

Rivestimenti icefobici per le componenti della rete elettrica: sintesi e caratterizzazione, proprietà antighiaccio e antineve

Marcella Balordi, Federico Maria Cernuschi, Damiano Fasani, Matteo Lacavalla, Francesco Pini, Giorgio Santucci De Magistris, Bruno Vitali, Alessandro Casali

2023

Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale



Accordo di programma 2022-2024 con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.

Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico

Work Package WP 3 Prevenzione e mitigazione degli effetti delle minacce e dei loro effetti

Linea di Attività LA3.06 – Ottimizzazione di coating antighiaccio e anticontaminazione per componenti della rete elettrica e loro sperimentazione

Codice identificativo RT-2.6-3.06-1

Titolo: Rivestimenti icefobici per le componenti della rete elettrica: sintesi e caratterizzazione, proprietà antighiaccio e antineve
Autori: Marcella Balordi, Federico Maria Cernuschi, Damiano Fasani, Matteo Lacavalla, Francesco Pini, Giorgio Santucci De Magistris, Bruno Vitali, Alessandro Casali (Università degli studi di Parma)

Verificatori: Maurizio Notaro, Elena Collino

Approvatori: Giovanni Pirovano, Luigi Mazzocchi

Tipologia di documento: RAPPORTO

Data di emissione: 31/12/2023

Note: prima emissione

© Copyright 2023 by Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A.

Contributo/i liberamente utilizzabile/i a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare.

Per la tutela dell'ambiente, prima di stampare questo documento pensa bene se è veramente necessario.



INDICE

INDICE	3
SOMMARIO.....	5
1 - INTRODUZIONE	6
2 - COATING ELASTOMERICI ANTIGHIACCIO: OTTIMIZZAZIONE DELLE FORMULAZIONI E PROVE DI INVECCHIAMENTO ACCELERATO	8
2.1 Studio del trattamento di <i>curing</i> termico	8
2.1.1 Caratterizzazione degli elastomeri sottoposti a differenti processi di <i>curing</i> termico	9
2.1.2 Monitoraggio del tempo di maturazione dell'elastomero	14
2.2 Test di invecchiamento accelerato	16
2.3 Valutazione complessiva e selezione dei campioni ottimizzati	20
3 - EFFETTO DEI PARAMETRI SPERIMENTALI SULLA MISURA DI ADESIONE DEL GHIACCIO ALLE SUPERFICI: OTTIMIZZAZIONE DEL METODO DI PROVA	22
3.1 Progettazione e realizzazione dello strumento	22
3.1.1 Progettazione parte hardware	22
3.1.2 Progettazione dell'elettronica	23
3.1.3 Progettazione del programma e dell'interfaccia utente	24
3.2 Ottimizzazione del metodo di misura	24
4 - STUDIO DELLE PROPRIETÀ DI REPULSIONE DELLA NEVE NEL LABORATORIO DI NEVE ARTIFICIALE (LNA)	28
4.1 Produzione di neve artificiale con differente LWC e densità	28
4.1.1 Metodo di misura di LWC	28
4.1.2 Parametri di produzione della neve artificiale	29
4.2 Allestimento della strumentazione del laboratorio di neve artificiale	30
4.2.1 Macchina a trazione meccanica	30
4.2.2 Espositore motorizzato per conduttori elettrici	31
4.3 Test di crescita dei manicotti di neve	32
5 - MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MANICOTTO DI NEVE ADESO ATTORNO AL CONDUTTORE	34
5.1 Sviluppo del modello	34
6 - PROVE IN CAMPO.....	39
6.1 Risultati dell'inverno 2022-2023	39
6.2 Preparazione dei campioni per il test dell'inverno 2023-2024 presso la stazione WILD	43
7 - AGGIORNAMENTO DELLO STATO DELL'ARTE DEI COATING ANTIGHIACCIO	45
7.1 Slippery covalently-attached liquid surfaces (SCALs).....	45
7.2 Smart coating	45
7.2.1 Materiali termo-responsivi	45
7.2.2 Materiali a cambio di fase	46
7.2.3 Materiali a impulso meccanico	46
7.3 Polimeri fluorurati e organici	46
8 - CONCLUSIONI	47
9 - BIBLIOGRAFIA	49



10 - APPENDICE: MISURA DEL LWC NEL LABORATORIO DI NEVE ARTIFICIALE	51
10.1 Procedura di prova	51
10.1.1 <i>Misura della capacità termica E del dewar</i>	51
11 - ACRONIMI	55
12 - ELENCO ALLEGATI.....	56



SOMMARIO

Questa ricerca si pone come obiettivo di mitigare la formazione dei manicotti di ghiaccio e neve, causati da eventi meteorologici estremi, sui conduttori di fase aerei e sulle funi di guardia. Il fine ultimo è la riduzione dei *black out* e dei disservizi della rete elettrica e dei costi di ripristino da essi derivanti. Lo studio presentato è relativo alla sintesi di *coating* elastomerici con proprietà antighiaccio e antineve e alla valutazione delle loro *performance*.

Si sono studiati gli effetti dei trattamenti di polimerizzazione (*curing*) e del rapporto prepolimero:reticolante sulle proprietà antighiaccio e sull'invecchiamento accelerato degli elastomeri. I materiali migliori sono gli elastomeri più *soft*, in quanto, anche dopo l'invecchiamento, sono in grado di diminuire l'adesione del ghiaccio fino a 4,5 volte rispetto al riferimento. Per questi materiali, il *curing* termico velocizza il processo di polimerizzazione, influenzando poco le proprietà antighiaccio.

È stato realizzato uno strumento di misura di adesione del ghiaccio su superfici planari, che permette di ampliare il *range* dei parametri di misura. Si è eseguita, attraverso un *Design Of Experiment*, l'ottimizzazione dei parametri sperimentali applicati, raggiungendo una ripetibilità del dato di analisi che si attesta al di sopra del 80%, valore eccellente rispetto a quanto riportato in letteratura.

All'interno del Laboratorio di Neve Artificiale (LNA), è stata condotta un'attività sulla caratterizzazione della neve e sulla crescita del manicotto, finalizzata a introdurre prove di *snowfobicità* atte a dare una prima valutazione delle proprietà antineve dei materiali testati. Il vantaggio di questa attività è che permette di controllare le condizioni ambientali di crescita e distacco del manicotto, svincolandosi dalla variabilità degli eventi meteorologici reali; resta comunque fondamentale anche la sperimentazione *outdoor*, per avere una effettiva valutazione del comportamento antineve dei coating in ambiente. Nel LNA è possibile produrre neve con contenuto di acqua liquida dal 3 al 35% e creare manicotti con differenti tipi di neve, valutandone la velocità di crescita e la eventuale fase di distacco. Le attività condotte nel LNA hanno anche reso possibile la definizione di un modello ad elementi finiti che simula la crescita e il distacco di un manicotto di neve attorno a un cavo conduttore.

I campioni più promettenti sono stati preparati in grandi dimensioni e installati presso la stazione sperimentale WILD, per l'inverno 2023-2024. Nella *test facility* sono stati installati dei sensori di spessore che consentiranno, in abbinamento alle immagini della telecamera e ai dati di una cella di carico, una valutazione quantitativa più accurata del manicotto di neve che si forma attorno agli spezzoni di conduttore in test.

Il rapporto si conclude con una analisi di letteratura dei più recenti coating antighiaccio, che potranno essere considerati per futuri sviluppi in RSE.

Keywords: antighiaccio, antineve, coating, elastomeri, laboratorio di neve artificiale, snowfobicità



1 - INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive le principali attività svolte nel periodo di riferimento circa lo sviluppo di rivestimenti antighiaccio per conduttori elettrici aerei e funi di guardia, la loro caratterizzazione e la misura delle prestazioni antighiaccio e antineve.

Questo rapporto costituisce deliverable della Linea di Attività (LA) 3.06 – Ottimizzazione di coating antighiaccio e anticontaminazione per componenti della rete elettrica e loro sperimentazione” che è inserita nell’ambito del Work Package 3 “Previsione, prevenzione e mitigazione degli effetti delle minacce sul sistema energetico” del Progetto 2.6 “Resilienza e sicurezza del sistema energetico”.

Gli obiettivi generali del Progetto e del WP sono di contribuire all’incremento della sicurezza e della resilienza del sistema elettrico, anche attraverso l’individuazione e la sperimentazione di componenti e materiali innovativi, grazie ai quali fare fronte alle nuove esigenze della rete e alle mutate sollecitazioni ambientali a cui questa è sottoposta.

Il cambiamento climatico in atto causa, con crescente frequenza, eventi nevosi a temperature elevate. Tali eventi sono caratterizzati da una neve particolarmente pesante per l’alto contenuto di acqua all’interno del fiocco (*wet-snow*). Nevicate di forte intensità possono portare alla crescita di manicotti sulle strutture elettriche e al loro successivo collasso sotto il peso della neve. In Italia, questa situazione si verifica più spesso nella fascia appenninica e nelle zone costiere dove le linee elettriche aeree non sono state progettate per sopportare carichi nevosi così importanti. In ambito mondiale, il problema del ghiacciamento delle strutture elettriche è ampiamente diffuso, tanto da organizzare *workshop* dedicati, come per esempio l’International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), e da costituire gruppi di lavoro per far fronte a questi problemi [1].

Da anni sono in corso ricerche in ambito internazionale, volte alla mitigazione del problema del ghiacciamento attraverso la formulazione e l’ottimizzazione di rivestimenti antighiaccio (*coating*), in grado di ritardare l’adesione del ghiaccio (o neve) sulle strutture elettriche o di promuoverne il distacco anticipato.

Sebbene ad oggi non esistano soluzioni commerciali di rivestimenti anti-ghiaccio per componenti aerei delle linee elettriche, anche il *Transmission System Operator* (TSO) italiano sta favorendo lo sviluppo di questi ultimi. Nel 2022 è stata infatti avviata una sperimentazione su scala reale, dove funi di guardia e conduttori aerei rivestiti con *coating* anti-ghiaccio sono stati installati in zone sensibili ai fenomeni di ghiacciamento, al fine di monitorarne il comportamento.

La Linea di Attività, a cui questo rapporto afferisce, si propone di proseguire lo studio dei ricoprimenti con funzione anti-neve ed anti-ghiaccio per applicazioni su conduttori elettrici aerei e funi di guardia, in continuità con gli studi svolti nelle precedenti annualità [2], ottimizzando e approfondendo sia le formulazioni e le caratterizzazioni dei *coating* che la valutazione delle loro *performance* antighiaccio.

I benefici che questa ricerca potrebbe apportare riguardano la riduzione dei disservizi dovuti a sovraccarico di neve sulle linee e dei costi associati, che solo in Italia ammontano a diverse decine di milioni di euro per anno [3].

La ricerca qui descritta si muove su tre filoni: il primo punta a **sviluppare e ottimizzare rivestimenti antineve e antighiaccio**, duraturi, economici, ambientalmente sostenibili e applicabili su larga scala.

Un dettagliato lavoro di sintesi e caratterizzazione di *coating* elastomerici con proprietà antighiaccio, viene descritto nel capitolo 2. Viene approfondito l’effetto del processo di polimerizzazione (*curing*) sulle caratteristiche finali dei rivestimenti, ottenuti applicando diversi rapporti prepolimero:agente reticolante. Si è osservato che alcune proprietà, come l’icefobicità, dipendono anche dal processo di *curing* mentre altre, come per esempio l’idrofobicità, ne sono quasi totalmente indipendenti. Si sono infine condotti test di invecchiamento accelerato per tutti i campioni in esame.



Grazie a questo studio si sono definite le condizioni di sintesi, sia in termini di rapporto di reticolazione che di processo di *curing*, per ottenere il rivestimento con le migliori proprietà antighiaccio e in grado di superare i test di invecchiamento accelerato.

Il secondo filone ha come obiettivo quello di **migliorare le caratterizzazioni delle proprietà antighiaccio**, rendendole più affidabili e ripetibili.

Nel capitolo 3 si presenta uno studio sulla misura dell'adesione effettuata attraverso l'analisi di *shear stress* del ghiaccio adeso alla superficie [2]. Intrinsecamente, questa misura è molto sensibile ai diversi parametri sperimentali che si applicano e l'assenza di norme e/o linee guida, rende molto difficile sia la valutazione delle proprietà ghiaccio-fobiche dei materiali che il confronto tra materiali diversi. Nella precedente annualità sono stati ottimizzati i parametri per condurre l'analisi su campioni cilindrici [4] principalmente applicabile ai *coating* superidrofobici. In questo anno di ricerca è stato realizzato un nuovo strumento per la misura dello *shear stress* su campioni planari, necessario per le misure delle proprietà antighiaccio dei campioni elastomerici, non altrimenti quantificabili. Si descrive il *design of experiment* (DOE) condotto variando il tempo e la temperatura di ghiacciamento e la velocità di distacco del ghiaccio dalla superficie. Vengono quindi definite, in un modello di regressione lineare multipla, le condizioni ottimizzate per avere la massima ripetibilità nelle misure di *shear stress*.

Il terzo filone invece si focalizza sullo **studio della neve artificiale e naturale**, delle sue proprietà e del comportamento dei campioni sottoposti a nevicate: si introduce il concetto di *snowfobicità*, inteso come la capacità della superficie di ritardare l'adesione della neve e/o di facilitarne il distacco. Nel capitolo 4 vengono presentate le attività condotte nel laboratorio di neve artificiale (LNA) tra cui la messa a punto di procedure per la misura calorimetrica del contenuto di acqua liquida (LWC) della neve prodotta. Sono definiti i parametri di macchina per la produzione di neve a differente contenuto di LWC, che può variare da secca (*dry*), a ibrida (*wet-dry*), a bagnata (*wet*) a seconda delle esigenze sperimentali. Infine, sono descritte le attrezzature installate e collaudate nel LNA, finalizzate alla caratterizzazione *indoor* delle proprietà anti-neve dei campioni. In particolare, viene descritto lo strumento, interamente realizzato in RSE, per la valutazione della crescita del manicotto di neve artificiale, grazie al quale sarà possibile eseguire una analisi *indoor*, in condizioni controllate, delle proprietà *snowfobiche* dei campioni rivestiti rispetto ad un riferimento. Questo è un importante strumento sia per fare una preselezione dei campioni più promettenti per i test all'esterno che per approfondire e interpretare meglio le proprietà anti-neve, a seconda della variazione di importanti parametri come, per esempio, le temperature, i flussi, la durata dell'evento nevoso e il contenuto di LWC.

Il capitolo 5 presenta la parte conclusiva dello studio, intrapreso nel 2021 nell'ambito di un Dottorato di Ricerca, relativo alla modellazione del manicotto di neve su cavi conduttori. Tale modello ha permesso di osservare che le sollecitazioni si concentrano all'interno del manicotto di neve in prossimità della superficie del cavo e che la deformazione nel tempo della neve sembra essere la causa della degradazione del legame adesivo.

Nel capitolo 6, in continuità con gli scorsi anni, si descrive la campagna sperimentale outdoor, condotta presso la stazione sperimentale WILD di Vinadio (CN), per valutare il comportamento anti-neve dei campioni più promettenti. In particolare, sono presentati i risultati dell'inverno 2022-2023 e sono descritti i campioni esposti per l'inverno 2023-2024.

Infine, il capitolo 7 racchiude un breve aggiornamento dello stato dell'arte dei coating antighiaccio di recente ideazione, utile per valutare possibili nuovi approcci e sviluppi futuri volti al miglioramento delle performance e delle applicabilità dei coating in ambito elettrico.

All'attività di ricerca ha collaborato attivamente un dottorando afferente all'Università degli Studi di Parma.

2 - COATING ELASTOMERICI ANTIGHIACCIO: OTTIMIZZAZIONE DELLE FORMULAZIONI E PROVE DI INVECCHIAMENTO ACCELERATO

In prosecuzione delle scorse annualità [2, 5], nel presente capitolo sono descritte attività di ottimizzazione e approfondimento delle preparazioni e delle caratterizzazioni di alcuni elastomeri siliconici con proprietà antighiaccio. Gli elastomeri presentati sono stati ottenuti a partire dal Sylgard™ 184 Silicone Elastomer Kit, un prodotto distribuito da Dow® Chemical che comprende due componenti: il prepolimero (A) e l'agente reticolante (o di curing) (B).

Nelle precedenti annualità sono stati studiati l'effetto dello spessore e dei rapporti tra prepolimero e agente reticolante sulle proprietà icefobiche. I risultati hanno mostrato che, all'aumentare dello spessore del coating e al diminuire del modulo elastico, diminuisce l'adesione del ghiaccio, in accordo all'equazione:

$$\tau \propto \sqrt{\frac{\mu W_{ad}}{t}} \quad 2.1$$

dove

τ : sforzo di taglio necessario a produrre il distacco

μ : modulo elastico o di Young

W_{ad} : lavoro di adesione

t : spessore

Tutti i materiali studiati hanno mostrato buone proprietà antighiaccio, abbassando l'adesione fino a 4 volte, rispetto alle superfici di lega di alluminio non rivestite, prese come riferimento.

Nel presente anno si è studiato l'effetto del trattamento termico degli elastomeri durante la fase di polimerizzazione (*curing*) sulle proprietà antighiaccio del materiale. Un trattamento termico più o meno spinto, oltre ad influire sul tempo di reticolazione del polimero, può infatti anche incidere su alcuni aspetti chimico-fisici, tra cui l'elasticità, l'adesività e la stabilità del rivestimento finale.

Al termine del capitolo viene presentato uno studio sul comportamento dei diversi campioni sottoposti a cicli di invecchiamento accelerato.

2.1 Studio del trattamento di *curing* termico

In generale, nel processo di *curing*, il materiale polimerico, inizialmente liquido, diventa solido attraverso la formazione di legami chimici tra le catene polimeriche e i reticolanti. Durante tale processo si forma un reticolo tridimensionale che via via si infittisce. La formazione dei legami può essere attivata dalla presenza di un catalizzatore o attraverso l'esposizione a radiazioni o a calore. All'interno dei componenti del Sylgard 184 è infatti presente un catalizzatore in grado di promuovere la formazione del polimero anche a temperatura ambiente. La scheda tecnica del materiale commerciale nel rapporto 10:1, dichiara che la solidificazione del polimero a 25°C avviene in 2 giorni [6], un trattamento termico può invece velocizzare la maturazione. Nonostante il materiale risulti solido, le reazioni di polimerizzazione all'interno del *bulk* possono comunque procedere anche oltre le tempistiche indicate. Il trattamento termico, inoltre, può causare un cambiamento nella durezza del materiale, correlata al modulo elastico, con un impatto sullo *shear stress* e di conseguenza sulle proprietà antighiaccio (equazione 2.1).

Al fine di indagare questi aspetti, sono state preparate 4 serie di campioni con rapporto in peso prepolimero:agente reticolante (A:B): 5:1, 10:1, 20:1 e 30:1. I campioni sono stati poi sottoposti a differenti trattamenti termici di *curing* (tt), le cui condizioni sono riportate in tabella.

Tabella 2-1 – trattamento termico e tempo di *curing* del Sylgard 184

Nome	Temperatura di <i>curing</i>	Tempo di <i>curing</i>
tt1	25°C	48 h
tt2	100°C	35'
tt3	100 °C	1 h
tt4	100 °C	3 h
tt5	100 °C	6 h
tt6	100 °C	9 h
tt7	100 °C	12 h
tt8	100 °C	24 h
tt9	200 °C	18'

A seconda dei rapporti A:B, sono stati testati tutti o solo alcuni dei trattamenti termici presentati in Tabella 2-1: in particolare, il processo tt9 è stato testato soltanto sul rapporto 10:1, mentre il tt1 non è stato testato sui Syl184_20:1 e Syl184_30:1 in quanto non sufficiente ad ottenere, per questi rapporti, una polimerizzazione del materiale entro le 48 ore.

Di ciascuna formulazione sono state preparate due tipologie di campione: *bulk* (spessore circa 10 mm), e *coating*, con uno spessore controllato di circa 800 µm, depositato su lastrine di Al.

I campioni così preparati saranno indicati come: Syl184_A:B_ttn, dove A:B rappresenta il rapporto prepolimero:agente reticolante e ttn il tipo di trattamento termico subito (es Syl184_10:1_tt1).

2.1.1 Caratterizzazione degli elastomeri sottoposti a differenti processi di *curing* termico

I campioni sono stati caratterizzati attraverso spettroscopia FTIR, misure di bagnabilità, di durezza e di adesione del ghiaccio con *shear stress test*. Le caratterizzazioni sono state eseguite tutte sui coating, tranne la durezza che è stata misurata sui materiali bulk.

2.1.1.1 Analisi FTIR

In generale, tutti gli elastomeri preparati presentano segnali FTIR nelle stesse posizioni sia in presenza di diversi rapporti A:B, sia dopo differenti tt. In figura Figura 2-1 a è riportato a scopo esemplificativo lo spettro di Syl184_10:1_tt3 che mostra i segnali caratteristici rispettivamente a: 2963 cm⁻¹ (stretching dei gruppi C-H alifatici), 1259 cm⁻¹ (stretching del Si-C-H), 1060 - 1011 cm⁻¹ (stretching Si-O-Si) e 786 cm⁻¹ (bending Si-O) [7].

