



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Analisi sperimentale della conformità di strutture metalliche
per protesi dentali ottenute mediante sinterizzazione laser
selettiva (SLS)**

Relatore

Ch.mo Prof. Meneghello Roberto

Correlatori

Ing. Turchetto Matteo

Sig. Sandi Andrea

Laureando: Zucchetto Francesco

Matricola: 1058135

Anno Accademico 2014/2015

ABSTRACT

Aim of this work is to develop a structured procedure finalized to the realization of a certificate, undersigned by AIMAD and the University of Padua, assessing the quality of the procedure done by dental laboratories. Due to the complexity and the unicity of prostheses, dental technicians have always relied on traditional and craft procedures. However, in the last years, there were deep changes. New technologies are raising and becoming increasingly popular. Among these technologies, Selective Laser Melting (SLM) certainly represents the most promising alternative. Moreover, this study, aims to cover, at least, some current gaps in this field. In fact, despite the dental technicians are the first liable for damages when prosthesis are used, there are few preventive actions to avoid failure of dental systems. Therefore operators rely on good manufacturing practices more than in inspection and testing investigations. In addition, the legislative framework is even more complex when dental metallic structures aren't made by the same subject who performs the realization of the final prostheses. Three different mechanical and geometrical testing were made to face these issues. The results and the data collected are presented in the following paper.

Key words: *dental prostheses, Selective Laser Melting, safety requirements, assessment of the quality of the procedure done by dental laboratories, mechanical properties of dental materials, geometrical accuracy of dental metallic structures.*

Scopo di questo lavoro è mettere in atto una procedura di prove volte alla stesura di un certificato, sottoscritto sia da AIMAD sia dall'Università di Padova, che attesti la qualità delle lavorazioni svolte dai laboratori odontotecnici. Il settore dentale, data la complessità e unicità delle protesi, è stato a lungo dominato da tecniche tradizionali e artigianali. Tuttavia tale settore ha assistito a profondi cambiamenti. Nuove tecnologie di fabbricazione sono emerse e si stanno imponendo. Tra queste la tecnologia di Fusione Laser Selettiva (SLM) rappresenta, di sicuro, l'alternativa più promettente. Tale iniziativa mira, inoltre, a colmare, almeno, in parte alcune lacune presenti. Infatti, nonostante il fabbricante sia il primo responsabile del prodotto in caso si manifestino dei danni arrecati in fase di utilizzo delle protesi, sono ancora limitate le azioni preventive eseguite per limitare i cedimenti dei dispositivi. È, pertanto, diffusa tra gli operatori del settore la prassi di affidarsi alle buone pratiche di fabbricazione, in sostituzione dei controlli e delle prove indirizzate all'eliminazione dei rischi. In aggiunta a questo, il quadro legislativo si complica ulteriormente qualora il produttore delle sottostrutture metalliche protesiche non sia il medesimo realizzatore della protesi finita. Per affrontare tali problematiche sono state realizzate tre differenti prove. I risultati e i dati raccolti vengono di seguito presentati.

Parole Chiave: *protesi dentarie, Fusione Laser Selettiva, requisiti di sicurezza, certificazione della qualità delle lavorazioni svolte dai laboratori odontotecnici, proprietà meccaniche dei materiali per uso dentale, precisione geometrica di sottostrutture metalliche protesiche*

INDICE

ABSTRACT	I
INDICE	III
INTRODUZIONE	1
PREMESSA	1
ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO	2
CAPITOLO 1. IL SETTORE DENTALE E IL PROGETTO DI RICERCA	5
1.1 ORGANIZZAZIONE DEL SETTORE DENTALE	5
1.2 DISPOSITIVI DENTALI	6
1.3 PROTESI DENTARIE FISSE	8
1.4 PROCESSI PRODUTTIVI DI PROTESI IN METALLO-CERAMICA	9
1.4.1 PROCESSO DI FUSIONE A CERA PERSA	10
1.4.2 TECNOLOGIE CAD/CAM E ADDITIVE MANUFACTURING	12
1.4.3 SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA	12
1.4.4 DESCRIZIONE DEL PROCESSO SLS	13
1.4.5 MECCANISMO DI FUSIONE DELLE POLVERI	14
1.4.6 FULL MELTING	14
1.4.7 PARAMETRI DI PROCESSO	15
1.4.8 MATERIALI IMPIEGATI	16
1.4.9 CONFRONTO CON IL PROCESSO DI FUSIONE A CERA PERSA	16
1.5 IL PROGETTO DI RICERCA	17
CAPITOLO 2. SVILUPPO DELLE PROVE	23
2.1 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE IMPIEGATO	23
2.2 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI METALLICI	24
2.3 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE METALLICO IMPIEGATO	25
2.4 PROVA DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI GIUNTI SALDATI	27
2.5 PROVE DI FLESSIONE PER LA VERIFICA DELL'ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA	28
2.6 MISURAZIONI DELLA DISTANZA MARGINALE TRA SOTTOSTRUTTURE METALLICHE E MODELLO DI MONCONI.	30
2.7 APPARATO DI PROVA	31
2.7.1 APPARATO DI PROVA PER LE PROVE DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI GIUNTI SALDATI	32

2.7.2 APPARATO DI PROVA PER LE PROVE DI FLESSIONE PER LA VALUTAZIONE DELL'ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA.....	32
2.7.3 APPARATO DI PROVA PER LE MISURAZIONI DELLA DISTANZA MARGINALE PRESENTE TRA LE SOTTOSTRUTTURE METALLICHE E IL MODELLO DI MONCONI	33
CAPITOLO 3. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA MEDIANTE PROVE DI TRAZIONE. 35	
3.1 PRIMA FASE: PROVE PRELIMINARI	35
3.1.1 GEOMETRIA E CONFIGURAZIONE DEL PROVINO	35
3.1.2 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA	38
3.1.3 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	48
3.1.4 COMMENTI.....	50
3.2 SECONDA FASE: CARATTERIZZAZIONE DEI GIUNTI SALDATI.....	51
3.2.1 PROGETTAZIONE DELLE GANASCE.	51
3.2.2 GEOMETRIA DEL PROVINO	53
3.2.3 APPARATO DI MISURA PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA	54
3.2.4 RISULTATI DELLE MISURAZIONI.....	55
3.2.5 COMMENTI.....	56
3.2.6 PROVE DI TRAZIONE	57
3.2.7 MODALITÀ DI ANALISI DEI RISULTATI	57
3.2.8 RISULTATI	58
3.2.9 COMMENTI.....	60
CAPITOLO 4. ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA	62
4.1 PRINCIPI DI ADESIONE	62
4.2 GEOMETRIA DEL PROVINO	63
4.3 PROTOCOLLO PROVE PER LABORATORI ODONTOTECNICI	63
4.4 ATTREZZATURA E APPARATO DI PROVA	64
4.5 PRIMA FASE.....	65
4.5.1 RISULTATI CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA	65
4.5.2 COMMENTI.....	70
4.5.3 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	70
4.5.4 ANALISI DEI DATI.....	71
4.5.5 COMMENTI.....	74
4.6 SECONDA FASE.....	74
4.6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA.....	76
4.6.2 COMMENTI.....	80
4.6.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	80

4.6.4 RISULTATI	81
4.6.5 COMMENTI.....	85
CAPITOLO 5. MISURAZIONI SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE	88
5.1 INTRODUZIONE	88
5.2 APPARATO SPERIMENTALE	89
5.3 PRIMA FASE: VALUTAZIONE DELLA RIPETIBILITÁ DEL PROCESSO DI MISURA	89
5.4 SECONDA FASE.....	92
5.4.1 PROCEDURA DI ESECUZIONE DELLE MISURE.	92
5.4.2 RISULTATI PRIMA PARTE E MODALITÁ DI ANALISI DEI RISULTATI.....	93
5.4.3 COMMENTI.....	97
5.4.4 RISULTATI PARTE SECONDA E MODALITÁ DI ANALISI DEI RISULTATI.....	98
5.4.5 COMMENTI.....	102
CAPITOLO 6. CONCLUSIONI	104
CAPITOLO 7. BIBLIOGRAFIA.....	106
APPENDICE I: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI PROVINI IN MATERIALE METALLICO PER LA PROVA DI VERIFICA DEI GIUNTI SALDATI	112
APPENDICE II: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI PROVE STATICHE DI TRAZIONE..	116
APPENDICE III: RISULTATI DELLE PROVE STATICHE DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI GIUNTI SALDATI	118
APPENDICE IV: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI PROVINI PER PROVE DI FLESSIONE.....	134
APPENDICE V: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI PROVE STATICHE DI FLESSIONE..	138
APPENDICE VI: RISULTATI DELLE PROVE DI FLESSIONE	140
APPENDICE VII: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE CERAMIZZATE	157
APPENDICE VIII: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI MISURE DI SOTTOSTRUTTURE METALLICHE PROTESICHE	161
APPENDICE IX: RISULTATI DELLE MISURAZIONE DELLE SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE	162
RINGRAZIAMENTI	192

PREMESSA

Le realizzazione e la progettazione dei dispositivi dentali è un processo complesso, che si compone di numerose fasi e a cui partecipano vari soggetti, che se non controllato e opportunamente curato può portare a una restaurazione dentale non duratura e sicura. Il settore dentale, data la complessità e unicità delle protesi, è stato a lungo dominato da tecniche tradizionali e artigianali. Tuttavia il settore delle protesi e delle restaurazioni dentali ha assistito a profondi cambiamenti. Nuove tecnologie di fabbricazione sono emerse e si stanno imponendo. Tecnologie e metodologie normalmente impiegate nei settori industriali stanno trovando spazi di applicazione sempre più ampi. I sistemi CAD/CAM, uniti a scanner per la digitalizzazione delle caratteristiche anatomiche dei pazienti, rappresentano, ad oggi le maggiori innovazioni che stanno interessando il settore. In questo contesto le tecnologie di Fusione Laser Selettiva (SLM) rappresentano, di sicuro, l'alternativa più interessante. Esse permettono di ottenere prodotti con caratteristiche meccaniche e di qualità superiori ai metodi tradizionali. Ovviamente ciò pone, anche, nuove sfide per i professionisti che si trovano ad impiegare questi prodotti. Nuove tecnologie e nuovi metodi produttivi rappresentano una sfida per i laboratori odontotecnici che devono assolutamente affrontare e dimostrare di saper vincere, in un'ottica di continuo miglioramento della qualità e del servizio offerto ai clienti. Il lavoro svolto si inserisce in questo contesto e mira a sviluppare una procedura che permetta di certificare la perizia e l'abilità dei laboratori odontotecnici nel operare con strutture metalliche ottenute tramite il processo di Fusione Laser Selettiva. Pertanto, il fine delle prove sviluppate è la stesura di un attestato di conformità, sottoscritto sia da AIMAD (Accademia italiana dei Materiali dentari) sia dall'Università di Padova, che viene rilasciato ai laboratori che dimostrano di saper operare rispettando le direttive imposte dalle normative internazionali e i criteri di fabbricazione evidenziati nelle relative pubblicazioni scientifiche di ambito dentale. Tale iniziativa mira, inoltre, a colmare, almeno, in parte alcune lacune presenti. Infatti, nonostante il fabbricante sia il primo responsabile del prodotto in caso si manifestassero dei danni arrecati in fase di utilizzo delle protesi, sono ancora limitate le azioni preventive eseguite per limitare i cedimenti dei dispositivi. In tema di sicurezza, emerge chiaramente, da uno studio del quadro normativo e tecnico-scientifico in materia, che i requisiti di sicurezza non vengono definiti in sede di progettazione della protesi. È, pertanto, diffusa tra gli operatori del settore la prassi di affidarsi alle buone pratiche di fabbricazione, in sostituzione dei controlli e delle prove indirizzate all'eliminazione dei rischi. In aggiunta a questo, il quadro legislativo si complica ulteriormente qualora il produttore delle sottostrutture metalliche protesiche non sia il medesimo realizzatore della protesi finita. Infatti, in questo caso, è difficile asserire e dimostrare con certezza le responsabilità dei singoli soggetti coinvolti qualora si manifestasse un mal funzionamento del dispositivo protesico.

Le prove sviluppate hanno come obiettivo:

- ✓ Indagare la tensione di rottura delle giunzioni saldate realizzate dai laboratori: molto spesso, in presenza di dispositivi protesici che coprono un'ampia parte dell'arcata

dentale, infatti, le sottostrutture metalliche devono essere tagliate per meglio adattarsi all'anatomia del paziente e poi saldate. Ovviamente la resistenza meccanica del materiale di base delle sottostrutture diventa completamente ininfluenza qualora il giunto saldato venga realizzato in maniera non idonea e con un comportamento dal punto di vista meccanico non conforme a quanto previsto in sede normativa. Ciò porterebbe al cedimento prematuro della protesi sotto le sollecitazioni e i carichi indotti dall'attività masticatoria senza che la responsabilità di ciò possa essere attribuita all'azienda realizzatrice delle sottostrutture metalliche.

