesso procedimento per attaccare il foglio con 9 punti sulla tavoletta in materiale plastico ma per avere i due fogli sullo stesso livello ho dovuto impiegare uno spessore pari a quello della lastra di vetro e per fare ciò ho utilizzato dei fogli di stampante ripiegati.

Quando ho posizionato i due fogli ho cercato di tenere paralleli i due array di punti e di allineare i loro baricentri.

Ruotando la vite del carrello ho potuto spostare, nell'ordine dei decimi di millimetro, la tavoletta in materiale plastico con i 9 punti su di essa attaccati e dunque solidali.

Per scattare delle foto al nostro sistema da una posizione fissa e senza tremolio ho bloccato lo smartphone su una griglia sopraelevata al nostro sistema grazie all'impiego di due vasi come spessori che mi garantissero almeno la minima distanza per mettere a fuoco i due array di punti; poi attivando il comando vocale della fotocamera sono stato in grado di scattare delle fotografie quasi identiche tra di loro tenendo conto della variazione di luminosità, e quindi dei giochi di ombre, che si sono venuti a formare a causa dei diversi istanti in cui sono avvenuti gli scatti.

Ho scattato:

- 5 foto ad una posizione iniziale (posizione A);
- 5 foto dopo aver aumentato la distanza tra i due array di 1 mm rispetto alla posizione A (posizione B);
- 5 foto dopo aver prima aumentato e poi diminuito la distanza tra i due array di 0,2 mm rispetto alla posizione B (posizione C);
- 5 foto dopo aver prima diminuito e poi aumentato la distanza tra i due array di 0,2 mm rispetto alla posizione C (posizione D);
- 5 foto dopo aver diminuito la distanza tra i due array di 1 mm a partire dalla posizione D per tornare nella posizione iniziale A (posizione E).

Ho scattato più foto nella stessa posizione sia per vedere la deviazione standard che ne risultava, sia per calcolare la media di quei valori che mi è servita per paragonarla all'effettiva distanza.



Figura 4.1: Foto del sistema per simulare la prova di Creep.

4.5 ANALISI DEL PROGRAMMA

CARICAMENTO IMMAGINE

```
% chiudi tutto  
clc % pulisce la command window  
clear all % rimuove tutte le variabili  
close all % chiude file dopo la scrittura di dati video  
  
% lettura immagine  
IMG=imread('B (1).jpg'); %carica l'immagine
```

La prima parte del programma consiste nel chiudere i vari file che sono ancora aperti su matlab e di caricare l'immagine che si vuole analizzare.

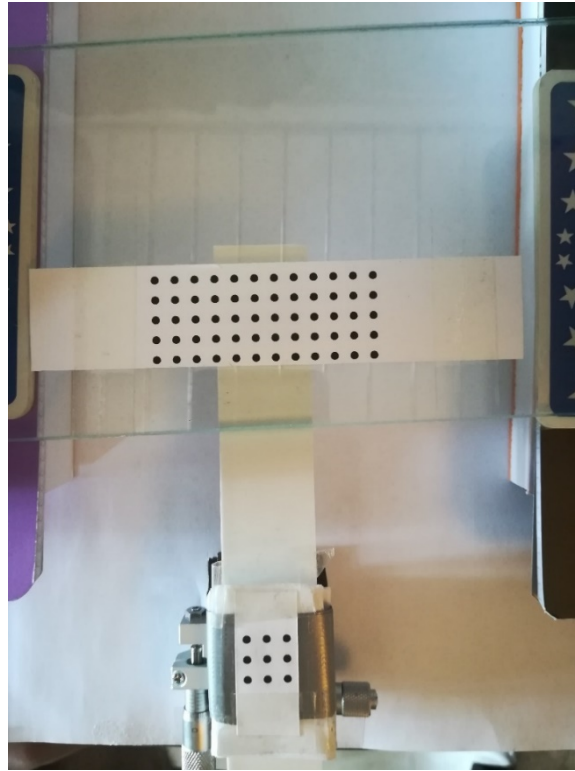


Figura 4.2: Foto B (1).jpg

FILTRAGGIO IMMAGINE

```
%filtraggio immagine
level=graythresh(IMG); %calcola la soglia da utilizzare in im2bw
bw=im2bw(IMG,level*0.8); %trasforma l'immagine in bianco e nero
bw=~bw; %bw non è uguale a bw (mantengo lo stesso nome variabile ma continuo
a modificare)
figure; %crea una nuova finestra di figura
imshow(bw); %mostra l'immagine bw
bw=bwareaopen(bw,1200); %rimuove tutti i corpi con meno di 1200 pixel
bw=imclearborder(bw); %sopprime le strutture luminose collegate al bordo
dell'immagine
A = roipoly(bw); %seleziona la zona di interesse (comando interattivo)
bw(A)=0; %i valori selezionati in "A" li trasformo in 0(cioè nero)
```

Senza intervenire sulla foto il risultato della trasformazione in bianco e nero, necessaria per la corretta individuazione dei punti, sarebbe questo:

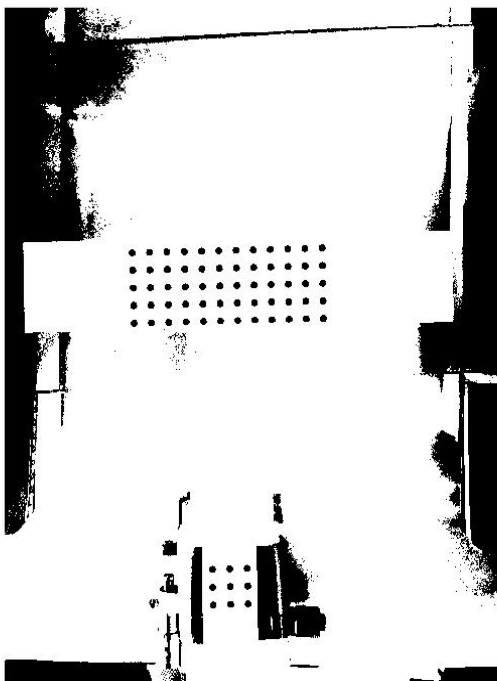


Figura 4.3: Foto B (1) convertita in bianco e nero senza filtraggio

L'immagine qui sopra presenta oltre ai punti di nostro interesse anche delle zone ombrate che impediscono la corretta analisi dell'immagine.

Per individuare la distanza tra i centroidi medi dei due array bisogna filtrare l'immagine rimuovendo tutto tranne i nostri punti neri.

È necessario convertire l'immagine in bianco e nero tenendo conto che nell'ambiente di lavoro di matlab il nero è visto come vuoto mentre il bianco è considerato come riempimento.