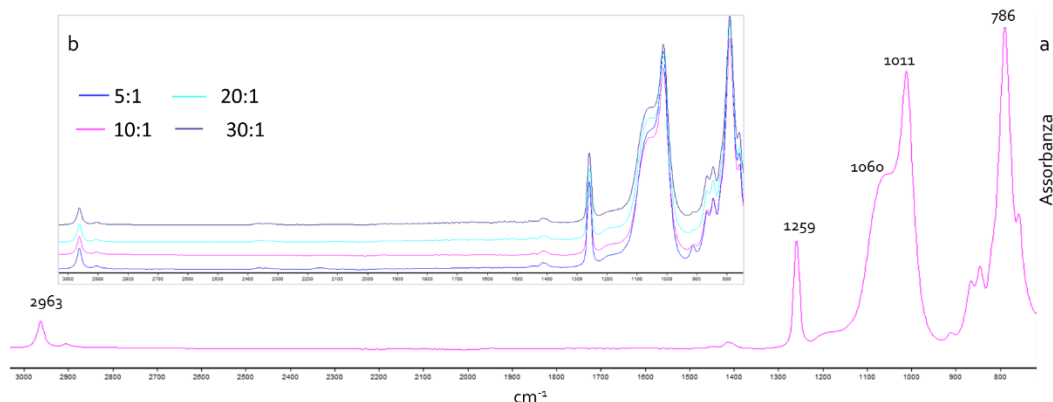


Figura 2-1 – a) Spettro FTIR del Syl184_10:1_tt3; b) Spettri impilati degli elastomeri con diverso rapporto prepolimero:agente reticolante.

Confrontando gli spettri FTIR degli elastomeri ottenuti con lo stesso trattamento termico (tt3), non si osservano significative differenze, nelle intensità relative dei segnali, tra elastomeri con differenti rapporti A:B: come si evince dalla Figura 2-1 b: gli spettri da 5:1 a 30:1 sono in buona approssimazione sovrapponibili tra loro.

Confrontando gli spettri per i diversi trattamenti termici invece, si possono osservare alcune differenze nelle intensità relative dei picchi dovuti ai gruppi C-H (picco 1), H-C-Si (picco 2) e Si-O-Si (picco 3), rispettivamente a circa 2960 cm⁻¹, 1260 cm⁻¹ e 1010 cm⁻¹. Tali picchi rappresentano la componente più idrofobica (picchi 1 e 2) e più idrofilica (picco 3) dei materiali.

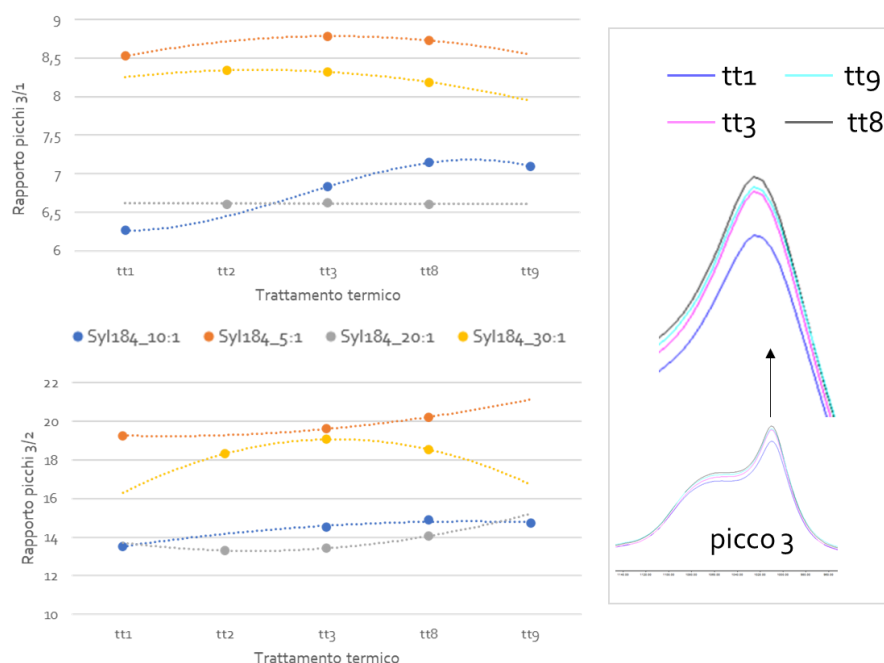


Figura 2-2 – Rapporti tra le intensità dei picchi 3/1 e 3/2 per gli elastomeri (5:1; 10:1; 20:1; 30:1) trattati con i trattamenti termici tt1, tt2, tt3, tt8 e tt9 e ingrandimento dei picchi 3 del Sylgard184_10:1.

I rapporti delle intensità di picco 3/1 e 3/2 dei campioni 10:1 e 5:1 che hanno subito un processo di curing a temperatura ambiente (tt1), sono minori rispetto a quelli dei campioni trattati termicamente per 1 ora (tt3). Aumentando la durata del trattamento termico fino a 24 ore, nel Syl184_10:1_tt8 (in blu nel grafico), si evidenzia un aumento del rapporto 3/1 e 3/2 mentre nel



Syl184_5:1_tt8 (in arancione nel grafico) si osserva solo un lieve incremento del rapporto 3/2. Tali variazioni sono indice di una minore presenza dei gruppi alchilici sulla superficie, probabilmente dovuti ad un riassetamento molecolare influenzato dalla durata del trattamento termico. Si esclude la rottura dei gruppi $-CH_3$ dal momento che l'analisi termogravimetrica (TGA) condotta sino a 150 °C non ha evidenziato perdite in peso del materiale.

Il trattamento di *curing* ad elevata temperatura (tt9) non provoca ulteriori significative differenze nello spettro FTIR del campione Syl184_10:1.

Per quanto riguarda i campioni Syl184_20:1 e Syl184_30:1 (grigio e giallo nella figura), il confronto è stato fatto tra i trattamenti termici tt2, tt3 e tt8. I rapporti tra le intensità dei picchi risultano molto simili tra di loro e anche le differenze più marcate, evidenziate tra tt2 e tt3, sono comunque trascurabili.

2.1.1.2 Analisi della bagnabilità

Le proprietà idrofobiche dei campioni sono state studiate attraverso la misura dell'angolo di contatto statico (ACS), dell'isteresi dell'angolo di contatto (H) e dell'angolo di scivolamento (SA). Si rammenta brevemente che la superficie è tanto più idrofobica quanto più è alto ACS e quanto più sono bassi H e SA, che definiscono le proprietà dinamiche della goccia sulla superficie.

Il campione Syl184_10:1 mostra un cambiamento delle proprietà idrofobiche in funzione del trattamento di *curing*: il Syl184_10:1_tt1 risulta infatti avere un ACS maggiore rispetto ai campioni trattati termicamente. Questo dato trova conferma con quanto discusso al precedente paragrafo, relativamente alla diminuzione dell'intensità relativa dei segnali FTIR dei gruppi alchilici idrofobici, nei campioni trattati termicamente rispetto a tt1. Il valore finale di ACS si assesta attorno a 118 °.

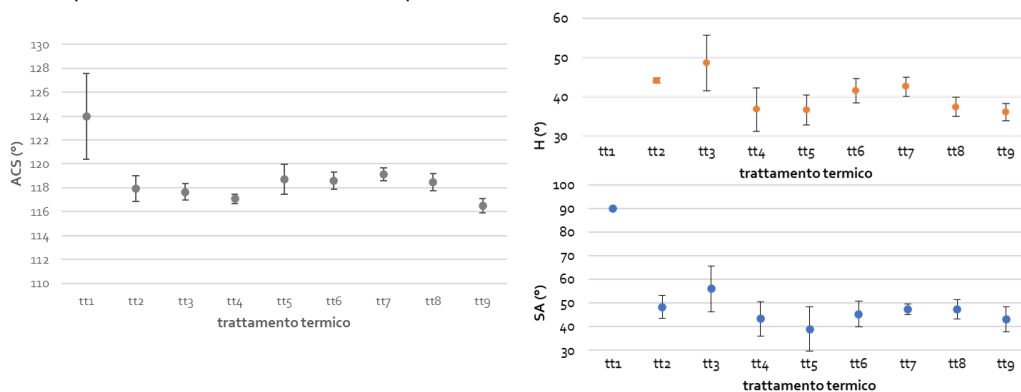


Figura 2-3 – Analisi della bagnabilità del campione Syl184_10:1 a seconda dei trattamenti termici.

Il trattamento termico influenza le proprietà dinamiche del materiale. Infatti, mentre il Syl184_10:1_tt1 non ha proprietà dinamiche, i campioni trattati termicamente mostrano valori di SA tra i 40° e i 55° e H tra 35° e i 50°. Le proprietà dinamiche dei trattamenti da tt2 a tt9 sono tra loro paragonabili, ad indice del fatto che il prolungamento del trattamento termico o l'utilizzo di temperature più elevate non porta a ulteriori cambiamenti significativi.

Confrontando i campioni con diverso rapporto A:B (Figura 2-4), risulta evidente come ACS è indipendente dal trattamento termico: tutti i campioni si assestano attorno a 118 °. Al contrario, le proprietà dinamiche risultano influenzate dal rapporto A:B e si osserva mobilità superficiale dell'acqua solo per le serie Syl184_10:1 e Syl184_5:1. All'aumentare del rapporto A: B la superficie del materiale diventa adesiva impedendo alla goccia di muoversi.

Il trattamento termico è in grado di diminuire l'adesività degli elastomeri 20:1 e 30:1, ma non abbastanza per conferire proprietà dinamiche al materiale. Ulteriori indagini serviranno per meglio definire e valutare tale adesività, in particolare l'effetto sulle proprietà antighiaccio.

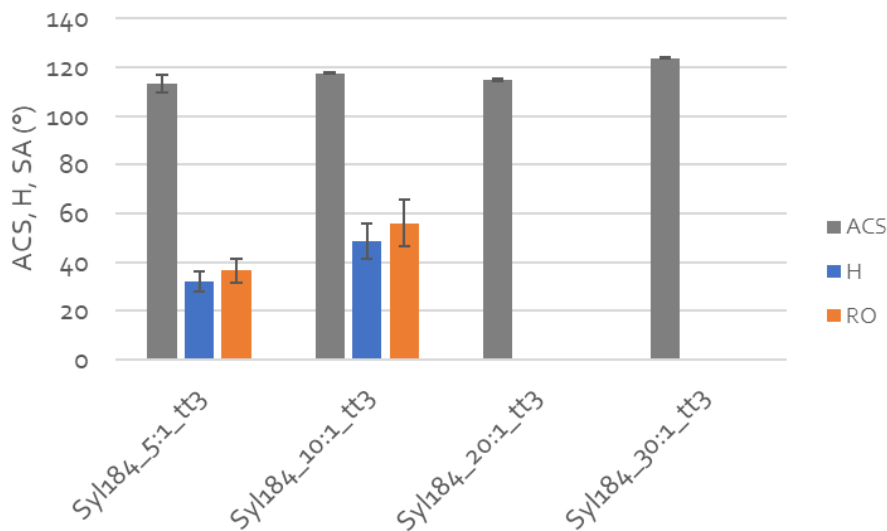


Figura 2-4– Angoli di contatto statici (grigio) e dinamici (H blu; SA arancione) per i campioni a seconda del rapporto prepolimero:agente reticolante e del tempo di curing.

2.1.1.3 Analisi della durezza e delle proprietà antighiaccio

Di seguito vengono presentate le misure di durezza e di modulo di Young (YM) dei campioni preparati in funzione dei trattamenti di *curing*. Le misure di durezza sono state eseguite attraverso il durometro SHORE A, applicando la norma di riferimento ASTM-D2240 [8]. I valori di YM sono stati calcolati da quelli di durezza, attraverso l'equazione di Gent riportata in [9].

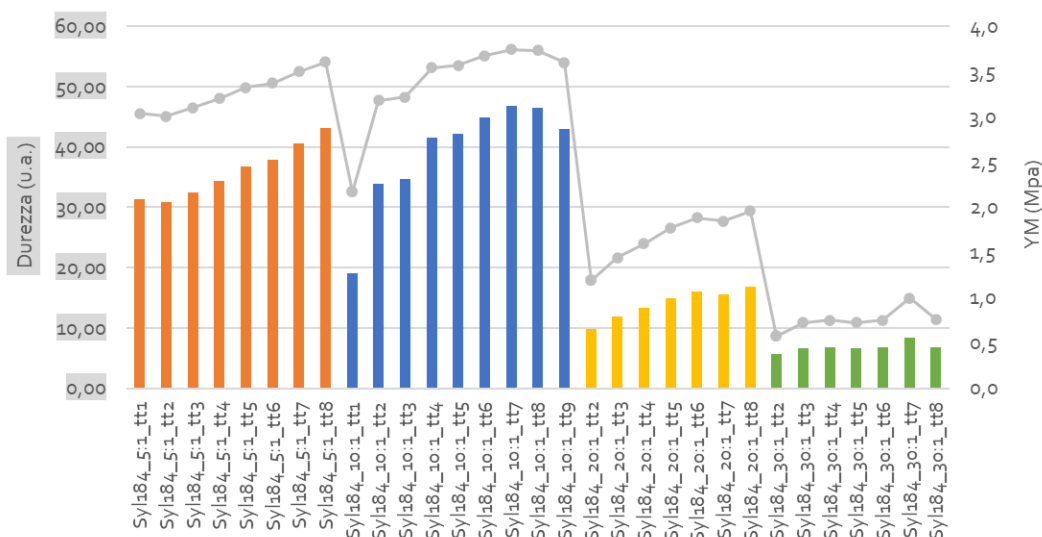


Figura 2-5– Durezza (grigio) e modulo di Young degli elastomeri sottoposti a differente processo di curing.

Come si osserva dal grafico, il processo di *curing* mediamente influenza la durezza e l'elasticità del materiale. In generale, queste tendono ad aumentare all'aumentare della durata e della temperatura del trattamento termico. Per quanto riguarda il Syl184_10:1 si osserva che il trattamento a 200°C condotto per 18 minuti (tt9) è del tutto paragonabile al processo condotto a 100°C per 3 ore (tt4), indicando quindi che una temperatura più alta influisce sulla cinetica della polimerizzazione, velocizzando il processo. Per quanto riguarda il Syl184_30:1 i trattamenti dal tt3

al tt8, con eccezione del tt7, non portano all'indurimento del materiale. Ulteriori indagini saranno eseguite per confermare l'anomalia della misura del Syl184_30:1_tt7.

Confrontando gli elastomeri con diverso rapporto di polimerizzazione si osserva, come atteso, che all'aumentare del rapporto A:B si ha una diminuzione di modulo di Young. È tuttavia importante sottolineare che il campione 10:1 sottoposto a trattamento termico prolungato mostra valori di durezza paragonabili, o addirittura superiori, a quelli misurati per il Syl184_5:1. Questa anomalia può essere spiegata dalla presenza nel rapporto 5:1 di un eccesso di agente reticolante liquido. Nei tempi di *curing* presi in considerazione, tale reagente rimane non reagito e si assesta tra le catene polimeriche, causando quindi un abbassamento della durezza dell'elastomero rispetto a quanto atteso.

Le proprietà antighiaccio sono state valutate tramite la misura di forza a taglio (*shear stress*) necessaria per staccare un cubo di ghiaccio di 1 cm di lato dalla superficie dell'elastomero [5]. I test sono stati condotti su superficie raffreddata a -15°C.

Tenuto conto che il valore di *shear stress* di un campione non rivestito è pari a 350 kPa, tutti i campioni mostrano discrete proprietà antighiaccio.

Come atteso dall' 2.1, l'adesione del ghiaccio diminuisce al diminuire della durezza dell'elastomero (Figura 2-6)Figura 2-6. I risultati migliori sono ottenuti per i campioni 30:1. Per questo campione si evidenziano leggere, ma non statisticamente significative, variazioni dell'adesione del ghiaccio al variare del trattamento termico. Questo dato è in buon accordo con i valori di modulo di Young e di durezza presentati in Figura 2-5: i trattamenti di *curing* applicati non causano un netto indurimento dell'elastomero e dunque non aumentano l'adesione del ghiaccio.

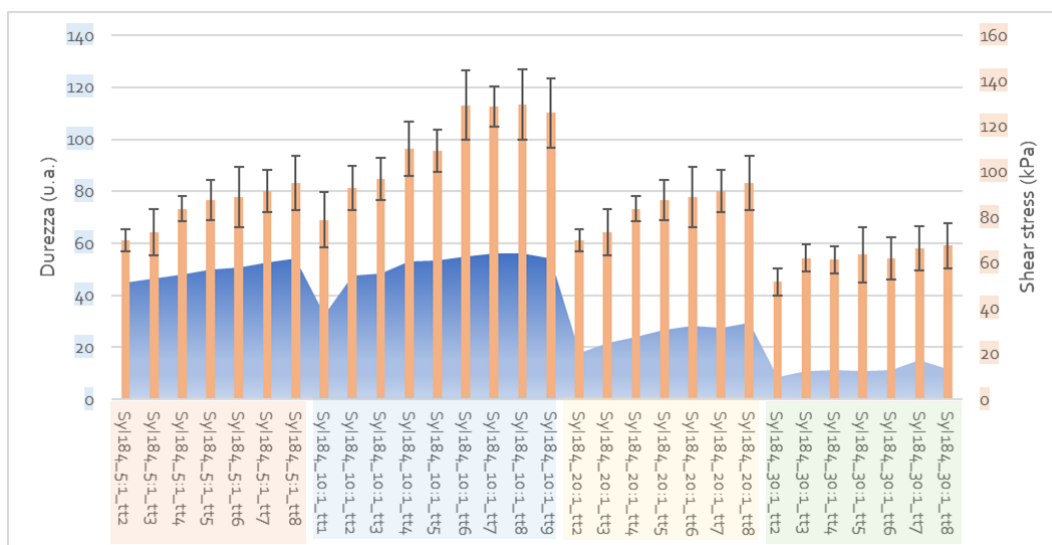


Figura 2-6 – Andamento dell'adesione del ghiaccio (barre arancioni) e della durezza (area blu) in funzione del trattamento termico.

I campioni Syl185_5:1, Syl184_10:1 e Syl184_20:1 mostrano un aumento dell'adesione del ghiaccio all'aumentare della durezza del materiale, impartita dal processo di *curing*.

Sebbene l'andamento dell'adesione del ghiaccio sia in accordo con il *trend* di durezza, i valori di *shear stress* non sono pienamente spiegati dalla variazione delle proprietà elastiche.

Inoltre, analizzando gli *shear stress* in funzione delle durezza, i risultati sui diversi campioni appaiono disporsi su due rette distinte una, per i campioni con durezza inferiori a circa 30 unità e una per durezza superiori a 40.

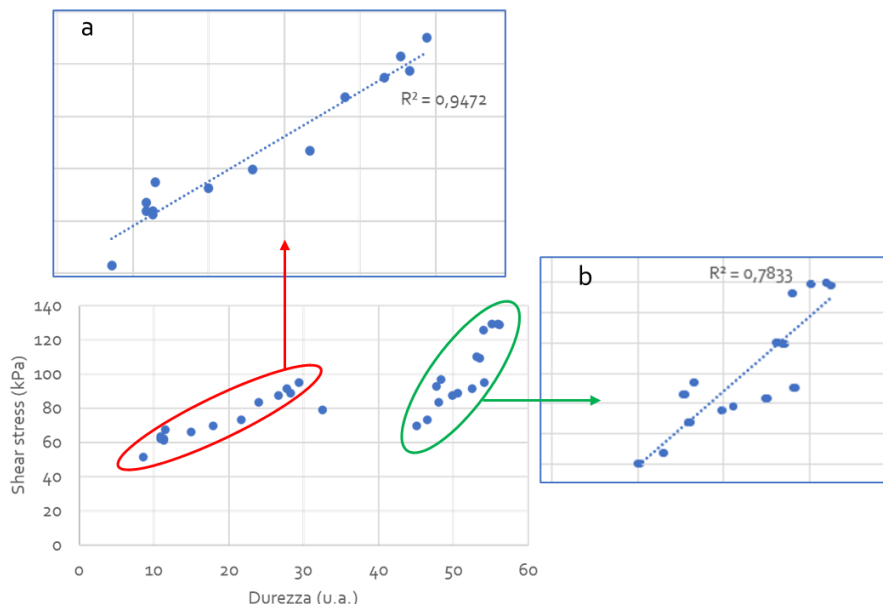


Figura 2-7– Durezza vs Shear stress: a) ingrandimento della zona cerchiata in rosso: i valori di adesione del ghiaccio e di durezza sono in relazione lineare; b) ingrandimento della zona cerchiata in verde: i dati sono dispersi.