- ✓ Indagare la tensione a cui avviene il distacco tra metallo e ceramica: un forte legame tra i due materiali è di vitale importanza al fine di garantire una protesi funzionale, duratura e sicura. Si ricorda inoltre, come i sistemi in metallo-ceramica siano ad oggi i più diffusi. Da questo, quindi, nasce l'importanza di tali prove.
- ✓ Indagare l'eventuale deformazione indotta dal processo di ceramizzazione sulle sottostrutture metalliche: il buon accoppiamento tra le sottostrutture protesiche e i monconi dei pazienti è una prerogativa essenziale al fine di ottenere una restaurazione dentale ritenitiva e sicura. Infatti la presenza di un gap marginale troppo elevato pregiudica la coesione e la durata del cemento posto ed espone il paziente ad infiltrazioni batteriche e alla formazione di carie secondarie. Anche in questo caso gli sforzi e l'attenzione profusa dal produttore delle sottostrutture metalliche verrebbero totalmente vanificati da una scarsa competenza dei laboratori odontotecnici nel realizzare lo strato ceramico. In tale circostanza, l'intraprendere di azioni scorrette, infatti, porterebbe all'insorgere di deformazioni significative nelle sottostrutture metalliche medesime.

Le prove svolte e l'analisi dei dati hanno permesso di formulare dei giudizi di conformità. Tutti i laboratori partecipanti hanno superato le prove volte ad indagare la resistenza meccanica delle giunzioni saldate e l'insorgere di eventuali deformazioni sulle sottostrutture protesiche. Maggiori criticità, invece, sono state incontrate nel superamento della prova di verifica dell'adesione tra metallo e ceramica. Tuttavia, in generale, la qualità delle lavorazioni si è dimostrata molto buona a testimonianza del livello del servizio offerto dai laboratori odontotecnici del distretto medico Veneto e del nord Italia.

ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO

Il lavoro svolto è organizzato nel seguente modo:

- ✓ Capitolo 1: nel primo capitolo viene fornita una panoramica del settore dentale, del processo di sinterizzazione laser selettiva e viene presentato e descritto il progetto di certificazione delle lavorazioni svolte dai laboratori odontotecnici;
- ✓ Capitolo 2: nel secondo capitolo vengono presentate le prove svolte e viene fornita una descrizione dell'attrezzatura di prova impiegata;
- ✓ Capitolo 3: nel terzo capitolo vengono presentate le prove di trazione svolte per indagare la resistenza meccanica delle giunzioni saldate realizzate dai laboratori partecipanti. Si descrive, inizialmente, la fase preliminare di messa appunto

dell'attività sperimentale per poi passare alla descrizione delle prove e alla presentazione dei risultati ottenuti;

- ✓ Capitolo 4: nel quarto capitolo vengono presentate le prove di flessione svolte per determinare la tensione di distacco tra metallo e ceramica. Si descrive, preliminarmente, la fase iniziale di set up della procedura di prova ed, in seguito, le prove e i risultati ottenuti;
- ✓ Capitolo 5: nel quinto capitolo vengono presentate le misurazioni svolte sulle sottostrutture protesiche prima e dopo il processo di ceramizzazione con lo scopo di verificare se il processo medesimo inducesse deformazioni rilevanti.
- ✓ Capitolo 6: nel sesto capitolo si presentano le conclusioni;
- ✓ Capitolo 7: nel settimo capitolo si riporta la bibliografia;
- ✓ Appendici: nelle appendici vengono riportati con dettaglio tutti i risultati sperimentali ottenuti e i protocolli di prova e di realizzazione dei campioni.

CAPITOLO 1. IL SETTORE DENTALE E IL PROGETTO DI RICERCA

1.1 ORGANIZZAZIONE DEL SETTORE DENTALE

Il settore dentale e la sua filiera annoverano una moltitudine di soggetti impegnati a fornire beni e servizi al fine di soddisfare alle esigenze di salute orale dei cittadini. Il bisogno frequente di una prestazione medica volta a prevenire possibili disturbi o a guarirli spinge i cittadini interessati a rivolgersi ad uno studio odontoiatrico qualificato il quale, a sua volta, interagisce con una serie di fornitori di attrezzature, materiali di consumo, arredi e di dispositivi dentali. Pertanto, all'interno della filiera produttiva si possono individuare i seguenti soggetti imprenditoriali che svolgono un ruolo fondamentale di supporto e sviluppo del settore dentale:

- ✓ *Produttori di materiale dentale di consumo*, sono imprese che producono e forniscono beni consumabili per l'odontotecnico e l'odontoiatra;
- ✓ *Produttori di apparecchiature dentali*, sono imprese che producono e forniscono attrezzature tradizionali (es. frese, forni, saldatrici, etc.) che consentono al laboratorio odontotecnico e allo studio odontoiatrico di fornire le prestazioni richieste;
- ✓ *Produttori di arredo tecnico*, sono imprese che realizzano e forniscono arredamento funzionale agli operatori del settore;
- ✓ *Produttori di apparecchiature dentali avanzate*, sono imprese che producono strumenti avanzati (es. scanner laser 3D, macchine utensili, etc.) per la realizzazione di dispositivi dentali;
- ✓ *Distributori*, sono imprese che distribuiscono beni e servizi agli operatori;
- ✓ *Laboratori odontotecnici*, sono i produttori dei dispositivi medici;
- ✓ *Studi odontoiatrici*, rappresentano i medici professionisti del settore.

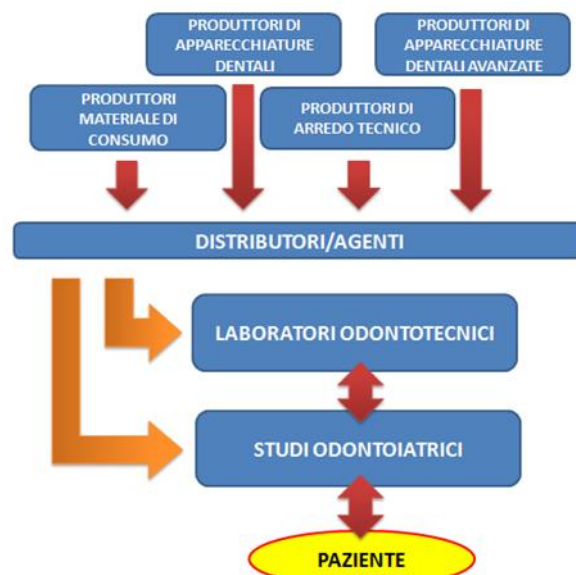


Figura 1.1.1 – Soggetti imprenditoriali coinvolti nel settore dentale

Tali soggetti imprenditoriali si rivolgono allo stesso mercato, ma costituiscono tipologie d'impresa molto differenti tra loro. Infatti i produttori di materiale di consumo e di apparecchiature sono aziende che solitamente propendono alla produzione di massa standardizzata; i produttori di arredo tecnico fanno solitamente riferimento al tradizionale settore dell'arredamento e forniscono soluzioni personalizzate; i produttori di apparecchiature dentali avanzate, storicamente dedicati al settore industriale, forniscono macchinari progettati appositamente per le lavorazioni di dispositivi dentali; i distributori provvedono alla commercializzazione di prodotti non realizzati internamente; i laboratori odontotecnici realizzano prodotti su misura; gli studi odontoiatrici offrono prestazioni mediche curative. Si è, quindi, in presenza di un settore complesso dal punto di vista strutturale e dei flussi di informazioni e beni che vengono generati, in cui i vari protagonisti generano flussi economici di importante rilievo.

Il settore dentale italiano è nel suo insieme qualitativamente tra i primi al mondo ed è caratterizzato dal essere dominato da soggetti privati. In tale contesto il nord Italia, ed in particolare la regione Veneto, rappresentano, indubbiamente, delle eccellenze ricoprendo un ruolo di assoluto rilievo sia in termini quantitativi che qualitativi (1). Tuttavia, come spesso accade all'imprenditoria nazionale, le aziende che operano in questo settore sono caratterizzate dall'essere di piccole o medie dimensioni. Ciò, ovviamente, limita i possibili investimenti in marketing, innovazione ed investimenti tecnologici ma consente, di contro, una maggiore flessibilità operativa consentendo di focalizzarsi maggiormente sulla qualità del prodotto e sul servizio offerto ai clienti.

Vari enti collaborano con i protagonisti della filiera produttiva al fine di mantenere elevata la qualità produttiva e di promuovere gli investimenti in innovazione del prodotto. Ad esempio in tale ottica il Distretto Biomedicale Veneto (2), un sistema di imprese istituite allo scopo di realizzare importanti sinergie a forte impatto sulla qualità del sistema economico regionale, mira a sostenere la competitività delle imprese biomedicali venete sul mercato internazionale incentivando le interazioni, esistenti o possibili, tra i soggetti delle filiere.

Un ulteriore contributo ad incoraggiare l'innovazione tecnologica deriva dall'Osservatorio Biomedicale Veneto (3), ente nato allo scopo di promuovere attività di ricerca, sviluppo e trasferimento tecnologico favorendo lo studio delle dinamiche relative al mercato del settore, la formazione di personale qualificato, la realizzazione di controlli e prove sui requisiti dei prodotti.

In questo contesto si inserisce il progetto di ricerca sperimentale volto a fornire un attestazione di conformità inerente le lavorazioni svolte dai laboratori, sottoscritto da due enti importanti e prestigiosi come AIMAD e l'Università di Padova.

1.2 DISPOSITIVI DENTALI

La protesi dentaria è un dispositivo che sostituisce la dentatura originaria quando insorgono complicazioni e disturbi che la portano a non essere più funzionale e a causare dolore al paziente. Esempi di protesi dentarie risalgono alle prime grandi civiltà, con esempi databili fin

anche al 800 a.c. (4) a testimonianza della pressante necessità di tali dispositivi, non solo per questioni di natura estetica, ma soprattutto per ragioni funzionali. Trattandosi di un dispositivo protesico volto a sostituire in maniera più o meno marcata l'originale dentatura del paziente, ogni realizzazione è un componente complesso, unico e deve soddisfare criteri di resistenza meccanica e di biocompatibilità unitamente a requisiti estetici e fonetici.

La progettazione delle protesi riveste, pertanto, un ruolo fondamentale. Infatti una scorretta progettazione e realizzazione porterebbe il dispositivo a non essere stabile, ritentivo e resistente di fronte agli elevati carichi che si possono generare durante il processo masticatorio. L'entità e la direzione di tali carichi dipendono da numerosi fattori come la configurazione anatomica del paziente e l'età. Di norma i valori riportati in letteratura vanno dai 300 ai 600 N (5), variando sensibilmente da una zona all'altra della bocca. Infatti essi passano dai 400-890 N nella regione dei molari, ai 222-445N nella regione dei premolari, ai 133-334N nei canini, o 89-111N sugli incisivi (4).

La biocompatibilità dei materiali rappresenta un'altra importante caratteristica che devono garantire i dispositivi dentali. Si deve, infatti, poter garantire l'assenza o comunque il contenimento dei rischi legati all'impiego di determinati materiali. Le reazioni avverse o la mancata biocompatibilità dei materiali possono portare a gravi danni alla salute del paziente. Un esempio degli organi e dei tessuti che possono essere danneggiati se il materiale impiegato non risponde agli standard di sicurezza previsti dalle normative internazionali è riportato in Figura 1.2.1.

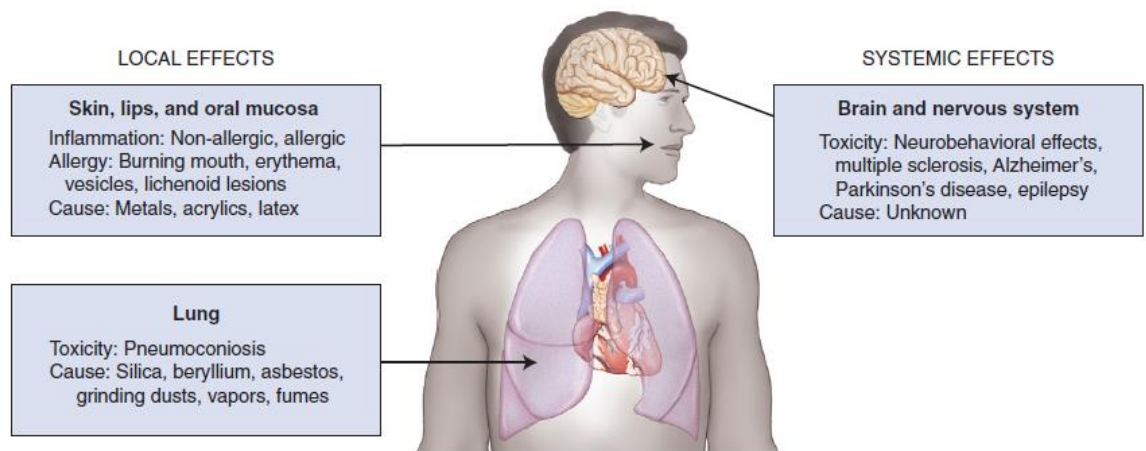


Figura 1.2.1 – Organi e tessuti che possono essere danneggiati dalla non biocompatibilità dei dispositivi protesici

Infine non meno importanti sono i requisiti estetici, che permettono di ottenere una protesi il più naturale possibile, adattandola alle caratteristiche anatomiche del paziente.

Sebbene la complessità di un dispositivo dentale renda difficile fornire una classificazione delle singole soluzioni si possono individuare tre principali categorie:

- ✓ **Protesi fissa:** le protesi dentarie fisse sono ponti o corone che vengono cementati ai denti e non sono più rimovibili dal paziente senza subire alterazioni che ne compromettono la riutilizzabilità.
- ✓ **Protesi rimovibili:** la protesi dentaria rimovibile è quella che il paziente può rimuovere dalla bocca, consentendo l'osservazione di norme igieniche ed il controllo periodico dei tessuti osseo-mucosi (6).
- ✓ **Protesi combinata:** la protesi dentaria combinata è quella composta in parte da protesi fissa e in parte da protesi rimovibile, strettamente collegate tra loro.