Per pulire la foto ho eliminato le strutture luminose intorno alle zone interessate e rimosso tutti i corpi che avessero una superficie in pixel inferiore a quella presentata da quella di un singolo punto.

Per cancellare gli ultimi elementi di disturbo ho inserito tutto ciò che vi è all'interno dell'immagine, ad esclusione dei punti, in un recinto poligonale e poi gli ho convertiti in corpi di colore nero.

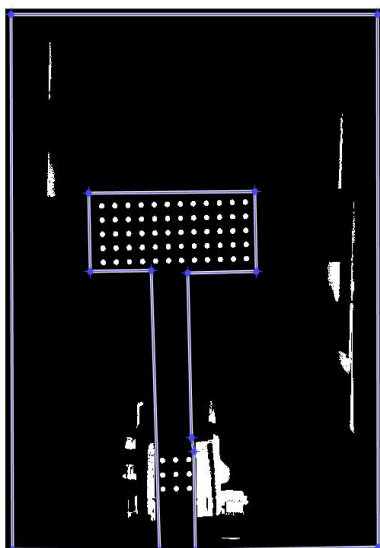


Figura 4.4: Foto recinto comando roipoly

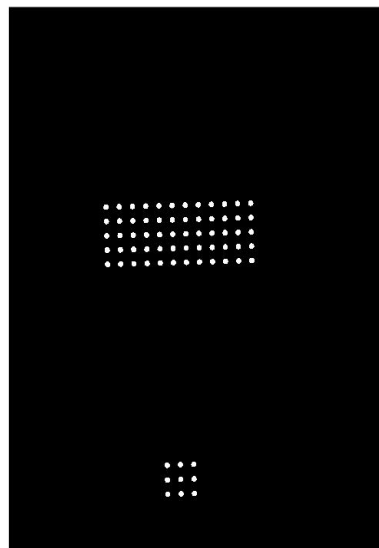


Figura 4.5: Foto immagine filtrata

La foto filtrata correttamente presenta al suo interno i soli 69 punti ben visibili in bianco mentre tutto il resto è di colore nero.

Nota:

È importante notare che i corpi di nostro interesse nella foto sono in bianco perché, come detto in precedenza, matlab associa a questo colore il concetto di riempimento mentre al nero associa il concetto di vuoto.

Bianco = Riempimento \rightarrow 1 (codice associato al bianco);

Nero = Vuoto \rightarrow 0 (codice associato al nero).

RILEVAMENTO DEI CENTROIDI

```
%centroidi
s=regionprops(bw,'centroid'); %trova i centroidi dell'immagine IMG e li
                               inserisce in una matrice s di struttura (struct).
centroids=cat(1,s.Centroid); %memorizza le coordinate (x;y) dei centroidi in
                              una matrice di due colonne
figure; %crea una nuova finestra di figura
imshow(bw); %mostra l'immagine bw
hold on; %mantiene l'immagine
plot(centroids(:,1),centroids(:,2),'r*'); %disegna i centroidi sull'immagine
```

Una volta ottenuta l'immagine filtrata è possibile trovare i centroidi dei singoli punti.

Con il comando “regionprops” ho trovato le coordinate dei baricentri dei 69 punti e, dopo averle ricopiate in una matrice, le ho plottate sulla foto.

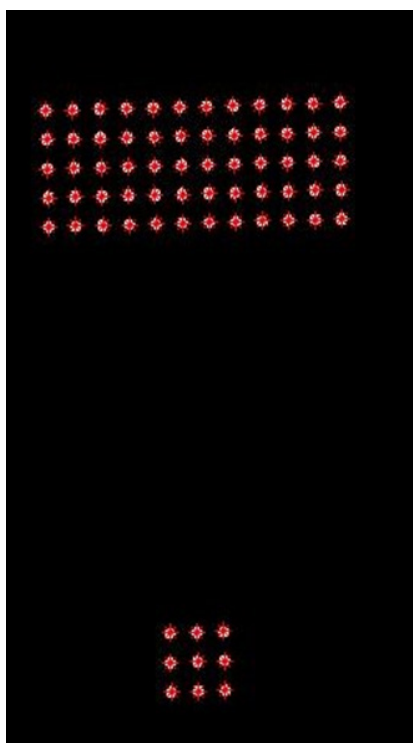


Figura 4.6: Foto B (1) correttamente filtrata e con sopra plottati i 69 centroidi

TRASFORMAZIONE PROSPETTICA

```
%trasformazione prospettica
[xi yi]=getpts; %trova ascisse(xi) e ordinate (yi) dei punti selezionati (i 4
                vertici del rettangolo superiore)

for n=1:4 %PER "n" variabile da 1 a 4 [1;2;3;4] (4 sono i punti da noi selezionati)
    dist=sqrt(sum(((centroids-repmat([xi(n) yi(n)],69,1)).^2)));
    %trova tutte le distanze dei centroidi da ognuno dei 4 punti selezionati
    [~,v(n)]=min(dist); %trova il centroide meno distante da ognuno dei punti
                        selezionati
end

vertici=centroids(v,:); %crea una matrice con le coordinate dei vertici v
plot(vertici(:,1),vertici(:,2),'og'); %cerchia i vertici sull'immagine

LX=((vertici(1,1)-vertici(3,1))^2+(vertici(1,2)-vertici(3,2))^2)^0.5;
%distanza tra vertici con la stessa ordinata
LY=((vertici(1,1)-vertici(2,1))^2+(vertici(1,2)-vertici(2,2))^2)^0.5;
%distanza tra vertici con la stessa ascissa
r=LX/LY; %rapporto tra le distanze

U=vertici; %U è uguale alla matrice vertici
X=[0 0;0 500;500*r 0;500*r 500]; %X è la matrice con le coordinate dei
                                vertici spostate
tform=fitgeotrans(U,X,'projective'); %definisce la trasformazione
                                    geometrica (prospettica)
WARP=imwarp(bw,tform); %applica la trasformazione geometrica definita
                       con tform su bw
WARP=bwareaopen(WARP,1200); %rimuove tutti i corpi con meno di 1200
                             pixel
```

Il passo successivo è stato quello di eliminare l'errore di prospettiva che è stato rilevato nel momento in cui ho scattato la foto.

L'idea di base per risolvere questo problema consiste nello stimare quanto è distorto l'array di 60 punti situato in alto che noi sappiamo, in quanto realizzato al computer, essere perfettamente rettangolare, ed in seguito applicare una trasformazione che regolarizzandolo risolve questo problema di deformazione della fotografia.

