

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria dei Materiali**

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione di rivestimenti per incrementare le prestazioni e la durata delle conchiglie per la colata in gravità.



Relatori

firma del relatore (dei relatori)

prof. Mario Rosso

Dott. Gobber Federico Simone

Ing. Lombardo Silvia

Ing. Fracchia Elisa

Candidato

firma del candidato

Peiranis Eleonora

Ottobre 2018

Indice generale

1. Introduzione.....	5
2. Stato dell'Arte.....	7
2.1 La Colata in Gravità.....	7
2.1.1 Leghe di alluminio da fonderia.....	7
2.1.2 Processo industriale di colata.....	8
2.1.3 Difetti di fonderia.....	9
2.2 Le conchiglie nella colata in gravità.....	11
2.2.1 Tipologie di Acciai per utensili a caldo.....	11
2.2.2 Usura degli stampi.....	12
2.3 Vernici Per Rivestimento Di Conchiglie Nella Colata In Gravità.....	14
2.3.1 Introduzione alle vernici per colata in conchiglia di leghe di alluminio.....	14
2.3.2 Composizione e morfologia.....	15
2.3.3 Caratteristiche e proprietà.....	16
2.3.4 Principali criticità.....	19
3. Pratica Industriale, Materiali e Metodi di Laboratorio.....	21
3.1 Applicazione della vernice.....	21
3.2 Materiali E Metodi.....	23
3.2.1 Osservazione del rivestimento: morfologia e composizione.....	24
3.2.2 Taber test e misurazioni risultati.....	24
4. Analisi dei risultati.....	31
4.1 Analisi morfologica e composizionale del rivestimento.....	31
4.2 Taber Test.....	35
4.2.1 Analisi morfologica.....	35
4.2.2 Analisi spessori, rugosità e altezze medie.....	53
5. Conclusioni.....	61
6. Lista dei Simboli.....	63
7. Riferimenti Bibliografici.....	65
8. Appendici.....	67
9. Ringraziamenti.....	69

1. Introduzione

Questo lavoro è stato svolto presso la F.O.M.T. di Grugliasco (TO) con l'appoggio dei laboratori di Alessandria del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) del Politecnico di Torino. La F.O.M.T S.p.A (Fonderie Officine Meccaniche Tonno) è un'azienda attiva fin dal 1962 nel campo della fusione di leghe leggere e in ottone e delle lavorazioni meccaniche. La possibilità di operare al proprio interno con diverse tecnologie le consente di seguire la produzione dei componenti motoristici in modo molto accurato, puntando alla migliore qualità del pezzo prodotto affiancata a una grande flessibilità del modello produttivo. L'azienda ha fornito i campioni e la possibilità di seguire le operazioni di verniciatura e preparazione degli stampi utili ad approfondire la sezione di pratica industriale.

Il seguente testo è redatto con l'intento di mettere in luce il comportamento delle vernici inorganiche usate per rivestire le conchiglie per colata in gravità di leghe di alluminio nel contesto della fonderia. Le problematiche principali che hanno portato all'attività di laboratorio sono la durata insufficiente dei rivestimenti ottenuti con la verniciatura delle conchiglie e quindi la caratterizzazione delle vernici stesse con particolare attenzione ai fenomeni di usura e fatica termica. La natura peculiare di questi prodotti li mette in una zona d'ombra per cui vi sono pochi studi accademici specifici in merito mentre molti altri studi generici su diversi tipi di vernici e rivestimenti non sono riconducibili a questo caso.

Come appena detto è difficile trovare testi specifici in merito alla caratterizzazione di queste vernici specifiche: l'articolo più specifico rinvenuto è di A. Hamasaid et al. (2007) che studia le proprietà di trasmissione del calore della superficie verniciata, senza però trattarne il comportamento a usura. È facile trovare anche articoli che trattano i tipi difetti del rivestimento e il loro effetto sulle conchiglie (C. Mitterer et al., 2000; B. Pawlowski, 2013 e MUSIC Publication, risorsa web 2018) senza però studiare i tempi o i fenomeni che regolano la formazione di tali danneggiamenti. Per elaborare un metodo di caratterizzazione sono stati consultati alcuni testi generici sulle vernici (James H. Havens, 1963) e sulle finiture superficiali (Paracchini L., 2003, "Manuale di trattamenti e Finiture). Così sono state identificate alcune norme su cui basare l'attività sperimentale (ASTM D4060 – 10 e C633 – 13) rispettivamente riferite all'uso dell'abrasimento Taber per valutare la resistenza all'usura superficiale e alle prove della forza di adesione tra substrato e rivestimento. Le due normative si riferiscono l'una alla caratterizzazione di vernici organiche, l'altra a quella di rivestimenti termospruzzati: si è ritenuto che fossero adatte ad essere trasposte sulla vernice in esame mentre altri tipi di prova, come lo scratch test, sono state scartate.

Lo scopo del lavoro è fornire una linea guida sulla caratterizzazione della vernice, esaminando i possibili metodi di prova e la loro efficacia nel dare risultati attendibili. Inoltre si cerca di stabilire tramite l'analisi dei dati ottenuti eventuali soluzioni per prolungare la vita dei rivestimenti e i comportamenti da evitare per ridurre la possibile insorgenza di difetti e distacchi della verniciatura. Affiancando questi due obiettivi si cerca di ottimizzare l'uso della vernice in produzione che di aiutare lo sviluppo di ricerche per migliorare ulteriormente la comprensione del comportamento del rivestimento.

Il testo si divide in tre capitoli più corposi: il primo riguarda lo stato dell'arte, con esposizione della teoria sulla colata in gravita, le leghe da fonderia, le proprietà delle conchiglie e delle vernici refrattarie usate. Il secondo tratta invece la pratica industriale osservata in azienda in merito all'uso delle vernici e descrive i materiali e metodi usati in laboratori per eseguire le varie prove di caratterizzazione. Il terzo capitolo più consistente invece espone il materiale raccolto durante le attività di laboratorio e ne analizza i dati ottenuti, evidenziando i risultati notevoli ricavati dalle prove. A seguire vi sono le conclusioni con esposizione finale dei risultati a cui si è arrivati, la lista dei simboli, bibliografia e appendici.

2. Stato dell'Arte

2.1 La Colata in Gravità

2.1.1 Leghe di alluminio da fonderia

Le leghe da fonderia a base di alluminio si distinguono per la loro ottima colabilità e per la predisposizione ai trattamenti termici. La temperatura di fusione dell'alluminio è abbastanza contenuta (660°C) e favorisce la pratica di fonderia non solo per colate in stampi monouso (ad esempio in sabbia) ma anche per colata in conchiglia permanente sia per gravità che assistita da pressione esterna o altri processi (ad esempio thixocasting e rheocasting). La lega fusa può essere quindi trattata con attrezzature e conchiglie in acciaio, inoltre può essere lasciata in forni di attesa aperti grazie alla sua tendenza a formare uno film di ossido che la protegge da ulteriori ossidazioni.

I principali elementi di lega di interesse per la colata in gravità sono il silicio, il rame e il magnesio, inoltre è possibile avere tracce di altri elementi desiderabili o dannosi. Il silicio è un alligante dell'alluminio molto usato grazie alle ottime proprietà meccaniche che dà alla lega con adeguati trattamenti e all'apporto positivo alla colabilità della lega. Inoltre questo elemento rende il raffreddamento più rapido promuovendo la formazione di una microstruttura fine e rende il materiale più adatto alle lavorazioni per asportazioni di truciolo, grazie ai cambiamenti di fase che aiutano la rottura del truciolo stesso. Anche il rame migliora la colabilità e predispone la lega ad un incremento delle proprietà meccaniche sia in condizioni as-cast che in seguito alla bonifica, in particolare durante la fase di invecchiamento. Un elemento sempre presente in lega ma spesso non desiderato è il ferro; può avere effetti positivi sulla resistenza meccanica e come affinaio della microstruttura, ma è deleterio per la resistenza alla corrosione e ha importanti effetti infragilenti.

Gli alliganti sono scelti per migliorare le caratteristiche finali del getto in base al processo di produzione che si desidera adottare. Vanno però bilanciati in modo da non andare ad intaccare le caratteristiche intrinseche dell'alluminio quali bassa densità e quindi leggerezza e resistenza alla corrosione, data dalla spontanea passivazione del materiale. Si possono ottenere così getti leggeri, con buone proprietà meccaniche, (ulteriormente incrementabili con trattamento termico) e resistenza alla corrosione, che grazie al metodo di produzione possono avere forme complesse, con ottima finitura superficiale e possibilità di essere rifinite con lavorazione meccanica.

Alcune problematiche derivanti dall'uso di queste leghe riguardano principalmente la fusione, scorifica e trattamento della lega nei forni di attesa. Inoltre allo stato fuso queste leghe presentano la tendenza ad attaccare l'acciaio, corrodendolo, quando in contatto con esso. All'interfaccia tra lega e acciaio si vengono a formare degli intermetallici Al-Fe che inquinano la lega e danneggiano la conchiglia. L'interazione tra alluminio fuso e strumenti e conchiglie in acciaio è molto problematica, a questo proposito vengono usate apposite barriere sotto forma di rivestimenti ceramici applicati alle attrezzature in questione. Sia gli strumenti che le conchiglie vengono ricoperte con una vernice ceramica refrattaria che fa da schermo fisico tra lega fusa e acciaio, impedendo la dissoluzione di quest'ultimo.

2.1.2 *Processo industriale di colata*

La colata in gravità è un tipo di colata in conchiglia permanente che sfrutta la spinta metallostatica della lega fusa per riempire la figura, senza l'applicazione di ulteriori pressioni esterne. In questo caso è trattata la colata in gravità di leghe di alluminio, ma può essere usata anche per altre leghe con temperatura di fusione contenuta, come quelle a base di piombo o zinco. È una tecnica usata da molto tempo, ma poco studiata rispetto ad altri processi di colata in conchiglia permanente, come ad esempio la pressocolata o lo squeeze casting.

Questo processo è ottimo per la produzione di lotti di piccole o medie dimensioni, i componenti da produrre possono avere peso variabile da 0,5 a 50 kg con forme mediamente complesse. Inoltre non richiede attrezzature costose e si possono usare anime e dettagli in acciaio per definire le forme rientranti del componente. Tutto ciò lo rende un processo molto flessibile, con costi iniziali contenuti rispetto ad altre comuni tecniche di produzione per le leghe di alluminio.

Questo processo garantisce una buona precisione dimensionale e finitura superficiale, come la pressocolata, ma la dinamica di riempimento della conchiglia è meno turbolenta e dà una microstruttura più fine e regolare con conseguente innalzamento delle proprietà meccaniche.

I principali svantaggi della colata in gravità sono innanzitutto il fatto che richiede molto lavoro da parte di operatori dedicati, perché poco automatizzabile e quindi non adatta a grandi volumi di produzione e secondariamente che le conchiglie richiedono accurata progettazione sia della figura che dei canali di colata e delle ventilazioni per garantire il completo riempimento del getto e la sua qualità finale. A differenza della pressocolata che richiede costose presse assistite da operatori, la colata in gravità è semi manuale, con assistenza di una conchigliatrice che agevola l'apertura e chiusura della conchiglia. In base alla dimensione del componente colato l'operazione può essere eseguita da un solo operatore o da più persone dedicate alla stessa conchiglia. L'usura delle conchiglie, l'elemento più costoso di tutto il processo, è un problema critico e vi sono diversi studi e tecniche con l'obiettivo di prolungare la vita di produzione delle conchiglie in acciaio.

Il metodo di colata è molto semplice e permette cicli di produzione relativamente rapidi con risultati molto ripetibili. Resta il fatto che, nonostante sia una tecnica diffusa, non sia molto studiata e spesso ogni fonderia ha la sua metodologia nell'applicare il processo, con accorgimenti pratici affidati all'esperienza degli operatori che eseguono la colata. Il processo parte dalla fusione delle diverse leghe, ogni lega è fusa in appositi forni fusori, dedicati ognuno a una certa lega, da cui viene prelevata in base alle necessità di produzione.

Anche le conchiglie vanno preparate in modo da ottimizzare la loro resa di produzione, come vedremo in seguito in modo più approfondito, vengono pulite, sabbiate e verniciate con apposita vernice refrattaria prima di essere portate in temperatura per la colata. Il preriscaldamento della conchiglia è essenziale per evitare shock termici che potrebbero danneggiare la conchiglia e provocare spruzzi di lega fusa durante la colata, molto pericolosi per gli operatori e che creano consistenti problemi logistici.

Come detto in precedenza, i componenti così ottenuti hanno un'ottima finitura superficiale e accuratezza dimensionale grazie alle conchiglie in acciaio, inoltre il rapido raffreddamento permette microstrutture fini e migliori proprietà meccaniche. Il ciclo più lento e laborioso si adatta alla produzione di lotti di medie e piccole dimensioni, anche per il fatto che l'investimento per i macchinari e strumenti necessari è contenuta. Il costo maggiore, a parte il lavoro degli operatori, è dato dalla conchiglia che richiede progettazione e accorgimenti specifici per garantire la durata della stessa e il rientro del suo costo iniziale.

2.1.3 Difetti di fonderia

La colata in gravità permette di avere un'ottima finitura superficiale e un buon controllo della turbolenza durante la colata ma non è esente da difetti. In particolare risente del fatto che la conchiglia è metallica, quindi non permeabile all'aria, affine alla lega colata e soggetta a deformazioni durante i cicli di colata.

Una prima serie di difetti è data dalla possibile turbolenza della lega durante la colata con eventuali schizzi e formazione di difettosità tipiche come le gocce fredde, ovvero spruzzi di lega di piccole dimensioni solidificatesi in aria e rimaste intrappolate nel getto, o microstrutture irregolari date dal flusso non laminare. Questi problemi possono essere evitati progettando adeguatamente i canali di colata e il sistema di inserimento del metallo fuso in conchiglia; inoltre mantenendo la conchiglia a temperature adeguate alla colata si limiteranno gli schizzi di lega fusa.

Un'altra famiglia di difetti comprendono le soffiature e l'aria intrappolata. Non essendo la conchiglia permeabile all'aria, come sarebbe invece uno stampo in sabbia, non è sempre facile evacuare tutto il gas durante la colata, inoltre turbolenze e schizzi possono aiutare a intrappolare ulteriori bolle d'aria nel getto. Così si generano cavità e porosità da gas nel componente o riempimenti incompleti nelle cavità a causa della solidificazione prematura, dove non è stato possibile eliminare l'aria dalla conchiglia. Oltre a difetti superficiali e effetti di indebolimento nel getto si possono anche avere parti ossidate a causa del gas intrappolato e in generale un abbassamento della qualità del pezzo. Questi difetti possono essere eliminati progettando un efficiente sistema di bocchette di ventilazione inserite nei punti critici e andando di nuovo ad agire sul sistema di canali di colata e soprattutto sui ingressi di colata.

Altri difetti tipici riguardano il riempimento incompleto della figura, un problema complicato legato sempre alla progettazione della conchiglia. La necessità di avere un riempimento completo e rapido va in concorrenza con la volontà di ridurre le turbolenze, l'aria intrappolata in colata e risparmiare lega metallica riducendo la dimensioni delle materozze. Nel caso in cui i canali di colata non garantiscano il completo riempimento prima della completa solidificazione si avrà un getto incompleto e inutilizzabile. Sempre a causa di una scorretta progettazione della conchiglia si può avere un eccessivo gradiente termico nel getto con possibile distorsione dello stesso durante il raffreddamento. L'uso di vernici refrattarie che rivestono la figura è anche volto all'agevolare un'ottimale trasmissione del calore tra conchiglia e getto durante tutto il ciclo di colata migliorando molto le dinamiche di riempimenti del getto.

Infine vi possono essere una serie di difetti legati all'interazione tra conchiglia e lega; nel caso delle leghe di alluminio vi è una certa affinità chimica tra l'acciaio e il metallo fuso, il che aumenta le possibilità di avere adesione tra getto e conchiglia, il tutto

agevolato dalle temperature di colata. L'alluminio fuso può solubilizzare il ferro contenuto nell'acciaio degli stampi creando difetti nella composizione chimica della lega ed erosione nella figura. Le parti erose sono localizzate nei punti dove si intensifica il flusso di lega fusa con formazione di crateri e altre mancanze nella figura che poi vanno a costituire un difetto sui getti. L'adesione tra superficie della conchiglia e getto solidificato può dare difetti simili ma con morfologia diversa, formati per usura adesiva data dal distacco del getto durante la fase di estrazione. Il distacco può avvenire dal getto o dalla conchiglia, creando crateri o sporgenze che poi restano impresse nelle colate successive. Per limitare questi fenomeni si applicano apposite vernici refrattarie che impediscono il contatto diretto tra lega fusa e conchiglia, eliminando questo tipo di difetti.

Si nota come la maggior parte dei difetti possa essere evitato con adeguata progettazione della conchiglia e dei suoi canali di colata, oppure tramite l'uso delle vernici refrattarie, le cui caratteristiche e problematiche verranno discusse in seguito.

2.2 Le conchiglie nella colata in gravità

Le conchiglie usate per la colata sono ricavate in base a precisi progetti: con lavorazioni meccaniche si ricavano in blocchi di acciaio da utensile a caldo le due parti mobili e fisse in cui è riportata l'intera figura del getto con relativi canali di colata e materozze, necessari al completo riempimento. Le conchiglie presentano costi elevati e si devono produrre volumi ingenti di componenti per coprire il loro costo iniziale: per questo un'accurata progettazione, uso e manutenzione sono essenziali a garantirne la durata.

I principali difetti e problemi di colata sono legati alla conchiglia, ad esempio una progettazione non accurata può dare riempimenti incompleti, porosità o distorsioni del componente. L'uso corretto della conchiglia riguarda soprattutto l'applicazione adeguata della verniciatura refrattaria, che ottimizza la vita della conchiglia limitando l'usura adesiva data dall'estrazione del getto e l'erosione meccanica e chimica operata dalla lega fusa sulla superficie in acciaio. La manutenzione va eseguita per garantire l'efficienza della conchiglia con accurate revisioni dei punti critici, ad esempio le bocchette di ventilazione della figura, e l'attenta osservazione del rivestimento refrattario, in quanto suoi distacchi o cricature localizzate vanno corretti tempestivamente per evitare danneggiamenti della conchiglia e del componente.

2.2.1 Tipologie di Acciai per utensili a caldo

Esistono tre famiglie di acciai usati per le lavorazioni a caldo: quella a base di Cromo (Cr, Mo, W, V), una a base di Tungsteno (W, C, Cr, V) e una di Molibdeno (basso C, Mo, Cr, V). L'obbiettivo è quello di ottenere leghe ad alta durezza e resistenza ai carichi elevati, alle alte temperature e all'usura.

Gli acciai usati per produrre le conchiglie sono adatti a operare ad elevate temperature e a cicli termici; devono garantire l'integrità del materiale nelle condizioni di esercizio, ma anche precisione dimensionale e finitura superficiale del getto costante. Il contatto con la lega fusa e il raffreddamento del getto sottopongono la conchiglia a cicli termici con temperature massime intorno agli 800°C e raffreddamenti rapidi. L'acciaio che compone la figura e i canali di colata deve essere in grado di resistere a tali temperature senza deformarsi per molti cicli oltre a resistere all'effetto abrasivo della lega e dell'estrazione del getto. La resistenza agli stress termici e all'usura è essenziale per questi acciai mentre nel caso della colata in gravità non necessitano di resistere a pressioni elevate, cosa molto importante invece per la pressocolata.

Nel caso della colata in gravità di leghe di alluminio c'è anche il problema dell'interazione tra lega fusa e acciaio; le temperature di colata sono tali da promuovere adesione tra il getto e la conchiglia oltre a fenomeni di dissoluzione dell'acciaio. Le leghe di alluminio per colata in gravità sono affini a diversi elementi contenuti nell'acciaio della conchiglia e allo stesso ferro; durante la colata la lega discioglie progressivamente la conchiglia, danneggiandola e alterando la composizione del getto. Si possono adottare acciai con meno elementi di lega affini per ridurre il problema, ma l'unico modo per abbattere questo fenomeno è introdurre una barriera fisica tra la superficie della conchiglia e quella del getto. A questo proposito vengono usate delle vernici refrattarie che aderiscono alla superficie della conchiglia dando molti vantaggi di produzione, poi illustrati meglio in seguito.

Per formare questi acciai in conchiglie si ricorre prima alla forgiatura e poi a lavorazioni meccaniche per definire i dettagli. La figura e i canali di colata e di ventilazione richiedono lavorazioni molto precise, inoltre bisogna garantire una finitura superficiale ottimale, in quanto la superficie dello stampo definisce la finitura superficiale del pezzo e influisce notevolmente sul distacco del getto dallo stampo e quindi sull'usura della conchiglia. La composizione e caratteristiche di questi acciai li rendono molto difficili da lavorare con altri metodi e anche con questi processi bisogna avere cura di organizzare le lavorazioni e i trattamenti termici per garantire migliore formabilità e caratteristiche del componente ultimato ottimali.

2.2.2 Usura degli stampi

Si possono trovare vari articoli accademici in merito ai difetti tipici delle conchiglie studiate come l'articolo di Pawlowski B. (2013) e di Mitterer C. et al. (2000). Inoltre al sito della MUSIC publication (music.eucoord.com) si possono visualizzare diversi articoli inerenti a difetti e problematiche generali legate alle conchiglie.

La vita della conchiglia è limitata dall'usura che questa subisce durante la vita di processo, quando non sono più garantite precisione dimensionale, finitura superficiale adeguata o un livello di difetti sotto una certa soglia questa va sostituita. Visto l'alto costo di produzione si desidera avere una vita della conchiglia più lunga possibile, garantendo contemporaneamente la qualità del componente prodotto. Per prevedere la vita utile della conchiglia è necessario conoscere i meccanismi di usura che ne degradano le caratteristiche; in base a questi si possono adottare strategie e tecniche per limitarne gli effetti e allungare il tempo di utilizzo della conchiglia.

I meccanismi distinguibili di usura della conchiglia sono diversi e avvengono in contemporanea, incrementandosi a vicenda:

- La più ovvia è l'usura meccanica data dal flusso di lega fusa che scorre sulla superficie della conchiglia, elementi leganti come il silicio producono molto velocemente inclusioni solide che accentuano l'effetto abrasivo. Questo fenomeno è più marcato nelle zone dove il flusso si intensifica, come i restringimenti al fondo dei canali di ingresso e di colata o in curve improvvise della figura sul percorso della lega fusa. Oltre a consumare la superficie della conchiglia questo effetto produce attrito allo scorrimento della lega e può dare riempimenti difficoltosi dei dettagli più piccoli e delle sezioni sottili.
- La fatica termica dovuta ai cicli di colata può dare problemi di accoppiamento e accuratezza della conchiglia, ma per lo più agisce sul rivestimento refrattario producendo tensioni interne soprattutto in difetti preesistenti, che poi influisce sulla qualità del getto. Questo fenomeno è molto critico nel caso in cui sia necessario fermare la conchiglia durante il processo, raffreddandola completamente, e poi farla ripartire, portandola nuovamente in temperatura con conseguenti gradienti termici.
- L'usura adesiva si verifica quando il getto aderisce alla superficie della conchiglia, rendendo molto difficoltosa l'estrazione del pezzo e procurando danni alla conchiglia o al componente durante la separazione. Questa usura può produrre l'asportazione di materiale metallico per adesione delle superfici di getto e conchiglia: se il materiale staccato è acciaio si formano difetti nella conchiglia che restano impressi nel getto, se invece è l'alluminio a depositarsi si formano accumuli sulla superficie

della conchiglia, con formazione di cavità sul pezzo colato. L'uso del rivestimento refrattario è essenziale per limitare molto questo effetto; eventuali difetti che espongono l'acciaio alla lega liquida vanno corretti tempestivamente.