TIPI DI DISPOSITIVI	SUPPORTO	RIMOVIBILITÀ	DEFINIZIONE
Protesi dentaria fissa	Dentale e/o implantare	non rimovibile	- Protesi di restauro del singolo dente - Protesi di sostituzione del singolo o di più denti - Provvisoria
Protesi dentaria rimovibile	Mucoso e/o dentale	rimovibile	- Parziale - Totale - Provvisoria
Protesi dentaria combinata	Dentale e/o implantare Dentale e mucoso Implantare e mucoso	in parte fissa ed in parte rimovibile	- Parziale - Overdenture - Provvisoria

Di seguito ci si concentra sulla descrizione delle protesi dentarie fisse in metallo ceramica, oggetto dello studio sperimentale svolto.

1.3 PROTESI DENTARIE FISSE

Le protesi dentarie fisse sono costituite da corone e ponti. Nelle corone almeno la radice è conservata e vengono ancorate al dente, che viene precedentemente preparato creando un moncone, oppure vengono fissate tramite perni endocanalari. Nel caso dei ponti, l'elemento dentario estratto viene sostituito da una protesi che comprende anche gli elementi dentali adiacenti che vengono, precedentemente ridotti a monconi o protesizzati. Essi vengono realizzati con materiali biocompatibili che possono essere sia metallici che ceramici. Le protesi dentarie possono essere suddivise in:

- ✓ **Protesi fissa in metallo-ceramica:** in questo caso sia ha una corona o un ponte costituito da una sottostruttura metallica che assolve al ruolo strutturale, rivestita da

uno strato di materiale ceramico che garantisce gli aspetti estetici della restaurazione dentale. L'impiego di protesi combinate metallo-ceramica consente di sopperire ai limiti tradizionalmente associati alle ceramiche dentarie, ovvero, le loro scarse proprietà meccaniche quando caricate a trazione o a taglio. Inoltre le protesi metallo-ceramica offrono altri vantaggi in quanto, rispetto ad altre categorie di protesi, sono più versatili, durature e, in genere, presentano una maggiore precisione. Di contro, richiedendo numerose fasi, delicate e complesse, per la loro realizzazione. Esse si collocano nelle fasce più elevate di costo.

- ✓ *Protesi fissa in ceramica Metal Free (All-ceramic)*: in questo caso sia corone che ponti vengono realizzati interamente in ceramica senza la presenza di parti metalliche. Rispetto alla classe precedente garantiscono un migliore risultato estetico e l'assenza di eventuali effetti collaterali dovuti ad allergie o intolleranze rispetto ai materiali metallici impiegati. I limiti principali riguardano, come già accennato, le loro caratteristiche meccaniche e strutturali. Tuttavia la diffusione delle tecnologie CAD/CAM e l'impiego di ceramiche particolari ad alta resistenza come la Zirconia, hanno portato ad una crescente richiesta di protesi Metal-Free con una diminuzione del gap prestazionale (rispetto alle protesi in metallo-ceramica) in termini di precisione ottenibile

1.4 PROCESSI PRODUTTIVI DI PROTESI IN METALLO-CERAMICA

Come già accennato, le protesi in metallo-ceramica sono costituite da una base metallica che svolge le funzioni strutturali della protesi, facendosi carico di sopportare gli sforzi generati durante la masticazione, e da uno strato di rivestimento in materiale ceramico a base vetrosa il quale ha il compito di garantire un effetto estetico il più naturale possibile alla protesi. Sebbene esse non rappresentino la categoria di protesi in grado di permettere l'ottenimento del miglior risultato estetico, esse sono largamente le più diffuse nel mercato occidentale per i loro vantaggi legati alla durata e alla maggiore precisione costruttiva, essenziale per garantire l'assenza dell'insorgere di spiacevoli e pericolose malattie paradontali e la formazione di carie secondarie.

Nella produzione di tali protesi, come in generale nel settore dentale, la produzione di serie con i tipici strumenti tecnologici ha faticato ad inserirsi. I processi impiegati sono ancora dominati da caratteristiche di tipo artigianale, data la complessità e l'unicità delle soluzioni protesiche. Pertanto il metodo tradizionale, tutt'ora più diffuso, è quello del processo di fusione a cera persa. Tuttavia negli ultimi anni si sta assistendo ad una rapida diffusione delle nuove tecnologie CAD/CAM con l'impiego di macchine per la fresatura CNC a 3 o 5 assi e soprattutto al impiego delle tecnologie di *"Additive Manufacturing"*. Entrambe queste tecnologie trovano maggior vantaggio nel uso di uno scanner intraorale che permette di bypassare la fase di riproduzione fisica del modello delle arcate dentali, ottenuto tramite la tecnica dell'impronta. Nei paragrafi successivi sono approfondite e messe a confronto queste due differenti tipologie produttive.

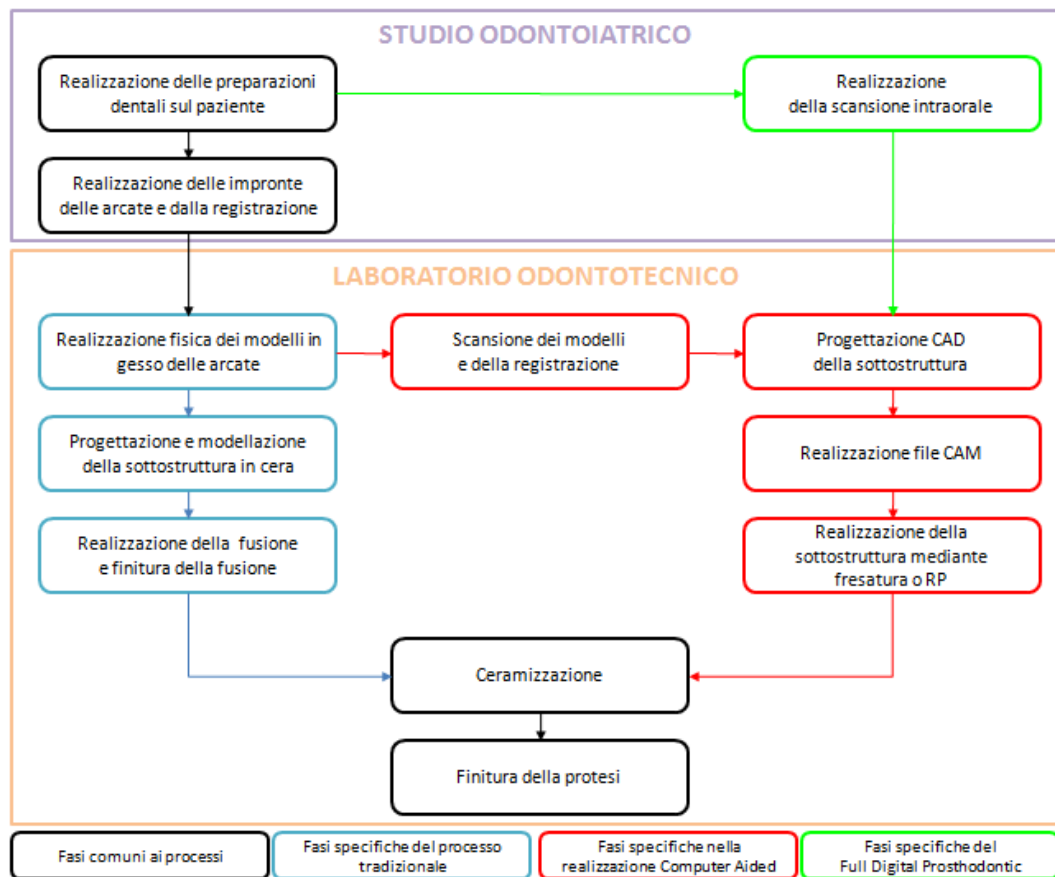


Figura 1.4.1 – Fasi di realizzazione delle protesi

1.4.1 PROCESSO DI FUSIONE A CERA PERSA

Il processo di fusione a cera persa è, ad oggi, il più diffuso per la realizzazione di protesi in metallo-ceramica (7) (8). Tale processo si può sintetizzare nelle seguenti fasi:

- 1) Creazione del modello in cera;
- 2) Realizzazione della sottostruttura in metallo
- 3) Applicazione del materiale ceramico con conseguente cottura, rifinitura e lucidatura.

Vista l'unicità delle problematiche legate ai singoli pazienti, l'odontoiatra rileva le impronte delle arcate del paziente, che rappresentano un modello tridimensionale negativo dei denti e le fa pervenire al laboratorio odontotecnico responsabile della realizzazione della protesi dentaria. A partire dalle impronte vengono costruiti in gesso i modelli fisici delle arcate che ne riproducono fedelmente i dettagli, impiegando materiali e procedimenti compatibili con i tipi di impronte fornite dall'odontoiatra. I modelli usati per la costruzione dei dispositivi dentali sono preparati con "monconcini sfilabili", in modo che il tecnico possa lavorare su ogni singola corona controllandone con precisione il margine di chiusura. I monconi vengono preparati indurendo i margini mediante un apposito "induritore" e utilizzando una lacca spaziatrice per creare uno spazio per il cemento.

I modelli in gesso sono fissati, utilizzando le registrazioni fornite dall'odontoiatra, a strumenti detti articolatori che consentono la riproduzione dell'occlusione del paziente.

A questo punto è modellata in cera la sottostruttura della protesi da realizzare, ricostruendo la forma anatomica finale dei denti in oggetto e asportando uno spessore relativamente uniforme di cera dalle superfici che dovranno essere ricoperte con la ceramica, tenendo una particolare cura per la chiusura dei bordi, che deve essere la più precisa possibile. Le corone di cera modellate sono collegate fra loro in modo da ottenere un blocco unico e sono aggiunti i perni di colata. Il modellato in cera così formato viene immerso in materiale refrattario (messa in rivestimento), che una volta solidificato sarà riscaldato in forno ad una temperatura più elevata rispetto a quella richiesta per la fusione della cera, ottenendo lo stampo per la fusione. Il metallo da utilizzare per la realizzazione della sottostruttura viene fuso e colato all'interno dello stampo in materiale refrattario, fino al completo riempimento. Una volta che il metallo si è solidificato, lo stampo viene frantumato liberando la fusione che deve essere priva di difetti interni e superficiali che possono comprometterne la funzionalità. La sottostruttura è pronta per essere rifinita, eliminando i perni di colata e ritoccando i margini di chiusura, migliorandone la precisione. Nel caso in cui si realizzino dispositivi di più elementi, l'aumentare della lunghezza della protesi può diminuire la precisione di combaciamento della stessa (9). Pertanto se necessario, le sottostrutture sono tagliate e riposizionate per l'esecuzione di una saldobrasatura o di una saldatura laser. Dopo l'esecuzione delle saldature, è necessario verificare che i giunti saldati siano esenti da difetti che ne possano compromettere l'accettabilità e la durata. Inoltre le operazioni di saldatura non devono generare alterazioni dimensionali delle protesi di entità tali da comprometterne la precisione e l'affidabilità.

La stratificazione della ceramica è eseguita, riproducendo accuratamente la forma anatomica e morfologica dei denti da realizzare. L'applicazione della ceramica sulle sottostrutture metalliche è eseguita con metodi appropriati e affidabili ed in ogni caso ben conosciuti dagli operatori che li applicano. La ceramica impiegata per la realizzazione delle protesi deve essere compatibile con il materiale metallico delle sottostrutture sia per quanto riguarda l'adesione tra i due materiali, sia per quanto riguarda le dilatazioni e le contrazioni che essi subiscono durante i cicli termici richiesti per l'applicazione della ceramica.

Al termine del lavoro la protesi viene sottoposta ad un accurato controllo finale, dovendo (I) presentare delle superfici assiali (vestibolari, linguali, mesiali e distali) in armonia con i tessuti molli e con i denti adiacenti, ed in particolare presentare dei profili di emergenza in armonia con il parodonto marginale, (II) presentare delle superfici oclusali in armonia con i denti antagonisti e tali da soddisfare lo schema oclusale previsto sia nelle relazioni statiche che in quelle dinamiche, (III) presentare un aspetto estetico soddisfacente per quanto riguarda la forma e le sfumature di colore.

1.4.2 TECNOLOGIE CAD/CAM E ADDITIVE MANUFACTURING



Figura 1.4.2.1 – Esempio di impiego di tecnologie CAD/CAM e SLM

Negli ultimi anni si è assistito alla diffusione delle tecnologie CAD/CAM e di Additive Manufacturing nel settore dentale. Tali strumenti, coadiuvati dall'impiego di uno scanner intraorale, offrono sicuramente prospettive e vantaggi molto interessanti. Essi permettono di by-passare la fase di realizzazione dell'impronta dell'arcata dentale del paziente e l'ottenimento di protesi con migliori caratteristiche di precisione geometrica, garantendo quindi una maggiore ripetibilità nel generare protesi caratterizzate da un buon accoppiamento marginale, fondamentale per garantire la realizzazione di una restaurazione dentale sicura ed affidabile.

Le fasi tipiche di questo processo sono:

- 1) Digitalizzazione delle preparazioni dentarie e delle arcate del paziente;
- 2) Progettazione CAD della protesi;
- 3) Realizzazione della sottostruttura;
- 4) Applicazione del materiale ceramico con conseguente cottura, rifinitura e lucidatura

In seguito ci si concentra sulla descrizione del processo di Fusione Laser selettiva (SLM) impiegato per la realizzazione dei campioni sottoposti ad analisi nel corso di questo studio.