Questo diverso andamento nelle serie dei campioni è un indice del fatto che, come riportato nell'equazione 2.1, oltre che dal modulo elastico (e quindi dalla durezza), lo *shear stress* degli elastomeri è proporzionale anche al W_{ad} (lavoro di adesione) del ghiaccio alla superficie. È pertanto utile sottolineare che i campioni più *soft*, in particolare i Syl184_30:1 esibiscono una certa adesività della superficie che peggiora il comportamento idrofobico del materiale: le gocce di acqua risultano infatti ben adese alle superfici anche quando queste vengono inclinate. Così come per l'acqua, l'adesività può aumentare anche l'adesione del ghiaccio alla superficie, causando l'aumento dello *shear stress*. Ulteriori approfondimenti, come lo studio dell'adesività degli elastomeri, serviranno a capire meglio questo andamento.

2.1.2 Monitoraggio del tempo di maturazione dell'elastomero

Come è stato discusso nel paragrafo precedente, a seconda del trattamento termico, gli elastomeri tendono a modificare alcune delle loro proprietà chimico-fisiche; tali modifiche sono principalmente legate alla formazione di reticoli polimerici via via più fitti. Le proprietà, in particolare la durezza, sono state monitorate per 60 giorni al fine di verificare eventuali cambiamenti dovuti alla maturazione del reticolo polimerico o all'invecchiamento del materiale. Si è studiato infine l'effetto del tempo sulle proprietà antighiaccio del materiale.

In genere, nel *range* di tempo studiato, gli elastomeri aumentano la loro durezza in modo più marcato se trattati con processi di *curing* a temperatura ambiente o per tempi brevi (tt_1 , tt_2 , tt_3 e tt_9), come si osserva in Figura 2-8.

La completa stabilizzazione del materiale in termini di durezza è dipendente sia dal trattamento termico che dal rapporto A:B: i rapporti 5:1 e 10:1 tendono a variare nel tempo, i 20:1 e i 30:1 sono stabili.

Considerando trascurabile una differenza di 2 punti secondo quanto si evince dalla norma ASTM-D2240 [8], si osserva che, dove sono presenti più molecole di agente reticolante (Syl184_10:1 e

Syl184_5:1, la polimerizzazione procede per più tempo e il materiale tende a stabilizzarsi soltanto con i *curing* più prolungati (Figura 2-9).

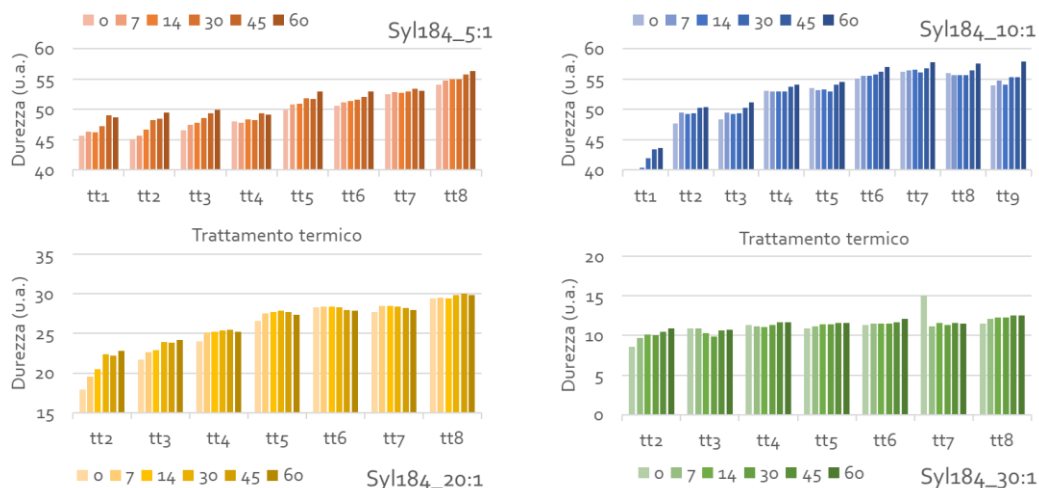


Figura 2-8 – Durezza degli elastomeri in funzione dei giorni di maturazione e del trattamento termico.

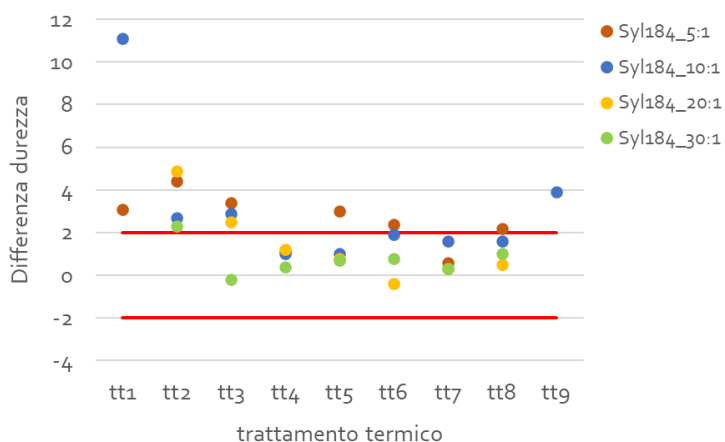


Figura 2-9 – Differenze dei valori di durezza tra il tempo 60 giorni e il tempo giorni per tipo di elastomero e trattamento termico. Le linee rosse rappresentano l'intervallo ± 2 , al cui interno le differenze sono da considerarsi non significative.

Aumentando il rapporto prepolimero:agente reticolante, si osserva una netta stabilizzazione della durezza del materiale anche per brevi tempi di *curing*. Il Syl184_20:1 risulta stabile dal tt4 in avanti mentre per il Syl184_30:1 l'elastomero è stabile dal tt3 in poi.

Le proprietà antighiaccio non sembrano subire significative variazioni nell'arco dei 60 giorni presi in esame (Figura 2-10).

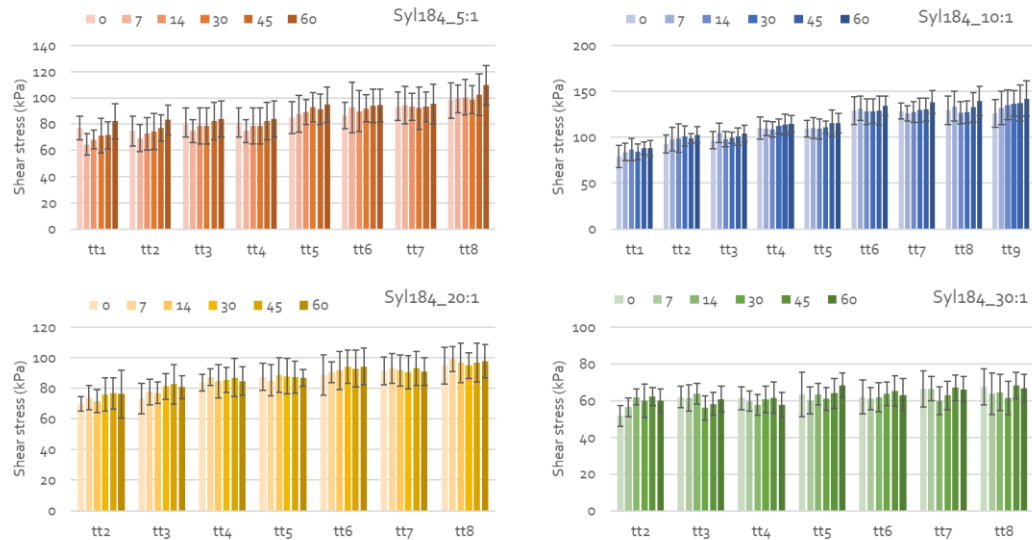


Figura 2-10 – Cambiamento dello shear stress nel tempo dei campioni in funzione del trattamento termico.

Le variazioni di *shear stress* misurate (Figura 2-11), indipendentemente dal tipo di rapporto A:B e dal processo di *curing*, sono di pochi kPa e risultano sempre all'interno dell'errore di misura della metodica. Questo dato risulta particolarmente importante al fine di una valutazione della stabilità nel tempo dei campioni studiati.

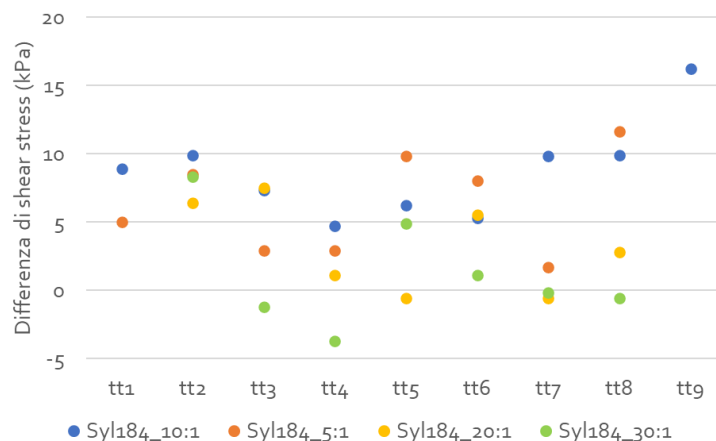


Figura 2-11– Differenza di *shear stress* tra i campioni al giorno 60 e al giorno zero in funzione del rapporto A:B e del trattamento di curing.

2.2 Test di invecchiamento accelerato

I campioni, ad eccezione dei Syl184 10:1 tt8 e tt9 e del Syl184 5:1 tt8 sono stati sottoposti a test di invecchiamento accelerato, secondo la prescrizione tecnica di Terna RQ UP 00M830. Il test di invecchiamento ha una durata complessiva di 140 ore e consente di valutare il comportamento dei *coating* sottoposti a cicli termici (+80°C/-30°C) e a cicli di invecchiamento climatico. L'invecchiamento climatico consiste in un processo a più *step* dove il campione viene umidificato, asperso con H₂O demineralizzata e irraggiato con UV-Vis all'interno di una camera che simula lo spettro solare. Si rimanda all'Allegato 1 per maggiori dettagli. La valutazione dei campioni dopo il processo di invecchiamento è stata effettuata attraverso i quattro criteri riportati in Tabella 2-2.

Tabella 2-2– Criteri di valutazione dei coating dopo l'invecchiamento.

Criterio	Prova	Parametro di valutazione
1	valutazione visiva	ingiallimento e/o distacco dal substrato
2	spettro FTIR	variazione rispetto al campione iniziale
3	durezza	
4	shear stress	

Anche in questo caso sono state preparate due tipologie di campione: *bulk* (spessore circa 10 mm) e *coating* (spessore circa 800 μm) depositato su lastrine di Al. I criteri 1 e 4 sono stati valutati per i campioni depositati su supporto metallico, mentre i criteri 2 e 3 su materiale *bulk*.

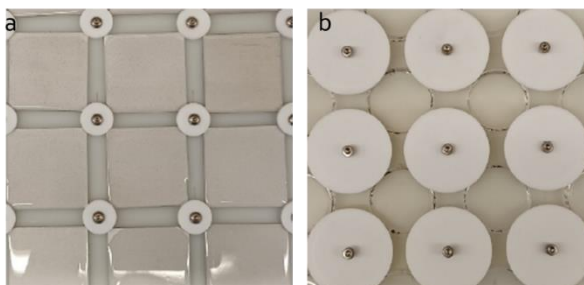


Figura 2-12– Provini per test di invecchiamento: a) coating; b) bulk.

I campioni, riepilogati in Tabella 2-3, sono stati testati solo dopo i 60 giorni di tempo di maturazione.

Tabella 2-3– Campioni e trattamenti termici testati per le prove di invecchiamento accelerato.

Tipo di elastomero	Processo di <i>curing</i>	Tempo di maturazione (giorni)
Syl184_5:1	da tt1 a tt7	60
Syl184_10:1	da tt1 a tt7	60
Syl184_20:1	da tt1 a tt8	60
Syl184_30:1	da tt1 a tt8	60

I risultati sono riportati in seguito, suddivisi per criteri di valutazione.

Criterio 1: valutazione visiva

Nessun campione sottoposto a invecchiamento ha evidenziato un ingiallimento, né mostrato segni di distacco dal supporto metallico.

Criterio 2: analisi FTIR

In alcuni campioni invecchiati si è osservato l'intensificarsi del segnale dello stretching Si-O-Si (1010 cm^{-1}), rispetto a quelli dei C-H e Si-C (3000 cm^{-1} e 1200 cm^{-1} circa, rispettivamente). Tale cambiamento è più o meno marcato in funzione del tipo di elastomero e del processo di *curing* effettuato. Per sinteticità vengono riportati soltanto gli spettri FTIR degli elastomeri trattati con i processi di *curing* tt2 e tt7, per i 4 rapporti testati (Figura 2-13) per i campioni 5:1 e 10:1 si

presentano anche i tt1. Gli spettri sono stati normalizzati sul picco a 3000 cm^{-1} e si è valutata la differenza di intensità del picco a 1010 cm^{-1} .

Per il campione La stabilità del campione Syl184_5:1 è evidenziata dagli spettri FTIR in cui non si osservano sostanziali differenze prima e dopo l'invecchiamento, indipendentemente dal processo di *curing*.

Il Syl184_10:1 risulta inalterato nel trattamento tt2, evidenzia un leggero aumento dell'intensità del Si-O-Si per il campione tt1 invecchiato mentre nel campione tt7 il segnale Si-O-Si post-invecchiamento diminuisce leggermente. Tali variazioni non risultano comunque intense.

Per Syl184_20:1 si sono osservate variazioni degli spettri sia per il trattamento termico tt2 che per il tt7: i segnali Si-O-Si aumentano sempre nel campione invecchiato. Ciò può essere un indice di riassetto molecolare, nel quale i gruppi CH_3 sono meno presenti sulla superficie, o di deterioramento del materiale, dove per rottura dei legami Si-C si hanno meno gruppi CH_3 . Ulteriori studi saranno necessari per capire da cosa sono causati questi cambiamenti e quali conseguenze hanno sulle proprietà finali del *coating*.

Lo spettro del Syl184_30:1:tt2 risulta invariato dopo l'invecchiamento mentre quello di Syl184_30:1:tt7 mostra un aumento dei segnali Si-O-Si nei campioni invecchiati, similmente al campione 20:1.

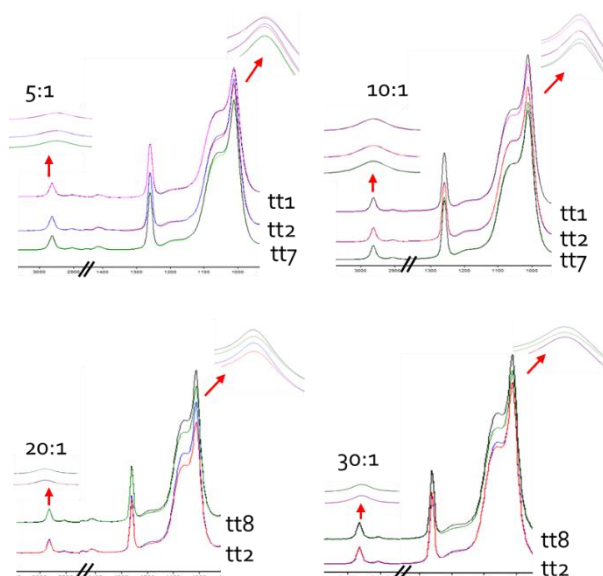


Figura 2-13 – Spettri FTIR normalizzati e confronto tra i campioni tal quali (verde, blu e rosa) e quelli invecchiati (grigio, rosso e nero).

Criterio 3: analisi della durezza

Sono state eseguite le misure della durezza dei campioni invecchiati e sono state comparate a quelle dei campioni non invecchiati (tal quali) in Figura 2-14.

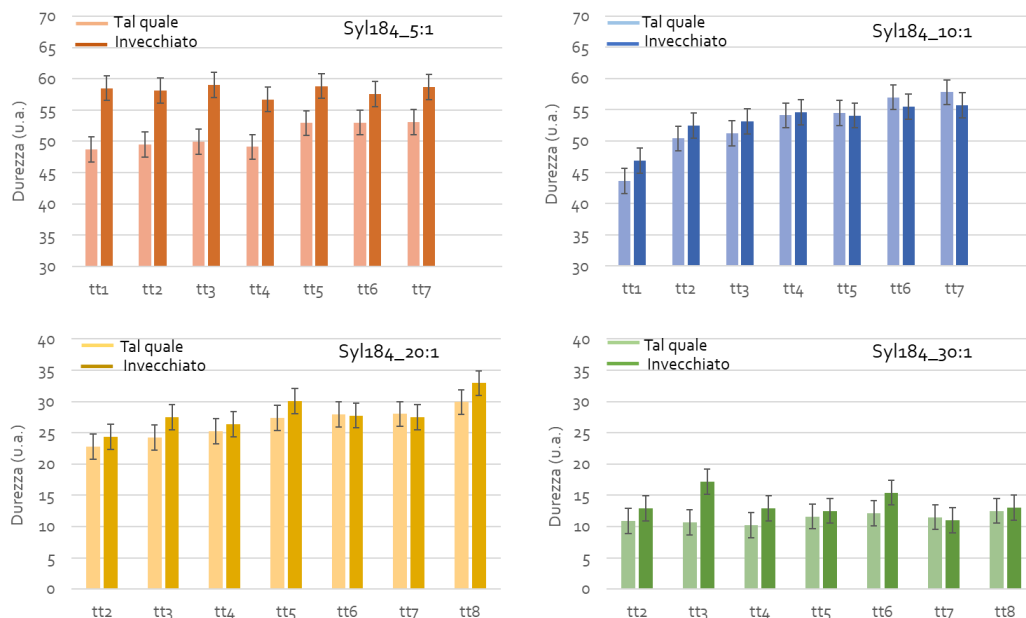


Figura 2-14 – Andamento delle durezza dei campioni tal quali e invecchiati.

Nella figura sottostante sono riportate le differenze di durezza tra i campioni invecchiati e quelli tal quali. Considerando non trascurabile una differenza di 2 punti (righe rosse nel grafico) [8], si osserva che tutti i campioni Syl184_5:1 evidenziano durezza maggiori rispetto al campione non invecchiato; tale differenza risulta più marcata per il campione tt1 e per i trattamenti termici più brevi (tt2-tt3-tt4). I campioni Syl184_10:1, che hanno subito un processo di *curing* termico, risultano abbastanza stabili all'invecchiamento, con una lieve tendenza al rammollimento, mentre il Syl184_10:1_tt1, polimerizzato a temperatura ambiente, mostra un lieve indurimento. Anche i campioni 20:1 e 30:1 evidenziano talvolta un indurimento significativo della gomma; le variazioni sembrano però seguire un andamento casuale e non sono facilmente relazionabili con il trattamento di *curing*.

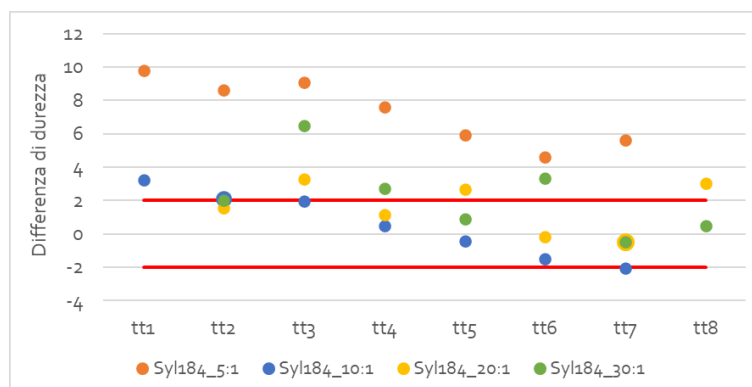


Figura 2-15 – Differenze tra la durezza dei campioni invecchiati e quelli tal quali.

Criterio 4: misura di adesione del ghiaccio

Sono state condotte le misure di adesione del ghiaccio sui campioni tal quali e su quelli invecchiati.

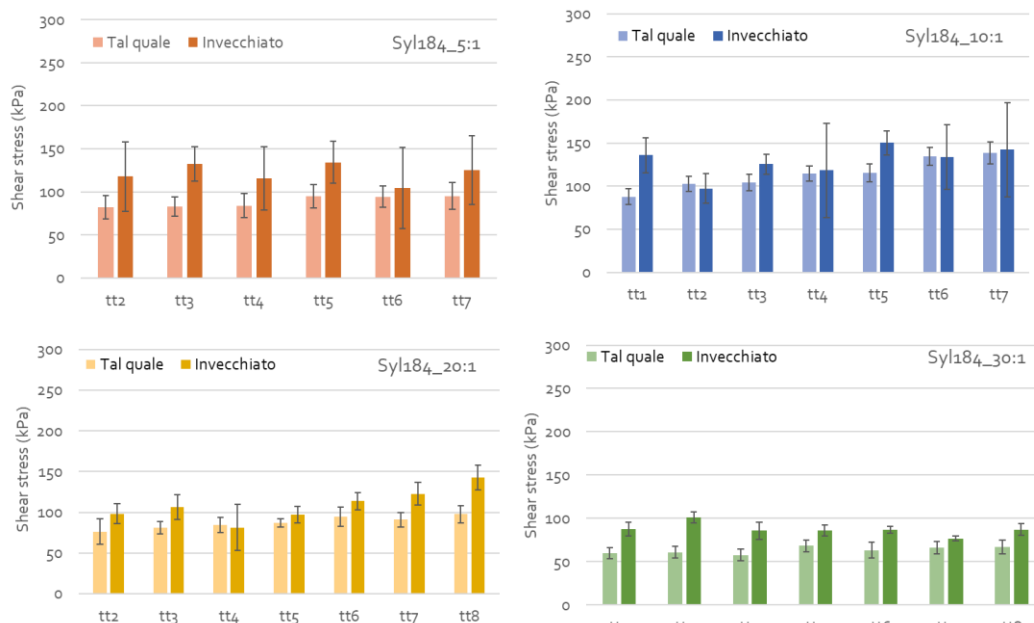


Figura 2-16 – Variazione di adesione del ghiaccio dopo invecchiamento.