- L'usura chimica consiste nella dissoluzione dell'acciaio da parte della lega fusa ed è un altro problema significativo come già descritto nei paragrafi precedenti.

Conoscendo questi meccanismi di usura e la corretta pratica di progettazione e manutenzione delle conchiglie si può ottimizzare il loro tempo di vita e quindi migliorare la produzione e i suoi costi. A questo scopo tutti gli aspetti del processo vanno analizzati e preferibilmente studiati in modo rigoroso per poter essere ottimizzati.

2.3 Vernici Per Rivestimento Di Conchiglie Nella Colata In Gravità

2.3.1 Introduzione alle vernici per colata in conchiglia di leghe di alluminio

Le conchiglie in acciaio comunemente impiegate nella colata in gravità sono soggette a varie tipologie di danneggiamento e principalmente ad un processo di erosione da parte della lega liquida; tuttavia il contatto diretto tra conchiglia e lega fusa provoca anche altri problemi quali:

- adesione tra getto e conchiglia, con conseguenti difficoltà nel distacco del getto e danneggiamento della conchiglia (usura adesiva e distacco di materiale);
- danneggiamento della conchiglia per dissoluzione dell'acciaio nell'alluminio fuso;
- scorrimento della lega fusa difficoltoso sulla superficie della conchiglia, con riempimenti incompleti della figura o comparsa di difetti di colata;
- scambio di calore difficilmente controllabile con la conchiglia che provoca solidificazioni erronee o nei punti sbagliati, con blocco del flusso di lega e riempimenti incompleti.

Queste problematiche possono essere limitate usando delle appropriate vernici a base d'acqua, polveri ceramiche e leganti, le quali formano uno strato refrattario di rivestimento della conchiglia che migliora di molto le prestazioni generali del processo, la vita della conchiglia e la qualità del getto.

Esistono varie tipologie di vernice, aventi caratteristiche specifiche per i diversi processi produttivi e per le aree delle conchiglie da trattare, in base alle diverse necessità del produttore. Con una scelta adeguata delle vernici, dei metodi e dei parametri di applicazione si possono ottenere rivestimenti economici ed efficaci nel migliorare la resa del processo. L'uso di queste vernici fa sorgere nuove necessità inerenti al rivestimento stesso; l'esecuzione di una verniciatura ottimale, il controllo dell'usura del rivestimento refrattario e dei possibili difetti dovuti al fallimento del refrattario.

L'applicazione della vernice non è un processo automatizzato, bensì dipende dalla capacità ed esperienza dell'operatore che la esegue, oltre che dalle attrezzature impiegate: appare quindi evidente che le caratteristiche dello strato refrattario possono variare in base alla zona della conchiglia. La verniciatura finale deve risultare omogenea e priva di difetti che altrimenti ne provocherebbero il distacco dal substrato metallico: infatti eventuali irregolarità del rivestimento possono portare a danneggiamenti della conchiglia durante la colata, distacco della vernice i cui frammenti ceramici vengono incorporati nel getto, contatto diretto tra conchiglia e metallo liquido e necessità di fermare la produzione per ripristinare il rivestimento. Le manutenzioni durante l'uso della conchiglia sono possibili ma difficoltose, infatti richiedono un determinato tempo durante il quale la conchiglia non lavora, oltretutto i punti riparati sono spesso più sensibili a nuovi fenomeni di usura rispetto al rivestimento iniziale.

Vi sono pochi studi accademici sulla caratterizzazione delle vernici come quello di Hamasaiid A. (2007) e Mitter C. et al. (2000): le procedure di verniciatura industriali sono infatti frutto della sola esperienza di operatori e produttori. Per queste ragioni in questo lavoro si è cercato di creare una base di studio per caratterizzare il comportamento delle vernici, osservandone il comportamento sia in condizioni di usura che di stress termico, al fine di ottimizzarne l'utilizzo in fase di produzione industriale. In

particolare l'analisi del comportamento ad usura di un substrato verniciato può fornire dettagli su quelle che sono le problematiche ed i punti critici che portano al fallimento dell'effetto protettivo del rivestimento. A tal proposito sono stati elaborati una serie di esperimenti volti allo studio dell'adesione della vernice al substrato, la sua resistenza ad usura e il comportamento al variare dei parametri di prova (condizionamento in temperatura, materiali abrasivi diversi), di cui verrà approfondito lo svolgimento nelle pagine successive.

2.3.2 Composizione e morfologia

Le vernici, come detto in precedenza, sono a base di acqua e polveri ceramiche e la loro composizione varia in base all'applicazione: la vernice va quindi scelta non solo in base alla tipologia di colata e lega utilizzata ma anche in base alla zona della conchiglia in cui andrà applicata.

La composizione della vernice influisce sulle caratteristiche del rivestimento quali la refrattarietà, la struttura sviluppata dal rivestimento, la finitura superficiale del getto, le capacità di distacco del getto e la resistenza all'usura della vernice stessa.

Ogni vernice ha tre componenti di base che possono variare in natura in funzione del tipo di vernice:

- **Filler:** polveri refrattarie (TiO_2 , talco, mica, silice in polvere, ossido di ferro, allumina) che garantiscono l'assenza di reazioni chimiche alla temperatura di colata ($650\text{-}800^\circ\text{C}$). La dimensione e forma delle particelle è curata ai fini di ottimizzare lo scambio termico nel modo desiderato e la finitura superficiale della vernice, ovvero del getto ottenuto.
- **Legante:** silicati di sodio con rapporto $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ controllato; possono essere usati anche certi tipi di argilla o amido.
- **Fluidificante:** acqua; la diluizione va fatta prima dell'applicazione, il rapporto tra parte solida e acqua varia in base al metodo di applicazione e alla morfologia del rivestimento che si vuole ottenere.

Composizione e granulometria delle polveri hanno una notevole influenza sulla morfologia del rivestimento poiché vanno ad incidere sulle capacità refrattarie, sulla finitura superficiale e sull'efficienza complessiva della vernice, inteso come tempo massimo di durabilità e di mantenimento delle sue proprietà intrinseche senza che si verifichino segni di usura.

La refrattarietà del rivestimento è data sia dalla scarsa conducibilità termica degli elementi che la compongono, sia dalla struttura tipica che vanno a formare, ossia una struttura a lamelle, interposte a cavità che inglobano molta aria nello strato del rivestimento [Figura 2.1]. Questa struttura può essere più o meno fine in base alla composizione della vernice, ma dipende soprattutto dalla percentuale di acqua contenuta nella miscela, dalla temperatura e dal metodo di applicazione.

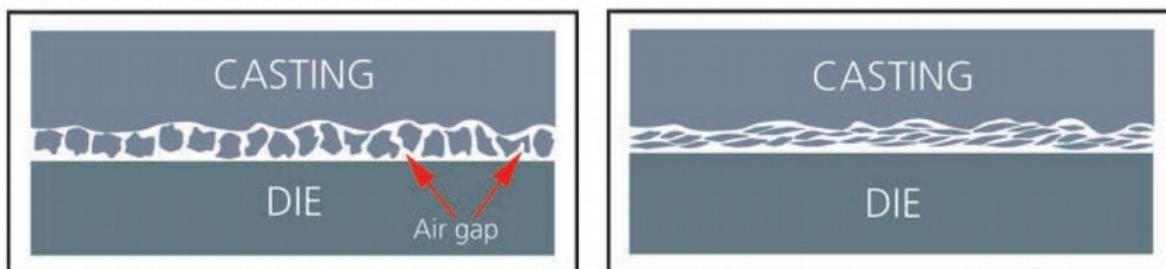


Figura 2.1: morfologia schematizzata del rivestimento più grossolano e di quello più fine. Foseco Int. Limited, Dycote manual, vedi bibliografia.

La finitura superficiale del getto dipende invece fortemente dalla rugosità del rivestimento, il quale è influenzato in primo luogo dalla granulometria delle polveri in sospensione, ma anche dal metodo di applicazione. Modalità di stesura manuali, come quella a pennello, creano accumuli irregolari di vernice ed acqua che, date le alte temperature di applicazione, danno superfici molto irregolari e pessime finiture superficiali ma anche ottima refrattarietà; l'applicazione con pistole a spruzzo permette una distribuzione più omogenea e regolare, particolarmente adatta a zone del getto che necessitano di una buona finitura superficiale.

2.3.3 Caratteristiche e proprietà

In base alle loro caratteristiche chimiche e fisiche, i rivestimenti influenzano i parametri di processo: tali proprietà vanno tenute in conto al fine di ottimizzarne il loro impiego nel processo produttivo.

Controllo del flusso di calore durante la colata

Applicando il rivestimento in modo adeguato si può promuovere la fluidità della lega nelle zone dove deve restare fluida a lungo come le materozze e agevolare il riempimento del getto in punti critici della figura come rientranze strette e sezioni sottili.

I principali fattori che influenzano il flusso di calore nello stampo sono i componenti di base della sospensione verniciante ed il metodo di applicazione della vernice: essi infatti definiscono spessore e morfologia dello strato finale ottenuto. Questi fattori possono essere regolati per ottimizzare le caratteristiche del rivestimento in base alla zona di applicazione in modo da garantire il miglior flusso di calore per le dinamiche di solidificazione ottimali. Ad esempio nelle zone in cui è necessario che la lega rimanga liquida più a lungo, come le materozze e il canali di ingresso, si applica la vernice a pennello ottenendo uno strato spesso e irregolare che riduce il flusso di calore, invece nelle zone che richiedono solidificazione più rapida la vernice viene spruzzata a pistola dando luogo ad un rivestimento più fine e sottile, il cui spessore definirà l'effetto refrattario complessivo.

Variando questi fattori si può aiutare il riempimento di zone critiche, come dettagli a sezione sottile, agevolare la solidificazione direzionale della microstruttura nelle zone più massive e aiutare a mantenere le materozze e il canali di ingresso più caldi rispetto al resto del getto. Questi contributi aiutano molto a ridurre i difetti da ritiro e quelli

generati per solidificazione prematura della lega liquida, agevolando il riempimento ottimale del getto.

Hamasaiid A. (2007) riporta uno studio sull'influenza dei parametri di processo sul coefficiente di scambio termico della vernice. Questo studio identifica lo spessore dello strato di vernice applicato come il principale fattore di influenza sul flusso di calore, molto più importante della composizione stessa della vernice, che invece ha influenza in modo consistente i fenomeni di trasmissione del calore secondari, dovuti al riempimento della conchiglia da parte delle riserve di metallo fuso contenuto nei canali di ingresso durante il primo ritiro da solidificazione, con picchi secondari di calore estratto dal getto che variano intensità e localizzazione in base al materiale del rivestimento.

Controllo del flusso di metallo fuso

Il rivestimento agevola il riempimento della conchiglia promuovendo lo scorrimento della lega fusa; la scorrevolezza del fuso è promossa inoltre dalla scarsa bagnabilità della vernice e dalla superficie irregolare del rivestimento refrattario.

Una maggiore rugosità della superficie riduce l'area di contatto con la lega fusa, in tal modo vengono a formarsi dei vuoti tra le asperità dovute all'alta tensione superficiale del liquido, riducendo lo scambio di calore e aumentando lo scorrimento della lega. La superficie molto irregolare agisce inoltre rompendo costantemente il film di ossido di alluminio che si forma all'interfaccia tra metallo fuso e conchiglia, migliorando la fluidità della colata e impedendo solidificazioni locali.

Una problematica rilevante che riguarda questo parametro è l'usura della superficie verniciata: a questo proposito si rende necessario riverniciare di sovente le aree più critiche e monitorare la vita della conchiglia per determinare quanti cicli di colata può sopportare lo strato di vernice.

Agevolare il distacco del getto

Lo scarso contatto all'interfaccia tra la lega fusa ed il rivestimento promuove il distacco del getto già durante la fase di solidificazione, quando si hanno i ritiri della lega solidificata, in fase di raffreddamento. La lega di alluminio mostra una tendenza molto minore nell'aderire al rivestimento ceramico rispetto che sulla superficie metallica della conchiglia, su cui avvengono invece fenomeni di adesione e/o metallizzazione importanti. Questo aumenta di molto la vita della conchiglia, riducendone l'erosione e l'usura per adesione, evitando danneggiamenti del getto e la contaminazione della lega fusa.

L'estrazione del getto può essere ulteriormente facilitata con l'uso di distaccanti a base di grafite applicati sulla superficie della conchiglia o inglobati nella vernice stessa (vedi Foseco Int. Limited, Dycote manual). Questi prodotti tendono a consumarsi velocemente e ad accumularsi nelle valli delle asperità superficiali, quindi un uso non appropriato può creare molti problemi secondari.

Migliore finitura superficiale

Come già accennato in precedenza, per migliorare le caratteristiche estetiche dei getti si possono applicare vernici che garantiscono finiture più fini in aree della figura non critiche, dove il riempimento è assicurato anche se la fluidità della lega non è ottimizzata. Al contrario, in zone dove la lega deve mantenersi fluida più a lungo come

canali di colata e le materozze in genere, la finitura superficiale non rappresenta un problema.

Le zone critiche della figura, come aree sottili e sporgenze strette, che richiedono buona finitura ma anche lega più fluida per un riempimento completo possono essere rivestite con strati più spessi di vernice a granulometria fine, così da garantire un buon compromesso tra esteticità del getto e fluidità della lega. È importante per ogni area della conchiglia identificare la priorità tra fluidità della lega e finitura superficiale per raggiungere l'ottimizzazione del rivestimento.

Durata operativa del rivestimento

Aumentare la vita del rivestimento è di grande interesse al fine di ottimizzare la produzione e diminuire i tempi di fermo macchina necessari alla manutenzione. Questo fattore è influenzato dal metodo e dalle condizioni di applicazione della vernice, dal refrattario della miscela e dal tipo di agente legante; ad esempio è fondamentale che quest'ultimo resista ad alte temperature ma anche agli sbalzi termici notevoli che si hanno in fase di colata e al successivo raffreddamento del getto. In quest'ottica, il silicato di sodio ha la notevole capacità di diventare più resistente alle alte temperature ad ogni ciclo di colata, promuovendo una lunga vita del rivestimento.

Per quanto concerne il metodo e la temperatura di applicazione della vernice, una corretta temperatura permette l'aggrappaggio ottimale della componente ceramica. Una temperatura troppo bassa porta invece lo strato applicato a trattenere eccessiva umidità, con successivo distacco dello strato verniciato durante le colate a causa dall'evaporazione improvvisa dell'acqua, con frammentazione del rivestimento per piccoli fenomeni esplosivi locali. D'altro canto temperature troppo alte portano a un'evaporazione istantanea e violenta al primo contatto tra vernice e conchiglia, la quale non permette alle particelle di formare uno strato compatto e lasciando un rivestimento distaccato e polveroso, facile da rimuovere.

Anche il rapporto di diluizione ha un ruolo fondamentale nel dare le giuste proprietà alla vernice, con grande influenza sulla durata operativa in produzione: troppa poca acqua darà un debole aggrappaggio tra vernice e conchiglia, ma troppa acqua renderà il rivestimento più liscio, meno isolante e con peggiore effetto fluidificante, aumentando l'umidità residua che può dare distacchi improvvisi o criccatura dei rivestimenti.

Difettosità comuni e problematiche

Le difettosità più comuni possono essere introdotte durante l'esecuzione della verniciatura, per questo motivo l'esperienza dell'operatore è essenziale per ottenere un risultato ottimale. Zone poco omogenee o che hanno già subito ritocchi in fase di preparazione possono dare vita a danneggiamenti nel getto o nel rivestimento, con conseguenti problemi di qualità in produzione. Limitare al minimo i difetti di verniciatura è quindi cruciale per ridurre il più possibile problemi sul getto e sulla conchiglia.

Un problema più difficile da affrontare è l'effetto erosivo del flusso di lega fusa con conseguente usura della vernice dovuta all'estrazione del getto. Questi fenomeni di norma formano difetti localizzati del rivestimento in aree preferenziali della conchiglia, come i restringimenti dei canali di ingresso e la punta degli estrattori. Conoscendo le caratteristiche delle aree critiche in cui si formano i difetti, questi possono essere

prevenuti verniciando con attenzione tali aree e controllandole nei cicli di colata successivi, in modo da poter fare manutenzioni tempestive all'insorgere dei difetti.

L'aspetto forse più critico è la resistenza alla fatica termica: infatti i continui cicli di colata, solidificazione ed estrazione del getto espongono la vernice a gradienti termici ciclici abbastanza intensi; ciò porta alla formazione di piccole fratture in aree critiche, ad esempio nelle zone curve, e promuove il distacco della vernice in presenza di irregolarità dello strato, come gocce o bolle d'aria irregolari. Per migliorare la resistenza termica si deve scegliere una vernice adeguata per il ciclo produttivo, che verrà applicata con particolare attenzione, evitando di produrre irregolarità eccessive. Come nel caso dei difetti da usura, si possono individuare le aree critiche dal punto di vista termico così da eseguire verniciature specifiche in modo da poter identificare subito eventuali difetti o manutenzioni necessarie.

2.3.4 Principali criticità

La verniciatura è eseguita a mano da un operatore preparato che però non può garantire una verniciatura identica per ogni conchiglia, anche dello stesso componente. Molti passaggi sono regolati dalla conoscenza ed esperienza riguardo una determinata conchiglia, come la localizzazione di zone critiche e delle aree che necessitano più o meno refrattarietà, e all'abilità manuale di chi esegue la verniciatura.

Questo porta a una non uniformità tra diverse conchiglie e ad un'alta probabilità di accumulare difetti casuali come gocce generate da schizzi, che restano sporgenti, zone di vernice troppo sottili o spesse, aree fresate e poi riverniciate più sensibili all'usura e difetti simili. In particolare le aree fresate e riverniciate sono problematiche perché possono dare luogo a distacco parziale o totale dell'aggrappante, con perdita della sabbatura iniziale della conchiglia e scarso ancoraggio del successivo strato di vernice.

Altri problemi dello strato refrattario si verificano durante il ciclo di vita della conchiglia: il passaggio della lega fusa ha un effetto erosivo mentre il distacco del getto e i gradienti termici inducono notevoli sforzi nel rivestimento che con il tempo ne possono modificare la rugosità e procurare distacchi della vernice.

L'effetto di erosione dovuto alla lega fusa è localizzato nei punti dove il flusso è più intenso, come le strozzature tra materozze e figura ed in aree con curvature più drastiche [Figura 2.2 e 2.3]. Questi distacchi di vernice possono essere prodotti da cause diverse, come l'effetto abrasivo o la presenza di difetti preesistenti, ma danno sostanzialmente gli stessi problemi: incorretto riempimento della figura, in particolare in zone critiche come sezioni sottili o rientranze, danneggiamento della conchiglia consumata dal passaggio della lega.



Figura 2.3: Difetto della verniciatura in corrispondenza di un estrattore



Figura 2.2: Difetto in corrispondenza di un area della figura sensibile al flusso di metallo.

3. Pratica Industriale, Materiali e Metodi di Laboratorio

3.1 Applicazione della vernice

Nel caso studiato la verniciatura è stata eseguita tramite un apparato composto da pistola spray, un serbatoio di vernice installato direttamente sulla pistola e l'impianto ad aria compressa collegato al sistema per ottenere la vaporizzazione. L'ugello della pistola è regolabile e l'operatore può sfruttare la variazione dell'ampiezza e intensità del cono vaporizzato per ricoprire zone difficili da verniciare, come anse e rientranze, così da applicare diversi spessori di vernice in base alla necessità.

Come si può intuire, la modalità di verniciatura segue alcuni concetti base simili per ogni conchiglia, tuttavia gran parte dei parametri di applicazione variano a seconda della figura in funzione della conoscenza della conchiglia e delle sue criticità di riempimento, usura e termiche previste. Molto è lasciato all'esperienza dell'operatore: si può intuire quindi che ogni conchiglia sarà verniciata in modo unico, con alta probabilità di avere zone disomogenee o difetti localizzati diversi da conchiglia a conchiglia, anche per conchiglie uguali. Per evitare che queste difformità nella verniciatura diano problemi, l'operatore può concentrarsi su aree della conchiglia dove è nota la presenza di difetti, prestando particolare attenzione al loro ricoprimento. Inoltre, per ridurre le possibili irregolarità superficiali fin da questa fase, un operatore particolarmente attento presterà attenzione anche ad eventuali spruzzi erronei o ricoprimenti insufficienti, ritoccando dove necessario il rivestimento per uniformare la superficie.

Procedura per la verniciatura delle conchiglie

Temperatura ideale 180°-220°

Si inizia con la preparazione dei materiali: le vernici sono messe nei fusti appositi, diluite con acqua e trasferite nei serbatoi delle pistole per la spruzzatura con precisi rapporti di diluizione.

La conchiglia con la figura completa di canali di colata e materozze viene sabbiata per favorire l'aggrappaggio della vernice e poi ripulita da eventuali residui con aria compressa.

Per iniziare la procedura di verniciatura, la conchiglia è riscaldata con fiamma a metano fino ad arrivare alla temperatura ottimale per la verniciatura. Essendo la conchiglia un blocco di acciaio massivo, una volta scaldato mostra una considerevole inerzia termica mantenendo tale temperatura a lungo. La temperatura della conchiglia è di norma controllata tramite un termometro a infrarossi, tuttavia per misure più precise può essere usata una termocoppia a contatto, modello YC-747U, tipo K con sensibilità di $\pm 1^\circ\text{C}$.

Come prima fase si applica l'aggrappante con l'apposita pistola a spruzzo; lo strato deve essere uniforme su tutta la parte utile della conchiglia, ovvero canali di colata, materozza e figura. Le parti strette o con rientranze accentuate vanno verniciate con particolare cura per evitare ricoprimenti incoerenti. Per far ciò, l'operatore può regolare l'ugello avvicinandosi alla conchiglia quanto necessario a ricoprire la cavità problematica. Eventuali sbavature esterne ai canali in cui passerà il metallo fuso saranno

ripulite prima dell'inizio produzione, per garantire un accoppiamento ottimale tra le varie parti.