Per effettuare la trasformazione prospettica ho dovuto selezionare manualmente 4 coordinate in maniera tale che fossero molto vicine ai centroidi situati nei vertici del rettangolo di punti più in alto.

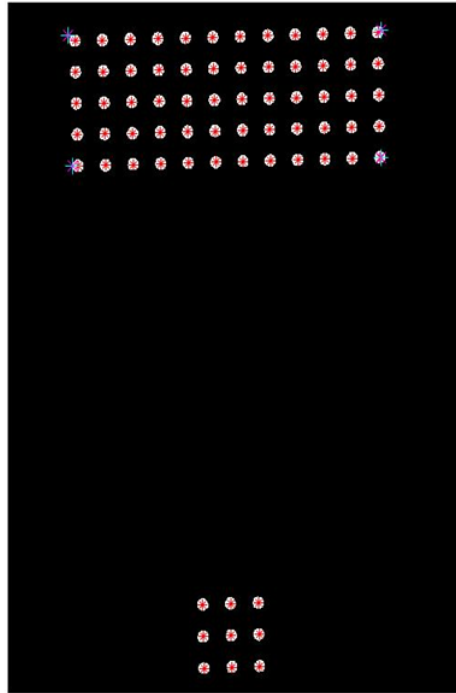


Figura 4.7: Foto con i 4 punti ricavati manualmente vicino ai vertici del rettangolo superiore

Successivamente, per selezionare esattamente le coordinate dei quattro centroidi ai vertici del rettangolo, ho trovato per ognuno dei punti posizionati manualmente tutte le distanze dai 69 baricentri; infine ho fatto selezionare al programma i centroidi che presentassero la distanza minore da ciascuno di quei 4 punti.

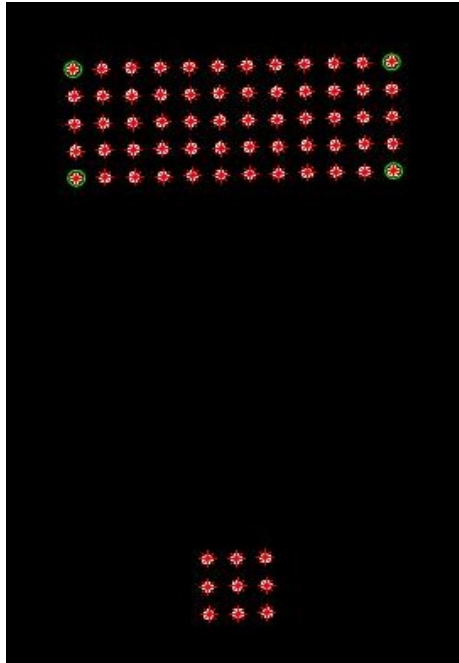


Figura 4.8: Foto dove sono messi in evidenza i centroidi situati ai vertici del rettangolo superiore

Conclusa questa operazione ho ipotizzato in modo realistico le dimensioni in pixel di base ed altezza del rettangolo di punti superiore senza la deformazione prospettica ed inserendo questi dati nel comando WARP sono riuscito a rimuovere gli errori prospettici in tutta la foto.

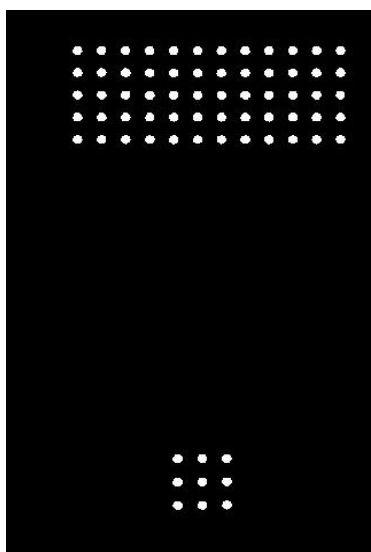


Figura 4.9: Immagine senza l'errore prospettico

DISTANZA IN PIXEL DEI CENTROIDI MEDI

```
%centroidi immagine senza prospettiva
figure %crea una nuova finestra di figura
imshow(WARP); %mostra l'immagine WARP
s=regionprops(WARP,'centroid'); %trova i centroidi dell'immagine WARP e
                                li inserisce in una matrice s di struttura (struct)
centroids=cat(1,s.Centroid); %memorizza le coordinate (x;y) dei centroidi in
                              una matrice di due colonne
centroids=sortrows(centroids,2); %riordina la matrice centroids in
                                  base alle y

centroidsT=centroids(1:60,:); %matrice dei centroidi superiori (TOP)
centroidsB=centroids(61:69,:); %matrice dei centroidi inferiori (BOTTOM)

CT=mean(centroidsT); %centroide medio TOP
CB=mean(centroidsB); %centroide medio BOTTOM

hold on; %mantiene l'immagine
plot(centroidsT(:,1),centroidsT(:,2),'*r'); %segna in rosso sull'immagine i
                                              centroidi TOP
plot(centroidsB(:,1),centroidsB(:,2),'*g'); %segna in verde sull'immagine i
                                              centroidi BOTTOM
plot(CT(:,1),CT(:,2),'or'); %segna con un cerchio rosso il centroide medio
                              TOP
plot(CB(:,1),CB(:,2),'og'); %segna con un cerchio verde il centroide medio
                              BOTTOM

distanzapixel=sqrt((CT(:,1)-CB(:,1))^2+(CT(:,2)-CB(:,2))^2);
                %distanza in pixel tra i centroidi medi
distanzapixelV=sqrt((CT(:,2)-CB(:,2))^2); %distanza verticale in pixel tra i
                                              centroidi medi
plot([CT(:,1) CB(:,1)],[CT(:,2) CB(:,2)],'g'); %disegna il segmento tra i
                                                  centroidi medi
plot([CT(:,1) CT(:,1)],[CT(:,2) CB(:,2)],'r'); %disegna il segmento verticale
                                                  dal punto CT all'ordinata di CB
```

Dopo aver corretto gli errori di prospettiva, ritrovo le coordinate dei centroidi di ogni punto.

Una volta riscritte tutte le coordinate in una matrice di dimensione 69x2, la riordino in base alle ordinate in valore crescente in modo tale da poter distinguere i centroidi superiori da quelli inferiori.