1.4.3 SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA

La tecnologia di sinterizzazione laser selettiva (SLS) fu, inizialmente, sviluppata per la produzione di prototipi in materiale plastico. Tale approccio, nel corso degli anni, è stato esteso ed impiegato anche nel campo dei materiali metallici e ceramici. Essa è stata la prima tipologia di processo "Powder bed fusion" (PBF) introdotta, ed una dei primi esempi di Additive manufacturing (AM). I processi PBF elaborati successivamente differiscono dalla SLS in modo da consentire una maggiore produttività e l'impiego di materiali diversi.

1.4.4 DESCRIZIONE DEL PROCESSO SLS

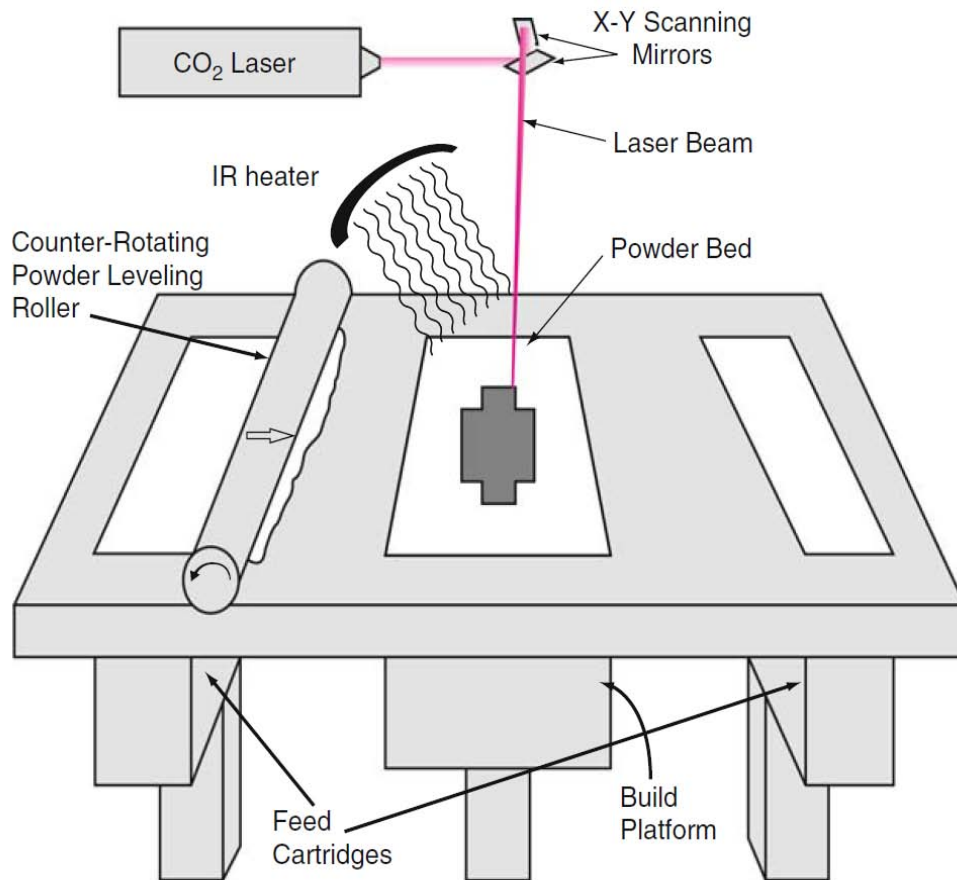


Figura 1.4.4.1 – Schematizzazione del processo di Sinterizzazione Laser Selettiva

Nel processo di Sinterizzazione Laser Selettiva vengono fusi dei sottili strati di polveri (tipicamente dell'ordine dei 0,1 mm di spessore), distribuiti sul piano di lavoro attraverso un cilindro livellatore. Il processo di realizzazione del manufatto avviene all'interno di una camera chiusa contenente azoto gassoso al fine di minimizzare l'eventuale ossidazione e la degradazione delle polveri metalliche. Le polveri disposte sul piano di lavoro vengono mantenute ad elevata temperatura, appena al di sotto della temperatura di fusione e/o della temperatura di transizione vetrosa, tramite dei sistemi ad infrarossi o dei sistemi di riscaldamento a resistenza. Inoltre le polveri vengono pre-riscaldate prima di essere disposte nel piano di lavoro. Il pre-riscaldamento delle polveri e il loro mantenimento ad elevate temperature sono fondamentali per ridurre la potenza necessaria dal laser e per prevenire le distorsioni dimensionali che si possono avere a causa dei gradienti di temperatura presenti. Dopo aver steso e compattato uno strato adeguato di polveri un fascio laser viene indirizzato nella regione di interesse e mosso al fine di fondere il materiale e realizzare la sezione desiderata. Le polveri circostanti, non interessate dal fascio laser, non sviluppano dei legami tra di loro ed hanno la funzione di supportare i layer successivi. Completato un layer la piattaforma si abbassa della quantità fissata al fine di permettere la stesura e la realizzazione di un altro strato. Tipicamente è richiesto un certo periodo di raffreddamento per permettere ai manufatti così ottenuti di raggiungere una temperatura che permetta loro di essere maneggiati ed esposti all'atmosfera. Questo è necessario per evitare possibili ossidazioni e

possibili distorsioni legate allo sbalzo di temperatura. Infine i pezzi vengono rimossi dalla piattaforma, puliti dalla polvere in eccesso e sottoposti, se necessario, ad operazioni successive di finitura.

1.4.5 MECCANISMO DI FUSIONE DELLE POLVERI

Nel corso degli anni sono stati sviluppati quattro differenti meccanismi di fusione che sono:

- ✓ Solid-state sintering;
- ✓ Chemically-induced binding;
- ✓ Liquid-phase sintering;
- ✓ Full melting.

Di seguito si provvede a fornire una descrizione del solo processo di Full melting poiché per la realizzazione dei campioni testati viene impiegato proprio tale meccanismo.

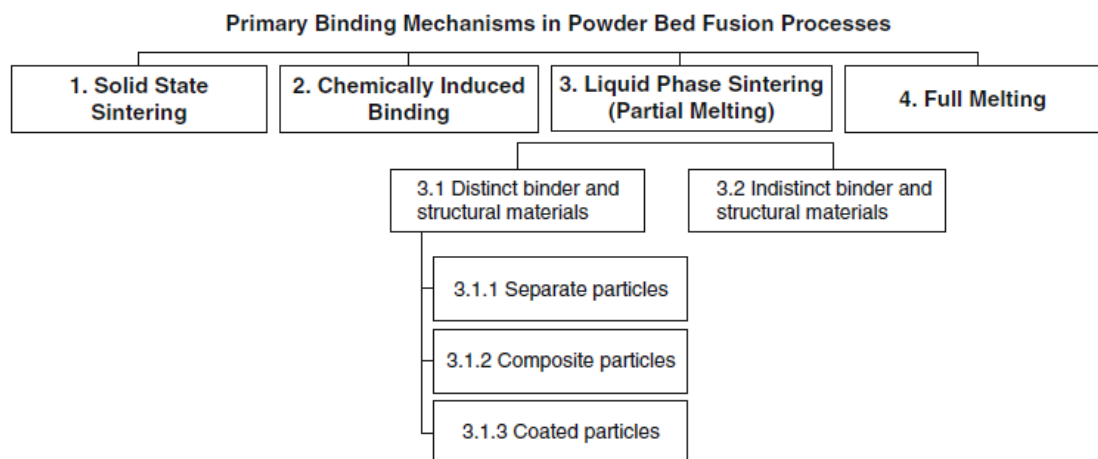


Figura 1.4.5.1 – Meccanismi di sinterizzazione delle polveri

1.4.6 FULL MELTING

Il meccanismo di Full melting è quello largamente più impiegato quando si trattano polveri metalliche e di polimeri semi-cristallini. In questo caso l'intera regione interessata dal fascio laser viene portata a fusione per una profondità superiore allo spessore del singolo layer generando strutture in cui il legame presente tra le particelle è molto forte unitamente ad una densità elevata. Un esempio di microstrutture ottenibili è rappresentato in Figura 1.4.6.1.

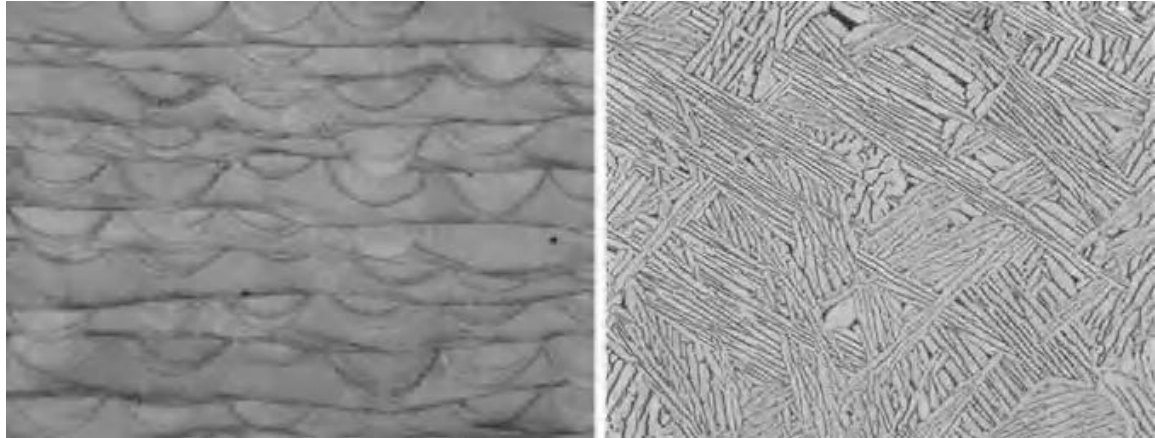


Figura 1.4.6.1 – Esempi di microstrutture: Co-Cr ottenuto mediante SLM (sinistra); Ti6Al4V ottenuto mediante EBM (destra)

Sia l'ampiezza che la profondità della zona che viene portata a fusione sono funzione della densità di energia che viene assorbita. Un modello semplificato che viene impiegato per determinare la densità di energia applicata E_A è il seguente (10):

$$E_A = P/(U \times SP)$$

Dove P è la potenza del laser, U è la velocità di scansionamento e SP è la distanza di scansionamento tra due linee parallele (valori tipici sono intorno ai $100 \mu m$).

In questo modello semplificato l'energia che viene applicata aumenta all'aumentare della potenza del laser e diminuisce all'aumentare della velocità e della distanza di scansionamento. Sebbene esso non tenga conto delle caratteristiche di assorbimento delle polveri, della dimensione dello spot laser e di altre caratteristiche importanti, essa fornisce l'approccio analitico più semplice per ottimizzare le performance e il processo.

1.4.7 PARAMETRI DI PROCESSO

L'impegno e la gestione corretta dei parametri di processo è di vitale importanza al fine di ottenere parti che soddisfino i requisiti. I parametri di processo possono essere suddivisi in quattro categorie:

- ✓ Parametri legati al fascio laser, come la potenza, la dimensione dello spot, la durata e la frequenza dell'impulso etc.;
- ✓ Parametri legati allo scansionamento, come la velocità di scansione, la spaziatura tra le scansioni e il percorso di scansionamento;
- ✓ Parametri legati alle polveri, come la forma, le dimensioni e la distribuzione delle particelle, la densità, lo spessore dei layer, le proprietà del materiale, etc.;
- ✓ Parametri legati alla temperatura, come la temperatura del letto di polveri, la temperatura del sistema di approvvigionamento delle polveri, la presenza di gradienti termici, etc..

Questi parametri sono tipicamente connessi tra di loro. Ad esempio la potenza richiesta dal laser aumenta all'aumentare della temperatura di fusione del materiale, in funzione delle caratteristiche di assorbimento delle polveri, che a loro volta sono influenzate dalle dimensioni delle particelle medesime e dalla densità con cui vengono compattate.

1.4.8 MATERIALI IMPIEGATI

In linea teorica tutti i materiali potrebbero essere lavorati impiegando questa tecnologia. I materiali più diffusi sono sicuramente la poliammide per quanto riguarda le materie plastiche e le leghe di Co-Cr-Mo e di Ti-6Al-4V per quanto concerne i materiali metallici. In particolare, quest'ultimi, sono particolarmente interessanti in virtù della loro biocompatibilità e, pertanto, delle applicazioni che trovano nel settore della realizzazione di protesi.

1.4.9 CONFRONTO CON IL PROCESSO DI FUSIONE A CERA PERSA

Il processo di Fusione Laser Selettiva è, come già esposto, un processo emergente e molto promettente per la realizzazione di protesi dentarie. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche come la tensione di snervamento e di rottura in accordo con (10) il comportamento dei campioni realizzati in cobalto-cromo mediante Fusione laser selettiva è decisamente migliore rispetto a quello ottenuto dai rispettivi campioni realizzati mediante il processo tradizionale di fusione a cera persa. Questo è da imputare alla possibilità di ottenere una microstruttura orientata che permette di migliorare le proprietà meccaniche sopra citate.