La vernice aggrappante fa da tramite tra il metallo della conchiglia e la vernice isolante, e nonostante essa non vada direttamente in contatto con il metallo fuso deve essere applicata con cura, perché da essa dipende l'adesione ottimale della vernice alla conchiglia.

Finito il primo ricoprimento viene passata nuovamente la fiamma sulla conchiglia per far evaporare tutta l'acqua della vernice ed evitare il ristagno di umidità residua. In caso contrario, l'eventuale umidità residua evaporerebbe in modo violento alla prima colata, portando ad un distacco od alla criccatura locale della vernice fin dal primo ciclo di produzione.

Si passa poi all'applicazione della vernice refrattaria a granulometria fine, con particolare attenzione nel mantenere lo strato applicato con spessore omogeneo su tutta la figura del pezzo. Eventuali zone con schizzi o aree più sottili o inspessite vanno livellate con una apposita fresa e riverniciate, a discrezione dell'operatore. Questa operazione può creare aree maggiormente soggette ad usura quindi è bene cercare di ottenere un rivestimento omogeneo già alla prima passata. Un secondo riscaldamento alla fiamma favorirà lo conchiglia in temperatura ed asciugare l'asciugatura della vernice.

Come ultimo passaggio, viene spruzzata una vernice maggiormente refrattaria nelle aree di materozze e canali, oltre che nelle zone critiche della figura, cioè quelle particolarmente sottili o incavate. Le zone caratterizzate da un difficile riempimento sono identificate dall'ufficio tecnico e dall'esperienza dell'operatore, pertanto l'osservazione del comportamento di conchiglie precedenti unita ad i dati sulle colate difettose sono molto utili a definire quali possono essere i punti più critici. Le materozze che dovranno fare da riserva di metallo fuso durante i primi ritiri sono le ultime a dover solidificare: per questo viene aggiunto un ulteriore strato di vernice refrattaria a pennello; questa assume una conformazione molto irregolare a causa della rapida evaporazione dell'acqua dallo spesso strato applicato. La morfologia così ottenuta porta ad una refrattarietà ottimale ma ad una pessima finitura superficiale che però non risulta problematica in quanto si verifica in una parte del getto che verrà scartato.

Per conservare il rivestimento e la conchiglia nelle condizioni ottimali si mantiene il sistema in temperatura fino all'inizio dei cicli di colata. Oltretutto, anche durante la messa in produzione e la manutenzione la conchiglia va sempre mantenuta calda, per evitare shock termici all'acciaio e al rivestimento. Eventuali raffreddamenti a temperatura ambiente seguiti da riscaldamento alla temperatura di mantenimento sono deleteri per la resistenza alla fatica termica del rivestimento.

Terminata la fase di verniciatura, prima della messa in produzione della conchiglia, si esegue un'accurata pulitura delle zone di accoppiamento e dei canali di ventilazione della conchiglia. Questo evita fuoriuscite di metallo da aree non ben accoppiate e permette il riempimento ottimale delle zone critiche in cui sono posizionati gli sfoghi per l'aria. Vengono pulite anche le eventuali portate d'anima, il tutto per garantire il miglior accoppiamento delle due metà della conchiglia in colata ed evitare bave e difetti che minerebbero l'accuratezza dimensionale del pezzo oltre che la sicurezza degli operatori.

Dopo aver rifinito il rivestimento della conchiglia si può avviare il processo di colata che segue una modalità ciclica con i seguenti passaggi:

1. Inserimento a mano di eventuali anime in sabbia, preparate precedentemente, e di perni in acciaio, se necessario, per la produzione di cavità interne al getto. Si procede poi alla chiusura manuale della conchiglia.
2. L'operatore preleva dal forno di attesa la lega fusa con un mestolo refrattario nella quantità necessaria al completo riempimento della forma ed effettua la colata nella conchiglia.
3. Avviene la solidificazione del getto; il tempo di permanenza nella conchiglia è preimpostato e calcolato per avere il miglior compromesso tra un breve ciclo di produzione e la sufficiente solidificazione del getto per l'estrazione.
4. La conchiglia viene aperta e il pezzo espulso dalla figura mediante gli estrattori della conchiglia e prelevato dall'operatore;
5. Il componente viene sterrato se conteneva anime, tagliato e sbavato per rimuovere le materozze e sabbiato prima di essere mandato alle lavorazioni meccaniche per la rifinitura dei dettagli. Poi si controlla l'integrità del pezzo e le difettosità per il controllo qualità

Essendo stati riscontrati dei problemi in azienda riguardanti la verniciatura che portano ad avere una vita della conchiglia inferiore alle attese, si è deciso di caratterizzare le proprietà della vernice e del suo ancoraggio alla conchiglia, per capire meglio il comportamento del rivestimento e le possibili soluzioni al distacco della vernice.

In particolare si è deciso di partire analizzando il comportamento della vernice e gli effetti abrasivi ciclici applicati tramite Taber Test, con osservazione a diverse condizioni di prova riguardanti le finiture dell'acciaio prima della verniciatura, l'uso di abrasivi diversi e l'applicazione di storie termiche che simulassero le condizioni termiche dello stampo in fase di attesa della colata ed in fase di colata. Inoltre si è adattato un test per rivestimenti termospruzzati utile a valutare la capacità adesiva della vernice al substrato.

3.2 Materiali E Metodi

Per caratterizzare il rivestimento sono state provate varie modalità di test e normative. A livello di regolamentazioni ASTM/ ISO la caratterizzazione di vernici inorganiche non è trattata, mentre è dato ampio spazio ai rivestimenti PVD e CVD ed alle vernici organiche. Le differenze tra i rivestimenti organici o PVD rispetto al caso in esame hanno spinto verso un adattamento delle normative esistenti al caso in esame.

Le possibili modalità di caratterizzazione attuabili per le superfici verniciate sono:

- Tape test;
- Taber test.

Dal momento che le vernici sono molto ben adese alla superficie e molto resistenti, ed essendo il tape test un metodo di prova basato sull'asportazione di vernice con il solo ausilio di nastro isolante (come normativa ASTM D3359-17), questa prima metodologia è stata scartata.

Al contrario, le prove all'abrasimetro Taber (Taber Test) secondo la normativa A.S.T.M. D 4060-10 (2010) si sono dimostrate adatte. Infatti, nonostante la normativa regoli le prove per vernici organiche, il Taber test è impiegabile anche per rivestimenti inorganici, in dipendenza delle mole adottate. Le prove all'abrasimetro Taber sono state effettuate a temperatura ambiente ed in seguito al condizionamento termico dei campioni. Per la descrizione del Taber Test e prove relative si rimanda al sotto paragrafo 3.1.2. in temperatura i campioni verniciati prima del test di abrasione. Un'altra normativa adattata al caso è la A.S.T.M. C 633-13 (2017) che descrive una prova per testare la forza di adesione di rivestimenti termospruzzati. Inoltre è stata fatta un accurata caratterizzazione visiva delle superfici di usura e dell'interfaccia tra rivestimento e supporto, assieme a molte misure di rugosità superficiali e spessore del rivestimento.

3.2.1 Osservazione del rivestimento: morfologia e composizione

Come indagine preliminare, al fine di comprendere morfologia e composizione del rivestimento in esame, è stata effettuata un'osservazione dell'interfaccia tra vernice e acciaio (39NiCrMo4) via microscopia ottica ed elettronica per le osservazioni morfologiche e via SEM-EDS per valutazioni composizionali semi-quantitative.

Per l'osservazione dell'interfaccia si è appositamente realizzato un campione impiegando la lega 39NiCrMo4 opportunamente verniciata. Il campione, tagliato con la troncatrice metallografica per espone l'interfaccia, è stato inglobato a caldo con resina epossidica e sottoposto alla comune preparazione metallografica impiegando carte abrasive (da 80 a 2400) sino alla silice colloidale, che garantisce una finitura superficiale media di 0.3 μ m.

Ottenuta la lucidatura ottimale il campione è stato prima osservato al microscopio metallografico (modello Leica Mef 4M) tramite il software apposito (Leica Qwin standard) e poi sottoposto a processo di doratura, per renderlo conduttivo e adatto all'osservazione al SEM. L'esame al SEM è stata affiancata a una analisi EDS composizionale, attraverso una valutazione lungo una linea della variazione degli elementi chimici presenti nell'interfaccia ed una mappatura degli elementi su un area più vasta di campione.

3.2.2 Taber test e misurazioni risultati

Il Taber test è una prova di abrasione eseguita su campioni a forma di disco. Lo strumento consiste in due mole (misura standard, modello H-22, molto abrasivo) che gravano sul campione con un peso noto: il disco è posto in rotazione con velocità definita per un numero di giri scelto dall'operatore. Durante la prova i detriti volatili di vernice vengono rimossi sia per evitare che essi si impastino sulle mole che per un fattore di salute dell'operatore che potrebbe inalarli a fine prova.

I campioni usati sono nove dischi di acciaio per conchiglie del diametro di 10 centimetri, spessi 6 millimetri e con un foro centrale di 10 millimetri di diametro per consentirne l'inserimento in macchina, segnati con la lettera A e numerati da 0 a 8.

Sui dischi sono state realizzate tre diverse finiture superficiali con l'obiettivo di valutarne l'interazione con la vernice:

- Su un terzo del disco è stata mantenuta la stessa finitura che si ha dopo la fresatura dell'acciaio che normalmente prepara la superficie alla sabbiatura;

- Un secondo settore è stato sabbiato con sfere in vetro da 70-120 μm con la sabbiatrice dei laboratori del politecnico di Alessandria ottenendo una finitura particolarmente fine;
- L'ultima parte è stata sabbiata direttamente in azienda con la normale finitura impiegata sulle conchiglie.

Ultimate le finiture superficiali sui tre settori, i campioni sono stati verniciati con la stessa procedura descritta in precedenza per le conchiglie. Una considerazione importante è che essendo i campioni molto più sottili delle conchiglie, essi hanno richiesto riscaldamenti alla fiamma più frequenti per mantenere la temperatura necessaria alla verniciatura. Inoltre, due dei nove campioni in fase di verniciatura hanno mostrato un substrato iniziale non uniforme e sono quindi stati raschiati con fresa a testa rotante e riverniciati (come da normale procedura precedentemente illustrata). Questo ha portato ad avere due campioni con rivestimento decisamente più irregolare, ma che tuttavia simula il comportamento della vernice dopo eventuali correzioni/riprese sulla conchiglia.

I campioni sono stati suddivisi in gruppi in base alle modalità di prova:

- A0, A6, A8 sono stati testati con mole standard H-22 da Taber test, molto abrasive, subito dopo verniciatura a temperatura ambiente, senza ulteriori condizionamenti termici;
- A4, A5 sono stati testati subito dopo verniciatura a temperatura ambiente con mole in lega di alluminio e silicio realizzate su misura per il Taber, per osservare il comportamento ad abrasione al contatto diretto con la lega di interesse;
- A1, A7 sono stati entrambi condizionati per 8 ore in forno a 400°C per simulare la temperatura più bassa a cui lo conchiglia permane durante la produzione. A1 è stato testato con mole di alluminio mentre A7 con le mole standard H22;
- A2, A3 sono stati condizionati per 8 ore a 750°C per simulare la temperatura di colata.

Tutti i campioni sono stati testati in condizioni di prova di: peso 0,5 kg, velocità 90 rpm, cicli di 100 giri per arrivare a 500 giri totali, cioè cinque cicli completi. Prima e dopo i cicli di usura sono state valutate sia la rugosità che l'aspetto della fascia abrasa tramite stereomicroscopio e foto macroscopiche.

Lo spessore del rivestimento è stato valutato sui campioni prima e dopo i cicli di abrasione, valutando le altezze locali delle piste abrase tramite il rugosimetro. Di seguito sono descritte le procedure e gli strumenti usati per queste valutazioni.

Peso dei campioni

Per valutare il materiale perso ad ogni ciclo la normativa propone tre formule basate sulla valutazione della variazione di peso tra condizione iniziale e finale:

- WEAR INDEX (I, formula in figura 3.1), è la differenza tra peso iniziale e post prova per 1000, il tutto diviso per il numero di cicli applicati;
- WEIGHT LOSS (L, formula in figura 3.2), differenza tra peso iniziale e post prova;

- WEAR CYCLE per Millimeters (W, formula in figura 3.3), calcolato come il numero di cicli necessario alla completa rimozione del rivestimento diviso lo spessore del rivestimento stesso.

La valutazione del peso dei campioni è stata problematica: le bilance di precisione a disposizione non valutavano pesi superiori ai 100 grammi quando i campioni a disco pesano più di 200 grammi l'uno. Per questo si è dovuta usare una bilancia meno accurata, modello ExplorerPro con sensibilità di $\mp 0,1$ grammo, che purtroppo non era in grado di evidenziare le perdite di peso date dai cicli di abrasione con ordine di grandezza di circa 0,01 grammi.

Nonostante le misure effettuate sui campioni sani dopo ogni ciclo di abrasione, si sono ottenuti valori poco utili ai fini della normativa usata come riferimento (ASTM D4060-10, 2010).

$$I = \frac{(A - B) 1000}{C}$$

Figura 3.2: Formula del wear Index.

$$L = A - B$$

Figura 3.3: Formula del Weight Loss.

$$W = D/T$$

Figura 3.1: Formula del Wear Cycle

I simboli contenuti nelle formule sono rispettivamente: il peso del campione prima dell'esecuzione della prova (A), il peso del campione dopo la prova (B), il numero di cicli effettuato durante la prova (C), il numero di cicli necessario a rimuovere completamente il rivestimento (D) e lo spessore del rivestimento (T).

I tre indicatori del livello di abrasione sono comunque stati calcolati, constatando il fatto che la scarsa sensibilità delle misure li rende poco indicativi delle effettive condizioni dei campioni.

Stereomicroscopio e analisi visiva

Per l'analisi visiva è stato usato lo stereomicroscopio (Leica Ms5) del Politecnico di Alessandria, un microscopio ottico adatto all'osservazione di superfici irregolari con mantenimento dei colori dell'immagine. I campioni sono stati valutati da sani e dopo ogni ciclo di abrasione a due diversi ingrandimenti (rispettivamente di 0,63x e 2,5x volte rispetto all'immagine originale) per evidenziare le caratteristiche morfologiche della superficie intonsa e delle piste di abrasione.

Dopo ogni ciclo di 100 giri al Taber test sono state prese tre immagini nelle fasce centrali, sempre all'incirca nello stesso punto delle varie finiture di ogni campione per poter ricostruire l'immagine ingrandita dell'intera pista di abrasione. Le immagini così prese a ingrandimento di 6,3 sono poi state montate con l'ausilio di un programma di foto ritocco in modo da poter confrontare facilmente le differenze tra le varie finiture, i cicli di abrasione e tra campione e campione.

Inoltre alcune delle immagini prese agli ingrandimenti di 6,3 e 25 servono a evidenziare dettagli sul tipo di abrasione, sulle tracce lasciate nelle varie condizioni e dei punti dove è avvenuto distacco o trasferimento di materiale. Riprendendo gli stessi punti per ogni ciclo di abrasione si è potuto osservare l'evoluzione di fenomeni di

danneggiamento quali il distacco della vernice, l'accumulo di materiale di riporto e l'espansione dei segni di abrasione sulle varie finiture.

Oltre alle immagini al microscopio sono state fatte anche delle foto macroscopiche dei vari campioni per inquadrare la situazione macroscopica del campione sano e la sua evoluzione dopo i vari cicli di usura.

Valutazione Spessori Rivestimento

Queste misurazioni sono state eseguite con uno strumento dell'azienda a correnti indotte chiamato Microprocessor Coating Thickness, modello DIGI-derm 2100 (gange mitutoyo) con sensibilità di $\mp 0,1 \mu\text{m}$. La procedura di misura prevede la taratura del sensore per leghe ferrose su un target standard, poi le misurazioni sono fatte appoggiando la sonda al rivestimento e applicando una lieve pressione affinché lo strumento esegua la valutazione, riportando il valore sul monitor.

Sui ogni campione, prima delle prove di usura, sono state fatte tre misure, una per ogni spicchio di finitura al fine di determinare lo spessore del rivestimento. Le misure sono state rifatte sui campioni dopo i cinque cicli di usura, questa volta prendendo tre valori per ogni finitura, quindi nove per ogni campione, trattati in termini di media e deviazione standard.

I valori iniziali e finali sono stati confrontati ricavando la percentuale di spessore perso per ogni finitura in base allo spessore iniziale medio di ogni campione, riportando i valori su un grafico per il confronto. È importante notare che alcuni campioni avevano spessori del rivestimento molto variabili da un'area all'altra, quindi per tenere conto dell'attendibilità delle medie delle condizioni di partenza è importante valutare la deviazione standard delle prime tre misure.

Rugosimetro

Si è usato lo strumento Hommel Tester T1000 (Hommelwerke) presso i laboratori di Alessandria del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) del Politecnico di Torino per valutare la rugosità superficiale dei campioni sani e dopo i cicli di abrasione. Lo strumento consiste in un tastatore micrometrico controllato da un motorino che con appositi sensori permette di valutare la rugosità e i profili superficiali con una sensibilità 1,5 micrometri.

Le misure sono guidate da computer tramite il software (Turbo Datawin-NT 1.48), dall'interfaccia è possibile definire la lunghezza della pista di misura, il Cut Off, il range massimo di misura e altri parametri. Il Cut Off è un valore definito da normativa in base ai valori di rugosità riscontrati, secondo le normative DIN EN ISO 4268 1998 e la DIN EN ISO 3274 1998, allegate direttamente al software utilizzato. La modalità di misura prevede la messa in tara dello strumento tramite posizionatori a rotella manuali e indicatore di prossimità dato dal programma. Portato il tastatore nel range di misura che a livello ottimale è intorno allo zero dell'indicatore, si dà l'avvio alla valutazione da computer; la misura viene eseguita in autonomia dallo strumento e alla sua conclusione il programma elabora automaticamente i valori di interesse.

I dati forniti per ogni misura sono molteplici, quelli di interesse sono tre:

- Valore medio Aritmetico della rugosità (R_a , formula in figura 3.5): corrisponde all'integrale sulla lunghezza della misura del modulo delle altezze valutate rispetto alla linea media, il tutto fratto la lunghezza di misura;
- Deviazione quadratica media della rugosità (R_q , riportata nella figura 3.4 come σ^2): è l'integrale sulla lunghezza della misura delle altezze valutate rispetto alla linea media elevate al quadrato, il tutto fratto la lunghezza di misura e poi posto sotto radice;
- Valore massimo di rugosità riscontrato sulla traccia (R_z): è il valore della distanza tra il punto più alto e il punto più basso riscontrati nella lunghezza della misura.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dz$$

Figura 3.5: formula del valore aritmetico medio della rugosità.

$$\sigma^2 = \frac{1}{L} \int_0^L z^2 dz$$

Figura 3.4: formula della deviazione quadratica media.

I simboli contenuti nelle formule sono rispettivamente: la lunghezza del tratto valutato (L), le altezze misurate (z).

I valori ottenuti sono stati registrati su un foglio di calcolo elettronico e confrontati tramite media e deviazione standard per facilitarne l'analisi, diversi grafici di confronto sono stati creati da questi dati e saranno esposti nel capitolo successivo. Dalle medie e deviazioni standard ottenute si è deciso di esprimere i grafici della Rugosità media Aritmetica (R_a), della sua deviazione quadratica media (R_q), del valore massimo di altezza misurato (R_z) e della sua deviazione quadratica media. Bisogna ricordarsi che R_q è un valore ricavato in modo simile a R_a e, per quanto dia indicazioni sulla sua variabilità, mantiene un andamento simile, perché ricavato dagli stessi valori con formula diversa. I grafici confrontano i valori misurati per una certa finitura su tutti i campioni per i cinque cicli a partire dalle misure fatte sul rivestimento prima delle prove di usura.

Sono state effettuate tre misure direttamente sui campioni post - verniciatura, una per ogni finitura superficiale con cut off di 2,5 millimetri, così da avere dei valori di riferimento. Inoltre è stata misurata anche la rugosità della superficie non verniciata prendendo a riferimento tre campioni, A0, A7 e A4, su cui eseguire tre misure per ogni finitura; si è scelta una pista di misura di 4,8 millimetri con range di misura di 80 micrometri e un Cut Off da normativa di 0,8 millimetri.

Dopo i cicli di abrasione si sono mantenuti gli stessi valori, tranne il Cut Off che è stato messo a 2,5 millimetri a causa del cambiamento della rugosità complessiva. Per ogni finitura si è segnato un punto verso il centro dello spicchio come riferimento per poter eseguire le misure sempre attorno alla stessa area. Sono state prese tre misure per finitura per ogni campione, dopo ogni ciclo di abrasione, così da poter confrontare la variazione di rugosità durante il processo. Inoltre per ogni finitura è stata presa una misura al confine tra la zona non interessata dall'abrasione e la banda abrasa; i valori di

rugosità ottenuti sono poco indicativi ma si è anche fatta una descrizione accurata del profilo ottenuto per poter fare un confronto della morfologia della banda abrasa.

Per avere un'ulteriore valutazione degli effetti del Taber test è stata eseguita un'ultima misura sui campioni dopo i cinque cicli di abrasione; usando uno strumento del programma sono stati valutati picchi e valli della rugosità superficiale ottenendo le aree a essi riferiti. Con una lunghezza di scansione di 15 mm (Cut Off 2,5 millimetri e range di misura 80 μm) si è coperta l'intera traccia abrasa per ricavarne il profilo. Con un apposito strumento si è poi selezionata una porzione del profilo di circa 10 ± 1 millimetri, cercando di ottenere una linea media più orizzontale possibile, su cui si sono valutate con il programma le altezze locali di interesse. In base alla linea media si sono misurate le aree locali dette negative, sottese ad essa e delimitata dalle valli, e quella soprastanti dette positive, delimitata dai picchi. Con questa modalità si sono ottenute tre misure per ogni finitura superficiale, per ogni campione, cercando di evitare zone colpite da distacchi eccessivi, poco significative della situazione generale del campione.

Le altezze locali valutate sotto forma di aree sono state rapportate alla lunghezza della pista delimitata dal misuratore e valutate come medie e deviazioni standard. Dalle prime sono stati ricavati due grafici di confronto, uno per le altezze medie positive e uno per quelle negative, comprendenti i valori per le tre finiture dopo 500 giri di ogni campione e quelli singoli dei casi sani.

4. Analisi dei risultati

4.1 Analisi morfologica e composizionale del rivestimento

Per identificare meglio il rivestimento in analisi è stata osservato al microscopio metallografico e al SEM (Scanning Electron Microscopy) il campione appositamente lucidato. L'obbiettivo era quello di vedere se la morfologia rispettava le descrizioni fatte dal produttore e di capire quale fosse la possibile composizione della vernice, in quanto le brochure riportano solo i possibili componenti in termini generali.