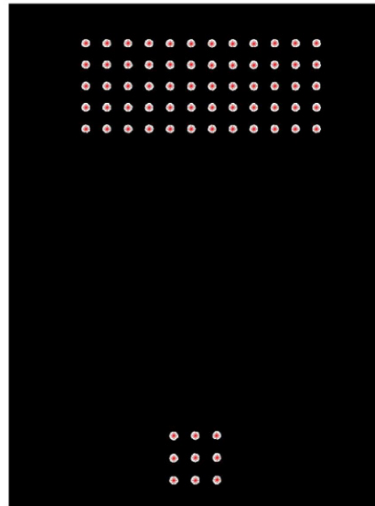


Figura 4.10: Plottaggio centroidi sull'immagine corretta in prospettiva

Ormai in grado di riconoscere i baricentri dei punti, ho distinto in due matrici diverse, i 60 centroidi superiori (centroidsT) dai 9 inferiori (centroidsB).

Per avere un unico punto di riferimento, ho calcolato, per entrambe le matrici, il centroide medio:

- Il centroide medio riferito ai primi 60 punti l'ho rinominato CT (centroide top);

$$CT \left(\frac{\sum_{i=1}^{60} x_i}{60} ; \frac{\sum_{i=1}^{60} y_i}{60} \right)$$

- Il centroide medio riferito agli ultimi 9 punti l'ho rinominato CB (centroide bottom);

$$CB \left(\frac{\sum_{i=1}^9 x_i}{9} ; \frac{\sum_{i=1}^9 y_i}{9} \right)$$

Essendo a conoscenza delle coordinate dei centroidi medi CT e CB, ho potuto calcolare la distanza in pixel tra di loro:

$$\text{distanzapixel} = \sqrt{[CT_y - CB_y]^2 + [CT_x - CB_x]^2} ;$$

Tuttavia, nella nostra prova di creep, solo la distanza tra le ordinate varia nel tempo, pertanto ho provveduto a calcolare la distanza verticale sempre in pixel:

$$\text{distanzapixelV} = |CT_y - CB_y| .$$

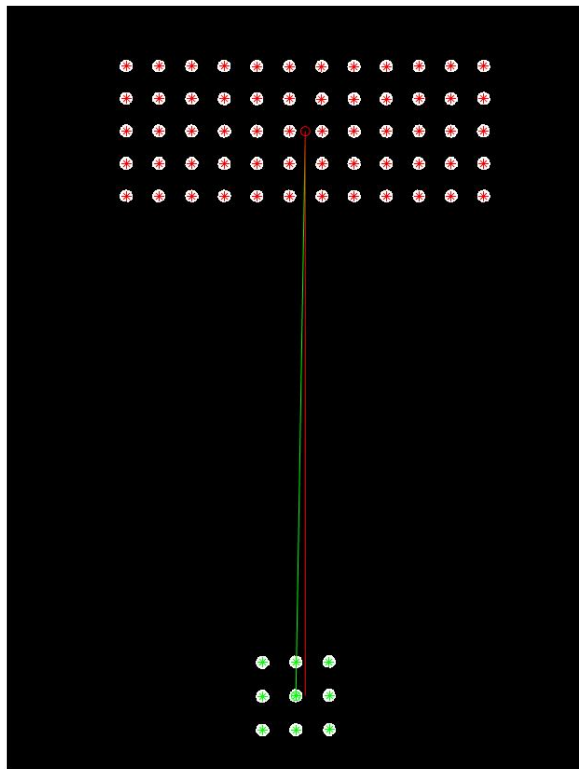


Figura 4.11: *distanzapixel= segmento verde*
distanzapixelV= segmento rosso

DISTANZE TRA CENTROIDI INFERIORI

```
for r=1:3
    centroidsB((r-1)*3+1:r*3,:)=sortrows(centroidsB...
        ...((r-1)*3+1:r*3,:),1);
end
    %ordina i centroidsB presi in riga in base all'ascissa, poi passa alle altre righe
    e fa lo stesso

n=1;

for r=1:3
    for c=1:2
        distB(n,1)=((centroidsB((r-1)*3+1+c-1,1)-centroidsB...
            ((r-1)*3+1+c,1))^2+(centroidsB((r-1)*3+1+c-1,2)-...
            ...- centroidsB((r-1)*3+1+c,2))^2)^0.5;
        n=n+1;
    end
end
    %calcola tutte le distanze orizzontali tra i centroidsB

for c=1:3
    for r=1:2
        distB(n,1)=((centroidsB((r-1)*3+1+c-1,1)-...
            ...centroidsB(r*3+1+c-1,1))^2+(centroidsB((r-1)*3+1+c-1,2)-...
            ...- centroidsB(r*3+1+c-1,2))^2)^0.5;
        n=n+1;
    end
end
    %calcola tutte le distanze verticali tra i centroidsB
```

DISTANZE TRA CENTROIDI SUPERIORI

```
for r=1:5
    centroidsT((r-1)*12+1:r*12,:)=sortrows(centroidsT((r-
1)*12+1:r*12,:),1);
end
%ordina i centroidsT presi in riga in base all'ascissa, poi passa alle altre righe
e fa lo stesso

n=1;
clear dist

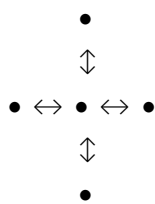
for r=1:5
    for c=1:11
        dist(n,1)=((centroidsT((r-1)*12+1+c-1,1)-centroidsT((r-
1)*12+1+c,1))^2+ ...
        ... (centroidsT((r-1)*12+1+c-1,2)-centroidsT((r-
1)*12+1+c,2))^2)^0.5;
        n=n+1;
    end
end
%calcola tutte le distanze orizzontali tra i centroidsT

for c=1:12
    for r=1:4
        dist(n,1)=((centroidsT((r-1)*12+1+c-1,1)-centroidsT(r*12+1+c-
1,1))^2+...
        ... (centroidsT((r-1)*12+1+c-1,2)-centroidsT(r*12+1+c-
1,2))^2)^0.5;
        n=n+1;
    end
end
%calcola tutte le distanze verticali tra i centroidsT
```

Per trovare la relazione che lega i pixels ai millimetri è necessario conoscere le distanze tra un centroide ed il successivo; per farlo ho calcolato tutte le distanze tra centroidi successivi ed infine ne ho fatto una media.

- Cosa si intende per distanza tra un centroide ed il suo successivo?
 Ogni centroide, ad eccezione di quelli situati nei vertici del rettangolo o lungo i suoi lati, presenta altri quattro barcentri (sopra, sotto, a destra e a sinistra) con la stessa distanza che è anche quella minima tra un centroide e l'altro.