Il confronto mostra un aumento dell'adesione del ghiaccio, più o meno marcato a seconda dei campioni e dei trattamenti termici, spesso però non statisticamente significativo, data la deviazione standard elevata tipica di queste misure.

Da un'analisi più approfondita della differenza tra i valori di *shear stress* (Figura 2-16), è possibile affermare che i campioni che risentono meno dell'invecchiamento sono i Syl184_10:1, che sono anche quelli che mostrano una buona stabilità nell'analisi della durezza. La differenza di adesione del ghiaccio per questi campioni, trattati termicamente, è quasi sempre in un range di 10 kPa (<10% del valore medio dello *shear stress* degli elastomeri), valore considerato poco significativo data l'incertezza di misura intrinseca.

Come atteso, un netto indurimento del materiale ha portato all'aumento dell'adesione (36% in più in media) del ghiaccio per il campione Syl184_5:1, indipendentemente dal trattamento di *curing*. Anche il Syl184_20:1 invecchiato mostra proprietà antighiaccio peggiori rispetto al campione tal quale con un massimo incremento del 45% nel caso del trattamento tt8 e un incremento medio del 25% in generale.

Tutti i Syl184_30:1 evidenziano un aumento dell'adesione del ghiaccio, in media del 38%, probabilmente legato all'indurimento del materiale. È importante notare che, il campione Syl184_30:1_tt3, che subisce il maggior indurimento, evidenzia il maggior aumento di *shear stress*. Nonostante le performance dei campioni invecchiati risultino peggiori rispetto ai materiali non invecchiati, è importante sottolineare che tutti conservano proprietà antighiaccio marcate, abbassando l'adesione del ghiaccio rispetto all'alluminio non rivestito di almeno 2,3 volte (si consideri lo *shear stress* del riferimento di Al pari a 350 kPa). Inoltre, è bene evidenziare che, nonostante il peggioramento delle proprietà antighiaccio, il campione più performante risulta comunque il Syl184_30:1 che abbassa mediamente l'adesione del ghiaccio di 4 volte rispetto ad un riferimento di Al non rivestito, con un massimo di 4,5 volte per il campione Syl184_30:1_tt7.

2.3 Valutazione complessiva e selezione dei campioni ottimizzati

I test eseguiti hanno mostrato che alcune proprietà dell'elastomero, in particolare la durezza, tendono a variare nel tempo, in funzione sia del rapporto A:B che del trattamento di *curing*. Il 10:1



porta alla formazione di un polimero le cui proprietà variano durante i primi mesi (test a 60 giorni), ma che poi si stabilizzano, rendendolo molto resistente all'invecchiamento accelerato. Gli elastomeri 20:1 e 30:1 invece risultano abbastanza stabili nei primi mesi (test a 60 giorni), ma le loro proprietà variano in modo più significativo dopo i test di invecchiamento accelerato. Il campione 5:1 non risulta mai completamente stabile, evidenziando un aumento della durezza sia nei primi mesi che dopo test di invecchiamento.

I processi di *curing* che portano ad un elastomero più stabile sono quelli che prevedono un trattamento termico a 100°C e una durata intermedia (da tt3 a tt6). Infatti, il *curing* a temperatura ambiente causa un notevole cambiamento delle proprietà dell'elastomero, così come quelli più lunghi (tt7 e tt8) e più brevi (tt2 e tt3).

Al fine di ottenere le migliori proprietà antighiaccio, l'elastomero più promettente risulta comunque il Syl184_30:1 che, pur avendo mostrato un peggioramento delle proprietà antighiaccio dopo i cicli di invecchiamento, mantiene un'ottima adesione al substrato metallico, una durezza inferiore rispetto agli altri elastomeri e risulta comunque quello con minore adesione al ghiaccio. Per questo campione la differente durata del processo di *curing* non comporta un netto cambiamento delle proprietà icefobiche per cui si predilige il processo di *curing* tt3 che raggiunge il miglior compromesso tra la stabilità del rivestimento e la velocità di preparazione.



3 - EFFETTO DEI PARAMETRI SPERIMENTALI SULLA MISURA DI ADESIONE DEL GHIACCIO ALLE SUPERFICI: OTTIMIZZAZIONE DEL METODO DI PROVA

Le misure delle proprietà icefobiche sono spesso affette dalla difficile confrontabilità delle analisi tra laboratori diversi [10], ma anche dalla elevata dispersione del dato acquisito all'interno dello stesso laboratorio. L'assenza di normative a riguardo esaspera questo problema. Uno studio approfondito dei parametri sperimentali di misura si rende quindi necessario per valutare il loro effetto sull'adesione del ghiaccio, per migliorare la ripetibilità della misura, per rendere il dato acquisito più affidabile e confrontabile tra i vari laboratori e per approfondire le conoscenze nel campo.

Nel presente anno di ricerca è stato progettato e realizzato un nuovo sistema per la misura dell'adesione del ghiaccio tramite *shear stress test*. La nuova apparecchiatura, rispetto alla precedente [5], permette di controllare meglio alcuni parametri e presenta alcune caratteristiche migliorative tra cui:

- possibilità di alloggiare campioni sino a 10x10 cm;
- possibilità di impostare la velocità di movimento della traversa nel range 0,2-4mm/s;
- possibilità di monitorare la temperatura del piatto porta campioni;
- possibilità di regolare l'altezza del tastatore attraverso una vite micrometrica;
- possibilità di acquisire il valore massimo della curva di distacco del ghiaccio o l'integrale della curva stessa;
- raffreddamento delle celle *peltier* con *chiller* per raggiungere una più bassa temperatura del piatto.

Con il nuovo sistema di misura, è stato fatto uno studio approfondito sull'effetto di alcuni parametri sperimentali, con lo scopo di determinare le condizioni da applicare per avere la migliore ripetibilità di misura.

3.1 Progettazione e realizzazione dello strumento

Brevemente, la misura di adesione del ghiaccio si esegue rimuovendo dalla superficie piana di prova un blocchetto di ghiaccio di sezione nota (A), tramite la spinta di un tastore [5]. Una cella di carico, montata sul tastore, registra la forza applicata (F). Lo *shear stress* τ si ricava dalla formula:

$$\tau = F/A$$

3.1

Di seguito vengono descritte le componenti *hardware*, *software* ed elettroniche con le quali è stato realizzato lo strumento.

3.1.1 Progettazione parte hardware

La struttura dell'apparecchio è composta da una scatola metallica di derivazione, da un supporto per i campioni e dalla struttura del motore (supporto motore, supporto verticale, slitta).

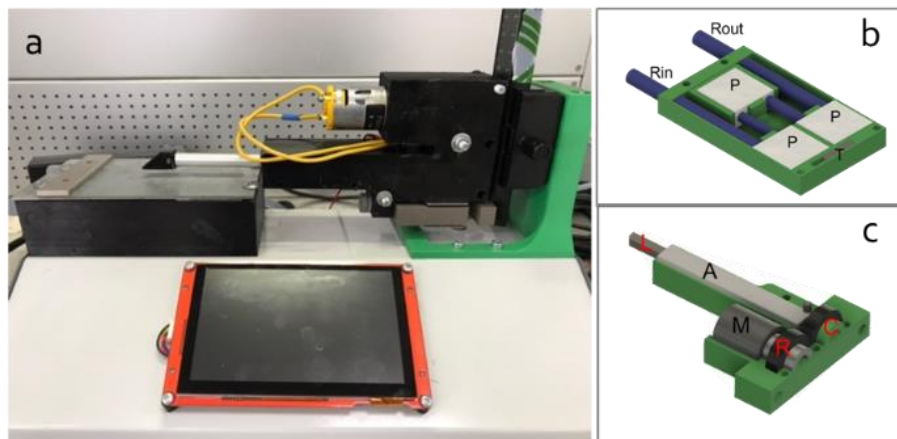


Figura 3-1– a) Nuovo apparecchio per la misura di adesione del ghiaccio; b) interno del vano portacampione; c) sezione del blocco motore.

Il blocco motore, dettagliato in Figura 3-1 c, è composto da un attuttore lineare commerciale (A in figura) modificato in modo da essere azionato da un motore DC *brushless* (M) che permette di raggiungere velocità inferiori di movimento del tastore (fino a 0,2 mm/s). Il moto è trasmesso con due ruote dentate (R) che ruotano su due cuscinetti a sfere (C). La cella di carico (L) è stata posta direttamente sul tastore. Sono stati realizzati due blocchi motore intercambiabili per ampliare il *range* di velocità per i tastori (uno per velocità inferiori a 1mm/s e uno per velocità maggiori, fino a 4mm/s). In questo modo, i motori possono essere sempre utilizzati vicino alla loro coppia massima. Il supporto del motore è regolabile in altezza tramite una slitta ancorata al supporto verticale.

Il supporto per i campioni (Figura 3-1 b) è stato progettato in modo da contenere le 3 celle *Peltier* (P) oltre al sistema di raffreddamento (R) e un sensore di temperatura (T) posto al di sotto di un piano di acciaio. I lati caldi delle celle *Peltier* sono posti in contatto termico con dei blocchetti di rame cavi all'interno dei quali passa il liquido di raffreddamento. Il sistema è connesso a un *chiller*. Tutte le parti riportate in verde in Figura 3-1, il supporto verticale per il blocco motore e le ruote dentate (R) sono state progettate su Autodesk® Fusion® 360 e stampate in 3D usando filamenti di PLA o ABS (15% riempimento, layer 0.2mm).

3.1.2 Progettazione dell'elettronica

Il sistema è controllato con una scheda Arduino® Mega. L'alimentazione è a 12V con trasformatore esterno. Lo schermo, i *relè* e la scheda sono alimentati a 5V con l'uso di regolatori di tensione TL7805. Il movimento del motore è regolato da un modulo LM298 che permette di controllare direzione e velocità tramite PWM (*pulse width modulation*).

Le celle *Peltier* sono collegate in parallelo per una potenza totale di circa 100W.

La cella di carico è interfacciata a un amplificatore e convertitore analogico/digitale HX711 che permette di leggere il segnale in uscita attraverso una porta digitale del controllore Arduino®. Il segnale della cella di carico può essere reindirizzato con un comando dall'interfaccia a una seconda scheda Arduino® che, connessa con un cavo a un PC dal pannello retrostante, può effettuare letture della forza a 80Hz al posto dei 10 Hz della scheda principale. La possibilità di acquisizione a frequenze elevate consente di raccogliere alcune informazioni importanti, come per esempio l'inizio del distacco del ghiaccio dalla superficie e le forze in gioco dopo l'avvenuto distacco mentre, come si osserva nella figura sottostante, il punto di massimo sforzo viene correttamente registrato anche con letture a 10 Hz.

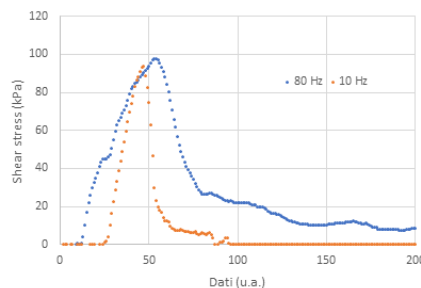


Figura 3-2–Confronti tra due curve di shear stress acquisite con frequenza 80Hz e 10Hz.

Il sensore di temperatura posto sotto il piano raffreddato è una sonda PT100, anch'essa collegata a un amplificatore e convertitore A/D. La scelta è giustificata dall'ottima linearità nella lettura delle basse temperature.

Il tastore è dotato di due *microswitch* di finecorsa e le celle Peltier si spengono automaticamente in caso di riscaldamento del piano oltre i 30°C (in caso di mancato funzionamento del sistema di raffreddamento).

3.1.3 Progettazione del programma e dell'interfaccia utente

L'operatore può controllare i parametri ed eseguire i test attraverso uno schermo touch capacitivo da 5 pollici. Il *layout* dello schermo permette di: accendere/spengere il raffreddamento e impostare la temperatura da raggiungere, di muovere il tastore con movimento libero, resettare la cella di carico, impostare la velocità di test, iniziare e terminare il test.

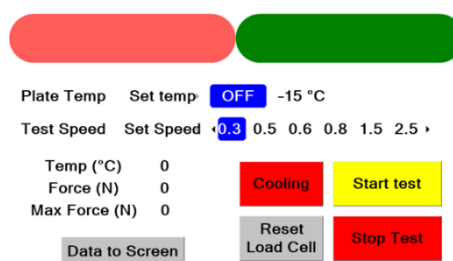


Figura 3-3– Layout dello schermo. La barra rossa e verde in alto controlla il movimento libero.

Sullo schermo sono riportate la forza istantanea e la forza massima raggiunta, necessaria per calcolare lo *shear stress* di distacco del ghiaccio. Il movimento libero permette di muovere il tastore fino alla posizione desiderata per iniziare il test.

Premendo il tasto "data to screen" (una volta premuto passa a "data to USB") i dati vengono inviati alla porta USB sul retro della macchina da cui leggere i dati della cella di carico a 80Hz.

Il programma è stato compilato su Arduino® IDE; nel programma sono incorporate alcune librerie per la lettura delle celle di carico [11] [12] [13].

Lo schermo è stato programmato utilizzando il software Nextion Editor [14].

3.2 Ottimizzazione del metodo di misura

Per ottimizzare le condizioni di prova, lo strumento è stato montato all'interno di una camera climatica posta a 20°C. Le celle Peltier che raffreddano il piano porta-campione sono state raffreddate a -15°C. Le prove sono state eseguite su 10 lastrine 5x5x0,4 cm di metacrilato satinato. I provini sono stati numerati da 1 a 10, al fine di rendere possibile il loro riconoscimento. Su ogni campione sono stati cresciuti due cubetti di ghiaccio di area 1x1 cm. La crescita del ghiaccio è stata fatta versando acqua demineralizzata all'interno di cuvette in plastica poste sulla superficie test. I

bordi delle cuvette sono stati sporcati con silicone per aumentare la tenuta. Il posizionamento della faccia della cuvette è avvenuto parallelamente al lato del campione in modo da evitare, durante la fase di test, una non perfetta perpendicolarità tra ghiaccio e tastore, che causerebbe un indesiderato effetto di *twisting*. Il tastore è stato fissato in modo da impattare contro il cubo di ghiaccio a circa 2mm di altezza sopra al campione.

Il design of experiment (DOE) è stato progettato su 3 fattori (temperatura, tempo di ghiacciamento e velocità del tastore) a due o tre livelli, per un totale di 12 esperimenti. Ogni esperimento è stato condotto in replicato su 20 campioni.

Tabella 3-1- Parametri presi in studio nel DOE.

Fattore	Livello 1	Livello 2	Livello 3
Temperatura (°C)	-15	-19	
Tempo (ore)	1	3	24
Velocità (mm/sec)	0,3	0,6	

Tabella 3-2-Matrice sperimentale.

Esperimento numero	Temperatura (°C)	Tempo (ore)	Velocità (mm/sec)
1	-15	1	0,6
2	-15	3	0,6
3	-15	1	0,3
4	-19	3	0,6
5	-19	1	0,6
6	-19	1	0,3
7	-19	3	0,3
8	-19	24	0,6
9	-15	3	0,3
10	-15	24	0,3
11	-15	24	0,6
12	-19	24	0,3

La risposta Y cercata è la deviazione standard percentuale calcolata sulle 20 misure di *shear stress*, il target ricercato è volto alla sua minimizzazione.

L'analisi dei dati è stata eseguita attraverso il software di analisi statistica Minitab®18, eseguendo in prima battuta i test di normalità, successivamente eliminando gli *outlier* e poi facendo lo studio della regressione multipla lineare.

In Tabella sono riportate le misure di peso applicato dalla cella di carico per distaccare il cubetto di ghiaccio dalla superficie (gF) e le deviazioni standard percentuali per ciascun esperimento svolto.

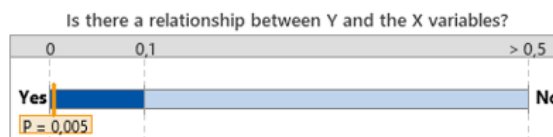
Tabella 3-3-Risultati di misura e deviazioni standard percentuali.

Esperimento	Peso (gF)	Deviazione standard %
1	1499	35
2	2497	13
3	1860	27
4	3730	17
5	2853	30
6	2620	18

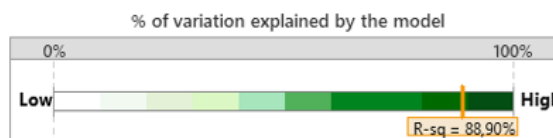


7	2529	10
8	2559	24
9	2834	21
10	3003	19
11	2734	33
12	3775	10

L'analisi di regressione lineare multipla conferma che esiste una relazione significativa tra le variabili studiate e la deviazione standard ed è possibile definire un modello che spiega al 88,9% la deviazione standard.



The relationship between Y and the X variables in the model is statistically significant ($p < 0,10$).



88,90% of the variation in Y can be explained by the regression model.

Figura 3-4– Significatività e rappresentatività del modello.

Il grafico sottostante descrive come varia la deviazione standard percentuale in funzione di ciascuna delle tre variabili studiate. Come si evince, la variazione di temperatura è quella che ha un effetto maggiore rispetto alle altre due. Il tempo di congelamento risulta invece il meno influente.

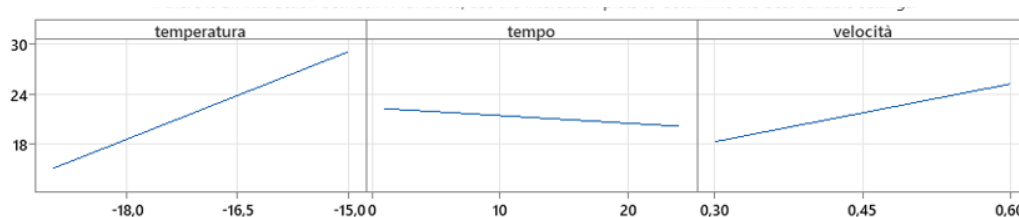


Figura 3-5– Dipendenza della deviazione standard dalle variabili singole.

Nel modello sono state anche considerate le interazioni tra le variabili: l'analisi della variabile combinata data dall'interazione tempo x velocità mostra un effetto sulla variazione della deviazione standard, in particolare operando a velocità minore si ha una diminuzione di deviazione standard nei campioni ghiacciati più a lungo.

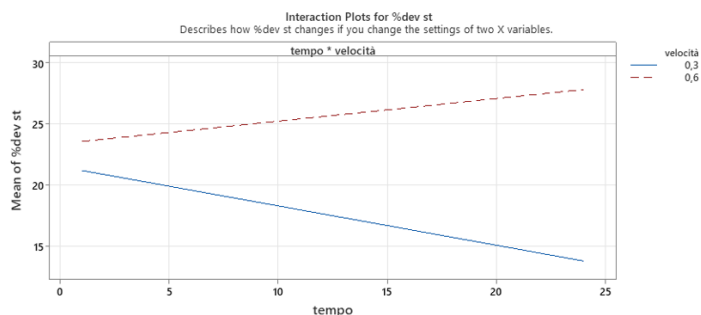


Figura 3-6– Dipendenza della deviazione standard dalla variabile tempo*velocità.

I contributi al modello delle restanti due interazioni a due variabili e dell'interazione a 3 variabili sono risultati non significativi.

Dall'analisi di regressione multipla è possibile definire che le condizioni ottimizzate al fine di avere la minima deviazione standard sono

- Temperatura -19°C
- Tempo 24 ore
- Velocità 0,3 mm/sec

Questo studio è un punto di partenza per fare chiarezza sui vari effetti dei parametri di misura delle proprietà antighiaccio.

Resta da verificare se i parametri proposti sono quelli ottimali anche per substrati con differenti proprietà fisiche, tra cui l'elasticità, la rugosità e la bagnabilità.

Inoltre, è opportuno approfondire lo studio di più parametri come, per esempio, estendere la velocità del tastore, provare nuove posizioni del tastore in spinta sul ghiaccio e tentare nuovi metodi di crescita del ghiaccio, al fine di abbassare ulteriormente la deviazione standard di misura.