Le immagini prese con i due microscopi hanno evidenziato una netta differenza tra l'aggrappante e lo strato di vernice refrattario superficiale, evidenziando come questa ottimizzi le loro diverse funzioni:

- L'aggrappante mostra un aspetto compatto e granuloso, con particelle di diverse dimensioni disperse nel legante e senza bolle d'aria intrappolate. Questa vernice si insinua nelle irregolarità del substrato lasciate dalla sabbiatura e fornisce un ancoraggio solido e più affine alla vernice refrattaria superficiale;
- Lo strato refrattario è di colore bianco trasparente ed è meno visibile di quello aggrappante, che è di un vistoso colore rosso [Figura 4.1] ed è visibile solo in alcune immagini riprese al SEM. In queste si nota solo un'ombra irregolare e scagliosa depositata sopra la banda compatta di aggrappante. È evidente la struttura a lamelle interposte a sacche d'aria descritta dal produttore e responsabile della refrattarietà del rivestimento stesso. La struttura presenta molte irregolarità e difetti come buche o agglomerati più densi di lamelle; questi evidenziano la natura eterogenea del rivestimento dovuta all'applicazione manuale dello stesso.

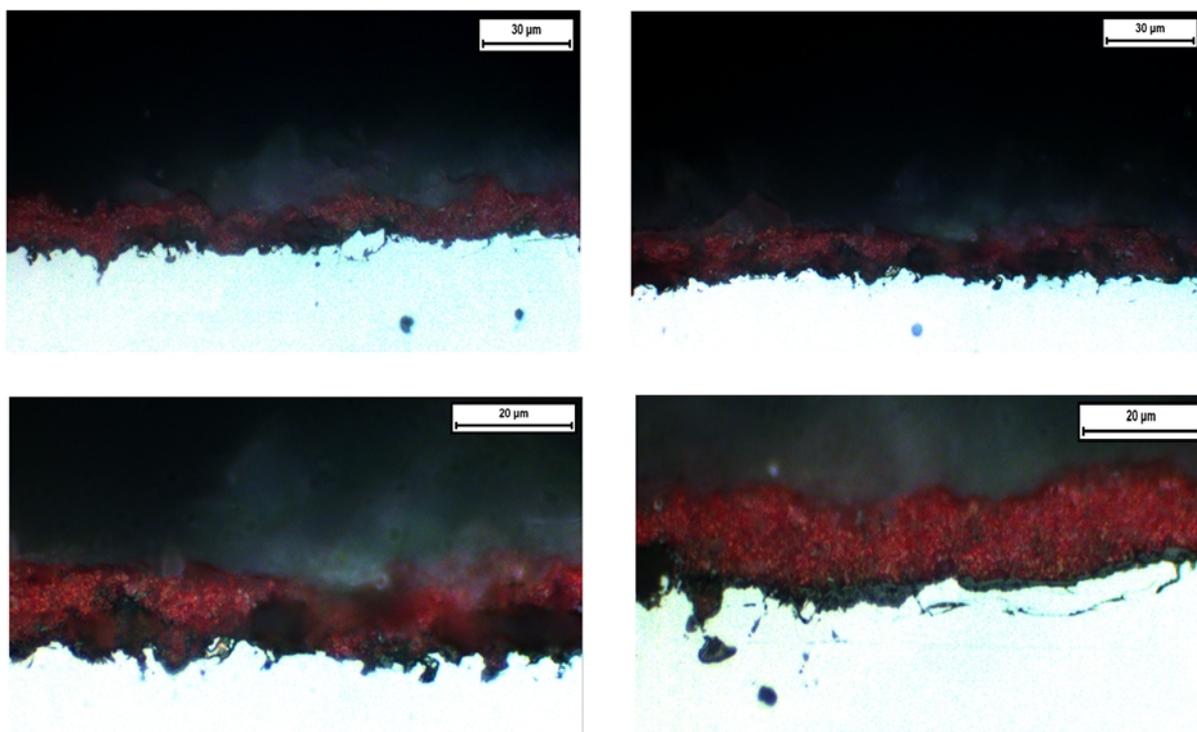


Figura 4.1: Struttura dell'interfaccia ripresa con il microscopio metallografico.

Oltre all'osservazione diretta dell'interfaccia e del rivestimento si sono svolte alcune analisi EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) per identificare la composizione generale della parte refrattaria e dell'aggrappante. Le analisi sono state fatte sia su linee che attraversavano entrambi gli strati che su aree localizzate, è anche stata fatta una mappatura degli elementi presenti su un'area più vasta.

Come si può vedere dalla mappa [Figura 4.2 e 4.3] si notano diversi elementi adatti a formare ossidi refrattari stabili al contatto con la lega di alluminio quali: Silicio, Alluminio, Magnesio, Sodio e Calcio. Le concentrazioni di questi variano a seconda dello strato analizzato, si vede come l'alluminio si concentri nella parte refrattaria, dove si può ipotizzare vi sia alta concentrazione di Allumina. Sempre nello strato refrattario si ha molto Magnesio, invece il calcio si concentra nello strato aggrappante, dove vi è anche del ferro non legato alla presenza del acciaio, probabilmente sotto forma di ossidi affini con esso.

Presenti in tutto il rivestimento sono invece il Silicio, il Potassio e il Sodio oltre a un'elevata presenza di ossigeno che conferma il fatto che tutti questi elementi sono presenti come composti ossidati. C'è da notare che la percentuale di carbonio e in parte quella di ossigeno sono da attribuire al polimero che ingloba il campione e non sono da confondere con ciò che compone il rivestimento.

Si può dire che la composizione dell'aggrappante favorisca la tenuta di questa parte del rivestimento al substrato, grazie alla presenza di ossidi di ferro e di calcio, fornendo una superficie più affine allo strato ceramico successivo. In questo si concentra l'Allumina e l'ossido di magnesio che sono ottimi refrattari, resistono alla temperatura e non creano problemi di affinità con la lega. La silice è usata come composto comune alle due vernici, probabilmente per dare un effetto di continuità tra le due strutture e come refrattario di base della miscela, inerte ed economico.

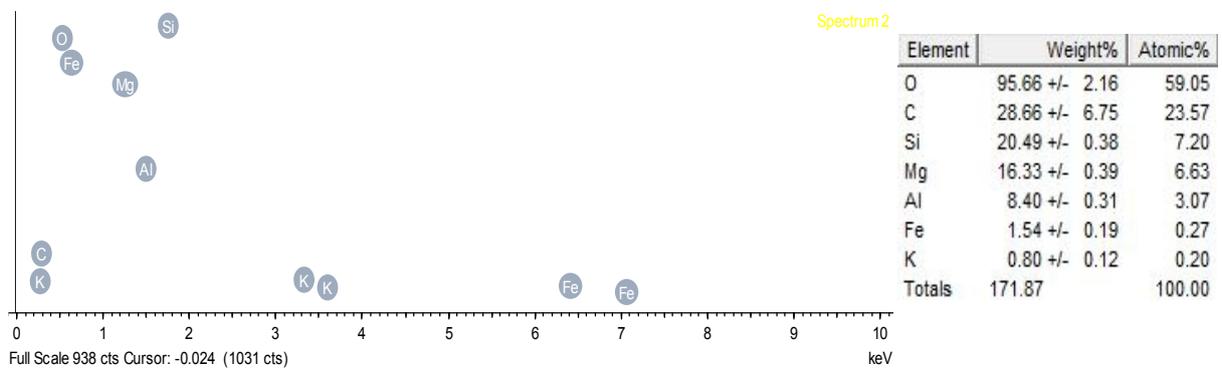
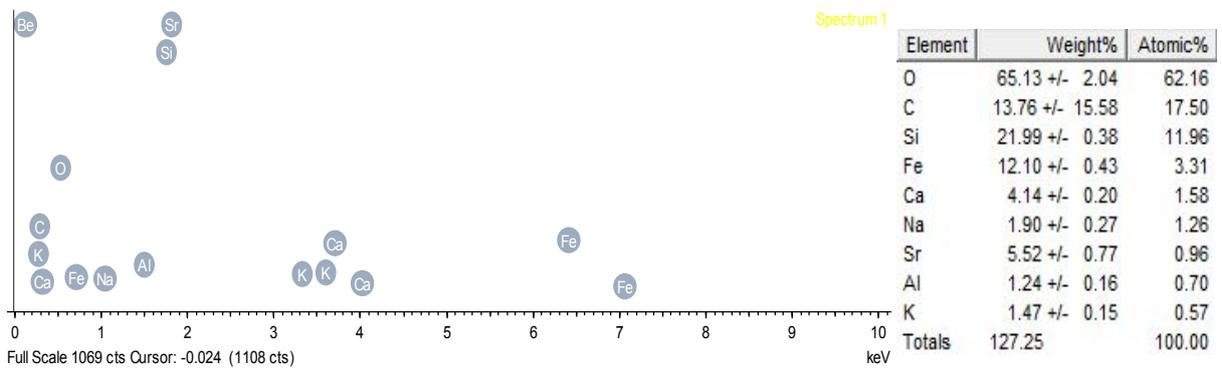
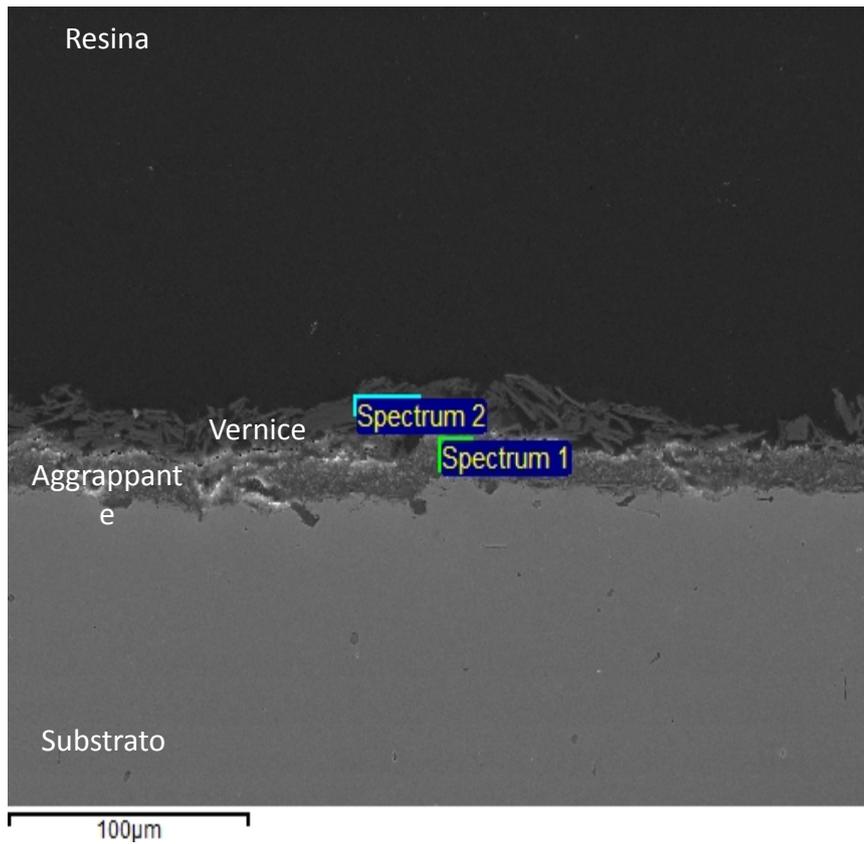


Figura 4.2: Immagine SEM e analisi composizionale EDS dei diversi strati di vernice.

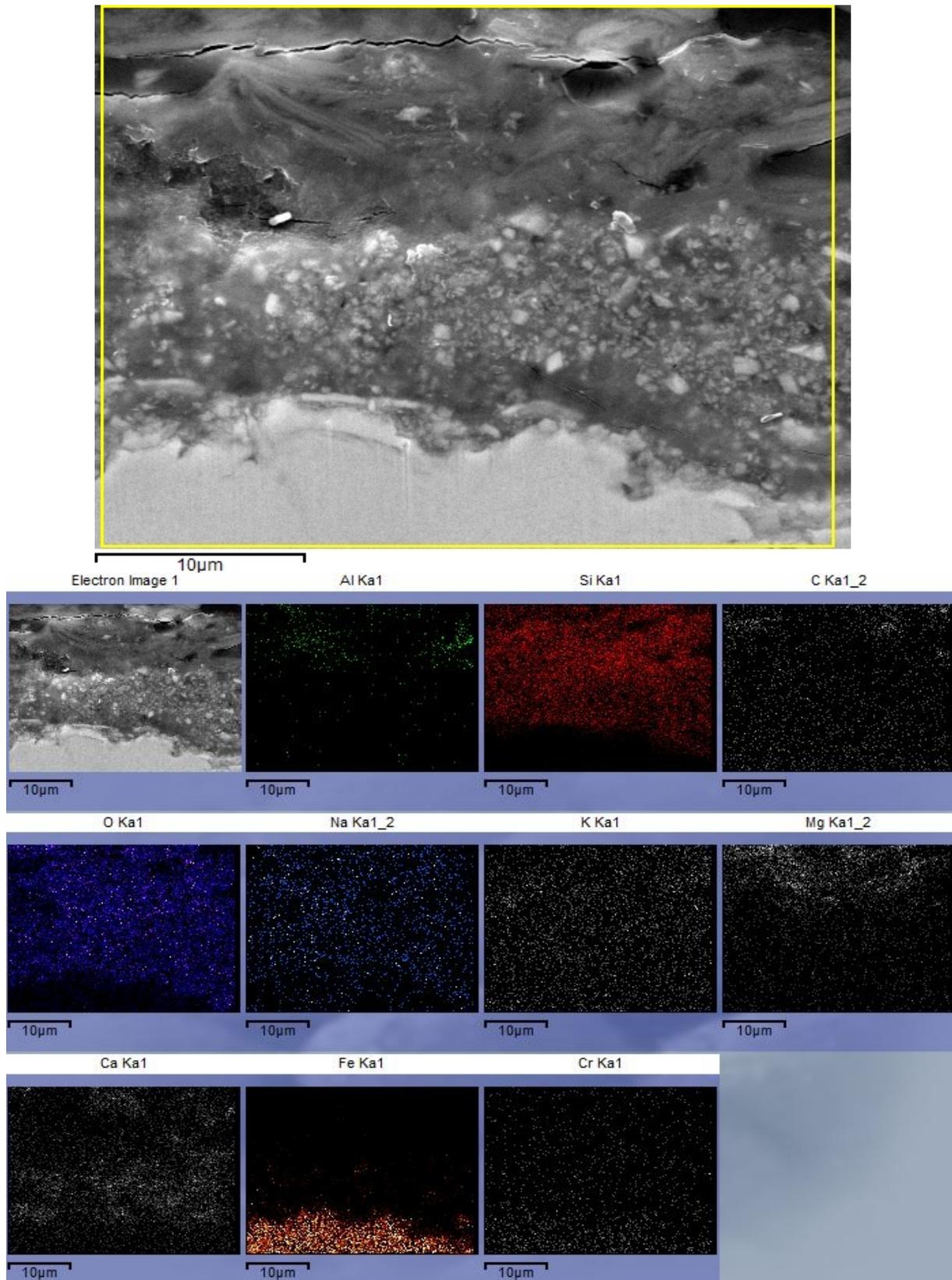


Figura 4.3: Mappatura EDS della composizione chimica di rivestimento e substrato

4.2 Taber Test

4.2.1 Analisi morfologica

Dopo ogni ciclo su tutti i campioni sono state prese delle immagini allo stereomicroscopio che evidenziassero gli effetti dell'abrasione; per ogni finitura sono state prese tre immagini, in modo da osservare l'intera banda usurata in tutta la sua larghezza. Inoltre vi sono alcuni dettagli che mostrano come si evolvono alcuni meccanismi di distacco e abrasione del rivestimento. La metodologia e gli strumenti con cui sono state prese le immagini sono descritti nel capitolo Materiali e Metodi.

Campioni pre-test

Alcune immagini dei campioni in condizioni di post-verniciatura mostrano la superficie prima dell'esecuzione dei cicli di usura; si nota subito una grande variabilità dell'aspetto superficiale tra campioni e anche tra aree diverse degli stessi campioni. In funzione di come la vernice è arrivata sulla superficie si osservano diverse morfologie:

- superficie regolare, senza discontinuità notevoli, anche se non perfettamente omogenea [Figura 4.5];
- Area con evidenti piccole conche circolari distribuite in modo casuale, sono riconducibili alle gocce in uscita dalla pistola spray che non sono state propriamente vaporizzate, sono di dimensioni variabili dai 100 ai 300 micrometri [Figura 4.4];
- Superfici irregolari con conche distorte, non più circolari, distribuite in modo casuale, danno una morfologia molto caotica, probabilmente dovuta a una spruzzatura intensa e non ben perpendicolare alla superficie [Figura 4.6].

Per quanto riguarda la fase di verniciatura, il campione A6 e A1 hanno mostrato delle problematiche. La prima fase di verniciatura si è valutata come difettosa per cui si è adottata quella che è la pratica comune da fonderia, ovvero fresatura della zona problematica e riverniciatura. Questa procedura, del tutto in linea con il normale iter in fase di produzione, va a simulare una 'ripresa' della verniciatura, come accade nelle conchiglie che vengono poste in produzione e che dopo un certo numero di colate necessitano di una nuova verniciatura in punti critici.

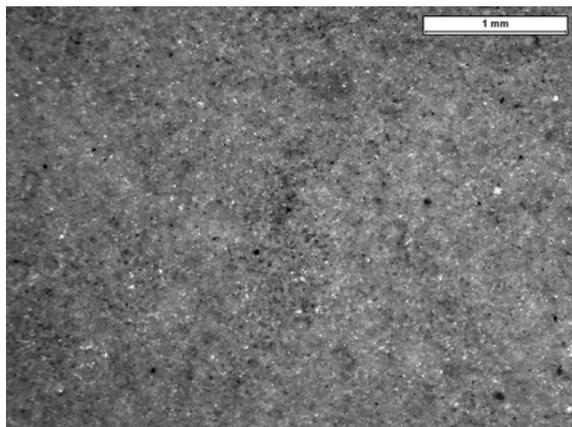


Figura 4.5: Morfologia regolare, campione A0, ingrandimento 0,63x.

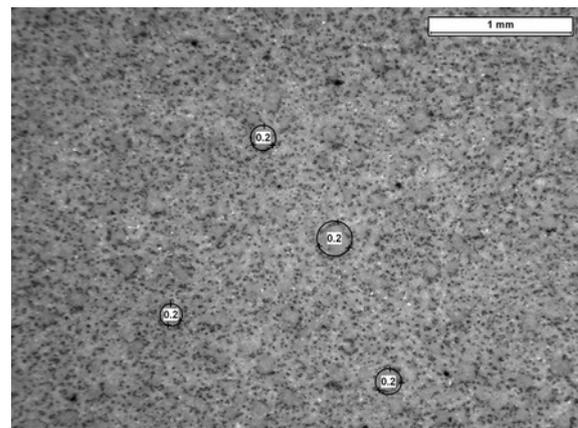


Figura 4.4: Morfologia irregolare con gocce evidenti, campione A5, ingrandimento 0,63x.

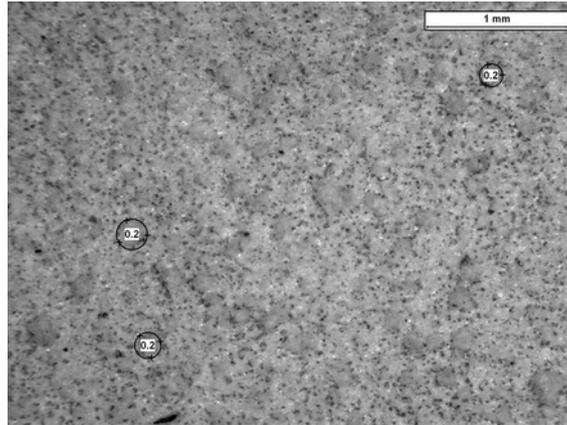


Figura 4.6: Morfologia con gocce irregolari, campione A8.

Analisi dell'usura tramite immagini

Si procederà con l'esposizione delle immagini raccolte campione per campione comprendenti le immagini macroscopiche, le fasce di usura osservate per ogni finitura con lo stereomicroscopio ed eventuali dettagli notevoli del singolo campione. Per coerenza sono stati esposti i campioni in modo da esporre di seguito quelli trattati con le stesse mole e storie termiche simili. Nell'appendice A sono state raccolte le immagini non incluse nel documento per maggiore chiarezza di esposizione: vi sono esposte tutte le foto macroscopiche e le fasce di usura ottenute sui campioni, oltre a diversi dettagli dei fenomeni di usura.

Dopo l'esposizione dei singoli campioni si è riportato un confronto tra campioni per mettere in luce le differenze tra prove effettuate con mole standard e di alluminio e tra campioni trattati termicamente e non trattati.

Di seguito per alleggerire la trattazione verranno indicate come finitura liscia quella ottenuta dopo fresatura (rugosità da $0,84\mu\text{m}$), come finitura fine la sabbatura operata nei laboratori di Alessandria (rugosità da $0,86\mu\text{m}$) e come finitura grossa quella della F.O.M.T. (rugosità da $1,94\mu\text{m}$).

Campione A0 - senza condizionamento termico, mole standard

A livello macroscopico si possono notare diversi comportamenti per le tre finiture e una buona resistenza del rivestimento ad abrasione, non vi sono marcate bande di usura preferenziale se non in fasi avanzate del processo di abrasione [Figura 4.7]. Dopo il primo ciclo si nota subito una banda schiarita dall'usura con segni più marcati nella finitura liscia, più leggeri in quella fine mentre quella grossa mostra segni visibili solo allo stereomicroscopio [Figura 4.8]. Questo andamento viene mantenuto durante il secondo ciclo con la comparsa di crateri molto marcati nella zona a finitura liscia e più sporadici nelle altre due finiture. Inoltre si nota nella zona fine un distacco localizzato del rivestimento, riconducibile a un difetto già presente nella verniciatura, che espone il substrato [Figura 4.9].

Al terzo ciclo di usura la zona liscia subisce un netto cambiamento, il colore della fascia abrasa vira verso il rosso rosato dell'aggrappante a causa dell'assottigliamento dello strato refrattario e i crateri iniziano a mostrare il metallo sottostante [Figura 4.10].

La zona grossa e fine continuano a mostrare segni di usura contenuti, soprattutto come estensione dei danni riportati dalla zona liscia, probabilmente a causa del trascinarsi dei detriti. Il quarto e quinto ciclo mantiene questo andamento con ulteriore assottigliamento della zona liscia e crescita dei distacchi che arrivano al substrato che ora si localizzano soprattutto sulla fascia esterna della banda usurata [Figura 4.11]. Il difetto presente in zona fine si è in parte esteso e il metallo esposto è stato abraso dalle mole ed ora ha un aspetto sfaccettato e lucido [Figura 4.12], a parte questo non vi sono crateri nelle finiture grossa e fine che arrivano fino al metallo.