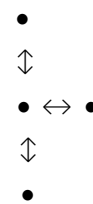
Esempi di distanze tra centroidi successivi:



Centroidi consecutivi



Centroidi consecutivi ai vertici



Centroidi consecutivi ai lati

RISULTATI FINALI

```
ps=5/mean([mean(dist) mean(distB)]); % pixel scale mm/pixel

distanzamm=ps*distanzapixel; %distanza in mm tra i due centroidi medi
distanzammV=ps*distanzapixelV; %distanza in mm tra le ordinate
                                dei due centroidi medi

risultati=[distanzamm distanzammV];
```

La parte conclusiva del programma consiste nel rilevare la distanza in millimetri tra i due array.

Per convertire la distanza da pixels in millimetri è necessario calcolare il pixelscale, ovvero un valore che ci dica quanti millimetri sono contenuti in un pixel.

Ho ottenuto il pixelscale dividendo i millimetri che separano due punti consecutivi (5mm) e la media delle distanze tra i centroidi calcolata nel passaggio precedente.

$$ps = \frac{5}{\text{distanza media tra centroidi consecutivi}} \quad \left[\frac{mm}{pixel} \right]$$

Una volta trovato il pixelscale è facile ricavare le distanze finali in millimetri:

- $\text{distanzamm} = ps * \text{distanzapixel}$
- $\text{distanzammV} = ps * \text{distanzapixel}$

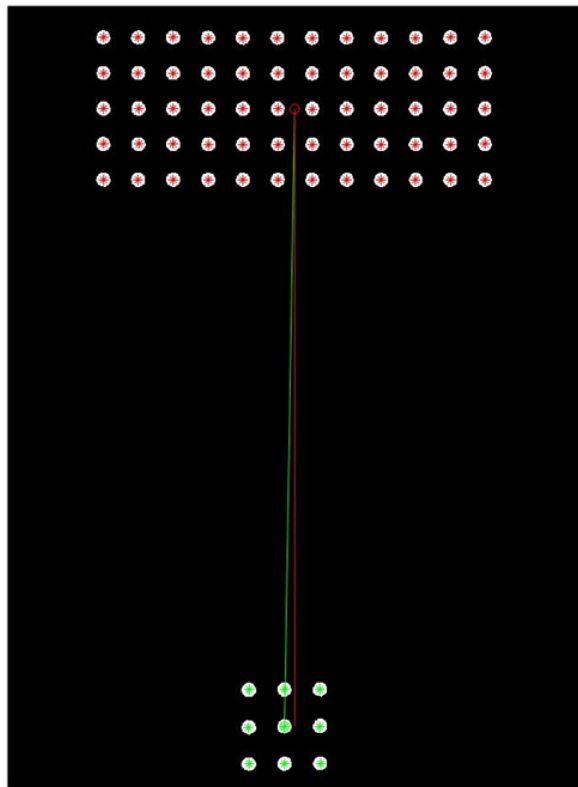


Figura 4.12: Immagine con relative distanze tra i centroidi medi

4.6 PROBLEMI E SOLUZIONI

Durante la costruzione del sistema di simulazione del creep e la preparazione del programma ho incontrato vari problemi e pertanto ho dovuto optare per alcune soluzioni:

<i>PROBLEMI</i>	<i>SOLUZIONI</i>
<ul style="list-style-type: none">• Rilevamento di interferenze luminose e quindi giochi di luci e ombre che mi impedivano di rilevare correttamente i 69 punti.• Instabilità del sistema che non mi garantiva una corretta misurazione della distanza.• Imprecisione nello scatto delle foto.	<ul style="list-style-type: none">• Ho cercato di evitare, per quanto possibile, che nelle foto ci fossero delle zone ombreggiate molto evidenti ed inoltre ho applicato un filtro sul programma per convertire l'immagine in bianco e nero tenendo conto di una opportuna soglia di grigio.• Ho fissato il carrello con del nastro biadesivo su un sistema di riferimento fisso e ho cercato di ottenere un sistema di appoggio il più equilibrato possibile.• Per non spostare minimamente lo smartphone ed evitare alcun tipo di tremolio, ho fissato il cellulare su una griglia sopraelevata al sistema e ho attivato il comando vocale della fotocamera.

<ul style="list-style-type: none"> • Errore causato dalla qualità della fotocamera. • Errore causato dalla prospettiva. • Errore umano nello spostamento del carrello. 	<ul style="list-style-type: none"> • Errore previsto ed in un certo senso voluto in quanto è stato un nostro obbiettivo fin dall'inizio realizzare delle foto con uno strumento non professionistico come uno smartphone. • Ho potuto rimuovere l'errore dovuto alla prospettiva grazie ai comandi di filtraggio di matlab (<i>fitgeotrans</i> e <i>imwarp</i>). • Ruotando la vite per effettuare spostamenti del carrello nell'ordine del decimo di millimetro, è possibile riscontrare delle imprecisioni che tuttavia possiamo considerare ininfluenti e trascurabili.
---	---

4.7 RISULTATI DELL'ANALISI DELL'IMMAGINE

Posizione A = posizione iniziale

immagini	distmm	distmmV
A (1)	84,4355	84,4233
A (2)	84,4231	84,4114
A (3)	84,4066	84,3946
A (4)	84,4023	84,3902
A (5)	84,4342	84,4216

distmm media= 84,42034 mm

distmmV media= 84,40822 mm

deviazione standard dalla distmm media= 0,015360436 mm

deviazione standard dalla distmmV media= 0,015221432 mm

Posizione B = aumento della distanza di 1 mm rispetto ad A

immagini	distmm	distmmV
B (1)	85,4154	85,4037
B (2)	85,4227	85,4108
B (3)	85,4184	85,4063
B (4)	85,4333	85,4216
B (5)	85,4208	85,409

distmm media= 85,42212 mm

distmmV media= 85,41028 mm

deviazione standard dalla distmm media= 0,006820337 mm

deviazione standard dalla distmmV media= 0,006877281 mm

Posizione C = aumento e poi diminuisco la distanza di 0,2 mm rispetto a B

immagini	distmm	distmmV
C (1)	85,4454	85,4336
C (2)	85,4134	85,4017
C (3)	85,4426	85,4306
C (4)	85,4409	85,4285
C (5)	85,4281	85,416

distmm media= 85,43408 mm

distmmV media= 85,42208 mm

deviazione standard dalla distmm media= 0,013329179 mm

deviazione standard dalla distmmV media= 0,013217678 mm

Posizione D = diminuisco e poi aumento la distanza di 0,2 mm rispetto a C

immagini	distmm	distmmV
D (1)	85,4342	85,4218
D (2)	85,4171	85,4047
D (3)	85,4164	85,4037
D (4)	85,4193	85,4068
D (5)	85,4161	85,4037

distmm media= 85,42062 mm

distmmV media= 85,40814 mm

deviazione standard dalla distmm media= 0,007693959 mm

deviazione standard dalla distmmV media= 0,007740349 mm

Posizione E = diminuisco la distanza di 1 mm rispetto a D e torno dunque nella posizione iniziale

immagini	distmm	distmmV
E (1)	84,3945	84,3827
E (2)	84,4075	84,3955
E (3)	84,4104	84,3985
E (4)	84,4175	84,4054
E (5)	84,3914	84,3791

distmm media=84,40426 mm

distmmV media=84,39224 mm

deviazione standard dalla distmm media=0,0110015 mm

deviazione standard dalla distmmV media=0,011030322 mm

CONFRONTI:

	distmm	distmmV
B-A	1,00178	1,00206
B-C	-0,01196	-0,0118
C-D	0,01346	0,01394
D-E	1,01636	1,0159
A-E	0,01608	0,01598
B-E	1,01786	1,01804