4 - STUDIO DELLE PROPRIETÀ DI REPULSIONE DELLA NEVE NEL LABORATORIO DI NEVE ARTIFICIALE (LNA)

Le attività condotte all'interno del laboratorio di neve artificiale sono state volte alla messa a punto di metodiche sia per la caratterizzazione della neve prodotta sia per la valutazione delle proprietà *snowfobiche* dei materiali.

4.1 Produzione di neve artificiale con differente LWC e densità

La tendenza a formare manicotti sui cavi conduttori e sulle funi di guardia è in stretta relazione con il contenuto di acqua liquida e con la densità della neve. In particolare, le nevicate ad elevato contenuto di acqua liquida (*wet snow*: LWC tra il $\approx 15\%$ e il $\approx 35\%$) sono quelle che risultano più problematiche per il sistema elettrico nazionale in quanto la neve appesantita dall'acqua tende a aderire maggiormente alle strutture metalliche rispetto alle nevi più secche (*dry snow*: LWC $< 10\%$). Un ulteriore aumento del contenuto di acqua (LWC $> 35\%$) porta invece il fiocco a sfaldarsi, senza provocare manicotti.

Al fine di testare il comportamento antineve dei campioni nel LNA, risulta pertanto necessario riuscire a misurare con affidabilità il contenuto di acqua liquida nella neve prodotta e controllare i parametri di processo per produrre nevi con LWC definito.

4.1.1 Metodo di misura di LWC

LWC, espresso come percentuale in massa di acqua liquida sulla massa della neve, è misurato con un metodo calorimetrico, basato sulla variazione di temperatura di una massa pesata di acqua prima e dopo essere venuta a contatto con una massa nota di neve [15].

Brevemente, i materiali richiesti per la misura sono una bilancia analitica, una sonda di temperatura e un contenitore isolato termicamente (dewar o calorimetro). I passaggi pratici richiesti per questa misurazione sono riportati in appendice al rapporto.

LWC (% m/m) è stato calcolato, tenendo presente della capacità termica del contenitore utilizzato, con l'equazione:

$$LWC = 100 \times \left(1 - \frac{C_{p,l}}{L_{SL}} \left[\frac{(M_1 + E - M_T) \times (T_1 - T_2)}{M_2 - M_1} - T_2 \right] \right) \quad 4.1$$

Dove:

MT: massa della tara (recipiente) (g)

M1: massa del recipiente + acqua (g)

M2: massa totale (recipiente + acqua + neve) (g)

T1: temperatura iniziale dell'acqua (°C)

T2: temperatura finale dell'acqua (°C)

$C_{p,l}$: calore specifico dell'acqua ($4,186 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$)

L_{SL} : entalpia di fusione ($333,5 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1}$)

E= equivalente in acqua del calorimetro (g)

È bene sottolineare che E è una grandezza specifica del dewar; la sua stima è stata eseguita, analogamente a quanto riportato in [15], eseguendo misure su campioni di neve a contenuto noto di acqua liquida. Tale neve è stata ottenuta per aggiunte di aliquote di acqua, mantenuta a 0°C , ad aliquote di neve secca mantenuta a -3°C . Ulteriori dettagli sul calcolo di E sono riportati in appendice al rapporto. Le misure di E sono state effettuate in un range di LWC tra 0 e 40%, non si

sono osservate differenze significative a seconda dei diversi contenuti di acqua liquida utilizzata. Il valore medio di **E** calcolato risulta pari a 35,266 g, valore considerato non trascurabile in quanto il calcolo di LWC senza questa correzione risulterebbe sovrastimato tra 5% e 11%.

4.1.2 Parametri di produzione della neve artificiale

Al fine di ricoprire un vasto range di nevi, sono state prese in considerazione tre tipi di neve con caratteristiche molto differenti tra loro in termini di LWC e densità, denominate *dry*, *hybrid* e *wet snow*. I valori indicativi di LWC e densità delle tre tipologie di neve selezionate sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 4-1 – Valori indicativi di LWC e densità per le 3 tipologie di neve

caratteristiche	dry snow 1	hybrid snow 1	wet snow 1
LWC (% m/m)	≈ 3	≈ 15	≈ 35
densità (kgxm ⁻³)	≈ 120	≈ 200	≈ 300

I parametri di produzione della neve artificiale sono stati ottimizzati al fine di ottenere nevicate con le caratteristiche ricercate. In particolare, sono stati variati sia i parametri di regolazione della macchina di produzione della neve (*snow machine*) sia quelli del vano refrigerato; i valori sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 4-2 – Valori dei parametri di produzione delle tre tipologie di neve da impostare nel software di controllo

settore	parametro	dry snow 1	hybrid snow 1	wet snow 1
Vano refrigerato	Air setpoint (°C)	-1,0	-0,5	-0,5
Vano refrigerato	Brine setpoint (°C)	-8,0	-8,0	-8,0
Vano refrigerato	Air compressor (ON/OFF)	OFF	ON	ON
Snow-machine	Brine to SM setpoint (°C)	-2,0	-1,0	-1,0
Snow-machine	SM basin temp setpoint (°C)	5,0	5,0	5,0
Snow-machine	SM housing temp setpoint (°C)	5,0	5,0	5,0
Snow-machine	Water level setpoint (%)	100	100	100
Snow-machine	Drum speed setpoint (%)	150	150	175

Le quantità indicative di neve prodotta all'ora in queste condizioni, espresse sia come massa, sia come spessore della copertura nevosa, sono riportate nella tabella sottostante.

Tabella 4-3 – Quantità indicativa di neve prodotta all'ora per ciascuna tipologia

neve prodotta	dry snow 1	hybrid snow 1	wet snow 1
massa (kgxh ⁻¹)	≈ 14	≈ 14	≈ 16
copertura (cmxm ⁻² xh ⁻¹)	≈ 11	≈ 7	≈ 5

Sono state eseguite cinque misurazioni di LWC e densità su ciascuna tipologia di neve, campionando aliquote poste in punti distinti del deposito nevoso, al fine di verificare l'omogeneità delle caratteristiche della neve prodotta.

In Tabella 4-4 sono riportati i valori di LWC misurati sulle tre tipologie di neve, utilizzando il procedimento precedentemente discusso.

Tabella 4-4 – Valori di LWC misurati sulle tre tipologie di neve con media e deviazione standard

misura	dry snow 1 (%)	hybrid snow 1 (%)	wet snow 1 (%)
1	1,65	14,68	35,25
2	2,49	16,71	33,06
3	2,84	20,02	35,48
4	2,65	14,91	36,20
5	4,12	16,16	35,19
media	2,75	16,50	35,04
dev. std	0,89	2,15	1,18

In Tabella 4-5 sono riportati i valori di densità misurati sulle tre tipologie di neve, calcolata pesando la neve depositata in un contenitore a volume noto.

Tabella 4-5 – valori di densità misurati sulle tre tipologie di neve con media e deviazione standard

misura	dry snow 1 (kg×m ⁻³)	hybrid snow 1 (kg×m ⁻³)	wet snow 1 (kg×m ⁻³)
1	123,73	210,12	294,16
2	131,62	195,62	287,54
3	119,23	202,64	321,47
4	121,75	215,31	306,78
5	106,26	189,41	309,15
media	120,52	202,62	303,82
dev. std	9,22	10,50	13,30

Le tipologie di neve realizzate con i parametri ottimizzati, hanno caratteristiche di LWC e densità molto simili a quelle ricercate. Inoltre, è bene sottolineare che la neve prodotta in tutti i casi risulta molto omogenea, evidenziando una bassa dispersione dei valori misurati, sia per la LWC, sia per la densità.

4.2 Allestimento della strumentazione del laboratorio di neve artificiale

Nella presente annualità, il Laboratorio di Neve Artificiale è stato corredato con particolari strumentazioni in grado di operare a temperature < 0°C: ciò consente un'analisi più approfondita del comportamento dei campioni sottoposti a nevicate e a basse temperature.

4.2.1 Macchina a trazione meccanica

All'interno del vano refrigerato del LNA è stata installata una macchina a trazione meccanica monocolonna Zwick Roell®, corredata da una cella di carico di 5kN. La macchina è in grado di operare a temperature < -10°C, mentre la sua elettronica, che risentirebbe del freddo, è stata remotizzata nel vano ufficio.

La macchina è stata accessoriata con piastre a compressione; può tuttavia operare sia in compressione che in trazione. Il collaudo è stato eseguito attraverso prove di compressione, sia di materiali tradizionali che di neve, alla temperatura di lavoro di -10°C. In futuro saranno sviluppati dei protocolli di prova che consentiranno di misurare, in funzione del LWC, sia la coesione della neve, sia le forze di adesione tra la neve e i campioni rivestiti. Inoltre, sarà possibile misurare le deformazioni elastiche dei campioni elastomerici fino a -10°C, al fine di verificare eventuali cambiamenti del modulo di Young dei campioni, indotti dalle basse temperature.

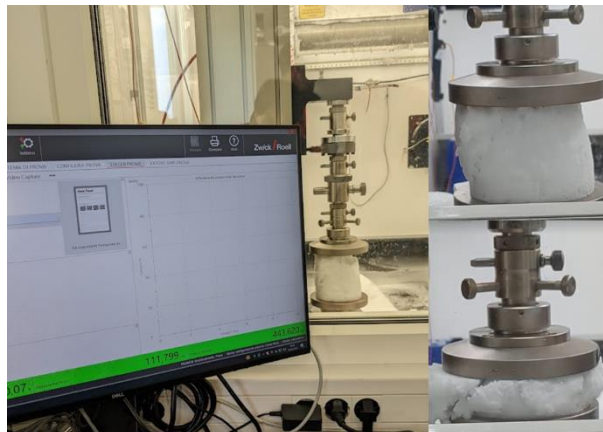


Figura 4-1– Collaudo della macchina con prove di compressione della neve artificiale.

4.2.2 Espositore motorizzato per conduttori elettrici

Al fine di promuovere la crescita dei manicotti di neve su spezzoni di cavo conduttore e funi di guardia, è stato progettato e realizzato un espositore motorizzato per conduttori elettrici. La struttura dell'espositore è composta da profilati di alluminio 40x40mm con scanalature *T-slot* da 8 mm. L'uso dei profilati di alluminio permette di adattare la struttura per alloggiare più campioni (fino a 4), di diversa dimensione (fino a 2m) e con diverse morfologie, oltre a poterne variare l'altezza da terra e la distanza gli uni dagli altri.

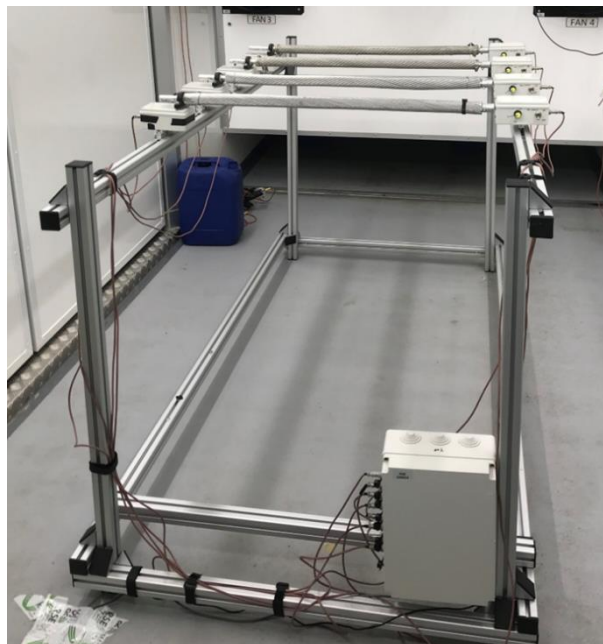


Figura 4-2– Espositore motorizzato per conduttori elettrici con montati 4 spezzoni di ACSR da 75 cm.

Lo strumento prevede che i campioni vengano fissati su dei blocchi motorizzati; mediante una lenta rotazione dei cavi, viene promossa la crescita del manicotto di neve, simulando quindi le condizioni di accumulo critiche nei casi reali.

In ogni momento la massa della neve accumulata sui campioni viene registrata da delle celle di carico poste al di sotto dei blocchi di fissaggio. I segnali delle celle di carico vengono convertiti e

amplificati da dei *driver* HX711 collegati a un microcontrollore Arduino® Mega. I dati di massa vengono registrati ogni 10s e trasmessi al computer.

Tipicamente i campioni testati sono dello stesso tipo di quelli in prova nella stazione WILD di Vinadio: spezzoni di conduttore incordato diametro 31mm (lunghezza 75cm) e funi di guardia di diametro 10-12mm.

4.3 Test di crescita dei manicotti di neve

Al fine di valutare le proprietà anti-neve dei campioni, è stata messa a punto una procedura preliminare per la crescita del manicotto di neve all'interno del LNA.

In prima battuta, è stata svolta una caratterizzazione della quantità di neve depositata a terra in 1h, al fine di valutare l'omogeneità del flusso nevoso. Questa prova è stata condotta con la neve *hybrid snow1* (LWC 15% circa) mantenendo la *snow-machine* in movimento lungo 1 metro di tracciato e operando con la velocità delle ventole al minimo (10%). L'altezza della neve in mm è stata campionata ogni 10cm nelle due direzioni e una mappa dell'altezza del manto nevoso è riportata nella figura sottostante.

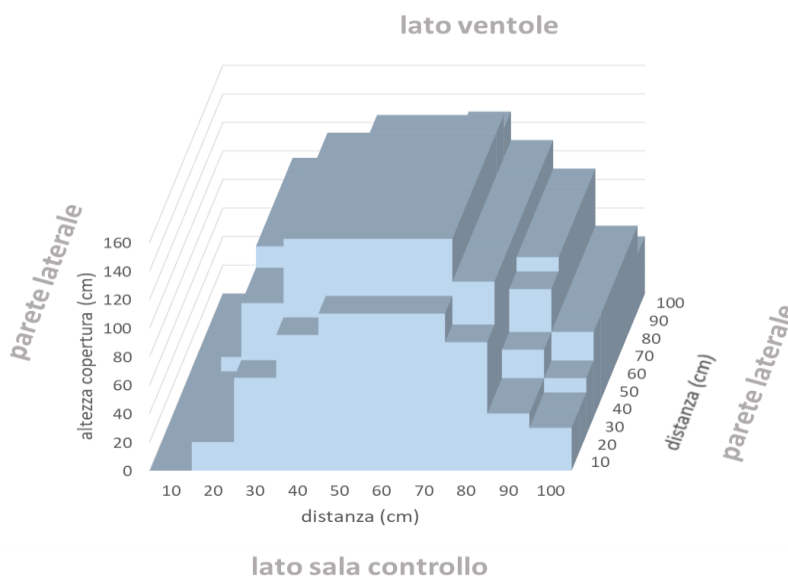


Figura 4-3 – Altezza della neve in mm su un'area di 1mx1m.

Nella zona centrale la deposizione risulta uniforme. Il profilo dell'accumulo è più ripido a sinistra, mentre la parte destra presenta un accumulo di 60mm anche nella parte più periferica. È da notare come ci sia meno accumulo nella diagonale che va dal lato sinistro in basso al lato destro in alto, probabilmente imputabile a dei vortici o a una leggera variazione nell'inclinazione del carrello.

Quattro campioni di conduttore ACSR identici sono stati montati sull'accrescitore di manicotto precedentemente descritto. I conduttori sono stati posti in rotazione di 1 rpm sotto un flusso di neve di tipo *hybrid snow 1* (LWC 15% circa). I campioni sono stati posizionati nella zona di maggiore accumulo di neve e sono stati numerati da 1 a 4 a partire dal più vicino al più lontano rispetto alla sala comandi.

Sono stati eseguiti diversi test di crescita, variando il movimento della macchina della neve sopra i campioni. Nel test ottimizzato, la macchina della neve è stata mossa avanti e indietro per la lunghezza di un metro, programmando uno stop del movimento di 15 secondi nella posizione iniziale adiacente alla sala comandi. I campioni evidenziano lo sviluppo di un manicotto di neve (Figura 4-4a), il cui peso viene misurato attraverso le celle di carico (Figura 4-4b).

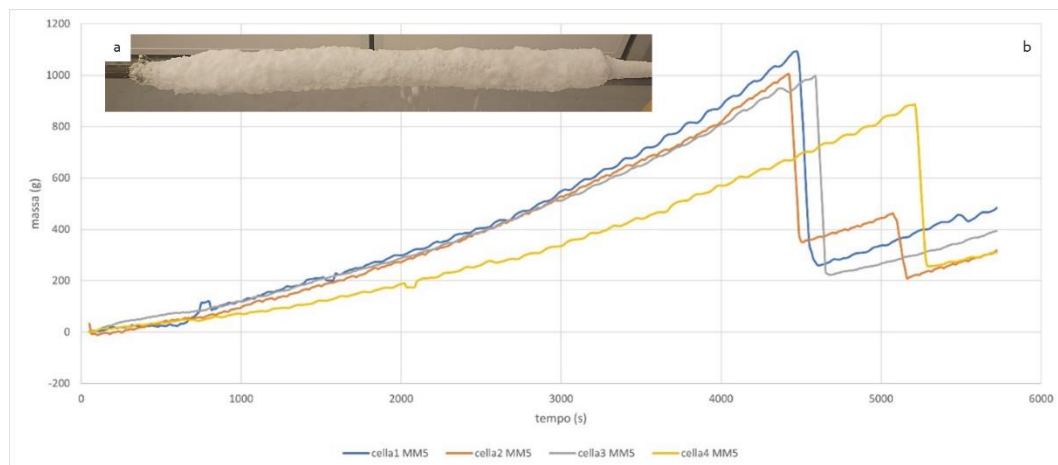


Figura 4-4 – a) Manicotto di neve in crescita su un campione test; b) grafico carico nevoso vs. tempo sui 4 spezzoni nel test 2.

Si nota che gli spezzoni nelle posizioni 1,2 e 3 hanno, in queste condizioni, un comportamento praticamente identico sia nella fase di crescita che in quella di distacco del manicotto, il campione in posizione 4 invece mostra una crescita più lenta e un distacco anticipato. Il manicotto crolla sotto il proprio peso attorno a 1000g nei campioni in posizione 1,2 e 3, mentre nella posizione 4 il manicotto si stacca raggiunto un peso di circa 850g.

Il differente comportamento del campione in posizione 4 (osservato anche negli altri test condotti), potrebbe indicare una leggera influenza dei moti d'aria, causati da movimento delle ventole, sul distacco della neve dai campioni.

Le proprietà antineve saranno valutate attraverso il confronto delle masse di manicotto di neve che si forma sui campioni rivestiti rispetto a un riferimento non trattato. Oltre al distacco anticipato, sarà possibile confrontare anche il ritardo nell'inizio della crescita del manicotto, valutando la pendenza della curva massa/tempo.

Con il setting proposto, è possibile testare sino a due campioni più il riferimento. Per un più diretto confronto, è preferibile montare i campioni in posizione 1 e 3 e il riferimento in posizione 2. Al momento la posizione 4 resta esclusa dalla procedura di prova. La procedura preliminare qui proposta verrà in futuro ulteriormente dettagliata, in particolare si cercherà di ottimizzare il flusso delle ventole, per avere una distribuzione più omogenea della neve e una crescita del manicotto confrontabile anche per il campione nella posizione 4.

5 - MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MANICOTTO DI NEVE ADESO ATTORNO AL CONDUTTORE

L'obiettivo di questo studio è determinare i valori di adesione a trazione e a taglio della neve alla superficie del conduttore, tali da consentire il distacco del manicotto di neve prima di pregiudicare l'integrità del componente nel suo complesso (conduttore e traliccio).

Questo nella prospettiva di determinare un buon compromesso tra le prestazioni dei trattamenti e delle funzionalizzazioni della superficie del conduttore in termini di adesione alla neve e la loro durevolezza agli agenti esterni, quali radiazione solare, erosione da particolato, danneggiamento a seguito di cicli di formazione e distacco dei manicotti, ecc.

Nelle precedenti annualità [5] [2], si sono sviluppate e applicate delle procedure affidabili e riproducibili per misurare sperimentalmente i valori di adesione a trazione e a taglio della neve, al variare delle caratteristiche morfologiche e funzionali delle superfici e del LWC e determinare i valori del carico a rottura della neve in funzione del contenuto di acqua liquida.

Questi dati sono infatti elementi di ingresso indispensabili per poter impostare il modello di distacco del manicotto e studiarne i meccanismi nel dettaglio.

Nel seguito sono riassunti gli elementi salienti di un primo abbozzo del modello di distacco del manicotto che potrà essere oggetto di future attività di ricerca.

5.1 Sviluppo del modello

La geometria 2D del modello consta di una parte centrale di diametro pari a 31,1 mm che rappresenta la sezione trasversale del conduttore (Parte 1) e una corona circolare con diametro interno di 31,1 mm e diametro esterno di 200 mm (Parte 2) che circonda la Parte 1 e rappresenta la sezione trasversale del manicotto di neve.

Inoltre, la Parte 1 è considerata fissa nello spazio; quindi, non ha gradi di libertà traslazionali. Questa geometria rappresenta in buona approssimazione la forma reale della sezione di mezzzeria in uno stadio avanzato di crescita. L'effetto del carico eccentrico non è stato considerato in questo primo lavoro.