Per quanto concerne l'adesione tra metallo e ceramica che queste leghe sono in grado di garantire, in letteratura si trovano pareri non uniformi. Secondo (7) e (11) la tensione alla quale avviene il distacco tra metallo e ceramica dei campioni realizzati mediante il processo di Fusione Laser Selettiva non differisce dal risultato ottenuto dai medesimi campioni realizzati con il processo tradizionale. Secondo (12), invece, tale tensione risulta in modo significativo superiore a quella registrata nel caso si impieghino campioni realizzati mediante fusione a cera persa. Comunque in entrambe le circostanze, gli studi condotti in letteratura dimostrano come le leghe di Cobalto-Cromo ottenute mediante Fusione Laser Selettiva offrano delle prestazioni conformi alla normativa internazionale e paragonabili a quelle del processo tradizionale di fusione a cera persa.

Anche per quanto concerne il fit marginale delle sottostrutture protesiche la letteratura non presenta dati uniformi. Secondo (13), in cui sono state confrontate tra di loro quattro diversi processi produttivi (Fusione Laser Selettiva, Fusione a cera persa, Fusione a cera persa realizzando il modello impiegando processi di fresatura e il processo di fresatura), il processo di Fusione laser Selettiva presenta le migliori performance. Secondo (14) (15) (16), invece non si riscontra una differenza significativa tra i metodi tradizionali e quelli legati all' Additive Manufacturing. Ad ogni modo anche in questo caso, il processo di Fusione laser Selettiva si pone come una valida e promettente alternativa ai processi tradizionali.

Riassumendo il processo di Fusione laser Selettiva consente di ottenere delle caratteristiche, in generale, paragonabili a quelle ottenibili mediante il processo di fusione a cera persa.

Tuttavia, specie se affiancato dal impiego di uno scanner intraorale consente di by-passare la fase di realizzazione fisica del modello dell'arcata dentale del paziente e, in generale, consente una maggiore ripetibilità delle lavorazioni riducendo la natura artigianale tipica delle restaurazioni dentali.

1.5 IL PROGETTO DI RICERCA



ATTESTAZIONE PERIODICA DI CONFORMITA'

per SISTEMI METALLO-CERAMICI

AIMAD - Accademia Italiana dei Materiali Dentari, in collaborazione con il Laboratorio LIN, dell'Università di Padova, sulla base di valutazioni sperimentali semestrali eseguite su provini appositamente realizzati, attesta che il

Laboratorio Odontotecnico

XYZ Sas

(Via Pinco Pallino, CAP, Città)

per la fabbricazione di protesi dentarie fisse in metallo-ceramica con sottostrutture in lega di Co realizzate mediante fusione laser selettiva (Selective Laser Melting - SLM) da 3Dfast Srl, adotta procedimenti tecnologici che soddisfano i pertinenti requisiti di conformità previsti nelle seguenti norme nazionali e internazionali e i criteri di fabbricazione evidenziati nelle relative pubblicazioni scientifiche di ambito dentale:

Resistenza della adesione metallo-ceramica: norma UNI EN ISO 9695-1:2012 Odontoiatria - Prove di compatibilità. Parte 1: Sistemi metallo-ceramici; UNI EN ISO 22674:2007 Odontoiatria - Materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili e le apparecchiature

Resistenza meccanica di giunti saldati: norma UNI EN ISO 28318:2010 Odontoiatria - Saldatura laser; norma UNI EN ISO 9333:2006 Odontoiatria - Materiali da rivestimento

Precisione del combaciamento marginale: Requisiti e criteri di fabbricazione per sistemi metallo-ceramici - AIMAD, documento tecnico, 2014

Padova, Settembre 2013

Simbolo AIMAD
Prof. Francesco Simionato
Direttore AIMAD
Simbolo LIN

Figura 1.5.1 - Esempio di attestato

Il settore delle protesi e delle restaurazioni dentali ha assistito, negli ultimi anni, a profondi cambiamenti. Nuove tecnologie di fabbricazione sono emerse e si stanno imponendo. In questo contesto le tecnologie di fusione laser selettiva (SLM) rappresentano, di sicuro, l'alternativa più interessante. Esse permettono di ottenere prodotti con caratteristiche meccaniche e di qualità superiori ai metodi tradizionali. Ovviamente ciò pone, anche, nuove sfide per i professionisti che si trovano ad impiegare questi prodotti. Per questo motivo 3Dfast in collaborazione con AIMAD-Accademia italiana dei Materiali dentari, e con il laboratorio LIN dell'Università di Padova, ha deciso di offrire l'opportunità ai laboratori odontotecnici di veder riconosciuta la propria abilità e perizia nella fabbricazione di protesi dentarie fisse in metallo-ceramica con sottostrutture in lega di cobalto-cromo realizzate mediante Fusione Laser Selettiva. I laboratori odontotecnici hanno, quindi, la possibilità di ricevere un attestato con

periodicità semestrale in cui AIMAD e il laboratorio LIN dell'Università di Padova, sulla base di valutazioni sperimentali su provini appositamente realizzati, certificano la competenza nel realizzare protesi in accordo con i requisiti previsti dalle norme nazionali e internazionali e dalle pubblicazioni scientifiche in ambito dentale.

In particolare, ogni laboratorio, vedrà riconosciuta e certificata la propria competenza nel realizzare giunti saldati che presentino dei valori di resistenza meccanica conformi a quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 9333:2006 (17), nel garantire un'adesione tra metallo e ceramica conforme alle direttive della norma UNI EN ISO 9693-1:2012 (18) e nel garantire una precisione della struttura finita in accordo con quanto previsto dalle direttive tecniche proposte da AIMAD.

I laboratori coinvolti, pertanto, riceveranno un kit composto da una serie di campioni unitamente a dei protocolli che indichino le fasi da seguire per realizzare al meglio le varie lavorazioni. Il kit è composto da tre diverse tipologie di provini, come si può vedere in Figura 1.5.2.

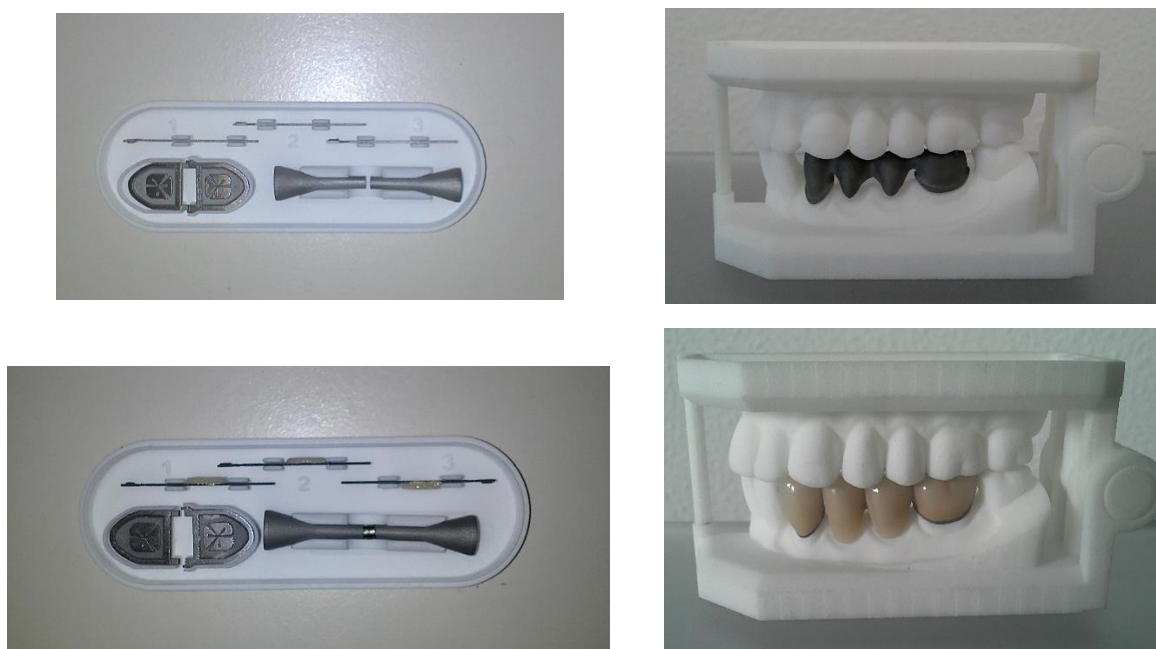


Figura 1.5.2 - Esempio di kit fornito prima e dopo le lavorazioni

Per quanto riguarda la resistenza dei giunti saldati, i laboratori odontotecnici dovranno procedere alla saldatura dei campioni, realizzati come monoblocco e, in seguito, tagliati e consegnati all'interno dei kit. Successivamente AIMAD e il laboratorio LIN dell'Università di Padova procederanno con le prove meccaniche di trazione al fine di verificare la conformità della resistenza meccanica di tali provini con quanto previsto dalle apposite normative.

Sui provini volti a determinare la resistenza dell'adesione metallo-ceramica verrà realizzata la ceramizzazione da parte dei laboratori odontotecnici. Verranno, quindi, eseguite delle prove

di flessione per determinare il carico a cui avviene il distacco all'interfaccia tra il metallo e la ceramica e verificare che questo sia conforme a quanto previsto dalla normativa.

Infine, per quanto concerne la precisione della struttura finita, ogni laboratorio riceverà un campione di sottostruttura metallica e di monconi su cui dovrà realizzare la ceramizzazione. Successivamente si provvederà a misurare il gap marginale presente tra sottostruttura e monconi e a confrontarlo con quello valutato precedentemente, prima che le sottostrutture subiscano il processo di ceramizzazione. Sarà quindi possibile valutare se tale processo venga eseguito in maniera corretta garantendo l'assenza di deformazioni consistenti della sottostruttura che portino il gap marginale al di fuori dei valori previsti. Sono stati contattati 80 laboratori. Di questi 28 hanno fornito i provini entro i tempi prestabiliti e sono stati analizzati

La tabella 1.5.1 riassume le fasi più importanti del processo di rilascio dell'attestato.

REALIZZAZIONE DEI CAMPIONI	
Descrizione fase	Controlli
Fase 1: Creazione dei campioni tramite Fusione Laser Selettiva	
I provini per le prove meccaniche di resistenza del giunto saldato e di adesione tra metallo e ceramica e le sottostrutture protesiche metalliche vengono realizzate tramite Fusione Laser selettiva. Essi vengono realizzati partendo da polveri di Co-Cr ed impiegando macchine della EOS. Inoltre vengono posti nella macchina in modo tale da avere una direzione di accrescimento che massimizzi le proprietà meccaniche di interesse. Successivamente i provini destinati alla verifica del giunto saldato vengono sezionati in corrispondenza della mezzeria.	
INVIO DELLE SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE AL LABORATORIO LIN	
Descrizione fase	Controlli
Fase 2: Invio delle sottostrutture protesiche al laboratorio LIN dell'Università di Padova	
Le sottostrutture protesiche metalliche ottenute tramite Fusione laser Selettiva vengono inviate al laboratorio LIN dell'Università di Padova. Essi vengono	Controllare che le sottostrutture protesiche non presentino un gap marginale superiore ai 100 µm in accordo con le direttive AIMAD. Eventualmente segnalare nel report le

<p>misurati impiegando la macchina di misura OGP Flash 300 CNC al fine di rilevare il gap marginale presente. Successivamente vengono univocamente identificati inserendoli in buste numerate e viene compilato un report di misura.</p>	<p>sottostrutture protesiche che non soddisfino tali requisiti. Inoltre porre particolare attenzione alla numerazione e alla univoca identificazione delle sottostrutture.</p>
--	--

INVIO DEI KIT AI LABORATORI

Descrizione fase	Controlli
Fase 3: Invio dei kit ai laboratori	
<p>I kit contengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un provino per la verifica della resistenza del giunto saldato; • Tre provini per la verifica dell'adesione tra metallo e ceramica; • Una sottostruttura protesica da ceramizzare. <p>Essi vengono inviati ad ogni laboratorio contattato unitamente a dei protocolli di prova che chiariscono le fasi da intraprendere</p>	<p>Verificare che ogni kit sia correttamente realizzato. Identificare univocamente i laboratori in base alla sottostruttura protesica inviata. Porre particolare attenzione al fatto che i laboratori coinvolti seguano ed abbiano ben compreso i protocolli di consegnati.</p>

INVIO DEI KIT AL LABORATORIO LIN ED ESECUZIONE PROVE

Descrizione fase	Controlli
Fase 4: Ricezione dei kit	
<p>I kit vengono ricevuti dal laboratorio LIN dell'Università di Padova</p>	<p>Verificare che ogni kit sia univocamente identificato e che contenga i provini destinati all'analisi sperimentale</p>
Fase 5: Misura dei provini per le prove di trazione	
<p>I provini volti ad asserire la conformità del giunto saldato realizzato dai laboratori vengono misurati impiegando la macchina di misura OGP Flash CNC 300 al fine di ricavare i parametri utili. In particolare vengono rilevati:</p>	<p>Verificare il corretto impiego della macchina di misura e la conformità geometrica dei provini</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Il diametro della zona calibrata; • La rettilineità dell'asse del provino. 	
Fase 6: Esecuzione delle prove di trazione	
<p>I provini vengono testati al fine di valutare il carico di rottura della giunzione saldata impiegando la macchina di prova Galdalbinsi SUN 2500 con una velocità di allontanamento delle ganasce di 1,5 mm/min. Successivamente viene calcolata la tensione di rottura.</p>	<p>Porre attenzione allo svolgimento della prova di trazione al fine di rispettare i protocolli di prova stabiliti.</p>
Fase 7: Misura dei provini per le prove di flessione	
<p>I provini volti a determinare l'adesione tra metallo e ceramica vengono misurati impiegando un calibro centesimale rilevando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lo spessore della ceramizzazione; • La lunghezza della ceramizzazione; • La larghezza della ceramizzazione; • Lo spessore della barretta metallica; • La lunghezza della barretta metallica; • La larghezza della barretta metallica. 	<p>Verificare la conformità dei provini.</p>
Fase 8: Esecuzione delle prove di flessione	
<p>I provini vengono testati impiegando la macchina di prova Galdalbinsi SUN 2500 con una velocità di discesa del punzone pari a 1,5 mm/min. Successivamente viene calcolata la tensione di distacco tra metallo e ceramica impiegando la procedura proposta dalla normativa UNI EN ISO 9693-1</p>	<p>Porre attenzione allo svolgimento della prova di flessione al fine di rispettare i protocolli di prova stabiliti.</p>
Fase 9: Misurazione delle sottostrutture protesiche in seguito al processo di ceramizzazione	
<p>Le sottostrutture protesiche ceramizzate vengono misurate impiegando la macchina di misura OGP Flash CNC 300 al fine di rilevare il gap marginale presente dopo la ceramizzazione. In seguito tale gap viene confrontato con quello presente prima della ceramizzazione calcolandone la differenza. È,</p>	<p>Controllare la corretta esecuzione della procedura di misura.</p>

così, possibile formulare un giudizio sulla deformazione subita da tali sottostrutture in seguito al processo sopra citato.