	Deviazione standard	Deviazione standard Verticale
Media	0,010841082	0,010817412

CONCLUSIONE: Il programma qui elaborato è in grado di effettuare misurazioni precise fino al decimo di millimetro.

5 APPLICAZIONE DEL PROGRAMMA SU UNA VERA PROVA DI CREEP

5.1 INFORMAZIONI SUL CREEP TEST

Una volta concluso il mio periodo di tirocinio si è presentata la possibilità di poter mettere alla prova il programma appena elaborato in quanto nella nostra sede universitaria, proprio in quel periodo, era stato programmato l'inizio di una prova di creep su giunti incollati di vetro e alluminio.

Qui sotto viene mostrata la foto della prova di creep nel suo complesso.

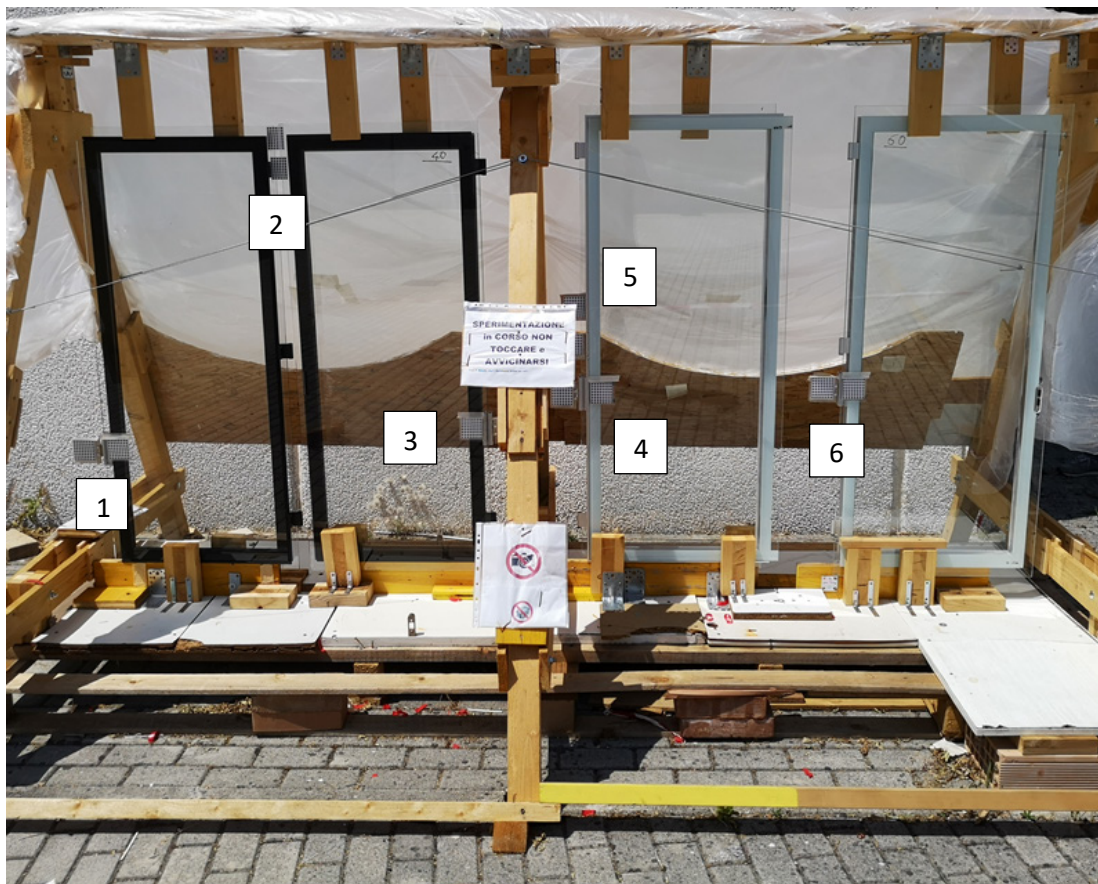


Figura 5.1: Giunzioni incollate sottoposte a creep test presso UNIVPM

Nella foto 5.1 posso notare che ci sono 6 punti di osservazione dello spostamento dovuto alla prova.

Insieme a me anche un altro ragazzo, che ha svolto il mio stesso tirocinio, si è occupato dell'analisi delle fotografie e pertanto ci siamo divisi il lavoro.

Ci siamo occupati di analizzare le foto per un periodo lungo quasi due mesi mentre la prova prevede una durata di tre anni.

Il creep test è iniziato verso gli ultimi giorni di luglio nel 2019 e da quel momento in poi il professor Chiappini, che si è occupato del nostro tirocinio, ci ha mandato ad intervalli di tempo non molto regolari 60 fotografie per giorno (10 per ogni posizione).

Il nostro compito è stato quello di analizzarle, rilevare le distanze e riportare i risultati ottenuti su un file Excel, infine abbiamo tracciato dei grafici per vedere l'andamento della prova.

Non è sempre stato possibile analizzare le fotografie che ci sono state inviate perché i fogli di carta, con sopra tracciati i vari punti neri, erano stati plasticizzati per poterli proteggere dalle condizioni climatiche in quanto, come si può notare dalla fotografia sopra riportata, il macchinario è situato in un ambiente aperto e dunque nelle foto è spesso presente un fastidioso riflesso che le rendeva inutilizzabili.

Inoltre bisogna considerare che le fotografie sono state scattate con uno smartphone da posizioni diverse e con prospettive sempre variabili pertanto i risultati ottenuti mancano un pochino in precisione, tuttavia riescono a riprodurre l'andamento del fenomeno.

5.2 RISULTATI DELLE ANALISI

Siccome sarebbe ripetitivo presentare i risultati di tutte le posizioni, in questo paragrafo riporterò solo quelli ottenuti dalla posizione 5.