Alla fine dei cinque cicli si nota una certa uniformità del fenomeno di usura nelle varie finiture: si nota che la finitura liscia è quella che ha mostrato la peggiore resistenza ad usura con assottigliamento e distacchi del rivestimento più consistenti fin dal primo ciclo. La finitura fine ha avuto un comportamento intermedio mentre quella grossa ha mostrato la resistenza migliore, evidenziando però una sensibilità ai detriti della finitura confinante [Figura 4.13]. Inoltre il distacco localizzato nella zona fine mette in luce la sensibilità ai difetti del rivestimento, in quanto il distacco è avvenuto quasi subito e in un'area che poi si è mostrata resistente a questo tipo di fenomeno.



Figura 4.7: immagini macroscopiche del campione prima delle prove, a 300 giri e 500 giri.



Figura 4.8: confronto fasce dopo 100 giri in ordine si vedono la finitura fine, grossolana e liscia. Ingrandimento 0,63x.



Figura 4.9: A0, 200 giri, dettaglio difetto, Ingrandimento 0,63x.

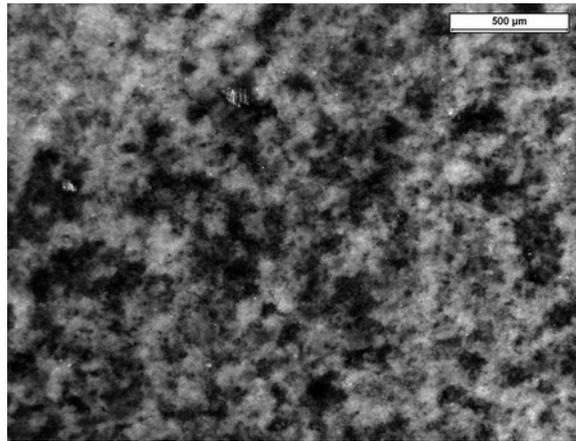


Figura 4.10: A0, 300 giri, finitura liscia, Ingrandimento 2,5x.

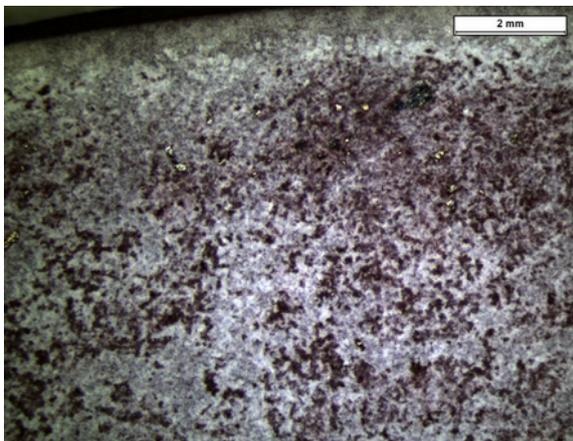


Figura 4.11: A0, 400 giri, finitura liscia, Ingrandimento 0,63x.

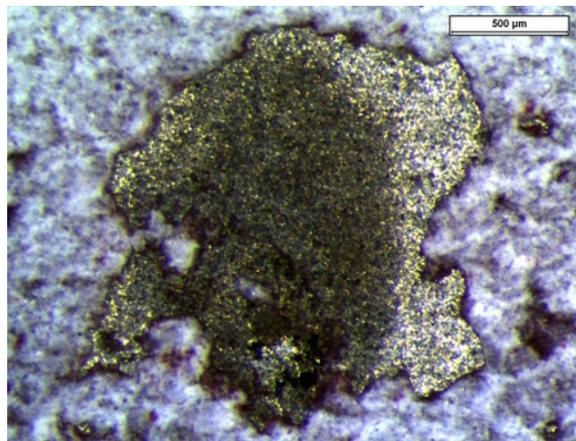


Figura 4.12: A0, 500 giri, dettaglio difetto finitura fine, Ingrandimento 2,5x.

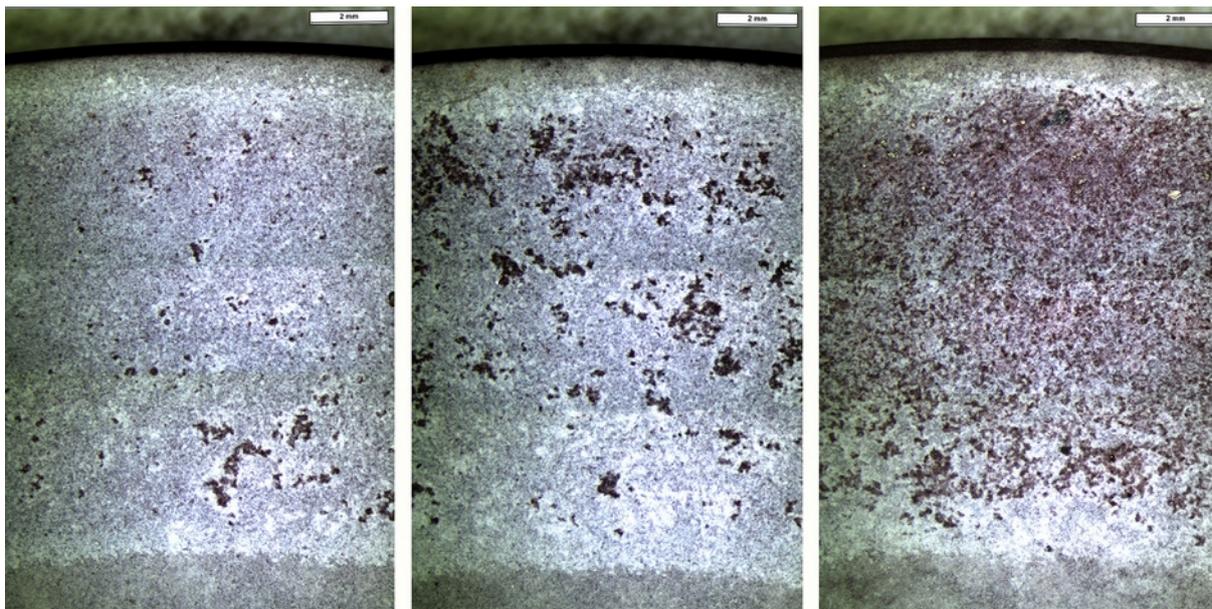


Figura 4.13: confronto fasce dopo 500 giri in ordine si vedono la finitura fine, grossolana e liscia. Ingrandimento 0,63x.

Campione A6 – senza condizionamento termico, mole standard

Il campione A6 è stato sottoposto a riverniciatura, come spiegato in precedenza. Nonostante a prima vista il rivestimento appaia uniforme, è necessario precisare che durante la fase di fresatura del primo strato di vernice solo nella zona liscia ($0.84\ \mu\text{m}$) è avvenuta la completa rimozione dell'aggrappante, mentre nelle altre aree frammenti della prima verniciatura sono rimasti ancorati al substrato ed inglobati dalla nuova verniciatura, andando a collocarsi al sotto dello strato di vernice 'nuovo', minando la compattezza finale del rivestimento.

La scarsa resistenza dello strato di verniciatura è ulteriormente comprovato dalle misurazioni di rugosità in seguito al Taber test: le misure si sono svolte solo dopo il primo e il quinto ciclo, prendendo solo una foto macroscopica dopo ogni ciclo, poiché nei cicli intermedi la vernice si presentava come frammentata e fragile, invalidando la misurazione [Figura 4.14].

Fin dal primo ciclo si è riscontrato un ampio distacco della vernice dalla zona con finitura liscia, fino ad esporre il substrato; distacco in particolar modo marcato nella zona esterna della fascia usurata [Figura 4.16]. Il distacco si estende anche alla zona a finitura fine, dove viene esposto il metallo ma anche diverse tracce del vecchio aggrappante che probabilmente ha promosso il danneggiamento del rivestimento. Al di fuori delle zone distaccate l'usura è molto più contenuta e si notano pochi segni di abrasione dove il rivestimento non era sovrapposto a quello vecchio [Figura 4.15].

Nei successivi tre cicli l'andamento è simile con crescita delle zone distaccate soprattutto nella fascia esterna della banda di usura, tanto da mostrare chiaramente il confine tra la finitura fine e grossa sotto la vernice [Figura 4.14]. Lontano dalle aree più danneggiate la finitura fine e grossa mostrano segni di abrasione minimi con solo un lieve assottigliamento preponderante verso la fascia interna della banda. Al quinto ciclo l'usura della zona liscia, prima confinato verso la banda esterna della fascia usurata,

subisce un'estensione critica su tutta la fascia con ampi distacchi e danneggiamenti [Figura 4.17 e 4.18]. Anche la zona fine subisce ulteriore esfoliazione del rivestimento anche se meno marcata, mentre la finitura grossolana mantiene un andamento dell'abrasione contenuto e regolare.

Per questo campione la riverniciatura ha agito indebolendo notevolmente la resistenza del rivestimento; la finitura fine e grossolana hanno risentito poco dei cicli abrasivi nelle zone prive di residui della vecchia verniciatura mentre sono state soggette a danni notevoli in prossimità di residui di essa. Sulla finitura liscia invece si sono osservate le maggiori criticità: nonostante non fossero presenti residui di verniciatura, la fresatura ha probabilmente agito negativamente sulla rugosità superficiale, andando di conseguenza ad impattare sull'aggrappaggio della vernice.

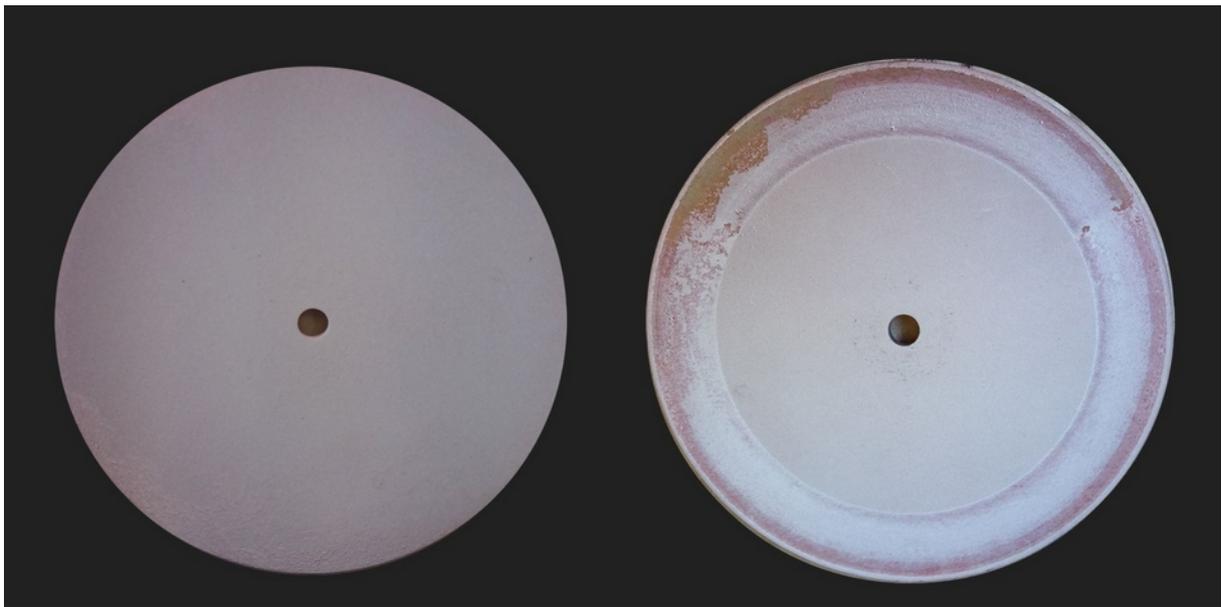


Figura 4.14: A6 immagini macroscopiche del campione prima dei test di usura e dopo 500 giri al Taber test.

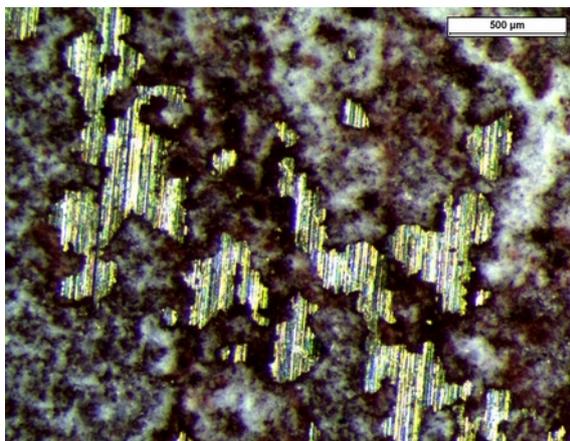


Figura 4.16: A6, 100 giri, dettaglio difetto finitura liscia, ingrandimento 2,5x

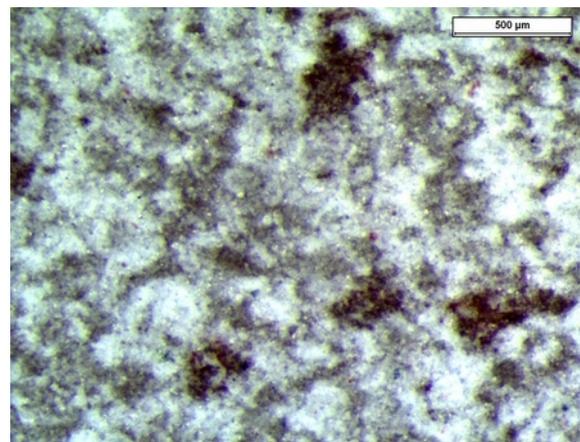


Figura 4.15: A6, 100 giri, dettaglio finitura grossa, ingrandimento 2,5x

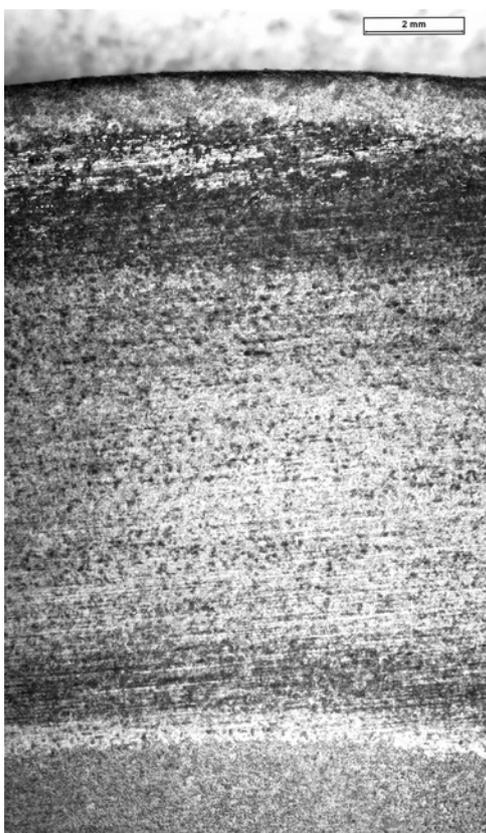


Figura 4.18: campione A6, fascia di usura su finitura liscia dopo 500 giri.

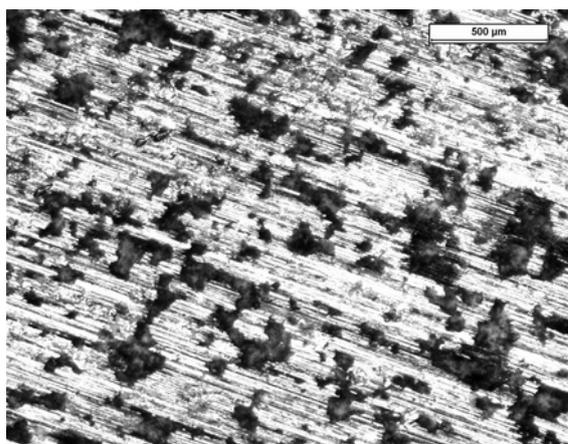


Figura 4.17: A6, 500 giri, dettaglio difetto finitura liscia, ingrandimento 2,5x

Campione A8 – senza condizionamento termico, mole standard

Il comportamento osservato è in linea con quello del campione A0, con piccole variazioni nelle dimensioni e distribuzione dei difetti, in particolare le differenze riscontrate sono riconducibili alle diversità nelle verniciature iniziali. Anche in questo campione l'evoluzione dell'usura è più marcata nella fascia esterna della zona liscia e subisce un avanzamento improvviso e notevole al terzo ciclo di abrasione. Solo dal quarto ciclo di usura si iniziano a osservare effetti più marcati sulla finitura fine e grossolana, con la comparsa di sporadici crateri che mostrano l'aggrappante, più o meno profondi [Figura 4.19].

Solo il quinto ciclo dà segni di avanzamento dell'abrasione più marcati con assottigliamento dello strato refrattario e coalescenza dei crateri formati nei cicli precedenti, l'usura in generale ha aspetto più omogeneo [Figura 4.20]. Le finiture liscia e fine in questo caso hanno mostrato un'evoluzione dell'abrasione simile, con un comportamento lievemente peggiore della finitura fine [Figura 4.21 e 4.23]. La finitura grossolana mostra sempre la migliore resistenza all'usura nelle condizioni di prova adottate [Figura 4.22].



Figura 4.19: A8 immagini macroscopiche del campione prima dei test di usura, dopo 300 giri e dopo 500 giri al Taber test.

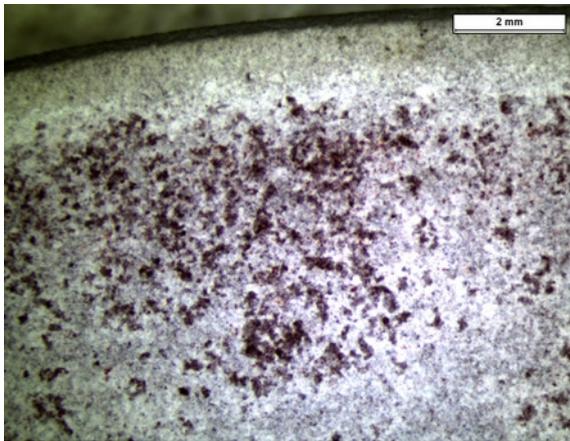


Figura 4.20: A8, 500 giri, finitura liscia, ingrandimento 0,63x.

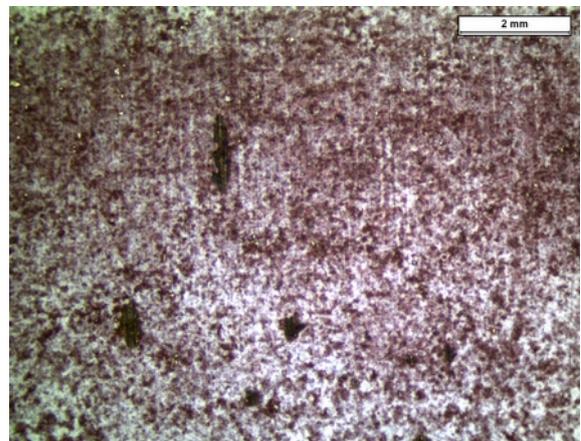


Figura 4.21: A8, 500 giri, finitura fine, ingrandimento 0,63x.

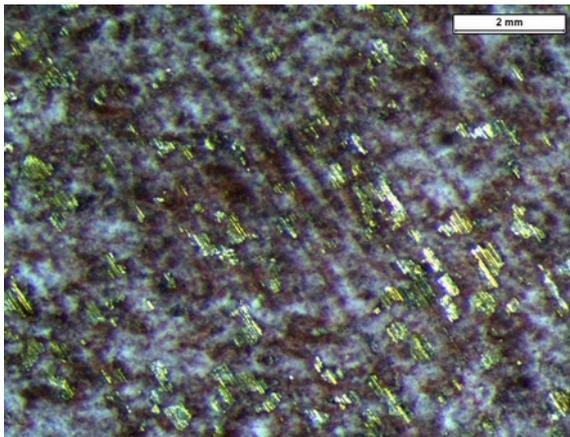


Figura 4.23: A8, 500 giri, dettaglio finitura fine, ingrandimento 0,63x.

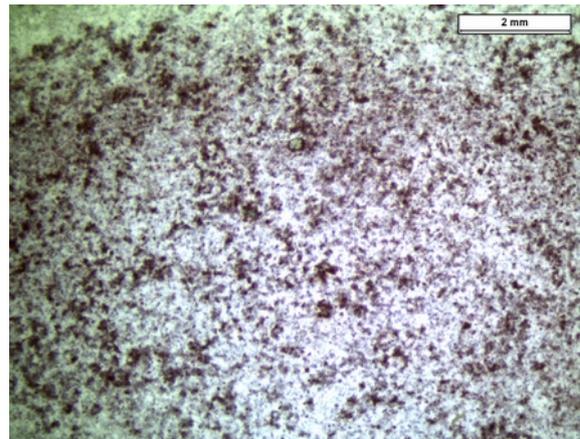


Figura 4.22: A8, 500 giri, finitura grossa, ingrandimento 0,63x.

Campione A7 – condizionamento a 400°C per 8 ore, mole standard

Il condizionamento è stato effettuato in un forno Nabertherm per trattamenti termici e consiste in un riscaldamento con mantenimento in temperatura a 400°C per 8 h, con raffreddamento in aria calma. Il campione, in seguito alla verniciatura, mostrava un aspetto uniforme con la presenza di macchie di umidità; tale aspetto è invariato in seguito al condizionamento [Figura 4.24].

Si nota fin dal primo ciclo un forte distacco nella zona con finitura liscia, con aree abrase localizzate nella banda esterna ed interna della fascia di usura con distacchi tondeggianti che mostrano il substrato metallico [Figura 4.25]. Nelle aree a finitura fine e grossolana si vedono diversi crateri irregolari, alcuni di vasta estensione, dispersi in modo casuale, altri piccoli e raggruppati verso il bordo esterno della fascia. Ulteriori cicli di Taber hanno evidenziato un avanzamento marcato dello stato di usura, con le zone a finitura fine e grossolana che mostrano assottigliamenti più estesi ma meno profondi mentre nella zona a finitura liscia si osservano cavità di dimensioni più contenute ma molto più profonde, che spesso espongono il metallo [Figura 4.26]. Si osserva un aumento dell'usura con esposizione dell'aggrappante uniforme per tutte le finiture. Il distacco del rivestimento dal metallo resta più intenso nella zona liscia dove invece l'assottigliamento valutato visivamente è meno marcato [Figura 4.27].

Dopo il quinto ciclo si iniziano a vedere distacchi che mostrano il metallo anche nelle finiture fine e grossolana, seppure molto più contenuti rispetto a quelli della zona a finitura liscia. La finitura liscia sembra resistere meglio all'assottigliamento del refrattario, tuttavia ci sono aree soggette a distacchi consistenti fino all'esposizione del metallo molto più marcati rispetto alle altre finiture superficiali, le quali mostrano segni di danneggiamento più evidenti rispetto alla zona liscia, ma minori esposizioni di metallo fino agli ultimi cicli. In generale il condizionamento ha indebolito lo strato refrattario, con la finitura grossa che riesce a mantenere meglio l'integrità, quella fine si assottiglia molto più facilmente mentre la liscia si comporta nel modo peggiore, essendo prona a facili distacchi dal substrato metallico [Figura 4.29].