Fase 10: Stesura report

Viene compilato un report di prova generale e dei report singoli per ogni laboratorio. In base ai dati analizzati viene espresso un giudizio di conformità inerente gli aspetti indagati.

RILASCIO ATTESTATO

Descrizione fase

Controlli

Fase 11: Rilascio dell'attestato

Se il laboratorio coinvolto nello studio ha superato tutte le prove viene rilasciato un attestato sottoscritto da AIMAD e dall'Università di Padova che certifica la perizia e l'abilità del laboratorio medesimo.

Tabella 1.5.1 – Sintesi delle fasi del progetto di attestazione

CAPITOLO 2. SVILUPPO DELLE PROVE

Il settore odontotecnico può riferirsi a norme che regolano gli aspetti di natura gestionale e tecnica, unitamente a fornire indicazioni riguardo i materiali e ai processi produttivi. Inoltre la direttiva 93/42/CEE concernente i dispositivi medici e recepita in Italia con D.L.vo 24 febbraio 1997, n.46 (Gazzetta Ufficiale-serie generale n.54 del 6 Marzo 1997) (19)afferma che i fabbricanti dei dispositivi sono obbligati a completare la dichiarazione di conformità, con la quale dichiarano di aver rispettato i Requisiti Essenziali previsti dal suddetto decreto. Tali requisiti prevedono che il dispositivo non comprometta la salute e la sicurezza degli utilizzatori. Pertanto la responsabilità del fabbricante è relativa alle scelte di natura progettuale, alla scelta dei materiali e alle scelte inerenti i metodi e i modi di costruzione e imballaggio. Sebbene, quindi, il fabbricante sia il primo responsabile in caso di mal funzionamento del dispositivo medico che comporti dei danni per la salute del paziente, il quadro tecnico normativo risulta ancora carente e deficitario per quanto concerne le azioni preventive da intraprendere al fine di limitare i cedimenti prematuri dei dispositivi. Inoltre, qualora, il fabbricante delle sottostrutture protesiche metalliche volte alla realizzazione di ponti non sia lo stesso soggetto che produce la protesi finale (applicando, quindi, il rivestimento ceramico) il quadro legislativo si complica ulteriormente. Infatti, qualora dovesse manifestarsi un malfunzionamento, i soggetti responsabili possono essere più d'uno senza che vi sia la certezza di chi ha effettivamente realizzato una lavorazione non conforme. In tale contesto l'attestazione della conformità delle lavorazioni svolte dai laboratori odontotecnici assume un ruolo di rilievo nel quadro generale. Con tale documento, sottoscritto da enti importanti e prestigiosi come l'Università di Padova e AIMAD, si certifica la competenza e l'abilità dei laboratori partecipanti nel operare con sottostrutture e campioni metallici realizzati mediante Fusione Laser Selettiva. Questo rappresenta un'iniziativa unica e senza precedenti nel settore dentale che ha, appunto, come scopo quello di colmare, almeno in parte, le lacune presenti nella normativa e nella letteratura tecnica attuale.

Ovviamente, al fine del rilascio dell'attestazione, sono state svolte delle prove meccaniche e delle prove di caratterizzazione geometrica sui campioni realizzati dai laboratori medesimi. Ciò ha richiesto l'impiego di una serie di attrezzature e la realizzazione di protocolli di prova che verranno descritti in seguito.

Infine, per quanto riguarda le caratteristiche del materiale impiegato, i campioni e le sottostrutture metalliche sono state realizzate utilizzando polveri di Co-Cr sinterizzate, ottenendo una lega classificabile come di "Tipo 4".

2.1 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE IMPIEGATO

I materiali impiegati per realizzare restaurazioni e protesi dentali devono soddisfare ad una serie di requisiti. I più importanti sono:

- ✓ *Biocompatibilità*: il materiale impiegato deve resistere bene ai fluidi orali e non deve rilasciare sostanze tossiche o dannose per l'organismo. Inoltre deve minimizzare i possibili rischi di intolleranze e allergie;

-
- ✓ *Resistenza alla corrosione:* i materiali impiegati si trovano a dover operare in un ambiente aggressivo che gli espone alla continua presenza di agenti chimici che ne possono determinare il deterioramento e la corrosione. Tale fenomeno è limitato in presenza di leghe nobili (quali ad esempio leghe a base di oro o palladio) o per la presenza di elementi come il Cromo che formano sulla superficie un rivestimento in grado di inibire tali meccanismi corrosivi;
 - ✓ *Proprietà termiche:* nelle protesi in metallo-ceramica le sottostrutture metalliche devono possedere proprietà di dilatazione termica simili a quelle della ceramica di rivestimento per evitare la formazione di tensioni che possono portare al distacco tra il rivestimento ceramico stesso e la sottostruttura;
 - ✓ *Adesione con la ceramica:* il metallo deve facilitare la formazione di ossidi in corrispondenza della superficie di adesione con la ceramica al fine di ottenere un legame forte;
 - ✓ *Economicità:* il costo della lega è un parametro non secondario da tenere in considerazione e dipende dal tipo di lega stessa, dalla sua densità e dal processo tecnologico impiegato.

2.2 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI METALLICI

Da un punto di vista della composizione chimica, le leghe possono essere classificate in leghe nobili e leghe non nobili.

Le leghe nobili devono il loro nome ai materiali metallici presenti che risultano essere particolarmente inerti (tanto più un metallo non reagisce, tanto più è elevato il suo grado di nobiltà). Gli elementi nobili che vengono impiegati nel settore dentale sono l'oro, il platino e il palladio. Una lega per essere considerata nobile deve avere, pertanto, un tenore di oro o platino o palladio non inferiore al 25%.

Le leghe non nobili impiegate, invece, sono principalmente leghe di Cromo, Cobalto e Titanio.

In (20) viene proposta una classificazione delle leghe in base alla quantità di ioni metallici che liberano nell'arco di una settimana se immerse in una soluzione di cloruro di sodio (in accordo con la normativa ISO 10271). Sono state individuate le seguenti classi:

- ✓ Una prima classe a cui appartengono le leghe che rilasciano una quantità di ioni inferiore a $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$;
- ✓ Una seconda classe a cui appartengono le leghe che rilasciano una quantità di ioni compresa tra i 10 e i $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$;
- ✓ Una terza classe a cui appartengono le leghe che rilasciano una quantità di ioni compresa tra i 100 e i $1000 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

A seconda del tipo di utilizzo, invece, si può proporre una classificazione che prevede:

- ✓ *Leghe convenzionali:* sono quelle leghe per le quali non è prevista la compatibilità con la ceramica;
- ✓ *Leghe per metallo-ceramica:* sono leghe che si prestano ad essere impiegate con ceramiche a media-alta temperatura. Affinché una lega possa essere classificata come lega per metallo-ceramica essa deve garantire un solido legame con la ceramica, deve

presentare un coefficiente di dilatazione termica simile a quello della ceramica (onde evitare l'insorgere di pericolose tensioni all'interfaccia tra il metallo e la ceramica che possono portare quest'ultima a staccarsi dal metallo) e una temperatura di fusione sufficientemente elevata al fine di minimizzare le deformazioni che avvengono nella fase di cottura della ceramica;

- ✓ *Leghe nobili universali*: sono leghe che vengono impiegate sia per uso convenzionale sia in associazione alla ceramica.

La normativa UNI EN ISO 22674 (21) propone una classificazione in base alle caratteristiche di resistenza metallica che presentano. Vengono identificati 6 gruppi di materiali, dal "Tipo 0" al "Tipo 5" con resistenza via via crescente. In Tabella 2.2.1 si riportano le caratteristiche metalliche dei gruppi e gli esempi di applicazioni dei materiali previsti dalla normativa.

Tipo di lega	R _{p0,2} [MPa] minimo	A% [%] minimo	E [GPa] minimo	Esempi di applicazioni
0	-	-	-	Piccoli intarsi su elementi singoli, soggetti a bassi carichi
1	80	18	-	Intarsi estesi su elementi singoli, soggetti a bassi carichi
2	180	10	-	Protesi fisse a singolo elemento
3	270	5	-	Dispositivi con spessori sottili soggetti a forza elevate
4	360	2	-	Dispositivi che richiedono elevata rigidità e resistenza
5	500	2	150	

Tabella 2.2.1: Classificazione delle leghe metalliche secondo UNI EN ISO 22674

2.3 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE METALLICO IMPIEGATO

Il materiale metallico impiegato è una lega commerciale di polveri di Cobalto-Cromo, la cui denominazione è "EOS CobaltChrome SP2". Le polveri vengono sinterizzate secondo il processo di Fusione Laser Selettiva (SLM) ottenendo una lega per uso dentale classificabile come di "Tipo 4" in accordo con UNI EN ISO 22674 (21). La composizione chimica e le principali caratteristiche meccaniche ottenute dopo sinterizzazione, ricottura a distensione (1 ora a 750 °C), simulazione della cottura di ossidazione (5 minuti a 950 °C) e cotture ceramiche (4 per 2 minuti a 930 °C) in accordo a UNI EN ISO 22674 (21) vengono riportate nelle tabelle 2.3.1 e 2.3.2.

COMPOSIZIONE CHIMICA	LIMITE INFERIORE UNI EN ISO 22674 (wt-%)	LIMITE SUPERIORE UNI EN ISO 22674 (wt-%)	RISULTATO (wt-%)
Co	61.8	65.8	64.1
Cr	23.7	25.7	24.4

W	4.9	5.9	5.3
Mo	4.6	5.6	4.9
Si	0.8	1.2	1.1
Fe	0	0.50	0.11
Mn	0	0.10	0.03

Tabella 2.3.1: Composizione chimica delle polveri di Co-Cr impiegate

PROPRIETÀ	UNITÀ DI MISURA	LIMITE	LIMITE	RISULTATO (wt-%)
		INFERIORE UNI EN ISO 22674 (wt-%)	SUPERIORE UNI EN ISO 22674 (wt-%)	
Densità	g/cm ³	8.075	8.925	8.667
Rp 0.2%	MPa	765	935	850
Rm	MPa	-	-	1350
Allungamento dopo frattura A	%	min 3%	-	3%
Modulo di elasticità	GPa	-	-	200
Durezza Vickers HV10	HV	-	-	420
Coefficiente di dilatazione termica (25-500 °C)	m/m°C x 10 ⁻⁶	-	-	14.3
Coefficiente di dilatazione termica (20-600 °C)	m/m°C x 10 ⁻⁶	-	-	14.5
Intervallo di fusione	°C	-	-	1410-1450

Tabella 2.3.2: Caratteristiche meccaniche nominali del materiale impiegato

2.4 PROVA DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI GIUNTI SALDATI

L'obiettivo dell'attività sperimentale è quello di sviluppare una prova meccanica che permetta di calcolare la tensione alla quale avviene la rottura dei giunti saldati e verificare che questa si conforme a quanto previsto da UNI EN ISO 9333 (17) e da UNI EN ISO 28319 (23). Pertanto, in accordo con tale normativa, è stata impiegata una prova di trazione uniassiale che prevede di inserire il provino tra due ganasce della macchina di prova e di applicare un carico crescente fino alla rottura. Tali prove statiche di trazione sono ampiamente trattate all'interno degli standard normativi (ad esempio UNI EN 10002-1:2004 Materiali metallici – Prova di trazione Parte 1: Metodo di prova a temperatura ambiente (22) o ASTM E8/E8M-08 Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Materials). In ambito dentale le normative di riferimento sono la UNI EN ISO 2674 (21) e, in particolare, per quanto concerne i giunti saldati mediante saldobrasatura la UNI EN ISO 9333 (17), e mediante saldatura laser la UNI EN ISO 28319 (23). Quest'ultime prevedono di verificare a trazione il provino fino a rottura constatando che la tensione di rottura sia superiore, rispettivamente a 250 MPa o a 350 MPa o al carico unitario di scostamento dalla proporzionalità del metallo più debole utilizzato.