Per prima cosa riporto l'immagine di una delle varie fotografie che ci sono state inoltrate per la posizione 5:



Figura 5.2: Esempio di foto da analizzare

In questa fotografia sono ben visibili i due fogli plastificati, ognuno con 64 punti neri (8x8) distanziati tra di loro di 8mm.

Siccome il peso tende verso il basso, in ogni posizione la deformazione avviene lungo la verticale e la distanza tende ad aumentare, quindi con il nostro programma ci siamo limitati a misurare solo distanza verticale che separa i due baricentri dei fogli.

Risultati:

Data	Distanza Verticale	Media		Ordine decescente	Media valori da 3 a 8
24/07/2019					
1	111,9808		1	luce	
2	111,9919		2	111,9919	
3	111,9549		3	111,9883	
4	111,9883		4	111,9808	
5	luce		5	111,9777	
6	111,9608		6	111,9743	
7	111,9743		7	111,97	
8	111,97		8	111,9608	
9	111,9777		9	111,9549	
10	111,9495	111,972022	10	111,9495	111,975317
25/07/2019					
1	112,0953		1	112,1474	
2	112,1474		2	112,0953	
3	112,0707		3	112,0869	
4	112,0593		4	112,0842	
5	112,0595		5	112,0707	
6	112,0384		6	112,0695	
7	112,0842		7	112,0671	
8	112,0869		8	112,0595	
9	112,0671		9	112,0593	
10	112,0695	112,07783	10	112,0384	112,072983
26/07/2019					
1	111,9657		1	112,0333	
2	111,9882		2	112,0183	
3	111,9696		3	112,0167	
4	111,9525		4	112,0138	
5	112,0138		5	112,0027	
6	112,0183		6	111,999	
7	111,999		7	111,9882	
8	112,0027		8	111,9696	
9	112,0333		9	111,9657	
10	112,0167	111,99598	10	111,9525	111,998333
29/07/2019					
1	112,0045		1	112,0221	
2	111,9768		2	112,0196	
3	111,9698		3	112,0065	
4	111,9657		4	112,0045	

5	111,9879			5	111,99	
6	111,99			6	111,9879	
7	112,0221			7	111,9768	
8	112,0065			8	111,9698	
9	112,0196			9	111,9684	
10	111,9684	111,99113		10	111,9657	111,98925
30/07/2019						
1	112,1269			1	112,1278	
2	112,1125			2	112,1269	
3	112,0993			3	112,1226	
4	112,0493			4	112,1157	
5	112,1145			5	112,1145	
6	112,0808			6	112,1125	
7	112,1157			7	112,0993	
8	112,0908			8	112,0908	
9	112,1278			9	112,0808	
10	112,1226	112,10402		10	112,0493	112,109233
31/07/2019						
1	111,992			1	112,0579	
2	112,0579			2	112,0364	
3	112,0311			3	112,0311	
4	111,9541			4	112,0198	
5	112,0005			5	112,0151	
6	111,9423			6	112,0005	
7	111,999			7	111,999	
8	112,0151			8	111,992	
9	112,0364			9	111,9541	
10	112,0198	112,00482		10	111,9423	112,009583
02/09/2019						
1	112,0648			1	112,1208	
2	112,0455			2	112,1079	
3	112,0518			3	112,0784	
4	112,0248			4	112,0738	
5	112,1208			5	112,0648	
6	112,0229			6	112,0535	
7	112,1079			7	112,0518	
8	112,0738			8	112,0455	
9	112,0535			9	112,0248	
10	112,0784	112,06442		10	112,0229	112,0613
03/09/2019						
1	112,0687			1	112,12	
2	112,0872			2	112,0961	

3	112,0735			3	112,0872	
4	112,12			4	112,0799	
5	112,0704			5	112,0735	
6	112,0961			6	112,0704	
7	112,047			7	112,0687	
8	112,0356			8	112,0652	
9	112,0652			9	112,047	
10	112,0799	112,07436		10	112,0356	112,07415
05/09/2019						
1	112,0806			1	112,0841	
2	112,0774			2	112,0806	
3	112,0693			3	112,0774	
4	112,0511			4	112,0726	
5	112,0841			5	112,0704	
6	112,0699			6	112,0699	
7	112,0454			7	112,0693	
8	112,0627			8	112,0627	
9	112,0704			9	112,0511	
10	112,0726	112,06835		10	112,0454	112,070383
11/09/2019						
1	luce			1	luce	
2	luce			2	luce	
3	luce			3	luce	
4	luce			4	luce	
5	luce			5	luce	
6	luce			6	luce	
7	luce			7	luce	
8	luce			8	luce	
9	luce			9	luce	
10	luce			10	luce	
16/09/2019						
1	112,1636			1	112,1958	
2	112,1958			2	112,1929	
3	112,1511			3	112,1804	
4	112,1804			4	112,1636	
5	112,1427			5	112,1511	
6	112,1299			6	112,1427	
7	112,1205			7	112,1299	
8	112,1929			8	112,1264	
9	112,1264			9	112,1212	
10	112,1212	112,15245		10	112,1205	112,149017

Successivamente ho inserito questi risultati (ad eccezione di quelli con la scritta luce perché presentano riflessi) in una tabella e poi ho tracciato un grafico dove sulle ascisse è riportato il tempo e sulle ordinate la distanza media.

data	Distanza in millimetri
24/07/2019	111,975317
25/07/2019	112,072983
26/07/2019	111,998333
29/07/2019	111,98925
30/07/2019	112,109233
31/07/2019	112,009583
02/09/2019	112,0613
03/09/2019	112,07415
05/09/2019	112,070383
16/09/2019	112,149017