Figura 4.24: A7 immagini macroscopiche del campione dopo il condizionamento e a 300 e 500 giri al Taber test.

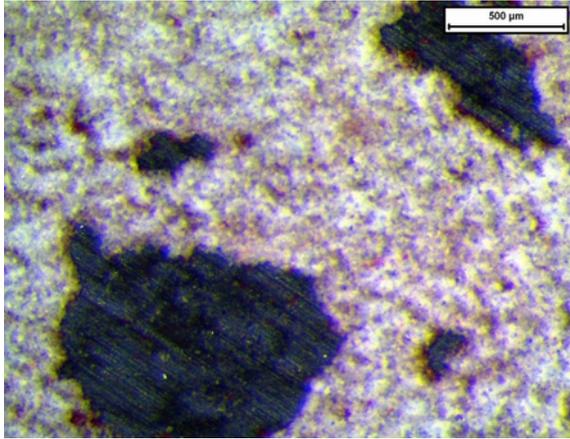


Figura 4.25: A7, 100 giri, dettaglio finitura liscia, ingrandimento 2,5x.

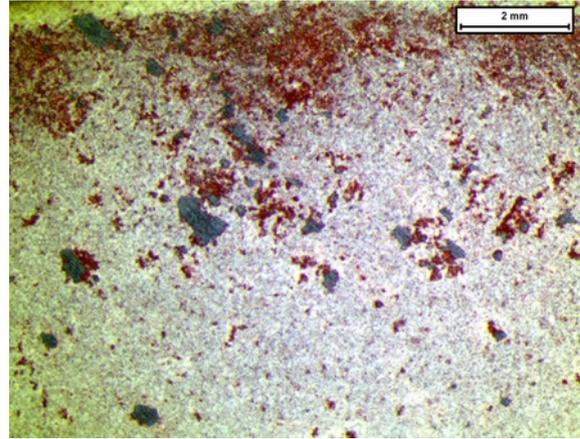


Figura 4.26: A7, 200 giri, finitura liscia, ingrandimento 0,63x.

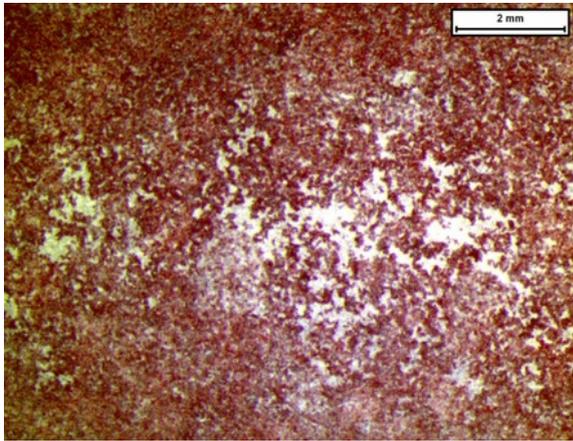


Figura 4.27: A7, 200 giri, finitura fine, ingrandimento 0,63x.

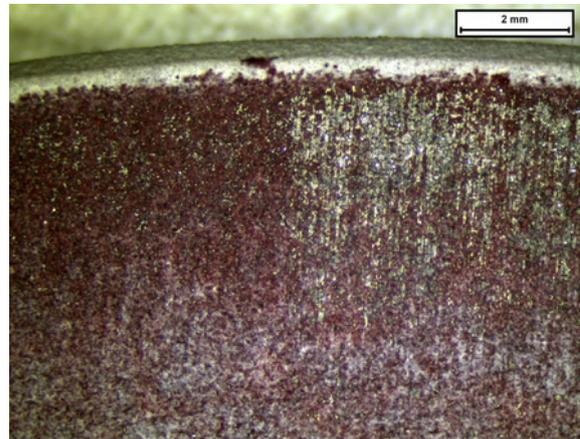


Figura 4.28: A7, 500 giri, confine finiture liscia e fine, ingrandimento 0,63x.

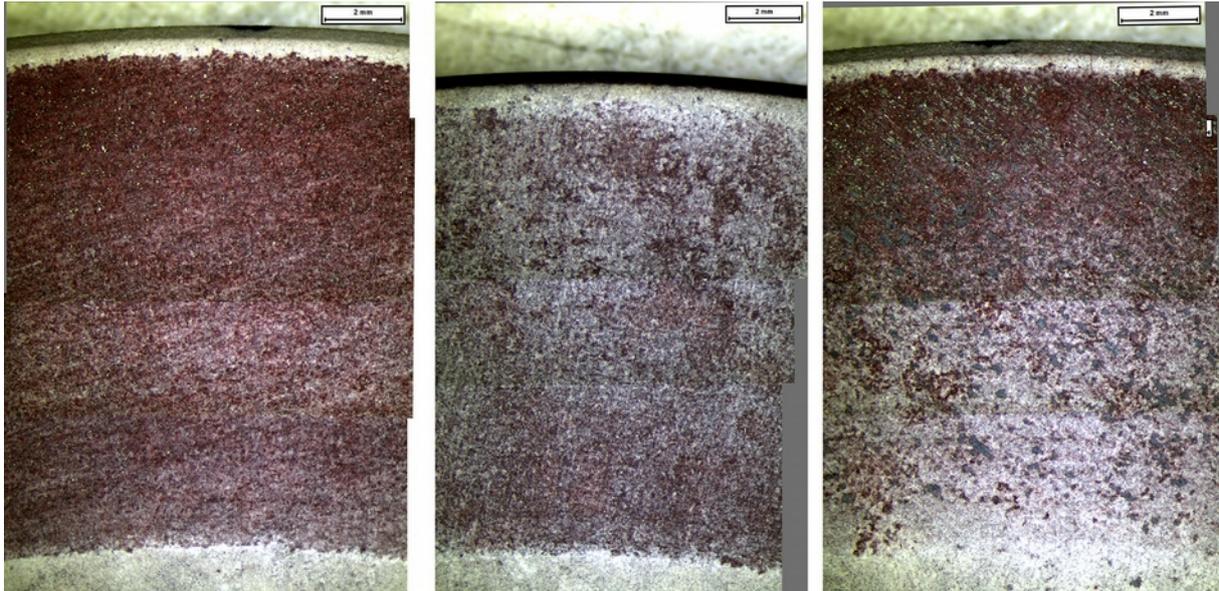


Figura 4.29: campione A7, fascia di usura su finitura fine, grossa e liscia dopo 500 giri, ingrandimento 0,63x.

Campione A4 – senza condizionamento termico, mole in alluminio

Il campione in seguito alla verniciatura presenta una zona caratterizzata da uno strato di vernice più spesso, localizzato nella zona a finitura fine, che rende il rivestimento irregolare, cosa che si può notare nella figura 4.30 sul campione nelle varie fasi in alto a destra. Inizialmente l'effetto di usura si è manifestato con una graduale usura della vernice, che si presenta visivamente piuttosto lucida, senza distinzioni evidenti a occhio nudo tra le varie finiture, ma evidenti aree più spesse dovute alla verniciatura irregolare. Solo allo stereomicroscopio si notano differenze tra le varie finiture, caratterizzate da segni lievi e simili ma orientati in modo diverso rispetto alla fascia di usura [Figura 4.31]: a macchie sparse per la finitura fine, paralleli alla fascia di usura per la finitura grossolana e perpendicolari alla fascia di usura per la finitura liscia. L'unico difetto notevole è una tacca di metallo esposto in presenza di un difetto del substrato, visibile anche ad occhio nudo [Figura 4.32].

Al secondo e terzo ciclo l'usura avanza lentamente e in modo uniforme, con lieve assottigliamento dello strato refrattario e difetti visibili solo allo stereomicroscopio sotto forma di piccoli crateri tondi che mostrano l'aggrappante [Figura 4.33]. Si inizia anche a vedere un fenomeno tipico dell'azione delle mole in lega di alluminio: l'accumulo in bande preferenziali di depositi metallici sopra il rivestimento refrattario, presenti in forma di piccoli depositi argentei localizzati nelle zone interna ed esterna della banda di usura.

Nei cicli finali di usura l'esposizione dell'aggrappante diventa visibile anche ad occhio nudo e la colorazione della fascia usurata tende verso il rosa a causa dell'assottigliarsi del refrattario. L'area caratterizzata da vernice più spessa preserva la zona a finitura fine dall'abrasione, limitandone il danneggiamento. I depositi di metallo sono sempre più estesi e spessi, segnando larghe aree nelle bande esterna e interna della fascia di usura [Figura 4.34]. In conclusione le zone a finitura liscia e grossolana

mostrano segni di usura tra loro simili, molto più blandi di quelli ottenuti con le mole H-22 [Figura 4.35] e l'unico difetto notevole è quello formatesi nei primi cicli ed evolutosi durante i successivi test [Figura 4.36].



Figura 4.30: A4 immagini macroscopiche del campione prima del test, dopo 300 giri e dopo 500 giri al Taber.

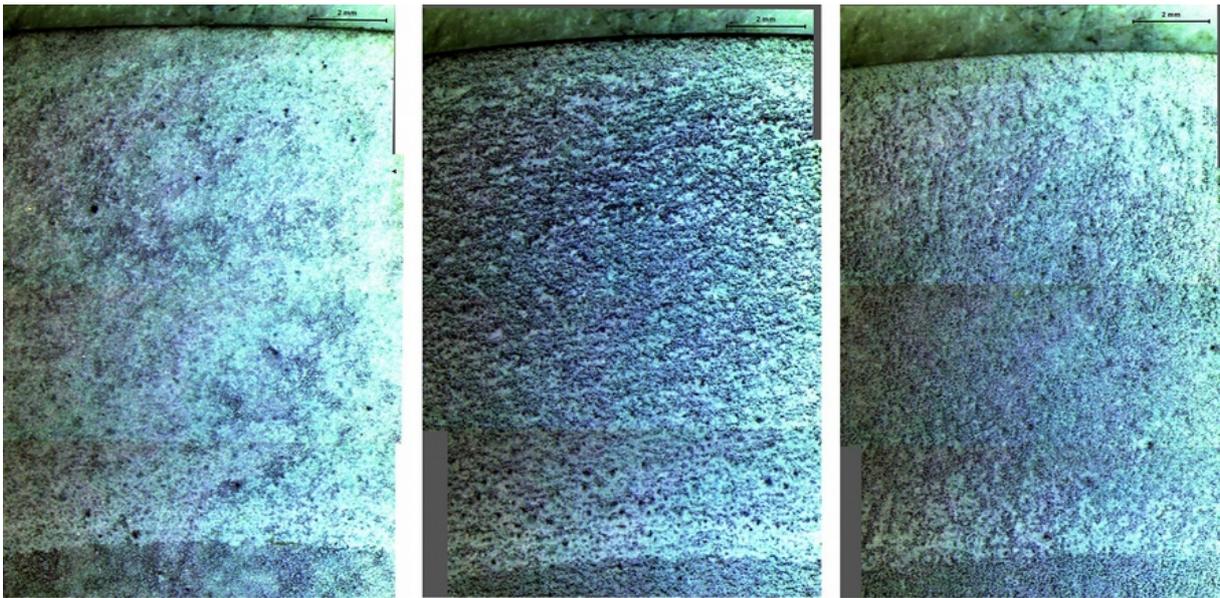


Figura 4.31: campione A4, fascia di usura su finitura fine, grossa e liscia dopo 100 giri, ingrandimento 0,63x.

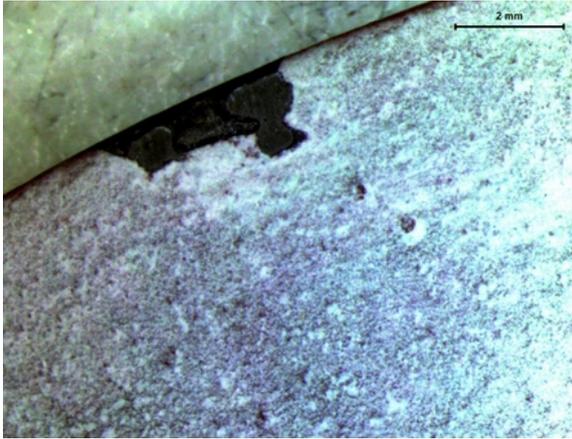


Figura 4.32: A4, 100 giri, finitura fine, ingrandimento 0,63x.

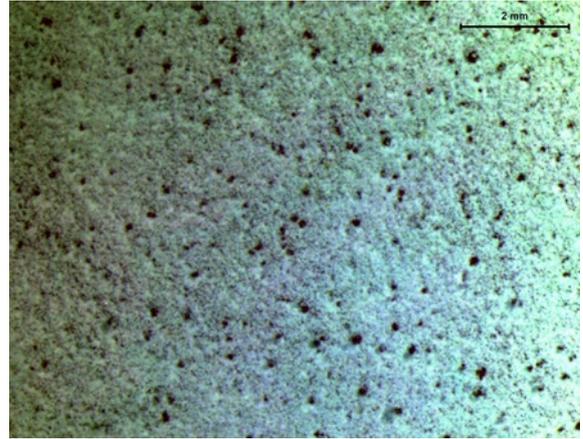


Figura 4.33: A4, 200 giri, finitura liscia, ingrandimento 0,63x.

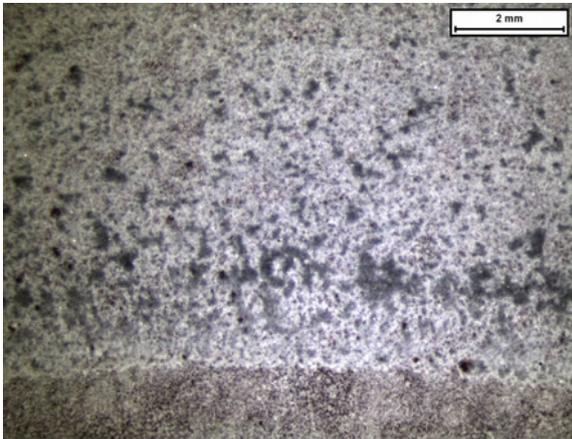


Figura 4.34: A4, 400 giri, dettagli depositi finitura fine, ingrandimento 0,63x.

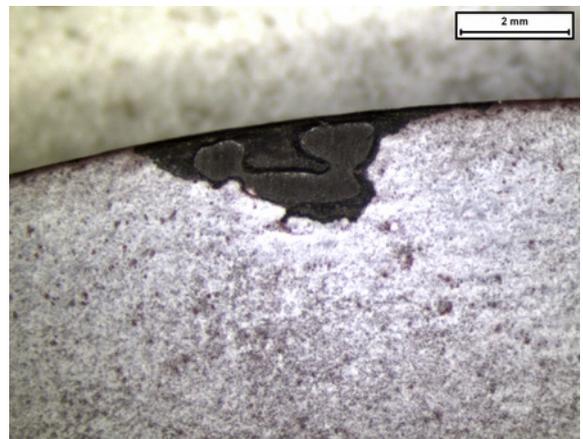


Figura 4.35: A4, 500 giri, dettaglio difetto finitura fine, ingrandimento 0,63x.

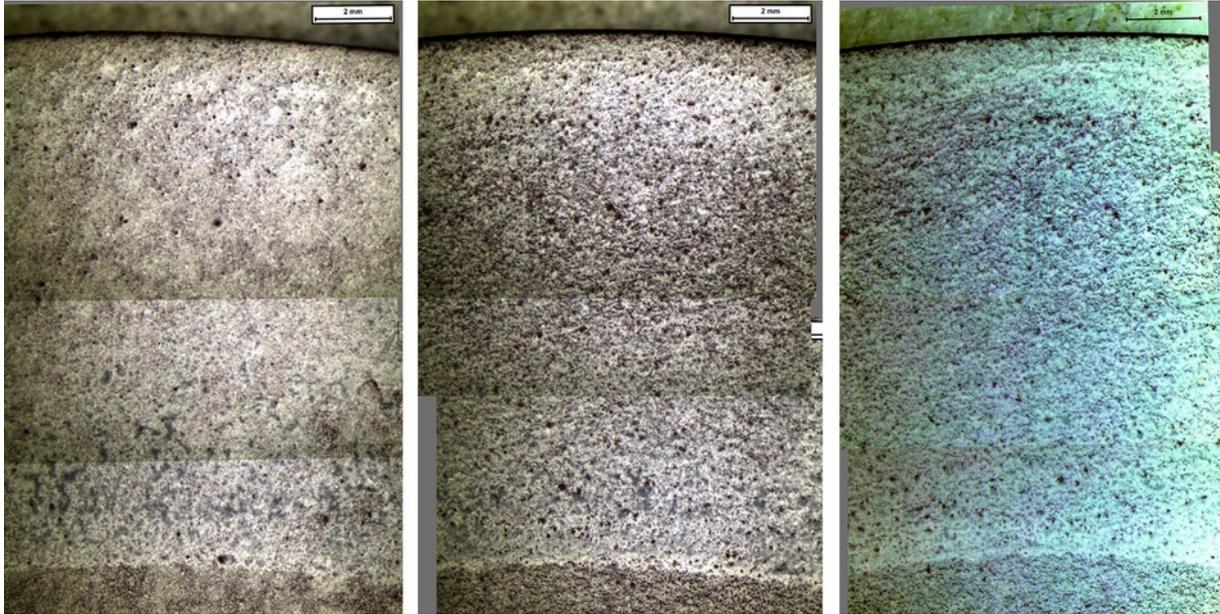


Figura 4.36: campione A4, fascia di usura su finitura fine, grossa e liscia dopo 500 giri, ingrandimento 0,63x.

Campione A5 – senza condizionamento termico, mole in alluminio

Questo disco ha una normale verniciatura, è stato trattato con le mole in alluminio per avere un confronto neutro con i campioni trattati con le mole standard. Fin dal primo ciclo il campione mostra un comportamento molto simile al campione A4 con la comparsa aggiuntiva di distacchi di vernice, probabilmente dovuti a difetti preesistenti [Figura 4.37].

L'avanzamento è simile al secondo, terzo e quarto ciclo con l'eccezione dei depositi che invece sono cresciuti di più in questo campione rispetto all'A4: si notano anche alcune rientranze nello strato refrattario che sono state riempite dal metallo delle mole [Figura 4.38 e 4.39]. I crateri che espongono l'aggrappante sono più fini e numerosi nella zona a finitura fine mentre sono più grandi e in numero inferiore in quella grossa, in quella liscia invece è difficile vederli ad occhio nudo e si osserva un generale assottigliamento. Non vi sono ancora distacchi fino al substrato metallico e i depositi di materiale trasferito dalle mole sono cresciuti notevolmente tracciando in modo marcato le bande esterna e interna della fascia di usura.

In seguito all'ultimo ciclo l'evoluzione dell'abrasione è lieve, è molto più notevole il trasferimento di materiale metallico dalle mole al campione, si nota solo una tenue colorazione rosata della banda usurata dovuta all'assottigliamento dello strato refrattario [Figura 4.40 e 4.41].



Figura 4.37: A5 immagini macroscopiche del campione prima del test, dopo 300 giri e dopo 500 giri al Taber.

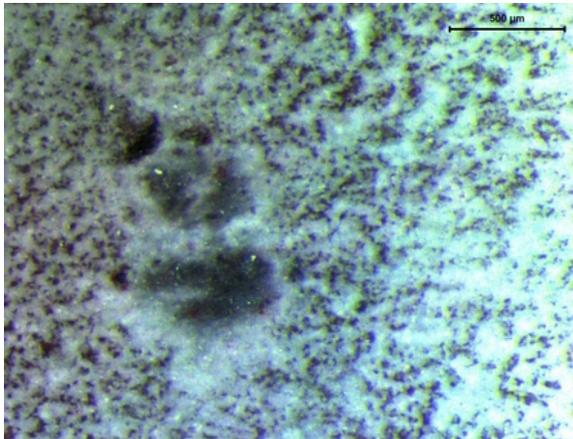


Figura 4.39: A5, 100 giri, dettagli finitura grossa, ingrandimento 2,5x.

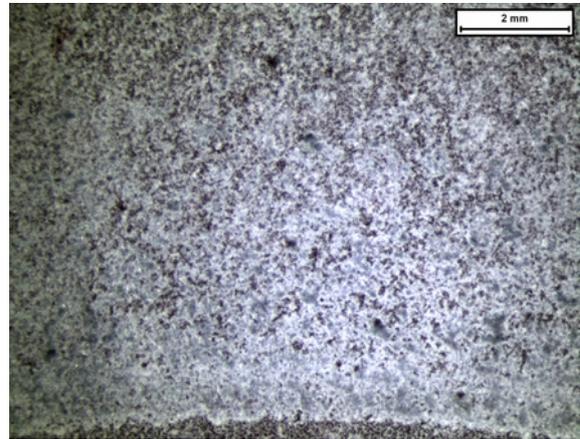


Figura 4.38: A5, 300 giri, finitura grossa, ingrandimento 0,63x.

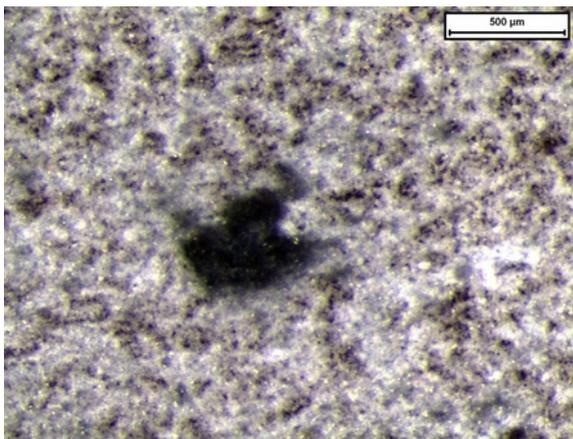


Figura 4.40: A5, 500 giri, dettagli finitura fine, ingrandimento 2,5x.

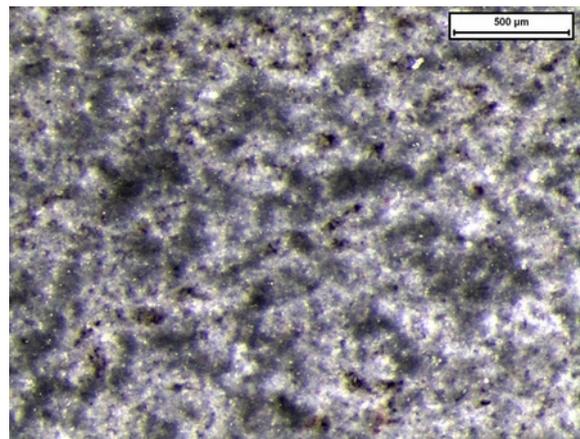


Figura 4.41: A5, 500 giri, dettagli depositi finitura fine, ingrandimento 2,5x.