I due materiali a contatto nel modello sono rispettivamente alluminio pallinato e neve umida con un contenuto di acqua liquida pari a circa il 25%. L'innescio del danneggiamento del legame conduttore-neve è stato definito con il criterio del massimo sforzo nominale.

In particolare, i valori critici di sollecitazione normale (σ_{adh}) e di taglio (τ_{adh}), determinati sperimentalmente per questo tipo di neve e di superficie [2], sono riassunti nella Tabella 5-1, unitamente al lavoro di adesione a trazione (γ_{adh})¹.

Tabella 5-1 – Valori dei parametri di adesione della neve alla superficie.

σ_{adh} [N/m ²]	τ_{adh} [N/m ²]	γ_{adh} [J/m ²]
850	300	0.096

La relazione sforzo-deformazione della neve è stata modellata considerando un modello viscoelastico lineare e la sua risposta sforzo-tempo è modellata tramite una serie di Prony [16], come mostrato nelle equazioni 5-1 e 5-2, dove $Y(t)$ è il modulo di rilassamento, E_0 è il modulo di Young istantaneo, ε_0 è la deformazione imposta con una funzione a gradino e $\dot{\varepsilon}$ è la velocità di deformazione. I parametri, p_i e τ_i della serie sono ricavati dal *fitting* delle curve di rilassamento ottenute durante le prove di resistenza a trazione (si veda Figura 5-1).

¹ Poiché non è stato possibile determinare sperimentalmente il lavoro di adesione in direzione tangenziale in prima approssimazione è stato posto uguale a quello normale. Chiaramente un'ipotesi così forte dovrà essere verificata in studi futuri.

I parametri ottenuti dalla procedura di regressione con una serie di Prony a $n=3$ termini sono riportati nella Tabella 5-2

Tabella 5-2.

$$Y(t) = E_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n p_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right] \quad 5.2$$

$$\sigma(t) = Y(t)\varepsilon_0 + \int_0^t Y(t-s)\dot{\varepsilon}(s)ds \quad 5.3$$

Tabella 5-2 – Parametri ottenuti effettuando una regressione delle curve di rilassamento di tre campioni di neve con valori di LWC compresi tra 22% e 27% (valore medio 25%).

Campione.	lwc	E_0	p_1	p_2	p_3	τ_1	τ_2	τ_3
#	[%]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[s]	[s]	[s]
1	27	1.87	0.148	0.043	0.809	6.89	50.34	0.84
2	25	0.96	0.208	0.096	0.697	7.00	43.58	1.67
3	22	1.53	0.156	0.050	0.795	7.94	52.80	0.94

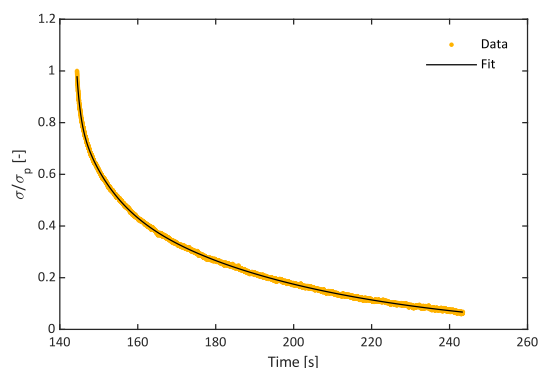


Figura 5-1 – Regressione della curva di rilassamento di un campione di neve con LWC=22% e densità (ρ_{sn}) = 313 kg/m³ con $n = 3$ nella serie di Prony dopo una compressione iniziale pari a $\sigma_p = 1.6$ kPa.

Di seguito sono riportati i risultati della simulazione del manicotto depositato attorno al conduttore utilizzando i dati precedentemente descritti. La Figura 5-2 e la Figura 5-3 rappresentano rispettivamente lo sforzo di Mises nel manicotto di neve all'inizio e alla fine della simulazione. La Figura 5-4 mostra la corrispondente distribuzione degli sforzi di trazione e di taglio interfacciali lungo la coordinata circonferenziale.

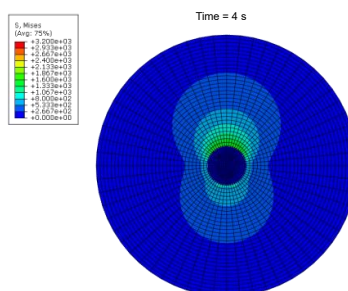


Figura 5-2 – Stress di von Mises 4 secondi dopo l'inizio della simulazione.

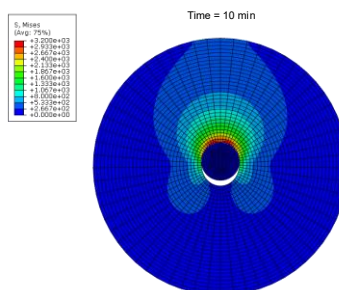


Figura 5-3 – Stress di von Mises 10 minuti dall'inizio della simulazione.

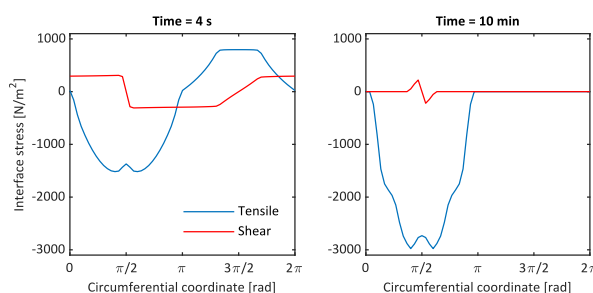


Figura 5-4 – Andamento delle sollecitazioni a trazione e a taglio dopo 4s e 10 minuti dall'inizio della simulazione.

È evidente che, anche in assenza di una coppia, lo sforzo di taglio lungo l'interfaccia è diverso da zero. In particolare, in più punti fin dalle prime fasi della simulazione raggiunge il valore di soglia e il contributo alla forza di reazione verticale è diverso da zero.

Si può osservare inoltre che:

- le sollecitazioni si concentrano all'interno del manicotto di neve in prossimità della superficie del cavo, mentre sono significativamente inferiori alla resistenza della neve misurata nel resto del manicotto;
- la deformazione nel tempo della neve sembra essere la causa della degradazione del legame adesivo e, di conseguenza, la causa del suo progressivo cedimento nel tempo, sia a trazione che a taglio;
- il cedimento dell'adesione determina un aumento della sollecitazione all'interno della neve, che si concentra in prossimità della metà superiore dell'interfaccia. Tale sollecitazione è di natura compressiva in direzione radiale e di trazione in direzione circonferenziale, come rappresentato in Figura 5-5 che rappresenta gli sforzi principali nella sezione del manicotto. In particolare, lo sforzo massimo di trazione raggiunto all'interno del manicotto di neve ($\sigma=1610 \text{ N/m}^2$) è inferiore alla resistenza media alla trazione misurata per la neve bagnata.

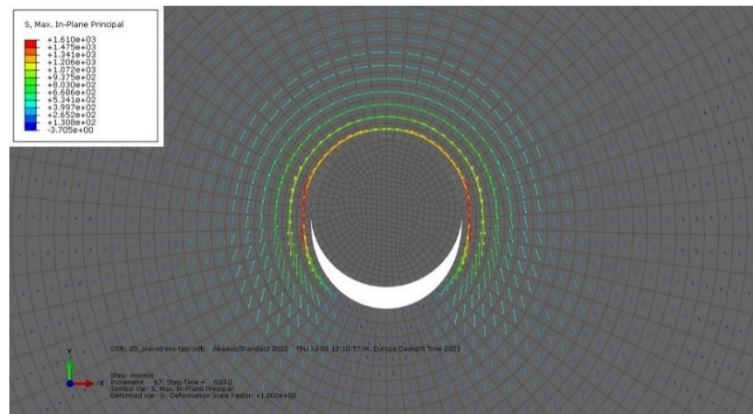


Figura 5-5 – Valori massimi degli sforzi principali in corrispondenza dell'interfaccia tra il conduttore e il manicotto di neve.

Sono infine qui riportate alcune osservazioni sui limiti del modello preliminare abbozzato e alcune indicazioni sui possibili sviluppi futuri di questo tema di ricerca:

- l'interfaccia cilindrica semplificata (che non tiene conto che il conduttore è costituito da un certo numero di trefoli che a seconda delle scelte costruttive possono essere a sezione circolare o trapezoidale) potrebbe non consentire una simulazione accurata dell'interazione tra un trefolo e la neve. Tuttavia, un approccio che dovesse vedere l'introduzione dei singoli trefoli nella modellazione della superficie introdurrebbe ulteriore complessità. Ad esempio, sarebbe necessaria una griglia più fine all'interfaccia, con conseguente aumento del tempo di calcolo. Inoltre, la superficie di contatto metallo-neve non coinciderebbe con la superficie esterna del conduttore, poiché la neve potrebbe non riempire completamente le scanalature tra i trefoli adiacenti e quindi, come suggerito anche in [17], poiché la neve che riempie le scanalature del filo può rimanere adesiva alla superficie, il distacco del manicotto potrebbe risultare una combinazione di rottura adesiva e coesiva, come mostrato schematicamente in Figura 5-6;

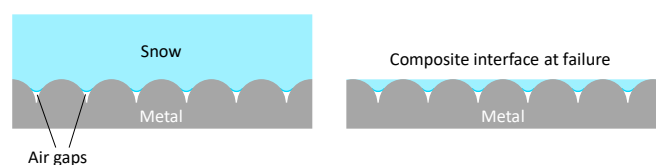


Figura 5-6 – Rappresentazione schematica dell'interfaccia tra un conduttore a trefolo e la neve prima (a sinistra) e dopo (a destra) il distacco del manicotto.

- l'effetto della coppia introdotta dal carico di neve non simmetrico deve essere tenuto in considerazione, cioè deve essere utilizzata la forma effettiva della superficie di accrescimento;
- un modello FEM 3D aggiungerebbe la possibilità di tenere conto dell'interazione tra le sezioni adiacenti distribuite lungo una catenaria e dell'effetto introdotto dalla deformazione del conduttore a seguito del carico determinato dal manicotto stesso;
- come già detto, la modellazione delle caratteristiche meccaniche della neve con la serie di Prony non tiene conto della componente irreversibile della deformazione. Per riprodurre questo comportamento, i lavori futuri dovranno adottare relazioni sforzo deformazione differenti e più aderenti alle caratteristiche della neve umida in prossimità



della temperatura di fusione. Un'opzione presa in considerazione nelle fasi iniziali di questa ricerca prevedeva anche la possibilità di acquisire, per le diverse tipologie di neve oggetto della ricerca, un numero sufficiente di immagini tomografiche della neve da utilizzare per individuare la posizione, la dimensione e l'orientazione spaziale dei punti di contatto tra i grani di ghiaccio/fiocchi di neve ai quali applicare le relazioni costitutive disponibili in letteratura per le proprietà meccaniche del ghiaccio, così da sviluppare un modello meccanico della neve anche con il supporto delle evidenze sperimentali.

6 - PROVE IN CAMPO

I campioni più promettenti sono stati preparati su spezzoni di conduttore ACSR da 75 cm e su spezzoni di fune di guardia da circa 15m ed esposti presso la stazione WILD di Vinadio a condizioni climatiche reali, al fine di valutare il comportamento dei coating esposti a nevicate. L'attività è stata svolta in collaborazione con il dipartimento di Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche (SFE) che si è occupato dell'allestimento della *test facility*, dell'installazione dei campioni e del monitoraggio della crescita del manicotto durante la stagione invernale. La caratterizzazione *outdoor*, attiva già da diversi anni, è rivolta a campioni di piccole (spezzoni di conduttore) e medie (campate) dimensioni, testati nelle stesse condizioni reali di nevicata e confrontati con analogo campione non trattato. Questo è un passaggio chiave nella selezione dei rivestimenti più promettenti, poiché connette l'analisi in laboratorio con la fase di verifica in campo con condizioni atmosferiche reali, e, sulla base dei risultati, costituisce un *feedback* per le fasi di sviluppo dei materiali antighiaccio. Di seguito sono riportati i risultati relativi ai campioni testati nell'inverno 2022-2023 e la descrizione dei campioni installati per l'inverno 2023-2024.

6.1 Risultati dell'inverno 2022-2023

La sperimentazione in campo per l'inverno 2022-2023 ha visto, rispetto all'inverno precedente, l'ampliamento del numero degli spezzoni e delle campate di prova rispettivamente a 9 e 6, inclusi i riferimenti non trattati.

Si ricorda brevemente che tutti i campioni in *test* sono messi in lenta rotazione (1 giro ogni 30-40 minuti) al fine di favorire la formazione di manicotto, come suggerito dalla norma di riferimento ISO 12494:2017 [18].

I *coating* testati sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 6-1– Trattamenti icefobici sottoposti a test invernali.

Spezzoni	Lunghezza	Coating	Tipologia
1	0.75 m	Sylg 186 olio	elastomero
2	0.75 m	Sylg 186 H202	elastomero con discontinuità elastiche
3	0.75 m	HCI SIVO	superidrofobico
4	0.75 m	Sylg 186 10:1 (sab)	elastomero
5	0.75 m	Sylg 186 30:1 (sab)	elastomero
6	0.75 m	Sylg 186 5:1 (sab)	elastomero
7	0.75 m	Sylg 184 rig	elastomero rigenerato
8	0.75 m	M10 212	elastomero con filler liquido
9	3 m	nessuno	Riferimento
Campate			
1	15 m	HCI + SIVO	superidrofobico
2	15 m	Prod1 ² PTFE + SIVO	idrofobico con discontinuità
3	15 m	SYLGARD® PDMS 186 10:1	elastomero
4	15 m	Zn + SIVO	superidrofobico a base zincata
5	15 m	Nessuno	Riferimento
6	15 m	Snow Ring	idrofobico con snowring

² Produttore 1

In particolare, per quanto riguarda i campioni idrofobici e superidrofobici, lo spezzone 1 e la campata 1, rispetto alle precedenti annualità, sono stati ottenuti irrugosendo la superficie con un attacco chimico. Le campate 2 e 6 abbinano le proprietà idrofobiche a una discontinuità superficiale data dalla presenza alternata di refoli rivestiti di PTFE (campata 2) che rendono la superficie scivolosa e dagli *snow-ring* (campata 6), anelli di plastica, che creano discontinuità nel manicotto, favorendone la rottura. È poi presente una fune superidrofobica zincata, già in test da due anni, che viene valutata dal punto di vista dell'invecchiamento.

Per quanto riguarda i campioni elastomerici, a partire dal Sylgard®186, sono stati testati diversi rapporti prepolimero:agente reticolante (spezzoni da 4 a 7 e campata 3), al fine di valutare l'effetto dell'elasticità sul comportamento antineve. Inoltre, lo spezzone 2 mostra una discontinuità delle proprietà elastiche della superficie grazie alla presenza di bolle di aria all'interno del rivestimento mentre lo spezzone 8 differisce dagli altri elastomeri per la presenza di PEG (polietilenglicole) all'interno della matrice polimerica e lo spezzone 1 per la presenza di olio di silicone all'interno del polimero. Infine, è stato testato lo spezzone 7, già in test nel precedente anno, previo trattamento di pulizia in laboratorio (rigenerato).

Gli spezzoni 7 e 8 sono stati posizionati solo nel febbraio 2023 ed è pertanto stato possibile monitorarli per l'ultima parte della stagione.

L'analisi si è avvalsa di un metodo semi-quantitativo basato sull'interpretazione visiva delle immagini acquisite ogni 15' da *webcam* che mostrano le fasi di sviluppo dei manicotti. Per ogni evento di nevicata individuato, viene valutato il grado di copertura $cov_{n,i}$ del campione n rispetto al riferimento non trattato mediante analisi soggettiva delle immagini per ciascuno slot temporale i , indipendentemente dallo spessore del manicotto. Il valore $cov_{n,i}$ è normalizzato tra 0 e 1 sulla lunghezza del campione. Terminata l'analisi di una sequenza di immagini riferibili a ciascun campione trattato n , viene calcolato l'indice di mitigazione della copertura relativa $Rcov_n$, come indicato nell'equazione seguente:

$$Rcov_n = \frac{\sum cov_{n,i}}{\sum cov_{ref,i}}$$

Se $Rcov$ è <1 il *coating* svolge un'azione complessivamente mitigante rispetto al riferimento in relazione al grado di copertura durante l'evento, viceversa l'azione non è vantaggiosa se il valore ricavato è >1 . Si faccia riferimento a [19] per una descrizione più dettagliata del metodo.

In generale, l'inverno 2022-2023 conferma un *trend* di siccità e diminuzione delle nevicate a Vinadio osservato negli ultimi anni (24 eventi nell'inverno 2017-2018, 13 eventi nell'inverno 2020-2021), con 6 eventi, di cui solo 3 hanno superato i 20 mm di precipitazione equivalente ricavata da pluviometro termo-riscaldato.

Tabella 6-2– Eventi nevosi campagna invernale 2022-2023.

Ev	da	a	Durata [hh:mm]	T _{ave} [°C]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]	RH _{min} [%]	RH _{max} [%]	Prec [mm eq.]	Vento [m/s]	Tipo neve Dry/ Wet	Massa max [kg/m]	Spess. Max [cm]
1	02/12/22 23:45	03/12/22 17:30	17:45	0.4	0.0	1.2	93.8	100.0	21.8	0.41	W	1.5	6
2	15/12/22 10:00	16/12/22 3:00	17:00	-0.8	-1.8	0.4	82.7	100.0	33.6	0.7	W	2.1	7
3	23/01/23 8:00	24/01/23 18:00	34:00	0.1	-0.9	1.4	62.7	100.0	47.6	1.09	D/W	1.6	7
4	05/02/23 18:00	07/02/23 4:00	34:00	-0.8	-4.4	1.3	86.6	100.0	7.8	0.96	D	0.5	5
5	26/02/23 11:45	27/02/23 12:00	24:15	-2.4	-3.2	0.4	79.5	100.0	14.8	1.23	D	0.6	5
6	01/03/23 15:00	02/03/23 19:00	28:00	0.0	-0.6	1.3	77.0	100.0	17.0	0.63	W	1.4	8

Le variabili meteorologiche medie registrate durante le nevicate sono riportate in Tabella 6-2. Come si osserva, i due eventi maggiori, sia in termini di precipitazioni che di massa di manicotto,

si sono verificati tra metà dicembre 2022 e fine gennaio 2023, ma l'analisi ha potuto avvalersi anche di altri due eventi significativi di *wet-snow* a inizio dicembre 2022 e a inizio marzo 2023.

Le prestazioni dei *coating* per tutti gli eventi di nevicata sono descritte nelle Tabelle 6-3 e 6-4, che riportano l'indice *Rcov* rispettivamente per le campate da 15 m e per gli spezzoni da 75 cm e per ogni rivestimento testato.

Per quanto riguarda le **campate**, i risultati indicano complessivamente un'azione di mitigazione osservabile per tutti i campioni. L'evento 2 è degno di nota poiché vede lo sviluppo tardivo di manicotti su tutti i conduttori trattati ad eccezione degli *snow ring* e *Prod1+SIVO*, e parziale distacco in anticipo rispetto al riferimento. Tuttavia, il distacco del riferimento, che segue di poche ore, è totale, mentre i residui di neve sui campioni permettono un ulteriore accrescimento. Il semplice calcolo dell'indice, in questo caso, quindi penalizza i campioni, che hanno risposto molto bene durante la prima parte dell'evento, motivo per cui in Tabella 6-3 viene riportata anche la media escludendo l'indice riferito a questo evento (**Ave.***). In media, **HCI+SIVO** ha avuto le prestazioni migliori, con un *Rcov* sempre inferiore o circa pari a 1. Anche la **fune zincata superidrofobica SYLGARD® PDMS 186 10:1** ha risposto molto bene e in modo costante, mentre l'elastomero **SYLGARD® PDMS 186 10:1** e la fune equipaggiata con *snow-ring* hanno avuto prestazioni intermedie ma comunque positive se si esclude l'evento 2. Infine, il campione *Prod1* PTFE (politetrafluoroetilene) + SIVO ha raramente fatto meglio del riferimento.

Tabella 6-3– Parametro di prestazione *Rcov* su campate.