La resistenza del giunto saldato dipende da numerosi fattori come il tipo di materiale coinvolto nel processo e il tipo di processo di saldatura impiegato. A tal riguardo alcuni autori (23) (24) sottolineano come le giunzioni realizzate mediante la saldatura laser presentino proprietà meccaniche superiori. Tuttavia in letteratura esistono pareri contrastanti. Infatti altri autori (25) asseriscono che i giunti saldati realizzati con le tecniche tradizionali siano più performanti rispetto a quelli ottenuti impiegando il processo di saldatura laser. Tuttavia tali discrepanze possono essere attribuite ad una scelta erranea dei parametri del laser stesso, che non riesce a penetrare in profondità nel provino riducendo, di fatto, la sezione resistente.

In Tabella 2.4.1 si riportano, a titolo d'esempio, alcuni valori della resistenza meccanica tipici per i vari materiali metallici impiegati e per le varie tecniche di saldatura.

Tipo di materiale	Tipologia di processo di saldatura		
	Fusione	Brasatura	Laser
Lega Oro/Palladio	450-850 MPa (26) (27)	250-700 MPa (26) (27) (28)	600-700 MPa (26)
Lega Cobalto/Cromo	850-1100 MPa (29)	450-700 MPa (25) (29)	300-1300 MPa (25) (29) (24)
Titanio	-	200-450 MPa (30) (31)	400-700 MPa (28)

Tabella 2.4.1: Esempi di carichi di rottura di giunzioni saldate

In particolare, per quanto riguarda la brasatura di leghe al cobalto-cromo, il materiale d'apporto può essere sia una lega a base d'oro sia una lega al cobalto-cromo con un punto di fusione più basso rispetto al metallo base. Quest'ultima è consigliata poiché è più resistente alla corrosione e permette di ottenere giunti con proprietà meccanica superiori.

Infine, le prove sono state svolte in accordo al corrispondente protocollo di prova elaborato e riportato in Appendice II. Un esempio è illustrato in Figura 2.4.1.

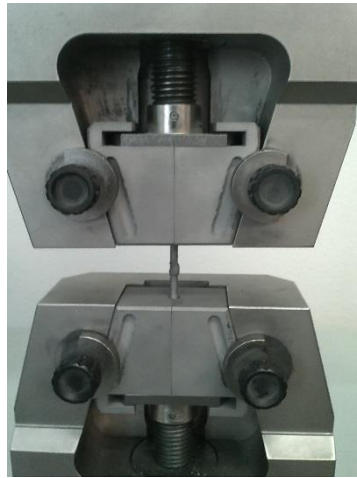


Figura 2.4.1 - Esempio di prova di trazione

2.5 PROVE DI FLESSIONE PER LA VERIFICA DELL'ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA

L'obiettivo dell'attività sperimentale è quello di impiegare una prova meccanica che permetta di valutare l'adesione tra metallo e ceramica e quindi di esprimere un giudizio obiettivo sulla capacità di ogni laboratorio di operare in accordo con i limiti imposti dalla normativa UNI EN ISO 9693-1 (18).

In letteratura esistono diverse categorie di prove per analizzare la resistenza al distacco tra metallo e ceramica. Hammad et al. (33) propongono una classificazione dei metodi di prova basati sul tipo di sollecitazione indotta per evidenziare il distacco:

- a) Prova di taglio: l'interfaccia tra metallo e ceramica viene sollecitata mediante sforzi di taglio. Esistono diversi tipi di modalità di prova, ma le due più utilizzate risultano essere quella sviluppata da Shell e Nielsen (33) (Figura 2.5.1 (a)) e quella proposta da Schmitz e Schulmeyer (Figura 2.5.1 (b)). La prima tecnica presenta problematiche legate all'influenza della geometria della superficie del metallo che può generare resistenze per attrito; la seconda tecnica si dimostra adeguata alla determinazione della resistenza al distacco poiché si manifestano distribuzioni di sforzi uniformi lungo l'interfaccia tra metallo e ceramica. Tali modalità di prove possono far sì che non si abbia distacco solo lungo l'interfaccia, ma in taluni casi la propagazione della cricca si manifesta attraverso la ceramica, con conseguente aumento di forza per ottenere il distacco.
- b) Prova di trazione (Figura 2.5.1 (e)): il provino, composto da due barre metalliche unite alle estremità tramite uno strato di ceramica, è sollecitato con sforzi di trazione; tale tipologia di prova trova applicazioni per misurare l'aderenza degli ossidi metallici alla ceramica. Non ha trovato grande sviluppo a causa delle problematiche di allineamento tra le parti del provino che possono portare ad avere distribuzioni di tensioni irregolari.

- c) Prova di trazione e taglio combinate: in tali prove i provini sottoposti a forze che non sollecitano direttamente l'interfaccia tra metallo e ceramica. Di conseguenza in alcuni casi si possono manifestare fratture della ceramica, senza riuscire a valutare la resistenza al distacco.
- d) Prova di flessione (Figura 2.5.1 (c)(d)): consiste nel sottoporre un provino a flessione su tre o quattro punti. Il distacco si manifesta a causa di sforzi di tensione paralleli o perpendicolari all'interfaccia tra metallo e ceramica. Critiche a tale metodo derivano dal fatto che la forza di distacco dipende dalle proprietà di rigidezza del metallo. Maggiore è il modulo elastico della lega impiegata, maggiore è la forza necessaria a manifestare il distacco.
- e) Prova di torsione (Figura 2.5.1 (f)): il provino composto da una lamina metallica centrale su cui viene riportato su ambo i lati della ceramica, è sollecitato a torsione mediante un apposito sistema di test.

Esempi di schemi di prova sono riportati in Figura 2.5.1.

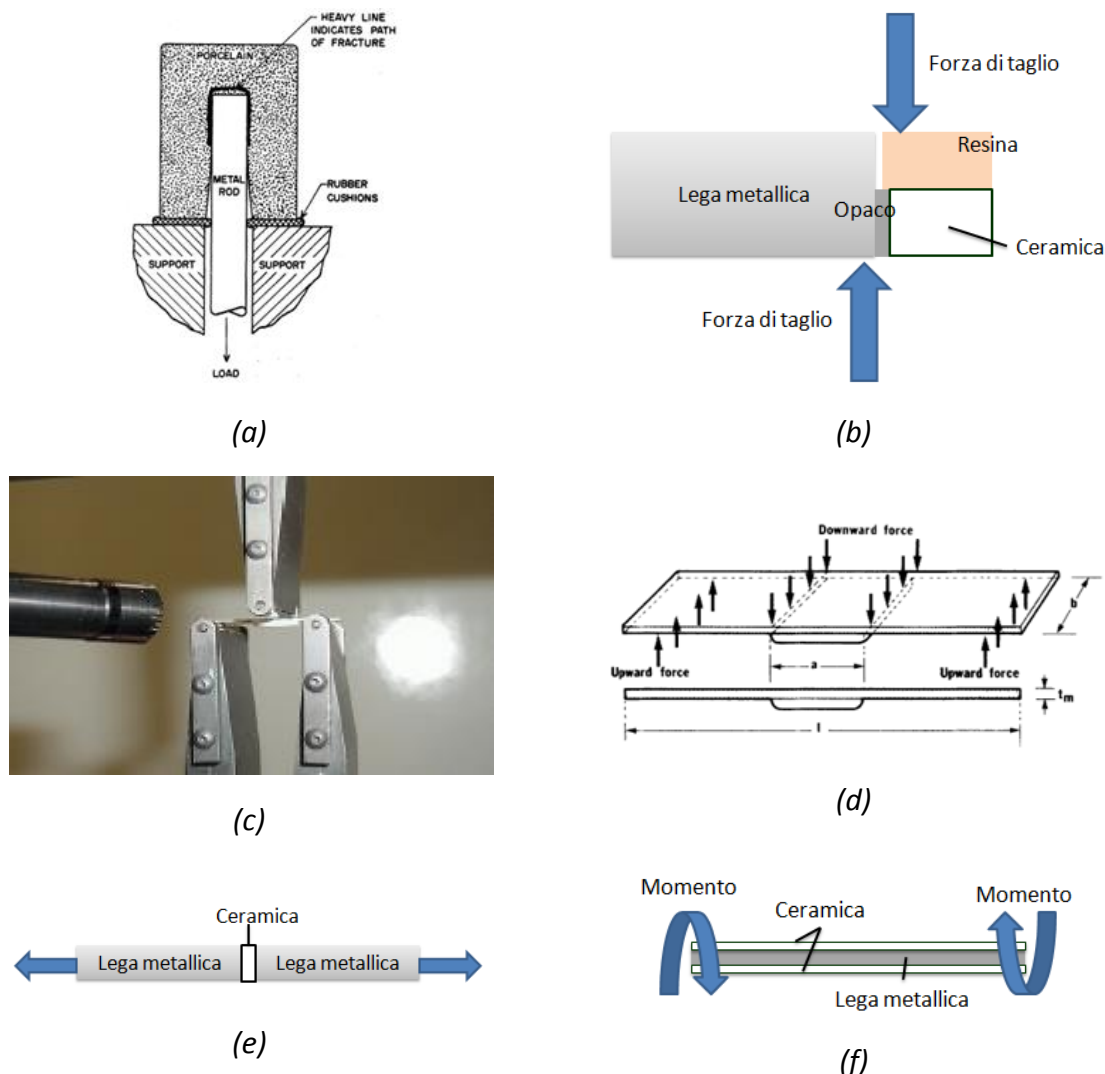


Figura 2.5.1: Esempi di schemi di prova

L'analisi della letteratura tecnica evidenzia, dunque, come non esista una prova universalmente accettata e condivisa dai ricercatori. Tuttavia la norma UNI EN ISO 9693-1 (18)

suggerisce l'impiego del metodo di Schwickerath. Tale metodo consiste in una prova a flessione su tre punti. La barretta metallica con al centro la ceramizzazione viene disposta su di un supporto avente la distanza tra i due punti di appoggio pari a 20 mm e un diametro, del perno su cui va ad appoggiarsi la barretta, pari a 2 mm. Il punzone viene fatto scendere in posizione simmetrica rispetto al supporto, in modo da sollecitare il campione in corrispondenza della mezzeria, con una velocità pari a 1,5 mm/min. i dati raccolti ed elaborati, secondo l'algoritmo proposto dalla normativa stessa, permettono di asserire la conformità della tensione di distacco con quanto previsto dalla normativa sopra citata.

Infine, le prove sono state svolte in accordo al corrispondente protocollo di prova elaborato e riportato in Appendice V. un esempio è illustrato in Figura 2.5.2.

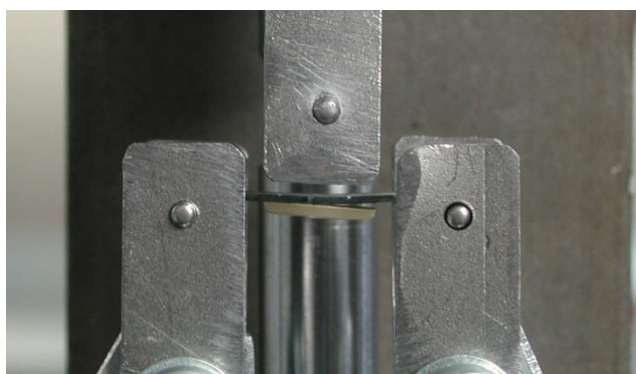


Figura 2.5.2: Esempio di prova di flessione

2.6 MISURAZIONI DELLA DISTANZA MARGINALE TRA SOTTOSTRUTTURE METALLICHE E MODELLO DI MONCONI.

Lo scopo dell'attività sperimentale è quello di sviluppare una procedura di prova che permetta di verificare la presenza di deformazioni indotte dal processo di ceramizzazione sulle sottostrutture metalliche protesiche.

La presenza di un certo gap marginale nella realizzazione di protesi dentali è inevitabile data la complessità di quest'ultime. Tale gap, però, espone la restaurazione dentale all'aggressione dei batteri e alla formazione di carie secondarie.

L'impiego dei sistemi CAD/CAM permette sicuramente di migliorare la precisione geometrica con la quale le sottostrutture metalliche si inseriscono nei monconi. In questo caso la precisione stessa dipende dall'apparato di digitalizzazione e dai parametri di lavorazione impiegati. In letteratura sono presenti numerosi studi che propongono un valore massimo dell'apertura marginale tra protesi e monconi. Ad esempio alcuni autori (34) (35) (36) (37) basandosi sugli studi di McLean e Von Fraunhofer utilizzano il criterio dei 120 μm per definire il limite massimo. Altri, come Tao et al. (38) sono più restrittivi, proponendo un limite massimo di 40 μm . In questa sede si è scelto di impiegare le direttive previste da "Requisiti e criteri di fabbricazione per sistemi metallo-ceramici - AIMAD, documento tecnico, 2014" (40), che prevedono una distanza marginale massima pari a 100 μm .

Tuttavia, anche se originariamente la sottostruttura protesica metallica presenta delle caratteristiche di precisione nell'accoppiamento con i monconi coerenti con il limite imposto, il processo di ceramizzazione, se non eseguito correttamente, può indurre delle deformazioni che portano le sottostrutture a non essere più conformi.

Per tale motivo è stata predisposta una metodologia di misurazione che prevede di valutare la distanza marginale presente campionando un opportuno numero di punti (massimo 30) prima e dopo il processo di ceramizzazione. Il confronto tra i dati ottenuti permette di valutare la differenza di distanza marginale prodotta dalle lavorazioni eseguite dai laboratori e di valutare, quindi, l'effettiva presenza di deformazione sulla sottostruttura.