Campione A1 – condizionamento a 400°C per 8 ore, mole in alluminio

Il condizionamento è stato applicato in un forno per trattamenti termici e consiste in un riscaldamento con mantenimento in temperatura a 400°C per otto ore e raffreddamento in aria. Il campione mostrava già qualche irregolarità del rivestimento prima del trattamento termico in quanto è stato fresato e riverniciato a seguito di una prima verniciatura difettosa. A seguito del trattamento si possono già notare dei distacchi sul bordo esterno della finitura liscia dove erano presenti i difetti dati dalla riverniciatura [Figura 4.42].



Figura 4.42: A1 immagini macroscopiche del campione prima del test, dopo condizionamento e 500 giri di Taber test.

Fin dal primo ciclo di usura i distacchi della vernice conseguenti al trattamento di condizionamento crescono notevolmente: tali distacchi caratterizzano la banda esterna della finitura liscia e si estendono in parte alla finitura grossolana [Figura 4.44]. Il metallo esposto da questi distacchi mostra segni di ruggine, probabilmente formatasi durante il condizionamento, e tracce di riporti bianchi che sembrano essere i detriti del refrattario usurato che hanno aderito alla superficie metallica [Figura 4.43]. Esattamente come nei casi precedenti, l'alluminio delle mole forma depositi sul campione ed in particolare sull'acciaio del substrato oltre che sul resto della banda abrasa, con dinamiche simili a quelle già viste in A4 e A5. Il resto della fascia usurata, dove non vi sono distacchi di vernice, mostra lievi cavità e solo nella zona a finitura liscia si nota una colorazione rosata dovuta all'assottigliamento del refrattario.

Nei cicli di usura successivi, lontano dalle zone che presentano i distacchi, l'abrasione mostra crateri simili ad A4 e A5 lievi e poco profondi oltre a depositi di materiale trasferito dalle mole [Figura 4.46]. I distacchi invece crescono ad ogni ciclo esponendo via via nuovo substrato, con evidenti criccate del rivestimento che si estendono dalle zone distaccate verso il rivestimento ancora adesivo. Anche sul metallo i depositi sono sempre più evidenti, sia quelli di lega di alluminio delle mole che quelli di polveri refrattarie. Inoltre si iniziano a notare le aree dove sono rimasti i residui della prima verniciatura con evidenti irregolarità del rivestimento soprastante.

Al quarto e quinto ciclo si iniziano ad osservare distacchi della vernice dovuti ai difetti introdotti in seguito alla fase di fresatura della prima verniciatura, fase in cui non

si è riusciti a rimuovere tutta la vernice. Inoltre questi difetti si distinguono chiaramente rispetto ai distacchi accresciuti già a partire dai primi cicli di usura poiché sono più netti e presentano superfici più irregolari e non arrugginite [Figura 4.45]. I distacchi iniziali del rivestimento arrivano ad estendersi fino al limite della fascia di usura, anche i depositi di materiale sul refrattario e sul metallo esposto sono cresciuti in modo consistente.

Si può notare come il condizionamento e la riverniciatura abbiano influito sul comportamento del rivestimento: l'effetto di essiccazione e lo shock termico apportato dal condizionamento, in seguito al riscaldamento e raffreddamento del campione, hanno esaltato i difetti della verniciatura, dando luogo a distacchi evidenti già prima di iniziare il test di usura. Questo effetto è stato più intenso sulle finiture lisce e fine, dovuto alle irregolarità lasciate dal primo strato di vernice applicato non completamente rimosso [Figura 4.47]. Nelle zone lontane da questi difetti marcati si ha invece un comportamento simile ai campioni A4 e A5.

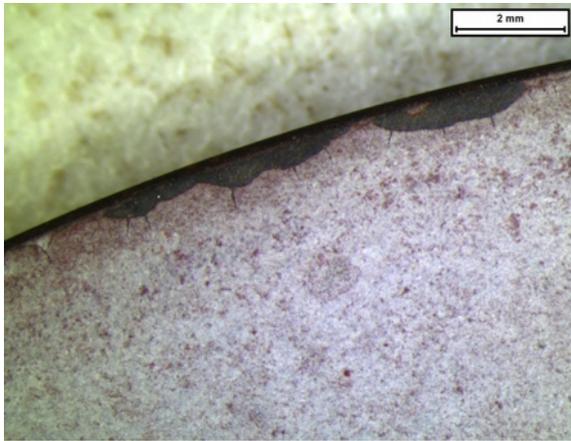


Figura 4.44: A1, 100 giri, finitura fine, ingrandimento 0,63x.

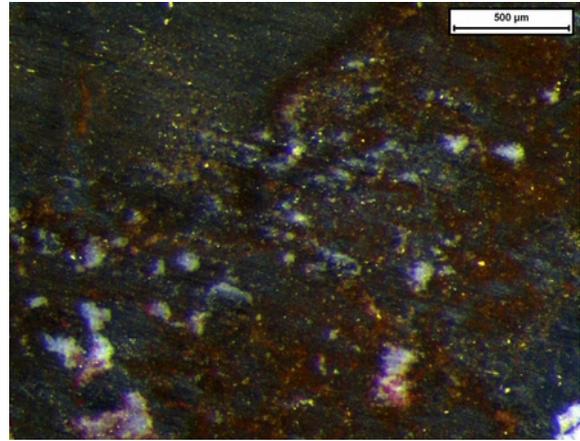


Figura 4.43: A1, 100 giri, dettagli finitura liscia, ingrandimento 2,5x.

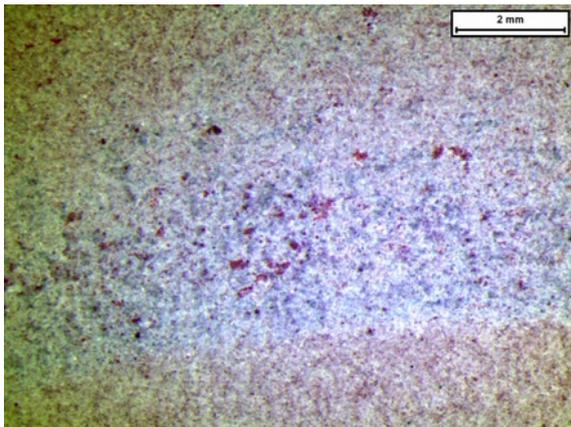


Figura 4.46: A1, 300 giri, depositi su finitura grossolana, ingrandimento 0,63x.

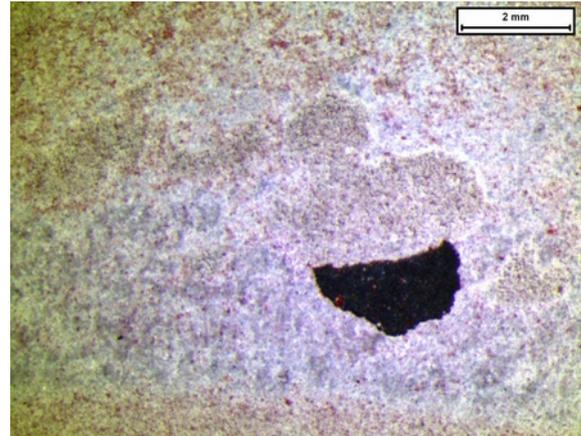


Figura 4.45: A1, 400 giri, difetti finitura fine, ingrandimento 0,63x.

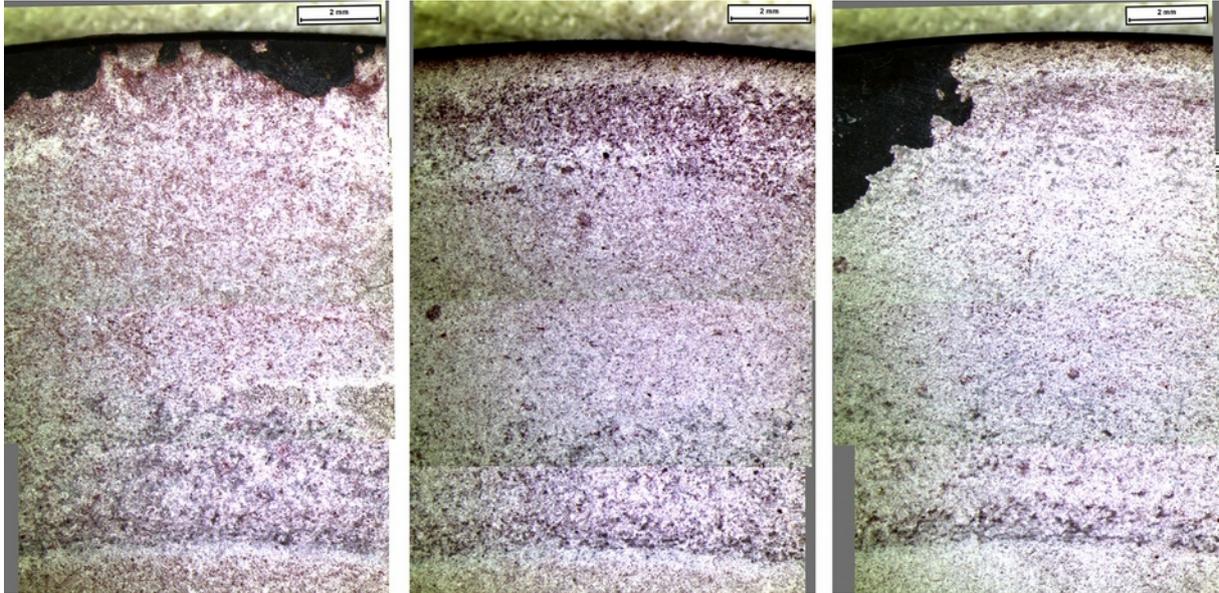


Figura 4.47: campione A1, fascia di usura su finitura fine, grossa e liscia dopo 500 giri, ingrandimento 0,63x.

Campioni A2 e A3 - condizionamento a 700°C per 8 ore

Questi dischi sono stati trattati in forno per simulare il condizionamento alla temperatura di colata subito dal rivestimento della conchiglia durante la produzione ma per tempi più prolungati.

I due campioni non avevano difetti superficiali prima del trattamento, ma in uscita dal forno hanno subito mostrato ampi scrostamenti e una colorazione annerita; lo scrostamento della vernice è avvenuto soprattutto durante il raffreddamento dei campioni in aria calma e lo si può attribuire allo shock termico. Questo effetto si differenzia molto per modalità e intensità in base alla finitura interessata in entrambi i campioni, come si osserva nella Figura 4,48:

- La finitura liscia da 0.84 μm mostra distacco e crepature uniformi su tutto lo spicchio, con formazione di grandi scaglie poligonali, facili da staccare, che si frammentano al contatto;
- La finitura fine da 0.86 μm ha distacco preferenziale verso il bordo esterno, con crepature che formano scaglie più piccole, mentre la parte non crepata del rivestimento sembra ancora ben adesa al substrato;
- La finitura grossolana da 1.25 μm è annerita ma non mostra segni di distacco o crepature, se non in prossimità della zona a finitura liscia, dove i suoi danneggiamenti si estendono a essa. In questa finitura c'è una minima differenziazione tra i due campioni dove si ha estensione dei distacchi delle altre finiture verso la vernice ancora adesa: nel campione A2 si nota l'avanzamento del distacco dalla finitura liscia verso l'area interna di quella grossolana mentre nel campione A3 avviene un fenomeno simile che però parte dall'area esterna della zona a finitura fine.



Figura 4.48: immagini macroscopiche dei campioni A2 e A3 dopo il condizionamento.

È notevole come le aree metalliche rimaste esposte siano fortemente ossidate e annerite perché rimaste esposte all'aria dopo i primi distacchi di vernice.

Da queste osservazioni si può dire che la finitura liscia è totalmente inadatta a queste temperature, quella fine ha un comportamento intermedio e comunque non adatto, mentre quella grossa riesce a promuovere l'adesione del rivestimento anche in queste condizioni estreme.

Visto i danneggiamenti così estesi, si è giunti alla conclusione che queste vernici non sono adatte a lavorare per periodi continuativi a queste temperature. È anche palese la necessità di evitare eccessivi gradienti termici in quanto l'acciaio ha coefficienti di espansione termica differenti rispetto al rivestimento refrattario, fatto che genera stress durante i raffreddamenti e riscaldamenti con crescita dei difetti già presenti proporzionale allo sbalzo termico. Infatti si è notato anche nel condizionamento a 400°C un'esaltazione dei difetti preesistenti e il fenomeno si mostra ancora più intenso per il condizionamento a 700°C.

4.2.2 *Analisi spessori, rugosità e altezze medie.*

Come spiegato nel capitolo Materiali e Metodi ogni campione è stato sottoposto a cinque cicli di 100 giri l'uno nelle condizioni precedentemente descritte; le misurazioni di peso e rugosità sono state fatte dopo ogni ciclo, per ogni finitura. Invece le misure degli spessori sono state effettuate solo inizialmente e dopo i cinque cicli di prova Taber, confrontando le percentuali di spessore perso per ogni finitura. Sempre sui campioni post-verniciatura e a fine test di usura sono state effettuate delle misurazioni delle altezze locali positive e negativa. Le misure effettuate sui campioni usurati sono state confrontate con i valori dei campioni sani per osservare l'evoluzione degli effetti abrasivi sul rivestimento.

Valutazione Spessori

Per analizzare i dati ricavati sono state valutate media e deviazione standard delle tre misure iniziali fatte per ogni campione e delle tre misure valutate per ogni finitura dopo i cinque cicli di usura; con questi dati si sono ricavate le percentuali di spessore abraso riportate nella tabella 3.1.

Il primo dato da notare è il valore della deviazione standard dei valori iniziali dello spessore; per alcuni campioni ha valori molto alti, dovuti allo spessore molto irregolare del rivestimento. I campioni A0 e A6 mostrano deviazioni standard molto alte ad indicare che lo spessore del rivestimento varia in modo notevole da un punto all'altro del campione, rendendo poco affidabile l'uso del valore medio per la valutazione della percentuale di spessore abraso. Questo lo si può notare osservando i valori percentuali ottenuti per il campione A6, in particolare il consumo della finitura liscia dà valore negativo a causa della differenza di spessore iniziale. Anche i campioni A5 e A8 danno valori abbastanza alti di deviazione, ma più contenuta e accettabile, mentre i campioni A1, A4 e A7 risultano avere una deviazione affidabile.

Osservando i valori ottenuti della percentuale di spessore consumato si nota la grande differenza tra i campioni testati con mole di alluminio e quelli testati con le mole abrasive standard. Come era prevedibile le mole di alluminio si sono rivelate meno aggressive di quelle standard, con percentuali rimosse che vanno dal 3 al 20% circa, mentre nell'altro caso lo strato rimosso non scende mai sotto il 20% (escludendo il caso A6, meno attendibile per via dei valori irregolari) e spesso è oltre il 30 se non 40%.

Si nota che le mole in lega hanno poco effetto sulla finitura liscia nel caso il rivestimento non sia stato trattato termicamente; mentre le altre due finiture sabbiate mostrano valori di abrasione simili, tra il 15 e 20 %, la zona liscia dà valori inferiori al 5%. Questo comportamento si inverte sul campione trattato termicamente a 400°C per otto ore; le finiture sabbiate si mostrano molto più resistenti con perdite del 7% circa mentre la parte liscia perde decisamente compattezza passando a un 16% di spessore rimosso.

Per quanto riguarda i campioni trattati con mole abrasive standard si è deciso di escludere il campione A6 dal confronto a causa dei valori troppo irregolari; questo campione ha subito riverniciatura e mostra una deviazione delle misure incredibilmente elevata, per cui dà valori non attendibili. Gli altri campioni mostrano valori attendibili, anche se A0 ha una deviazione notevole; si osservano subito valori abrasivi più alti dovuti alle mole più aggressive. In generale l'abrasione è abbastanza uniforme sulle tre finiture, con migliore comportamento della finitura liscia nel solo campione A8. Il campione condizionato a 400°C A7 dà valori percentuali più alti, evidenziando una minore resistenza del rivestimento trattato termicamente all'azione aggressiva delle mole.

Campione	Finitura	Spessore iniziale [μm]	Dev. st. iniziale [μm]	Spessore finale [μm]	Dev. st. finale [μm]	Perdita di spessore %
A0	fine	67,27	264	35,77	3,85	30,6%
	grossa			31,20	80,66	36,6%
	liscia			23,17	44,21	48,8%
A1	fine	54,77	16	47,27	1,53	7,4%
	grossa			47,30	2,34	7,3%
	liscia			39,17	28,59	16,6%
A4	fine	80,03	18	57,53	12,05	16,4%
	grossa			53,03	26,73	20,3%
	liscia			73,33	79,21	4,4%
A5	fine	56,77	103	41,57	3,65	15,5%
	grossa			38,27	25,53	19,5%
	liscia			53,50	113,06	3,0%
A6	fine	56,17	918	60,07	7,09	-3,4%
	grossa			43,50	46,94	12,7%
	liscia			23,97	2,11	40,2%
A7	fine	50,43	14	12,90	1,52	59,3%
	grossa			16,60	6,08	50,5%
	liscia			14,53	5,73	55,3%
A8	fine	75,33	52	19,73	6,25	58,5%
	grossa			26,67	8,61	47,7%
	liscia			47,90	7,62	22,3%

Tabella 4.1: Confronto spessori e percentuali abrasi per ogni finitura sui vari campioni

Valutazione Rugosità

Nei grafici non è stato incluso il campione A6 perché sono state registrate solo misure per i cicli 100 e 500, a causa della scarsa resistenza del suo rivestimento. Di seguito sono riportati i grafici riguardanti il valore aritmetico medio della rugosità (Ra) in quanto gli altri due parametri (Rq, Rz) hanno andamenti del tutto simili ad esso [Grafici 4.1, 4.2 e 4.3].

Come già esposto in materiali e metodi, i valori di partenza dei quattro parametri studiati (Ra, Rq, Rz e sua deviazione standard) sono frutto di una media, per ogni campione, di tre misure per ogni finitura. Osservando i tre grafici si nota che i campioni A4, A5 e A8 sono caratterizzati da una rugosità media iniziale superiore rispetto agli altri campioni, con valori nell'intorno di $Ra \cong 12-14 \mu\text{m}$; i campioni A0, A1 ed A7 partono invece da valori medi inferiori di circa $Ra \cong 6,5-8 \mu\text{m}$. L'evoluzione dei valori di rugosità osservate durante i cicli di usura si mantiene in linea con queste valutazioni iniziali per i campioni A4 ed A5, ovvero essi continuano a mantenere rugosità maggiori. Tuttavia, questo comportamento è imputabile al fatto che essi sono stati processati con le mole di alluminio, meno aggressive rispetto a quelle standard H22.

In generale si osserva un comportamento più costante per i campioni trattati con mole di alluminio, i salti dei valori misurati sono meno marcati e di entità molto più contenuta. Si notano due variazioni più marcate solo per le misurazioni a 500 giri per il campione A4 sulla finitura liscia e A1 sulla finitura fine, dove la prima mostra un crollo dei valori di rugosità, la seconda invece un rialzo. A parte rari rialzi del valore di rugosità (campione A4 nel grafico 4.2 e campione A1 nel grafico 4.3) le misure mostrano un andamento discendente del parametro Ra con andamento meno brusco che si può attribuire all'effetto più blando delle mole di alluminio per cui si hanno meno difetti e distacchi che vanno a intervenire sulla regolarità della rugosità.

Invece i tre campioni testati con le mole standard mostrano andamenti più irregolari, seppure in intervalli di valori distinguibili: Ra varia intorno ai 2-4 μm , Rq con andamenti simili intorno ai 3-5 μm e Rz nell'intervallo tra 15-23 μm . Si notano però varie misure che escono da questi intervalli, è molto evidente per la finitura fine dove i valori si allargano attorno a questo intervallo con andamenti discendenti non costanti (campione A7) o addirittura salti marcati (campione A8) soprattutto durante i cicli finali. Nella altre finiture l'evoluzione delle misure è più regolare, ma presenta comunque degli andamenti non costanti, come il salto della rugosità del campione A8 attorno ai 400 giri per la finitura grossa, o le misure con picchi alternati del campione A0 per la finitura liscia.

Questa marcata differenza tra gli andamenti si può attribuire alle diverse mole usate; essendo molto più aggressive le mole standard provocano un abbattimento più uniforme e netto della rugosità, andando poi a creare più crateri e macchie con aggrappante o substrato esposto. Le irregolarità generate dall'usura sono più marcate e vanno a influire sui parametri misurati, i distacchi sono evidenti come picchi e valli larghe e brusche inserite in modo casuale nel profilo, così i valori misurati possono subire variazioni notevoli in base al numero e entità di distacchi coinvolti nella misura, cosa che non avviene nei campioni trattati con mole di alluminio, dove i distacchi sono molto meno frequenti e l'usura più uniforme e moderata. L'effetto è notevole osservando la deviazione standard di Rz per le finiture liscia e grossa, dove sono i campioni A8 e A0 a mostrare le variazioni della misura ampie. Nella finitura fine invece si nota una generale irregolarità tra i valori trattati, con andamenti alternati dei picchi di tutti i campioni ad eccezione dei soli A7 e A5.

Per quanto riguarda i campioni A7 e A1 condizionati termicamente si può vedere un'evoluzione della rugosità differente da quelli non condizionati, anche se solo in modo lieve. A7 mostra un andamento abbastanza regolare con riduzioni della rugosità un poco più marcate rispetto ai campioni non trattati su cui sono state usate le stesse mole. La decrescita dei valori maggiore è molto notevole nella finitura fine per tutti e tre i parametri, è più lieve per la finitura grossa mentre non è notevole per quella liscia. Inoltre la variazione della deviazione standard del parametro Rz è molto bassa e regolare, indicando un comportamento più costante con distacchi uniformi e meno marcati. Per il campione A1 invece si ottiene un effetto opposto, con aumento moderato delle irregolarità rispetto ai rivestimenti testati con le stesse mole ma non trattati, palesi soprattutto nei cicli finali della finitura fine e nella deviazione standard di Rz della stessa e in discese dei valori più marcate nei cicli finali delle altre finiture.