	1) HCI + SIVO	2) Prod1 PTFE + SIVO	3) SYLGARD® PDMS 186 10:1	4) Zn + SIVO	6) Snow ring
Ev 1	1.08	0.97	0.90	1.05	1
Ev 2	1.10	3.63	2.51	0.99	1.96
Ev 3	0.50	1.00	0.57	0.85	1
Ev 4	1.02	0.94	0.38	0.68	1.01
Ev 5	0.28	0.98	1.21	0.98	0.28
Ev 6	0.78	0.77	0.65	0.66	0.82
Ave.	0.79	1.38	1.03	0.87	1.01
Ave.*	0.73	0.93	0.74	0.84	0.82

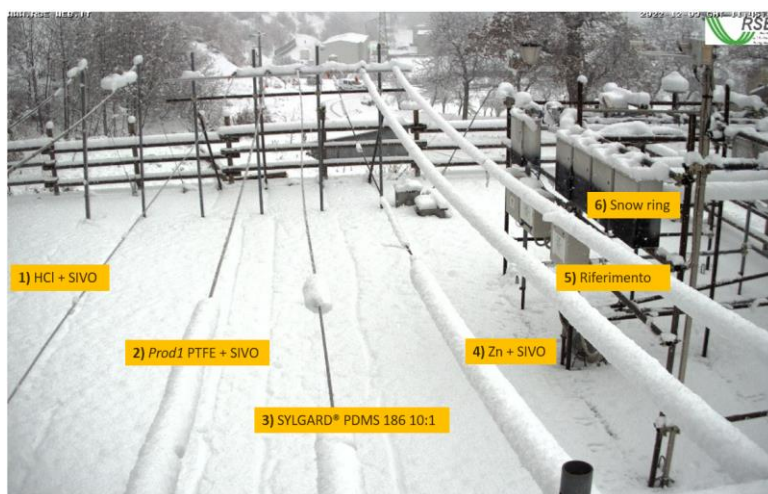


Figura 6-1– Istantanea degli effetti di formazione manicotto sulle campate durante l'evento 1 (2-3 dicembre 2022).

L'analisi degli spezzoni ha rivelato valori spesso superiori al riferimento (ad eccezione degli eventi 1 e 4) e piuttosto vicini tra loro, mediamente. Anche in questo caso l'evento 2 ha visto prestazioni molto scarse da parte dei campioni, motivo per cui si mostra anche la media escludendo tale

evento. Pur con differenze minime rispetto agli altri, i campioni migliori sono stati quello trattato con **SYLGARD® 186 olio**, quello con **SYLGARD® 184 rig** e quello con **M10 212**, mentre quelli con prestazioni peggiori sono stati quelli trattati con **HCl SIVO** (si noti il risultato in controtendenza con la campata) e con **SYLGARD® 186 10:1 sabbato**. Si ricorda che l'analisi per i campioni 7 (**SYLGARD® 184 rig**) e 8 (**M10 212**) ha incluso solo gli eventi 4, 5 e 6.

Tabella 6-4– Parametro di prestazione Rcov su spezzoni.

	1) Sylg 186 olio	2) Sylg 186 H202	3) HCl SIVO	4) Sylg 186 10:1 (sab)	5) Sylg 186 30:1 (sab)	6) Sylg 186 5:1 (sab)	7) Sylg 184 rig	8) M10 212
Ev 1	0.61	0.78	0.70	0.60	0.61	0.59	\	\
Ev 2	4.94	7.74	4.94	6.37	4.94	3.01	\	\
Ev 3	1.46	1.49	1.43	1.47	1.36	1.36	\	\
Ev 4	0.93	0.97	0.82	0.81	0.81	0.81	0.82	0.82
Ev 5	1.42	1.43	1.68	1.68	1.65	1.65	1.35	1.35
Ev 6	1.42	1.43	1.68	1.68	1.66	1.66	1.35	1.35
Ave.	1.80	2.30	1.87	2.10	1.84	1.51	1.17	1.17
Ave.*	1.17	1.22	1.26	1.25	1.22	1.21	1.17	1.17

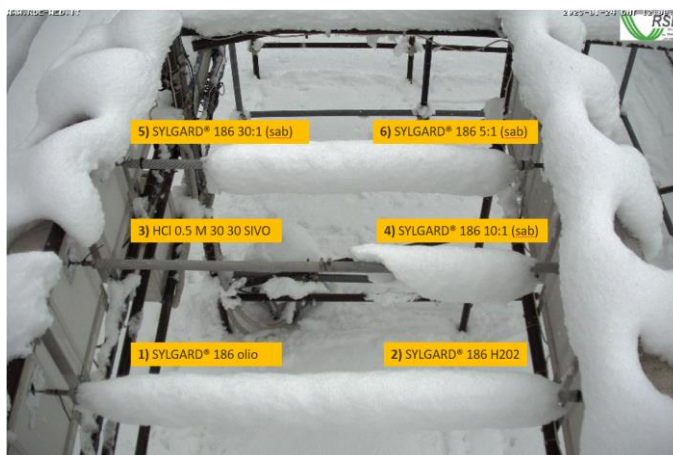


Figura 6-2– Istantanea degli effetti di formazione manicotto sugli spezzoni durante l'evento 3 (23-24 gennaio 2023).

Alla luce di questi risultati si riconferma la buona *performance* dei trattamenti basati su Dynasylan® SIVO, che, soprattutto per le campate, ha dato risultati apprezzabili (ad eccezione della fdg *Prod1* PTFE). La fune zincata ha dato risultati promettenti e gli *snow ring* continuano ad avere un'efficacia interessante, anche in considerazione del fatto che questi campioni sono in test da più di due anni.

Purtroppo, l'analisi sugli spezzoni non ha evidenziato differenze significative nelle diverse composizioni e lavorazioni dell'elastomero SYLGARD® e ha in generale restituito un quadro poco interpretabile. Sulla base di queste considerazioni, per la campagna di monitoraggio 2023-2024 si è programmato di sostituire gli spezzoni da 75 cm con campioni "doppi", che coprano l'intera lunghezza del cavo rotante, per avere un comportamento quanto più omogeneo possibile.

Si sottolinea una tendenza generale di tutti i campioni a **ritardare l'accumulo** di manicotto e a favorirne un **primo distacco**, a cui tuttavia fa però spesso seguito una seconda fase di accumulo in cui l'effetto del *coating* appare meno evidente o assente.

Tabella 6-5– Sintesi dei risultati basati sulla valutazione delle campate, indicante l'indicazione generale sulle prestazioni ottenute.

Campione	HCI + SIVO	Prod1 PTFE + SIVO	SYLGARD® PDMS 186 10:1	Zn + SIVO	Snow ring
Prestazioni complessive	Promettenti	Limitate	Promettenti	Intermedie – da approfondire	Intermedie – da approfondire

6.2 Preparazione dei campioni per il test dell'inverno 2023-2024 presso la stazione WILD

Per l'inverno 2023-2024 sono state preparate due tipologie di campioni:

- spezzoni di cavo conduttore ACSR di diametro 31.5 mm e lunghezza pari a 75 cm
- spezzoni di funi di guardia (fdg) di diametro circa 12 mm e lunghezza pari a 15 m

Per quanto riguarda gli spezzoni di conduttore, sono stati installati dei sensori di diametro in grado di valutare lo spessore del manicotto di neve. Questo dato, combinato con la misura di densità della neve offrirà una stima affidabile del peso del manicotto permettendo di migliorare il processo di valutazione delle *performance* antineve, ad oggi condotto solo per osservazione di immagini.

I campioni selezionati per i test in campo sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 6-6– Campioni in test presso la stazione WILD.

Numero	Nome	tipologia	note
1	SHP SIVO	funi di guardia	campione superidrofobico in test dall'inverno 2022
2	Syl186_10:1 old		campione elastomerico in test dall'inverno 2022
3	Syl186_10:1 new		campione elastomerico
4	Syl184_10:1_tt3		
5	Syl184_30:1_tt3		
6	Syl184_5:1_tt3	ACSR	
7	Syl184_10:1_tt3		
8	Syl184_30:1_tt3		

In particolare, date le buone prestazioni nello scorso inverno dei campioni **1** e **2**, è stato scelto di continuare il loro monitoraggio. Il campione **3** è stato installato al fine di confermare le *performance* antineve viste nel 2022-2023. Inoltre, per confronto tra **3** e **2** sarà possibile valutare l'eventuale invecchiamento del **2**. I campioni dal **4** al **8** sono stati discussi al Capitolo 2 e si completa dunque il loro studio valutandone le *performance* antineve. In particolare, il campione Syl184_30:1_tt3, considerato il più promettente per quanto riguarda le misure antighiaccio, è stato preparato sia su conduttori ACSR (**8**) che su fdg (**5**). Per confronto, si è scelto di preparare anche una fdg rivestita con Syl184_10:1_tt3 caratterizzata da una minor elasticità e da un peggior comportamento antighiaccio.

La preparazione dei campioni di fune di guardia per i test *outdoor* si è rivelata particolarmente complessa. Infatti, per poter distribuire omogeneamente il *coating* ed effettuare il trattamento termico, è stato necessario mettere la fune di guardia in trazione. Il trattamento termico è stato effettuato attraverso un tubolare riscaldato con delle resistenze a banda che però non hanno



garantito un'omogenea diffusione del calore lungo il tratto. Come si osserva dalla Figura 6-3 b, il campione così preparato ha mostrato comunque discrete proprietà idrofobiche per tutta la lunghezza del filo, confermando quindi la buona riuscita del processo. Tuttavia, nella fase di detensionamento, la fune si è bruscamente piegata causando in alcuni punti la lacerazione del rivestimento. Tutte difficoltà incontrate nella fase di preparazione mettono in evidenza le possibili difficoltà per l'applicazione di questi materiali su grande scala. Una possibile via per ovviare a tali inconvenienti potrebbe essere quella di depositare gli elastomeri su nastri da avvolgere attorno alle funi e ai conduttori, una volta polimerizzato il materiale.



Figura 6-3 – Preparazione delle funi di guardia. a) forno tubolare e fune tesa; b) prova di idrofobicità della fune rivestita.

I campioni sono stati installati presso la test facility Wild in Novembre 2023 e il loro comportamento sarà argomento di discussione nel prossimo rapporto.



7 - AGGIORNAMENTO DELLO STATO DELL'ARTE DEI COATING ANTIGHIACCIO

Nel presente capitolo vengono riportati alcuni tra i più promettenti *coating* per applicazioni antighiaccio di recente individuazione. Tale studio è propedeutico e finalizzato alla identificazione di nuovi materiali che potranno essere sviluppati in futuro.

7.1 Slippery covalently-attached liquid surfaces (SCALs)

Gli SCALs sono materiali innovativi in cui un liquido lubrificante viene attaccato covalentemente a un substrato opportunamente trattato [20]. Le superfici che si ottengono sono caratterizzate dall'estrema scivolosità, evidenziando una isteresi dell'angolo di contatto (θ) solitamente inferiore a 5° . Le molecole a catena lunga legate alla superficie manifestano una mobilità simile a quella di un liquido, impartendo quindi le desiderate proprietà antiadesive.

Il polimero maggiormente utilizzato come liquido scivoloso è il polidimetilsilossano (PDMS) che presenta proprietà idrofobiche, è flessibile, è atossico ed è facilmente disponibile in commercio. Oltre al PDMS o in miscela con questo, possono essere utilizzati altri composti siliconici polimerici, in grado di aumentare le proprietà ricercate. Lo spessore dei polimeri è su scala nanometrica.

La preparazione dei materiali SCALs prevede un pretrattamento della superficie solida, attraverso una pulizia seguita da trattamento al plasma o agli UV oppure dall'impiego di un *primer*, in modo da attivare la superficie e facilitare la formazione dei legami con il liquido.

Successivamente il polimero viene applicato alla superficie attraverso differenti tecniche di deposizione, tra cui *spray coating*, *dip coating* o *tape casting*. Segue infine un processo di *curing* del materiale, necessario per migliorarne l'adesione al substrato.

Grazie alle loro peculiarità, questi composti, di recente ideazione, sono promettenti materiali antighiaccio [21]. Tuttavia, le potenziali applicazioni degli SCALs devono ancora essere approfondite insieme a una piena comprensione delle proprietà chimico fisiche e ad uno studio sulla loro durabilità.

7.2 Smart coating

Gli *smart coating* sono rivestimenti in grado di rispondere in modo controllato ai cambiamenti dell'ambiente circostante, tale comportamento si definisce responsivo. La risposta dei rivestimenti può includere un cambio di temperatura, dimensione, area superficiale, proprietà meccaniche etc.; al cessare dello stimolo, i rivestimenti tornano nello stato originario. I rivestimenti *smart* con proprietà antighiaccio possono dividersi in rivestimenti termo-responsivi, rivestimenti a cambio di fase e ad impulso meccanico.

7.2.1 Materiali termo-responsivi

I coating termo-responsivi producono energia termica per effetto Joule, grazie a questa viene indotto il distacco del ghiaccio dalla superficie [22]. Questi *smart coating* possono effettuare termogenesi come risposta a uno stimolo elettrico (*electric-sensitive*) o magnetico (*magnetic-sensitive*). I rivestimenti *electric-sensitive* sono materiali compositi, spesso resine epossidiche, all'interno dei quali sono inserite nanostrutture di grafene conduttivo; applicando una tensione, questi generano energia termica in grado di sciogliere un primo layer di interfaccia superficie/ghiaccio, facilitandone quindi il distacco [23]. I *coating* che rispondono allo stimolo magnetico sono invece materiali in cui nanoparticelle magnetiche (come, per esempio Fe_2O_3) sono inserite all'interno di un polimero [24], applicando un campo magnetico esterno queste emettono calore.



7.2.2 Materiali a cambio di fase

I materiali a cambio di fase (PCM) hanno un'elevata capacità di accumulo di calore, che può essere rilasciato durante il passaggio di fase (es solido-liquido) e viceversa [25]. Il calore latente rilasciato dai PCM può essere utilizzato come antighiaccio [26]. I PCM possono avere origine inorganica, organica o ibrida. Per una reale applicazione di questo genere di composti è essenziale che vengano rispettati numerosi criteri tra cui avere una temperatura di fusione ottimale per l'ambiente di utilizzo, un alto calore latente, un'elevata conducibilità termica, un cambio di fase riproducibile, essere durevoli ed economicamente convenienti. Queste restrizioni fanno sì che attualmente una reale applicabilità al sistema della rete elettrica sia difficilmente sostenibile, nonostante questi rivestimenti siano particolarmente promettenti in altri campi, per esempio aeronautico e building [27].

7.2.3 Materiali a impulso meccanico

Il meccanismo di distacco anticipato del ghiaccio per questo *smart coating* è attribuito alle vibrazioni. Le vibrazioni possono sia impartire sforzi di taglio superiori alle forze di adesione ghiaccio-superficie, sia generare delle crepe all'interno del ghiaccio, indebolendolo. I materiali a impulso meccanico sono materiali piezoelettrici che si deformano quando sottoposti a campo elettrico. In particolare, i polimeri piezoelettrici, come per esempio il polivinilidendifluoruro (PVDF), giocano un ruolo particolarmente importante in questo campo, grazie alla loro flessibilità e alla capacità di sopportare sollecitazioni meccaniche [28].

Vanno inoltre citati, oltre ai polimeri piezoelettrici, i materiali a memoria di forma (SMA). Gli SMA subiscono deformazioni in funzione della temperatura per poi tornare nella loro forma originaria; questa peculiarità avviene per una transizione dalla fase cristallina originaria (austenitica) a una seconda fase (martensitica) e prende dunque il nome di transizione martensitica. Tra gli SMA i più comuni sono costituiti da leghe di Ni-Ti. Alla stregua dei materiali elettro-sensitivi, anche questi possono trovare impiego per applicazioni antighiaccio, in particolare per applicazioni aeronautiche [29] [30]; l'effetto antighiaccio per questi materiali è doppio: la loro deformazione provoca sia le vibrazioni tipiche dei polimeri piezoelettrici, sia la generazione del calore dovuto alla transizione di fase.

7.3 Polimeri fluorurati e organici

I polimeri fluorurati (PF) sono molecole che contengono atomi di fluoro covalentemente legati ad atomi di carbonio all'interno di catene polimeriche più o meno lunghe. I PF risultano particolarmente promettenti per applicazioni nel campo antighiaccio grazie ad alcune peculiarità [31]:

- sono idrofobici grazie alla presenza della parte fluorurata;
- hanno bassa energia di superficie e pertanto godono di bassa adesività;
- restano flessibili alle basse temperature, avendo una bassa temperatura di transizione vetrosa;
- sono estremamente stabili ad agenti chimici e risultano resistenti agli agenti atmosferici;
- sono stabili in un ampio range di temperatura;
- godono di buone proprietà meccaniche.

Nonostante questi materiali siano particolarmente interessanti per applicazioni antighiaccio, la presenza delle parti fluorurate li rende non del tutto ecologicamente sostenibili.

La sostituzione delle parti fluorurate con molecole alchilate in polimeri organici, come per esempio il polietilene (PE), può portare comunque ad interessanti risultati [32], permettendo di superare i problemi dell'alto impatto ambientale dei polimeri alogenati, pur mantenendo buone prestazioni nell'abbassamento dell'adesione del ghiaccio e una buona applicabilità in campo industriale.



8 - CONCLUSIONI

Nella presente annualità sono stati approfonditi vari aspetti relativi alla sintesi dei *coating* antighiaccio e al metodo di valutazione delle proprietà *icefobiche* e *snowfobiche*.

Nella prima parte del rapporto, a partire dalle formulazioni della scorsa annualità, sono riportati gli studi sulle proprietà di durezza, di idrofobicità e antighiaccio degli elastomeri, ottenuti variando il rapporto prepolimero:reticolante e i trattamenti di polimerizzazione.

I trattamenti di polimerizzazione più spinti possono influenzare la bagnabilità e la durezza del materiale, migliorando mediamente le proprietà dinamiche e indurendo l'elastomero. Tuttavia, queste variazioni hanno una lieve influenza sulle proprietà *icefobiche* finali, mentre il rapporto prepolimero:reticolante è un parametro chiave per ottenere le *performance* ricercate. In particolare, il campione Syl184_30:1 risulta essere il migliore.

Dallo studio è emerso che per i campioni più *soft*, lo shear stress è in buona relazione lineare con la durezza del materiale: quanto minore è la durezza, tanto minore risulta l'adesione del ghiaccio; piccole variazioni nell'adesione del ghiaccio sono abbinate a più significative variazioni nella durezza. Questa relazione lineare si perde in parte per i campioni più duri, inoltre la pendenza della retta aumenta e per piccole variazioni di durezza si osservano più significative variazioni di *shear stress*. Questi andamenti sono indice di meccanismi complessi in cui, probabilmente, entrano in gioco anche altri fattori, come per esempio la bagnabilità, la rugosità e l'adesività delle superfici, che influenzano in modo più o meno significativo il lavoro di adesione del ghiaccio alla superficie (Wad, equazione 2.1).

Sono state condotte prove di *ageing* accelerato sugli elastomeri più promettenti: tutti hanno mostrato, al termine dei cicli, un'ottima adesione al supporto metallico, mentre le proprietà *icefobiche* sono peggiorate dopo l'invecchiamento, restando però di almeno 2 volte superiori al campione non rivestito.

Tutti i campioni di Syl184_30:1, in particolare, mantengono un buon comportamento antighiaccio, diminuendo l'adesione fino a 4,5 volte rispetto al riferimento, anche dopo l'invecchiamento. Questa formulazione risulta quindi la più interessante per le applicazioni future, indipendentemente dal processo di polimerizzazione testato.

Gli elastomeri studiati hanno mostrato buone proprietà antighiaccio e ottima resistenza all'invecchiamento, sono economici e ambientalmente sostenibili; tuttavia, la loro applicazione su larga scala risulta particolarmente problematica, soprattutto pensando al processo di produzione dei cavi conduttori estremamente rapido e alle sollecitazioni meccaniche a cui vengono sottoposti in fase di installazione in linea. Risulta quindi imprescindibile, a livello di applicabilità tecnologica, superare questi ostacoli, attraverso formulazioni più rapide e resistenti agli *stress* meccanici.

La seconda parte dell'attività è stata volta al miglioramento della valutazione delle proprietà antighiaccio. In particolare, è stato realizzato un nuovo strumento per la misurazione dello *shear stress* del ghiaccio che consente di variare numerosi parametri di misura, per ottenere dati più ripetibili e affidabili. Nell'ottimizzazione del metodo di misura si sono considerati il tempo, la temperatura di solidificazione del ghiaccio e la velocità con cui il ghiaccio viene staccato dalla superficie; è stato proposto un modello a regressione lineare multipla che ha permesso di identificare le migliori condizioni sperimentali per ridurre la dispersione dei risultati. Ulteriori studi saranno utili per testare questi parametri su diverse tipologie di campioni.

Nella terza parte il *focus* è stato volto allo studio delle proprietà della neve e dei manicotti. All'interno del Laboratorio Neve Artificiale (LNA) è stata definita una procedura che consente di misurare in modo preciso e accurato il contenuto di acqua liquida della neve (LWC). A partire da questa misura, sono stati studiati i parametri sperimentali per produrre, con buona accuratezza (scostamento massimo del 9% dal valore desiderato), la neve con LWC controllato, in un range tra 3% e 35% di LWC.