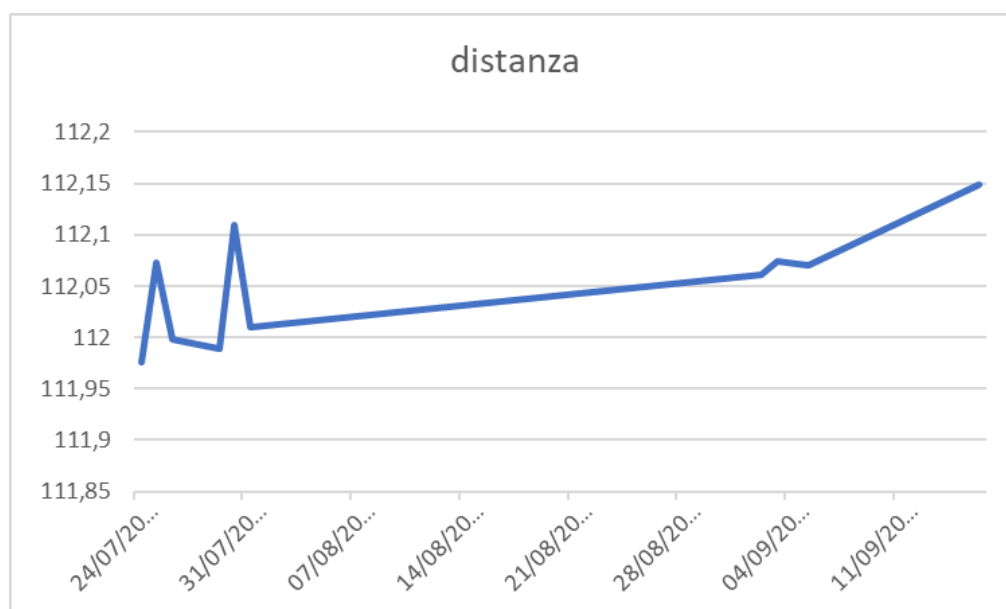


Figura 5.3: grafico della distanza – tempo dei dati in tabella.

Anche se, come ben visibile nel grafico, i risultati inizialmente oscillano di valori infinitesimi, è anche vero che è evidente la tendenza di crescita della distanza. Come detto precedentemente, è impossibile avere dei risultati precisi perché le foto sono fatte manualmente con uno smartphone e questo comporta i vari problemi sopra citati.

Siccome è evidente la crescita della curva della distanza, ci possiamo ritenere soddisfatti dei risultati ottenuti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Analysis of the cyclic behavior of an adhesive in an assembly for offshore windmills applications. Materials. Pierre Bidaud. Université Bretagne Occidentale, 2014. English.
 - [2] Creep Testing of Adhesive Joints Analysis of Creep Rupture Data, W R Broughton, October 1999, Centre for Materials Measurement & Technology. National Physical Laboratory, Teddington, Middelsex (UK).
 - [3] Adhesive Toolkit, Design Guidance – Service Requirements - Creep.
 - [4] Creep simulation of adhesively bonded joints using modified generalized time hardening model, Mohammad Alli Saeemi Sadigh, Journal of Mechanical Science and Technology, April 2016, Volume 30, Issue 4, pp. 1555-1561.
 - [5] Tecnologie e Materiali Aerospaziali, Cap. 27, Materiali a comportamento viscoelastico: Comportamento Costitutivo.
 - [6] Deformazione ad alta temperatura – Creep, Lecture 13 – Introduzione al Creep, CDM – N. Bonara 2016.
 - [7] La metallurgia italiana (18/09/2004), Il comportamento dei metalli ad alta temperatura, S. Spigarelli.
 - [8] La metallurgia italiana (18/09/2004), Scorrimento viscoso: termine di esercibilità di componenti sollecitati a caldo, G. Merckling, M. Jago.
 - [9] Didattica UniRoma2, lezione 16.
 - [10] Creep and Creep Failures, National Board BULLETIN, luglio 1991, David N. French.
 - [11] Appunti UniNa, Corso di costruzione di macchine 2006, Prof. Giuseppe Giudice.
 - [12] Comportamento a frattura di un adesivo strutturale, Atti IGF XV, 3-5 maggio 2000, Bari, Italia, pp. 459-466.
 - [13] Appunti di costruzione di macchine sui giunti meccanici dell'università del Salento, Prof. Riccardo Nobile.
 - [14] Analisi statica e a fatica di giunzioni ibride co-cured metallo-composito a semplice e a doppia sovrapposizione, R. Paolotti, D. Scibetta, D. Tumino, B. Zuccarello, Dipartimento di meccanica, Università degli studi di Palermo.
 - [15] Tecnologie e materiali aerospaziali – Ver.01, Capitolo 44 – Tecniche di giunzione continua dei materiali compositi: incollaggio e sigillatura, G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini.
 - [16] Adhesively bonded joints in composite materials: an overview, Journal of material design and applications, Vol. 223:1, M. D. Banea, L. F. M. Da Silva, 2009.
 - [17] P. Cirillo, Modellazione analitica di giunzioni incollate in materiale composito, Tesi di dottorato, Dip. di ingegneria chimica, Università di Napoli Federico II, a.a 2015/2016.
-

- [18] G. Fioranti, Chimica delle superfici ed interfasi, corso di Chimica delle Superfici ed Interfasi, Università degli studi dell'Aquila, 2016-2017.
- [19] F. Trifirò, Dalle molecole agli adesivi. La lunga strada della formulazione, La chimica e l'industria, Settembre 2003.
- [20] FEDERCHIMICA, AVISA Gruppi adesivi e sigillanti, Materiali didattici incollaggio/adesivi, Marzo 2006.
- [21] Linee Guida Incollaggio nel Settore Ferrotramviario e Metropolitano, Rev. 01 del 16/11/15 Parte 3, AICQ (associazione italiana cultura qualità) Settore trasporto su rotaia.
- [22] Modelli Previsionali Per La Resistenza Statica Di Giunzioni Incollate In Materiale Composito, Tesi di Laurea Magistrale di Matteo Montagnin in Ingegneria dell'innovazione del prodotto. Università di Padova, Anno Accademico 2013/2014.
- [23] Il creep nei materiali metallici – Prove di creep – ElectroYou.
- [24] Lezioni di costruzione di macchine, Univpm, 2019.
- [25] Caratteristiche e prestazioni degli adesivi per le giunzioni meccaniche, Il Progettista Industriale, Stefano Vinto, 06/05/2019.
- [26] La saldatura nella carpenteria metallica, Costruzioni Metalliche Icomet.

RINGRAZIAMENTI

Ormai giunti alla conclusione di questo elaborato non mi resta che ringraziare chi lo ha reso possibile.

In primo luogo ringrazio il professor Rossi Marco ed il professor Chiappini Gianluca che con la loro pazienza e con la loro professionalità hanno reso possibile questo lavoro.

Ringrazio anche l'Univpm ed il suo personale per aver permesso il miglioramento della mia formazione.

Un sentito grazie va ai miei genitori, non solo per il grande aiuto economico, ma per la loro presenza costante durante questi anni di studio.

Un ulteriore ringraziamento va ai miei compagni di corso per il confronto reciproco che abbiamo avuto quotidianamente.

Ringrazio coloro che, in questo periodo trascorso lontano da casa, sono sempre stati disponibili con me.

E perché no, visto che ci sono, un grazie lo dedico anche a me stesso per la mia forza di volontà e la determinazione che mi ha permesso di portare a termine questo percorso e raggiungere i miei obiettivi.

Grazie!

Francesco