Confronto Ra - Finitura liscia 0.84μm

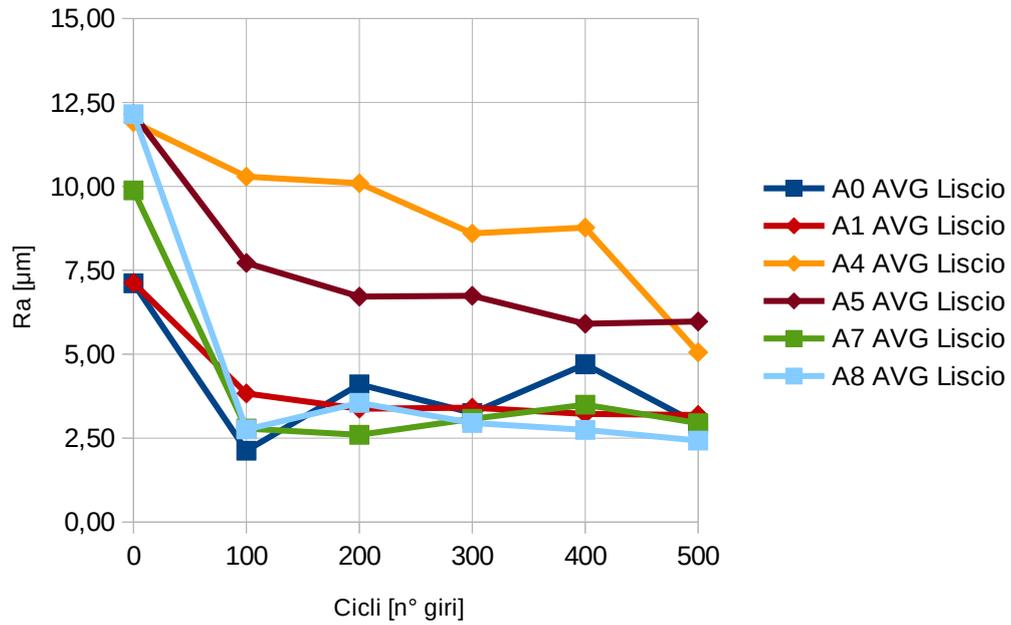


Grafico 4.1: Grafico di confronto tra i valori medi di rugosità della finitura liscia dopo i 500 giri di Taber test.

Confronto Ra - Finitura grossa 1.94μm

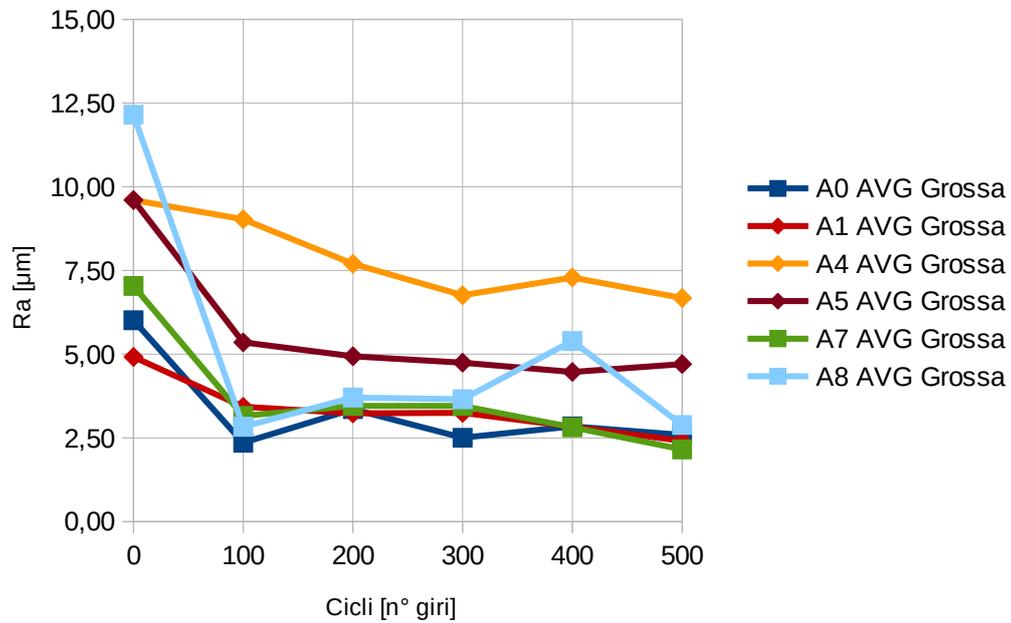


Grafico 4.2: Grafico di confronto tra i valori medi di rugosità della finitura grossa dopo i 500 giri di Taber test.

Confronto Ra - Finitura fine 0,86 μ m

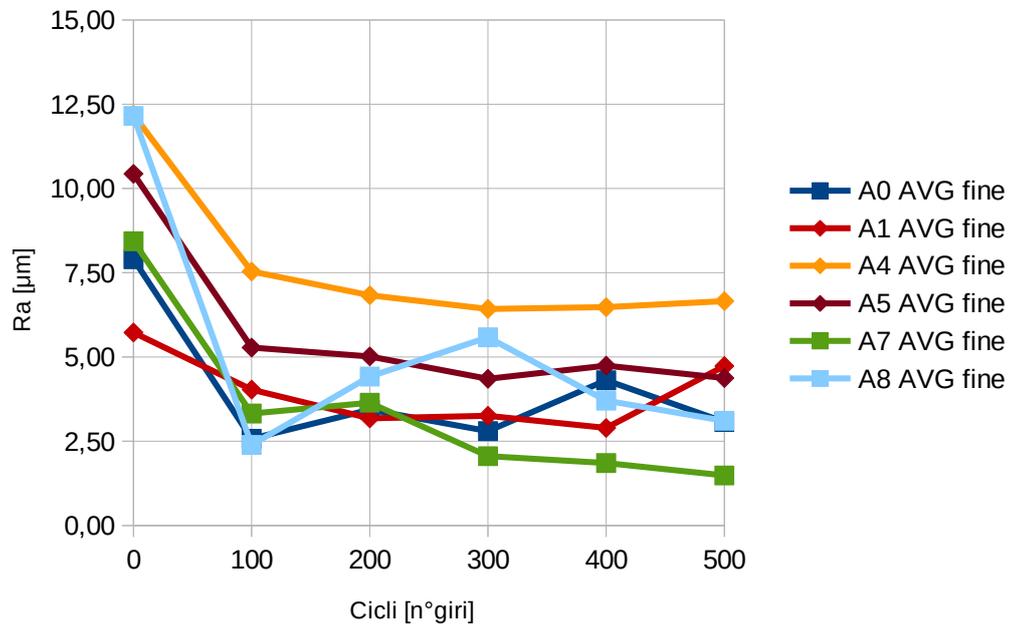


Grafico 4.3: Grafico di confronto tra i valori medi di rugosità della finitura fine dopo i 500 giri di Taber test.

Valutazione Aree Locali

L'analisi delle aree locali rispetto al tratto di profilo misurato ha permesso di produrre due grafici [grafico 4.4 e 4.5] di confronto tra valori della superficie iniziale e le tre finiture sia per i valori definiti positivi che negativi. Tali valori sono conseguenti a misure sul rivestimento in condizioni di post verniciatura ed in seguito a 5 cicli di usura (500 giri); per questa ragione, al contrario di quanto accaduto per le misurazioni di rugosità, è stato possibile valutare anche il campione A6.

Si nota che gli andamenti non sono abbastanza consistenti per trarre delle conclusioni sulle differenti finiture, si può notare che tutti i campioni mostrano una diminuzione severa delle altezze locali medie negative molto marcato mentre quelle positive hanno risentito meno dell'abrasione; si può dedurre che le valli siano state molto ridotte mentre la smorzatura dei picchi è stata inferiore, probabilmente a causa dei detriti prodotti che sono andati a riempire le valli.

Si può osservare che i valori dei campioni trattati con mole di alluminio sono un poco più alti, come nel caso di A4 per la finitura grossa delle altezze locali negative, di tutti e tre i campioni per la finitura fine e grossa delle altezze locali positive e di A5 per la finitura liscia dello stesso parametro. È anche evidente un abbattimento più consistente dei parametri per i due campioni A1 e A7 condizionato termicamente, la differenza è lieve ma notevole.

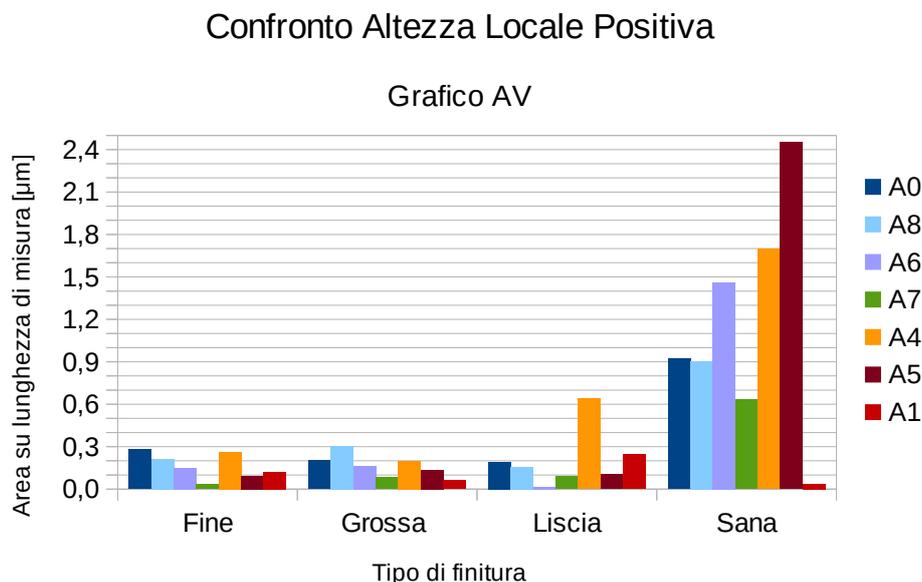


Illustrazione 4.4: Grafico di confronto delle altezze locali positive.

Confronto Altezza Locale Negativa

Grafico AP

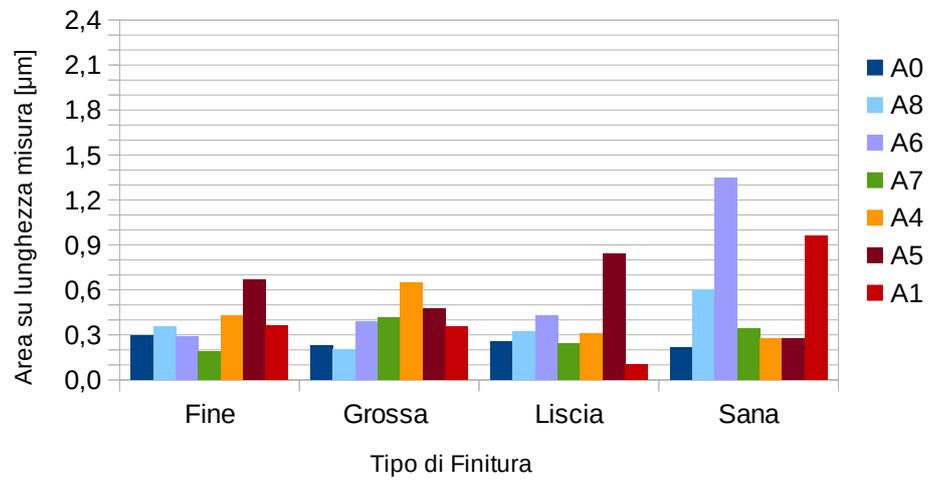


Illustrazione 4.5: Grafico di confronto delle altezze locali negative.

5. Conclusioni

L'analisi SEM ed EDS si sono rivelate molto utili al fine di osservare la morfologia e la composizione semi-quantitativa del rivestimento in esame. Si è constatato che la struttura del rivestimento è granulosa per quanto riguarda l'aggrappante e composta da scaglie interposte a sacche d'aria nello strato refrattario. Inoltre si è potuta vedere la composizione a base di ossidi inorganici e la loro differente distribuzione nel rivestimento.

Dai risultati ottenuti con l'abrasimetro Taber si possono trarre varie conclusioni:

Dalle analisi visive si può notare che spesso l'usura di una finitura si estende alla successiva senza un confine netto, infatti, sebbene i substrati siano differenti, la vernice presenta una sua continuità poiché depositata in un'unica fase.

Osservando le differenze tra i campioni testati con mole H22 e di alluminio si vede facilmente che le prime hanno un'azione abrasiva molto più intensa, che dà un forte consumo della vernice in pochi passaggi (Campioni A0, A6, A7 e A8). Le mole di alluminio invece hanno un'azione molto più moderata, dando scarsa abrasione con effetti di lisciatura della fascia percorsa e effetti di usura contenuti. Un fenomeno importante che si nota con le mole di alluminio, assente nelle prove con mole standard, è il trasferimento di materiale metallico sul rivestimento con formazione di depositi di lega che incrementano durante i vari cicli (campioni A4, A5 e A1). Questi riporti di alluminio potrebbero verificarsi anche in fase di distacco del getto dalla conchiglia per azione meccanica, promuovendo altri fenomeni di danneggiamento come l'adesione al getto successivo al rivestimento.

Anche il metallo esposto ad eventuali distacchi subisce effetti diversi dall'azione dei due tipi di mole: quelle standard ne abradono la superficie, generando un aspetto sfaccettato [Figura 4.12], mentre quelle in alluminio non danno segni di usura ma formano depositi di lega trasferita preferenzialmente sull'acciaio esposto.

In sostanza i due tipi di mole sono utili a osservare comportamenti del materiale in diverse condizioni di usura più che per un confronto diretto. Le mole H-22 essendo più abrasive evidenziano quale sia la finitura che resiste meglio all'usura: la finitura che meglio si presta a resistere all'usura anche in caso di condizionamento termico è quella già utilizzata in F.O.M.T. caratterizzata da rugosità media di $1.94 \mu\text{m}$. La finitura $0.86 \mu\text{m}$ presenta un comportamento migliore di quella a $0.84 \mu\text{m}$, che si è dimostrata la peggiore in questo studio.

Dalle prove fatte con mole di alluminio si può osservare il possibile trasferimento di materiale metallico dalle mole al rivestimento e la tendenza ad una diminuzione della rugosità superficiale soggetta a un agente abrasivo poco aggressivo. In questi campioni si nota che la finitura grossolana soffre di un maggiore assottigliamento diffuso dello strato refrattario ma minori distacchi, invece concentrati nelle zone a finitura liscia e fine.

In tutti i casi si è potuto constatare quanto la riverniciatura e la presenza di difetti preesistenti siano problematici per l'integrità del rivestimento. Nei due campioni riverniciati, A1 e A6, si notano facilmente segni dei residui non rimossi della prima verniciatura [Figura 4.45] e come questi promuovano l'usura e il distacco del rivestimento. Si nota anche come piccoli difetti possano dare origine a distacchi dopo

pochi giri di usura, come si vede nei campioni A0 e A4; questi potrebbero dare grossi problemi in produzione, peggiorando di molto la capacità di resistere all'abrasione del rivestimento in presenza di difetti di verniciatura.

I condizionamenti termici hanno influenzato in modo notevole il comportamento dei campioni all'usura rispetto ai campioni non trattati. Il trattamento a 400°C ha cambiato le tempistiche di abrasione delle finiture del campione A7, rendendo il refrattario più facile da rimuovere sulle finiture fine e grossa ma anche facilitando il distacco della vernice dalla finitura fine. L'effetto del trattamento è dovuto in parte alla forte essiccazione del refrattario, che diviene più duro e fragile, ma anche all'esaltazione di eventuali irregolarità della verniciatura dovuta allo shock termico del raffreddamento.

Questo può provocare il distacco di piccole parti di vernice in prossimità di cricche o altri difetti che intaccano l'integrità dell'aggrappante, come osservato nel bordo esterno del campione A1, oppure veri e propri distacchi massivi come nel caso dei campioni A2 e A3. Questi, sottoposti a un trattamento termico eccessivo per questa vernice, hanno mostrato una forte corrugazione del rivestimento in zone preferenziali durante il raffreddamento, con forti distacchi e infragilimento notevole della verniciatura.

Le analisi al rugosimetro hanno permesso di osservare la generica evoluzione della superficie che appoggiano le conclusioni raggiunte con l'analisi immagini, come si può osservare dai grafici 4.1, 4.2 e 4.3. Gli andamenti delle varie finiture mostrano come l'azione delle mole H-22 agisca più pesantemente sulla rugosità, abbattendone i valori nel primo ciclo e poi portando a rialzi improvvisi dovuti alla comparsa di difetti e nuove asperità date dall'usura. I valori misurati dai cicli con mole di alluminio invece mostrano andamenti meno irregolari, con pochi salti nella rugosità misurate e un generale abbassamento della rugosità all'aumentare del numero di cicli eseguito.

I risultati ottenuti in laboratorio appoggiano la pratica aziendale fino ad ora adottata aiutando a chiarire le dinamiche che portano al fallimento prematuro del rivestimento, formalizzando le problematiche conosciute tramite esperimenti rigorosi e non solo osservazioni empiriche.

Sarà opportuno prestare maggiore attenzione durante la verniciatura delle conchiglie per evitare di introdurre difetti che possono promuovere distacchi: questo nei campioni avveniva molto più facilmente a causa del substrato sottile, per cui il calore si disperdeva più velocemente del dovuto e il rivestimento accumulava più difettosità rispetto a una conchiglia. Inoltre è consigliabile evitare di rimuovere il rivestimento e riverniciare e, se non si può evitare, di farlo con molta cura, evitando di lasciare residui della prima verniciatura e cercando di rovinare la finitura sottostante il meno possibile. È stato evidenziato anche come la vernice soffra i cicli termici estremi, come può essere il completo raffreddamento e la rimessa in uso della conchiglia, e in generale come la fatica termica agisca sui difetti danneggiando il rivestimento comportamento molto evidente nel campione A1.

Ai fini di ulteriori ricerche si potrebbe osservare la morfologia di rivestimenti al SEM dopo che sono stati sottoposti a cicli di usura tramite Taber test oppure a fine vita della conchiglia.

Inoltre l'impiego di campioni con una sola finitura superficiale sarà la prosecuzione naturale di questa ricerca, come strumento necessario per validare il set di prove

realizzate in questo lavoro. Sarebbe interessante per future ricerche creare gruppi di campioni appositi per osservare i vari comportamenti più nello specifico: come una serie di campioni riverniciati e una condizionata, incrociando le due caratteristiche e le varie finiture con l'uso delle mole H-22 o di alluminio per ottenere più dati su un maggiore numero di casi.

Visto l'ampio lavoro ancora da svolgere per approfondire la caratterizzazione di questi rivestimenti si possono mettere in pratica diverse prove prese in esame durante la preparazione di questa tesi. Una prova molto promettente riguarda la norma A.S.T.M. C633-13 del 2017, pensata per testare l'adesione dei rivestimenti termospruzzati e adattabile alle vernici in esame. Inoltre è stata formulata l'ipotesi di testare alcuni campioni di acciaio da conchiglia verniciati, sottoponendoli a cicli di immersione in alluminio fuso alternati a riscaldamento alla fiamma o raffreddamento. Le prove di immersione potranno meglio delucidare le interazioni fuso-conchiglia in condizioni di processo e il comportamento del rivestimento quando sottoposto a cicli termici.

6. Lista dei Simboli

A: peso del campione prima dell'esecuzione della prova di usura.

B: peso del campione dopo l'esecuzione della prova di usura.

C: numero di cicli eseguiti nella singola prova di usura.

D: numero di cicli complessivi necessari a rimuovere completamente il rivestimento.

I: Indice di usura o Wear Index (normativa A.S.T.M. D 4060-10 del 2010).

L (paragrafo sul Taber test): Peso perso durante la prova di usura o weight loss (normativa A.S.T.M. D 4060-10 del 2010).

L (paragrafo sulla rugosità): Lunghezza della tratta su cui si valutano le altezze di picchi e valli.

Ra: Indice di rugosità definito dalla media delle altezze valutate in un certo tratto di superficie.

Rq (σ): Deviazione quadratica media dell'indice di rugosità nel tratto considerato.

Rz: Altezza massima valutata nel tratto considerato in base alla valle più profonda e al picco più alto misurati.

W: Indice dei cicli di usura o Wear Cycle valutato per millimetro di materiale rimosso (normativa A.S.T.M. D 4060-10 del 2010).

z: valore misurato delle altezze di picchi e valli rispetto a una linea neutra.

7. Riferimenti Bibliografici

Actis Grande M., 2017-2018, Metal Forming Technologies. Materiale Didattico, Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DI.S.A.T.).

Aluminium Gravity Casting, www.idiecasting.com. NINGBO INNOVAW MECHANICAL CO., 2015, web, settembre 2018.

Aluminium Gravity Die Casting, www.harrisoncastings.com. Harrison Castings Limited, 2018, web, settembre 2018.

American Society for Testing Materials International (A.S.T.M.), 2010, D4060 – 10. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser. West Conshohocken, USA.

American Society for Testing Materials International (A.S.T.M.), 2017, C633 – 13. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. West Conshohocken, USA.

American Society for Testing Materials International (A.S.T.M.), 2018, D3359-17. Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test. West Conshohocken, USA.

De Benedetti B., 2009-2010, Materiali Metallici. Materiale Didattico, Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DI.S.A.T.).

Foseco Int. Limited, ????, Dycote manual. Drayton Manor Business Park, Tamworth, Staffordshire.

Gravity Die Casting, www.investacast.com. Mullacott Cross Trading Estate, ????, web, settembre 2018.

Gravity Die Casting, The Metal Casting.com. 2018, web, settembre 2018.

Hamasaid A., 2007, Effect of Mold Coating Materials and Thickness on Heat Transfer in Permanent Mold Casting of Aluminum Alloys. The Minerals, Metals & Materials Transactions A, volume 38A, 1303-1316. [10.1007/s11661-007-9145-2]

Havens James H., 1963, Fundamental Principles in Paint Technology (Report). Kentucky Transportation Center Research, University of Kentucky.

Herb Charles O., 1952, Die-casting : the die-casting process and its applications in modern manufacture. The Industrial Press Ed., New York.

Mitterer C. et al., 2000, Application of hard coatings in aluminium die casting—soldering, erosion and thermal fatigue behaviour. Surface and Coatings Technology 125, 233–239.

MUSIC Publication, music.eucoord.com. Eucoord (European Projects Coordination Tool), 2018, web, settembre 2018.

Paracchini L., 2003, Manuale di trattamenti e finiture. Tecniche nuove Ed., Milano.

Pawlowski B. Et al., 2013, Premature Cracking Of Dies For Aluminium Alloy Die-casting. Archives of Metallurgy and Materials, volume 48, 1275-1279.

Rosso M., 2016-2017, ingegneria delle leghe ad elevate prestazioni. Materiale Didattico, Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (D.I.S.A.T.).

Ugues D., 2017-2018, Ingegneria delle superfici. Materiale Didattico, Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (D.I.S.A.T.).

Vaia Dino, Le Leghe di Alluminio dalla relazione "Il Riciclaggio Delle Lattine di Alluminio: da Rifiuto a Risorsa.", <http://www.ing.unitn.it>. Università degli studi di Trento, Facoltà di ingegneria, 2001, web, settembre 2018. 

8. Appendici

Appendice A: Raccolta di immagini per l'analisi del processo di usura operato con abrasimetro Taber.

9. Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va al Politecnico e a tutte le persone che dal suo interno mi hanno dato la possibilità di prepararmi e superare tutti gli ostacoli che ho incontrato lungo il corso di studi.

Un grande ringraziamento va alla mia famiglia, in particolare ai miei genitori, alle mie zie e ai miei cugini per avermi supportato durante tutti questi lunghi anni di studio dandomi la determinazione necessaria a portare a termine questa laurea.

Ringrazio molto anche i miei amici per avermi accompagnato lungo questo percorso, alleggerendo lo spirito e appoggiandomi quando lo studio si faceva più intenso.