Nel rapporto è inoltre presente la descrizione dell'espositore motorizzato per conduttori elettrici, uno strumento realizzato in RSE e collocato nel LNA, che permette la crescita di manicotti di neve



artificiale su spezzoni di conduttori e funi di guardia. Sono state testate le condizioni di crescita del manicotto al fine di consentire la valutazione dell'effetto *snowfobico* dei rivestimenti, in funzione del ritardo dell'accrescimento o dell'anticipo del distacco, rispetto ad un riferimento non trattato. Questa procedura è di particolare importanza perché permetterà di eseguire test con neve artificiale, affiancando i risultati a quelli ottenuti con la campagna *outdoor*. Nel LNA è stata inoltre allestita una macchina universale per prove meccaniche, in grado di eseguire prove di compressione e trazione sulla neve, per valutarne le forze coesive e stimare quelle adesive tra campione e neve.

Nella presente annualità si è poi concluso lo studio sulla modellazione della crescita e distacco del manicotto di neve, che mostra le zone in cui il cavo è maggiormente sollecitato e propone una valutazione della deformazione della neve nel tempo.

Nel 2023 è continuata la campagna *outdoor* per lo studio delle proprietà antineve di campioni di rivestimenti sottoposti a innevamento presso la stazione sperimentale WILD di Vinadio. Sono riportati i risultati relativi all'inverno 2022-2023, che hanno evidenziato per alcuni rivestimenti buone prestazioni, anche su campioni esposti da più di un anno. Alcuni di questi sono stati mantenuti in test anche per l'inverno 2023-2024, insieme a nuovi campioni rivestiti con i *coating* siliconici sviluppati nel periodo di riferimento. Nella stazione sperimentale sono inoltre stati montati dei sensori di spessore che permetteranno valutazioni più oggettive, basate non solo sulla copertura complessiva o parziale di neve sugli spezzoni, ma anche sull'analisi della dimensione del manicotto; per comparazione con un riferimento montato su una cella di carico, sarà inoltre possibile stimarne il peso.

Il rapporto si conclude con una analisi di letteratura relativa a *coating* innovativi con proprietà antighiaccio. Alcuni dei rivestimenti proposti potranno essere in futuro sviluppati nei laboratori RSE, affiancando gli elastomeri e/o in combinazione con loro, per ovviare ai problemi di applicabilità sopra citati.



9 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Cigré, «Coatings for protecting overhead power networks against icing, corona noise, corrosion and reducing their,» 2021.
- [2] M. Balordi, A. Cammi, F. M. Cernuschi, G. Santucci de Magistris, V. Rotella, A. Casali, D. Fasani e F. Pini, «Rivestimenti antighiaccio per i componenti della rete elettrica: sintesi, modelli prestazionali e caratterizzazioni antighiaccio,» 2022.
- [3] ARERA, «Avvio di un'indagine conoscitiva in relazione alle interruzioni del servizio elettrico accaduto nei giorni 6,» 2015.
- [4] M. Balordi, A. Cammi e G. Santucci de Magistris, «Effect of experimental parameters on icephobic,» 2022.
- [5] M. Balordi, A. Cammi, F. M. Cernuschi, G. Santucci de Magistris, A. Casali, D. Fasani e P. Francesco, «Coating elastomerici e superidrofobici per conduttori e funi di guardia: preparazione e caratterizzazione, studio delle proprietà antighiaccio e dei meccanismi di crescita e distacco dei manicotti di neve,» 2021.
- [6] DowCorning, «<https://www.dow.com/documents/11/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf?iframe=true&>,» [Online].
- [7] R. Al-Oweini e H. El-Rassy, «Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several Si(OR)_4 and $\text{R}^n\text{Si(OR)}_3$ precursors,» *Journal of Molecular Structure*, vol. 919, pp. 140-145, 2009.
- [8] ASTM-D2240, *Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*, 2017.
- [9] A. M. Gent, «On the Relation between Indentation Hardness and Young's Modulus,» *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 4, pp. 896-906, 1958.
- [10] N. Rehfeld, J.-D. Brassard, M. Yamazaki, H. Sakaue, M. Balordi, H. Koivuluoto, J. Mora, J. He, M.-L. Pervier, A. Dolatabadi, E. Asenath-Smith, M. Jarn, X. Hou e V. Stenzel, «Round-Robin Study for Ice Adhesion Tests,» *aerospace*, vol. 11, p. 106, 2024.
- [11] RobTillaart, «<https://github.com/RobTillaart/HX711>,» [Online].
- [12] Adafruit, «https://github.com/adafruit/Adafruit_MAX31865,» [Online].
- [13] «<https://seithan.com/Easy-Nextion-Library/Custom-Protocol/>,» [Online].
- [14] «<https://nextion.tech/nextion-editor/>,» [Online].
- [15] D. Fasani, F. M. Cernuschi e L. Colombo, «Calorimetric determination of wet snow liquid water content: the effect of test conditions on the calorimeter constant and its impact on the measurement uncertainty,» *Cold Region Science and Technology*, vol. 214, 2023.
- [16] T. Chen, «Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data,» *NASA/TM-2000-210123*, 2006.
- [17] R. Hefny, L. Kollár e M. Farzaneh, «Simulation of Snow Adhesion on Real-Scale Lines,» *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, vol. 1, pp. 102-108, 2012.
- [18] *ISO 12494:2017 Atmospheric icing of structures*, 2017.
- [19] P. Marcacci, V. Rotella, M. Tribuzio e G. Quinteri, «Caratterizzazione e verifica delle prestazioni di conduttori idrofobici e ice-fobici (periodo ottobre 2020 – aprile 2021),» 2021.
- [20] I. Gresham e C. Neto, «Advances and challenges in slippery covalently-attached liquid surfaces,» *Adv Colloid Interface Sci*, 2023.
- [21] Z. Zehui, . W. Zelinlan, L. Guang e C. Dengke, «Liquid-like slippery surface with passive-multi active strategy integration for anti-icing/de-icing,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 474, p. 1385, 2023.
- [22] R. Ramachandran e M. Nosonovsky, «Surface micro/nanotopography, wetting properties and the potential for biomimetic icephobicity of skunk cabbage *Symplocarpus foetidus*,» *Soft Matter*, vol. 10, pp. 7797-7803, 2014.



- [23] N. Karim, M. Zhan, S. Afroji, V. Koncherry, P. Potluri e K. S. Novoselov, «Graphenebased surface heater for de-icing applications,» *RSC Advanced*, vol. 8, pp. 16815-16823, 2018.
- [24] P. Irajizad, M. Hasnain e . N. Farokhnia, «Magnetic slippery extreme icephobic surfaces,» *Nature Communications*, vol. 7, p. 13395, 2016.
- [25] X. Yao, J. Ju, S. Yang, J. Wang e L. Jian, «Temperature-Driven Switching of Water Adhesion on Organogel Surface,» *Advanced Materials*, 2013.
- [26] A. A. Yancheshme, A. Allahdini, K. Maghsoudi, R. Jafari e G. Momen, «Potential anti-icing applications of encapsulated phase change material-embedded coatings; a review,» *Journal of Energy Storage*, vol. 31, p. 101638, 2020.
- [27] A. Madad , T. Mouhib e A. Mouhsen, «Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives,» *Buildings*, vol. 8, p. 63, 2018.
- [28] T. Strobl, S. Storm, M. Kolb, J. Haag e M. Hornung, «Development of a Hybrid Ice Protection System based on Nanostructured Hydrophobic Surfaces,» in *ICAS*, St Petersburg, 2014.
- [29] L. Chen, Y. Zhang, Z. Liu e Q. Son, «Effect of graphene oxide doping on anti-/deicing performance of shape memory epoxy resin,» vol. 30, p. 103025, 2022.
- [30] X. Liu, Y. Xing e L. Zhao, «Study of Shape Memory Alloy De-icing Device for Nonrotating Components of Aircrafts,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 394, 2018.
- [31] C. Zhou, X. Zhao, X. Zhao, H. Li, S. Zhang, W. Feng e Y. Zhang, «Low Ice Adhesion Surfaces Based on Flexible Fluorinated Polymers with a Polynorbornene Backbone,» *Appl Mater Interfaces*, vol. 47, 2020.
- [32] H. Koivuluoto, C. Stenroos, M. Kylmäla, M. Apostol, J. Kiilakoski e P. Vuoristo, «Anti-icing Behavior of Thermally Sprayed Polymer Coatings,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 26, 2016.



10 - APPENDICE: MISURA DEL LWC NEL LABORATORIO DI NEVE ARTIFICIALE

10.1 Procedura di prova

Procedimento:

- 1) nel vano ufficio pesare il recipiente vuoto completamente asciutto (M_T);
- 2) aprire il recipiente e versare acqua a circa 35 °C nel calorimetro (circa 400 g di acqua);
- 3) chiudere il recipiente e pesarlo di nuovo (M_1);
- 4) chiudere il recipiente e agitarlo con un movimento circolare orizzontale;
- 5) inserire la sonda di temperatura nel recipiente e leggere la temperatura, una volta stabilizzata (T_1);
- 6) portare il recipiente nel vano refrigerato di produzione neve, aprirlo ed introdurvi, il più rapidamente possibile, un campione di neve di massa di circa 100 g;
- 7) riportare il recipiente nel vano ufficio e pesarlo (M_2);
- 8) agitare il recipiente con un movimento circolare orizzontale, inserirvi la sonda di temperatura e leggere la temperatura, una volta stabilizzata (T_2).

10.1.1 Misura della capacità termica E del dewar

La stima di E (capacità termica, espressa come massa equivalente di acqua) per il calorimetro dewar è stata eseguita, analogamente a quanto riportato in [15], eseguendo misure su campioni di neve a contenuto noto di acqua liquida, ottenuti per aggiunte di acqua, mantenuta a 0 °C in bagno di acqua e ghiaccio, ad aliquote di neve secca mantenuta a -3 °C nel vano refrigerato.

Il procedimento utilizzato è il seguente:

1. una massa di acqua calda è inserita nel dewar di massa M_T e sono misurati M_1 e T_1 ;
2. una massa di neve secca (m_{ice}) a $T_s = -3$ °C è aggiunta al dewar e si misura la massa M_{2d} ;
3. una massa di acqua (m_{liq}) a $T_0 = 0$ °C è aggiunta al dewar e si misura la massa finale M_2 ;
4. dopo agitazione circolare del dewar si misura la temperatura finale T_2 , una volta stabilizzata.

Il termine E è calcolato con l'equazione seguente:

$$E = \frac{M_2 - M_1}{T_1 - T_2} \left[\frac{L_{SL}}{C_{p,L}} (1 - LWC_r) + T_2 \right] - (M_1 - M_T) \quad 10.1$$

dove LWC_r è il contenuto noto di acqua liquida della neve, calcolato a partire da LWC_s e corretto per il calore scambiato dalla neve secca (ghiaccio) alla temperatura di sotto-raffreddamento (-3 °C) (lo stoccaggio della neve secca a questa temperatura è necessario a garantire che il contenuto di acqua liquida iniziale della neve secca sia zero).

LWC_r è dato da:

$$LWC_r = LWC_s - (1 - LWC_s) \frac{C_{p,I}}{L_{SL}} \Delta T_{sub} \quad 10.2$$

dove:

$C_{p,L}$ = calore specifico del ghiaccio ($2108 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$)

$\Delta T_{sub} = T_0 - T_s$

mentre LWC_s è dato da:

$$LWC_s = \frac{m_{liq}}{m_{sn}} = \frac{m_{liq}}{m_{ice} + m_{liq}} = \frac{M_2 - M_{2d}}{M_2 - M_1} \quad 10.3$$

Per misurare E si è scelto di porsi nelle seguenti condizioni:

- massa di acqua calda ($m_w = M_1 - M_T$) di circa 400 g
- una massa di neve ($m_{sn} = M_2 - M_1$) di circa 100 g
- temperatura dell'acqua calda (T_1) di circa 35 °C.

Sono state eseguite misurazioni su nevi a 5 differenti livelli di contenuto di acqua liquida ($LWC_s = 0, 10, 20, 30, 40\%$) per coprire l'intervallo di LWC 0-40%, e per ciascun livello sono state eseguite 5 repliche.

I valori di E ottenuti sono riportati in Tabella 10-1.

Tabella 10-1 – valori di dell'equivalente in acqua del calorimetro (E) misurati sulle nevi a contenuto noto di acqua liquida

replica	livello LWC	E (g)	livello LWC	E (g)	livello LWC	E (g)
1	0%	42,38	20%	35,09	40%	38,96
2		38,25		32,37		37,15
3		35,81		37,46		37,93
4		35,85		33,22		29,44
5		37,54		34,34		29,28
1	10%	32,53	30%	34,50		
2		33,11		35,73		
3		41,97		31,48		
4		35,38		32,94		
5		35,02		33,77		

I valori di E ottenuti seguono una distribuzione normale (Figura 10-1a) e la normalità è verificata con test di normalità di Anderson-Darling ($\alpha=0,05$) (Figura 10-1b).

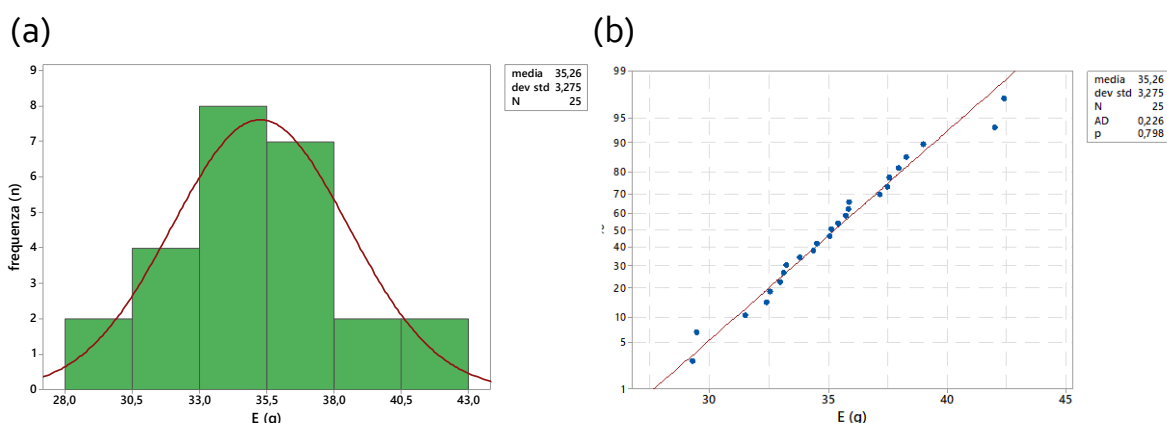


Figura 10-1 – (a) Istogramma delle frequenze dei valori di E calcolati; (b) grafico di probabilità del test di normalità

Per verificare se vi sono differenze statisticamente significative nei valori medi di E in funzione del livello di LWC misurato è stata eseguita una ANOVA sui risultati ottenuti. Al 95% di confidenza ($\alpha=0,05$), assumendo che i gruppi abbiano uguale varianza (verificato con test di Levene, risulta $p=0,505$, Figura 10-2). ANOVA non identifica differenze significative ($p=0,283$, Tabella 10-2), così come il test per medie accoppiate di Tukey ($p_{\min}=0,247$, Figura 10-3)

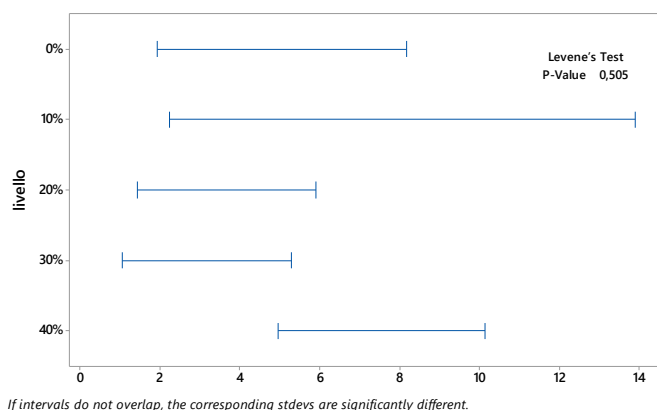


Figura 10-2 - Test di omogeneità delle varianze: intervalli di comparazione multipla delle deviazioni standard dei valori di E per i differenti livelli di LWC, $\alpha=0,05$

Tabella 10-2 – Risultati di ANOVA sulle medie dei valori di E raggruppate per livello di LWC, $\alpha=0,05$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
livello	4	55,04	21,38%	55,04	13,76	1,36	0,283
Error	20	202,40	78,62%	202,40	10,12		
Total	24	257,44	100,00%				

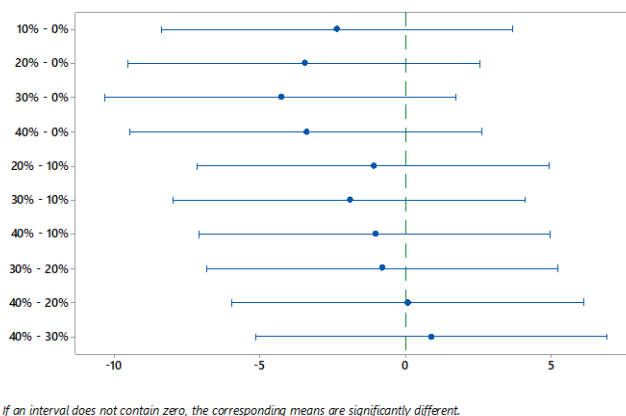


Figura 10-3 – Risultati del test di Tukey per il confronto tra medie accoppiate, $\alpha=0,05$

Sulla base dei risultati ottenuti appare dunque lecito utilizzare il valore medio di equivalente in acqua del calorimetro ottenuto pari a 35,26 g per tutte le misure di LWC nel range 0-40%.

La Figura 10-4, infine, mette a confronto i valori di LWC_r (calcolati con l'equazione 10.2) con i valori di LWC corretti utilizzando $E=35,26$ (LWC_{corr}): si evidenzia una elevata correlazione lineare (0,999) tra LWC_r e LWC_{corr} , indice di una buona corrispondenza tra LWC atteso e misurato, senza deviazioni di rilievo, in tutto il range di LWC tra 0 e 40%. I valori negativi sono dovuti alla correzione per il raffreddamento a $T=-3$ °C utilizzato per preparare i campioni, che porta a valori di LWC_r negativi.

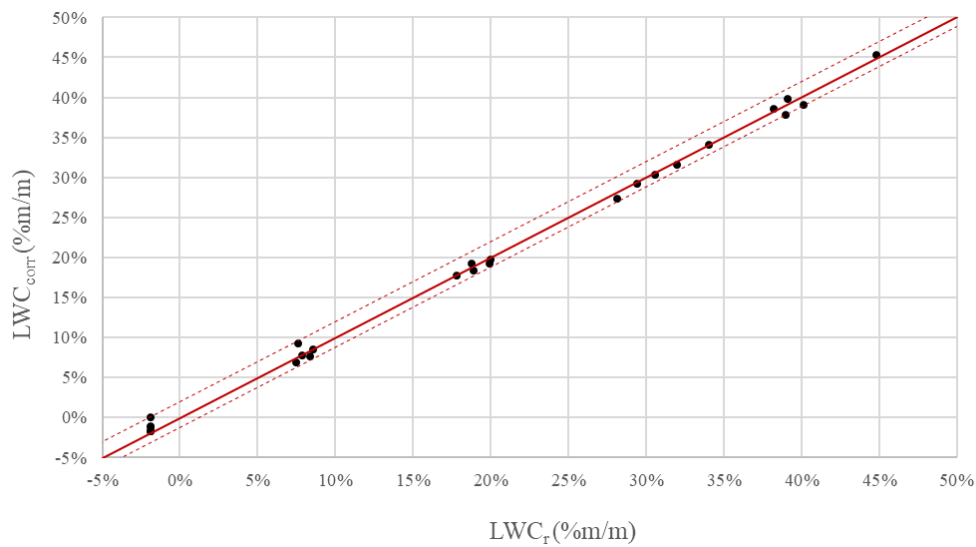


Figura 10-4 – LWC atteso (LWC_r) vs LWC misurato (LWC_{corr}), corretto utilizzando $E=35,26$. Le linee tratteggiate corrispondono alle massime differenze riscontrate tra le due misure.



11 - ACRONIMI

Acronimo	Descrizione
ABS	Acrilonitrile Butadiene Stirene
ACS	Angolo di Contatto Statico
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
DOE	Design Of Experiment
Fdg	Funi Di Guardia
FTIR	Spettroscopia Infra Rossa a Trasformata di Fourier
IWAIS	International Workshop on Atmospheric Icing of Structures
LNA	Laboratorio di Neve Artificiale
LWC	Liquid Water Content
PCM	Phase change Material
PDMS	PoliDiMetilSilossano
PE	Poli Etilene
PEG	Poli Etilen Glicole
PF	Polimeri Fluorurati
PLA	Acido Polilattico
PWM	Pulse Width Modulation
RdS	Ricerca di Sistema
RO	Roll-Off Angle
RSE	Ricerca sul Sistema Energetico
SA	Angolo di Scivolamento
SCALs	Slippery Covalently-Attached Liquid Surfaces
SFE	Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche
TGA	Analisi TermoGravimetrica
TSO	Transmission System Operator
WILD	Wet-snow Ice Laboratory Detection
YM	Modulo di Young



12 - ELENCO ALLEGATI

Allegato	Descrizione	N. protocollo
1	Prove di invecchiamento climatico accelerato	23011304