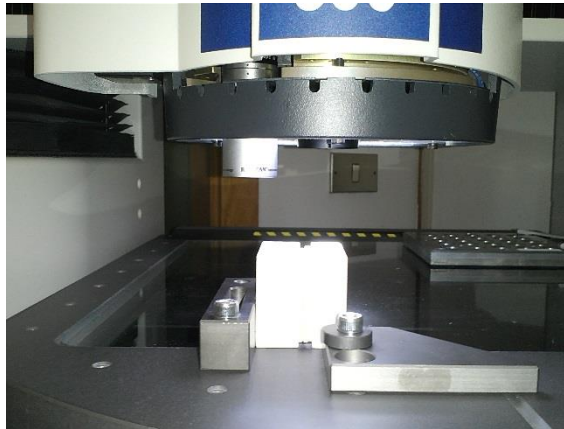


Figura 2.6.1: Esempio di misurazione di sottostruttura protesica

2.7 APPARATO DI PROVA

Di seguito vengono descritti gli apparati di prova impiegati per le prove svolte. Si ricorda che tali strumentazioni sono disponibili nel laboratorio LIN del dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

2.7.1 APPARATO DI PROVA PER LE PROVE DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI GIUNTI SALDATI

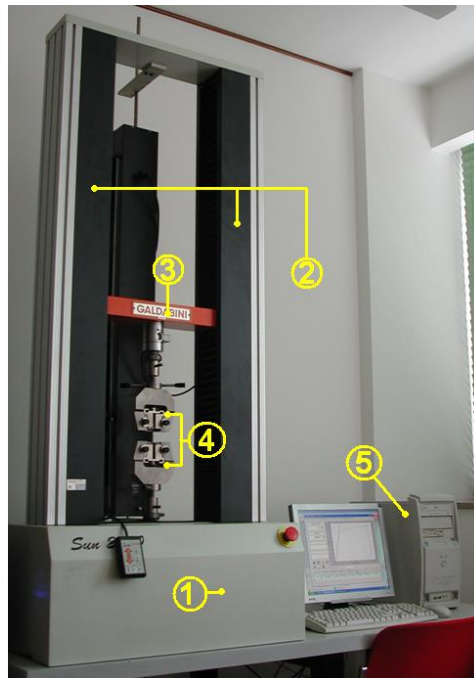


Figura 2.7.1: Apparato di prova per prove di trazione

La macchina di prova per prove di trazione uniassiali impiegata nella caratterizzazione meccanica dei giunti saldati è la Galdalbinsi SUN 2500 equipaggiata con una cella di carico da 25 kN. Come si può osservare in Figura 2.7.1 la macchina è composta da un basamento (1) sul quale sono disposte due colonne verticali (2). Il sistema di attuazione del carico è di tipo elettromeccanico ed avviene con motore elettrico e viti a ricircolo di sfere poste nelle colonne verticali. Lo scorrimento della traversa mobile orizzontale (3) determina l'allontanamento delle morse di afferraggio (4). L'utente interagisce con il sistema di prova attraverso un'unità hardware (5), equipaggiata con il software Sun GraphWork 2.0 e collegata all'elettronica di controllo con linea seriale. L'elettronica di controllo realizza tutte le funzioni di regolazione, controllo e acquisizione dei segnali in uscita dai trasduttori di forza, deformazione e corsa. Essa è munita di certificato di taratura SIT, n. 162-09F emesso il 14 Aprile 2009.

2.7.2 APPARATO DI PROVA PER LE PROVE DI FLESSIONE PER LA VALUTAZIONE DELL'ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA

La macchina di prova impiegata per le prove di flessione è la Galdalbinsi SUN 2500 descritta nel paragrafo precedente. L'apparato di prova è rappresentato in Figura 2.7.2. Esso è composto da un supporto sul quale viene adagiata la barretta metallica con la ceramizzazione disposta verso il basso. La distanza tra i punti di appoggio è pari a 20 mm, mentre il diametro dei perni di appoggio è di 2 mm. Il punzone applica la forza in corrispondenza della mezzeria del provino e scende con una velocità pari a 1,5 mm/min.

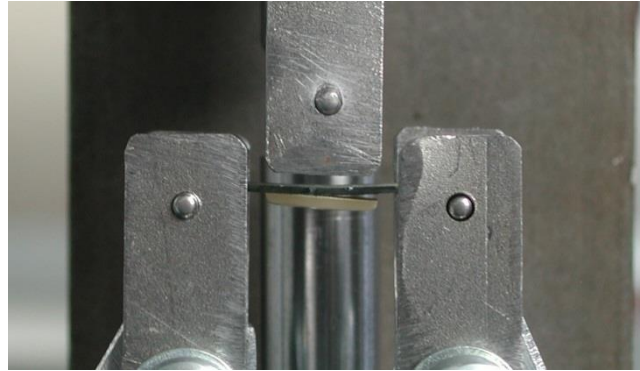


Figura 2.7.2 – Apparato di prova

2.7.3 APPARATO DI PROVA PER LE MISURAZIONI DELLA DISTANZA MARGINALE PRESENTE TRA LE SOTTOSTRUTTURE METALLICHE E IL MODELLO DI MONCONI

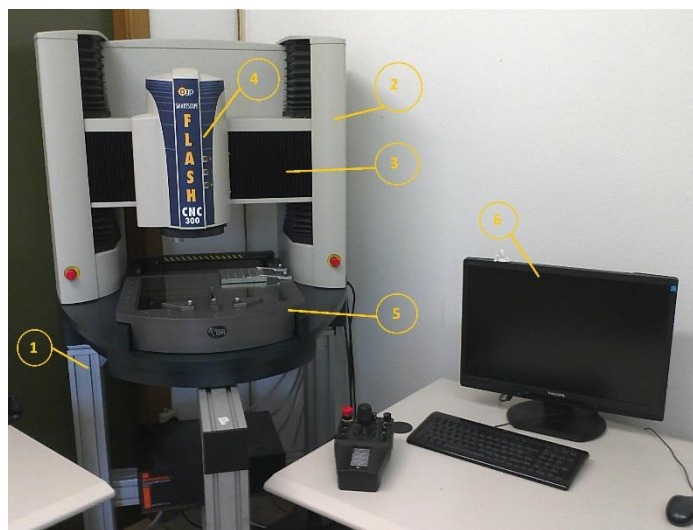


Figura 2.7.3: Apparato di misurazione

La macchina di prova impiegata per valutare la distanza marginale tra le sottostrutture metalliche e il modello di monconi è la OGP Flash CNC 300. Come si può osservare in figura 2.7.3, la macchina è composta da un basamento (1) sul quale sono disposte le colonne verticali (2) che, insieme alla traversa orizzontale (3), consentono al dispositivo di misura ottica (4) la traslazione verticale e trasversale. Il movimento lungo l'altra direzione nel piano è realizzato da una tavola mobile (5) su cui è posto il vetro d'appoggio. L'utente interagisce col sistema grazie ad un unità hardware (6). I dati elaborati dalla macchina di misura vengono forniti in output. Essa è dotata di un certificato di taratura n. 13/071/DB emesso il 5 dicembre 2013. In tale attestato si certifica che gli errori, determinati con il massimo ingrandimento e con un carico disposto sulla tavola di 5 kg, sono pari a:

- ✓ Errore in xyz $E_3 = 2,8 + \frac{5L}{1000}$;
- ✓ Errore in xy $E_2 = 1,8 + \frac{5L}{1000}$;
- ✓ Errore in z $E_3 = 2,5 + \frac{5L}{1000}$;

Dove con L si intende la misura in mm e gli errori sono espressi in μm .

Infine si ricorda come tale macchina di misura sia stata impiegata anche per la caratterizzazione geometrica dei provini per le prove di trazione.

CAPITOLO 3. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA MEDIANTE PROVE DI TRAZIONE

La finalità delle prove è, come espresso nei capitoli precedenti, indagare il carico di rottura delle giunzioni saldate realizzate dai laboratori. Tuttavia, preliminarmente, si è deciso di studiare quale fosse la geometria e la posizione di lavoro nella macchina di sinterizzazione laser migliori al fine di ottenere le più elevate caratteristiche meccaniche in termini di tensione di rottura. Per questo motivo il lavoro svolto viene presentato, in questo capitolo, diviso in due parti principali. La prima parte ha come obiettivo verificare le caratteristiche meccaniche nominali dichiarate dal fornitore delle polveri (in termini di carico di rottura) e determinare la direzione di accrescimento migliore. La seconda parte, invece, rappresenta il fulcro vero e proprio del lavoro svolto. In essa i giunti saldati realizzati dai laboratori sono stati testati verificandone la conformità in accordo con le normative UNI EN ISO 9333 (17) e UNI EN ISO 28319 (23). La prova impiegata in entrambi i casi, ovviamente, consiste nella prova di trazione uniassiale. Il provino viene caricato sulla macchina di prova e viene applicata una tensione crescente fino ad arrivare a rottura. In seguito i dati raccolti sono stati elaborati consentendo di ricavare la tensione di rottura e verificare che questa fosse inferiore al limite imposto dalla normativa.

I provini, come già indicato, sono stati realizzati come monoblocco tramite la tecnica di fusione laser selettiva impiegando polveri di Co-Cr. La composizione di tali polveri soddisfa i requisiti per i materiali destinati al settore odontoiatrico di “Tipo 4” in accordo con la normativa UNI EN ISO 22674 (21). La composizione chimica e le principali caratteristiche meccaniche ottenute dopo sinterizzazione, ricottura a distensione (1 ora a 750 °C), simulazione della cottura di ossidazione (5 minuti a 950 °C) e cotture ceramiche (4 per 2 minuti a 930 °C) in accordo a UNI EN ISO 22674 (21) sono state riportate nel Capitolo 2. Successivamente essi sono stati tagliati in corrispondenza della mezzeria ed inviati ai vari laboratori i quali hanno realizzato il giunto saldato.

3.1 PRIMA FASE: PROVE PRELIMINARI

La fase di indagine preliminare aveva lo scopo di verificare le proprietà meccaniche di interesse nominali, dichiarate dal fornitore delle polveri, e di verificare quale fosse la configurazione di accrescimento migliore dei provini al fine di ottenere la migliore precisione geometrica e il più elevato carico di rottura.

3.1.1 GEOMETRIA E CONFIGURAZIONE DEL PROVINO

La norma UNI EN ISO 22674 (21) propone due geometrie diverse dei provini che si possono vedere nelle Figure 3.1.1.1 e 3.1.1.2, entrambe applicabili al fine dell'esecuzione delle prove di trazione.

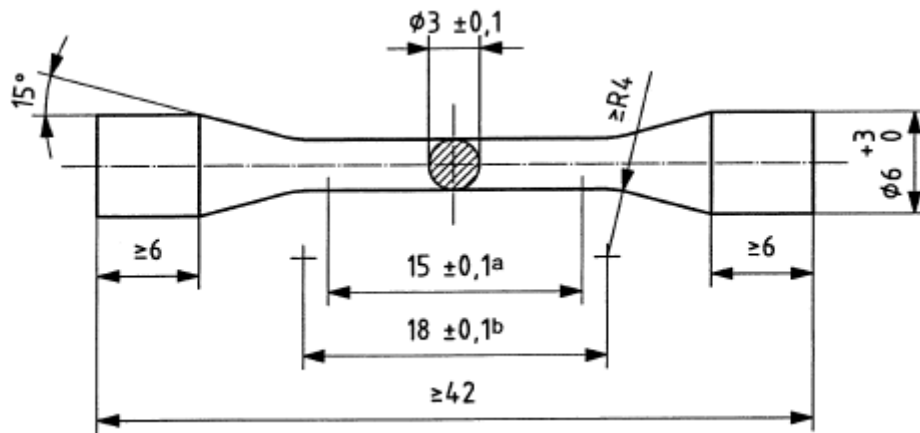


Figura 3.1.1.1– Provino con spallamenti conici

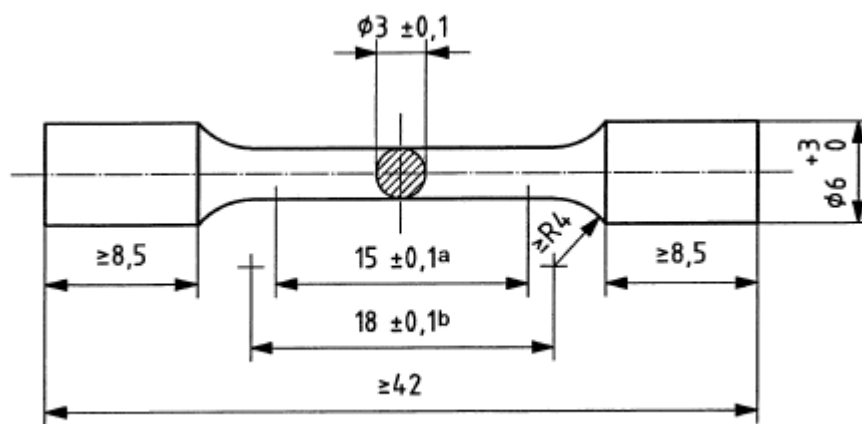


Figura 3.1.1.2– Provino con spallamenti con raggi di raccordo

In questa fase si è scelto di impiegare le geometrie illustrate nelle Figura 3.1.1.3 e 3.1.1.4, apportando alcune modifiche alle geometrie proposte dalla normativa UNI EN ISO 22674 (21), allungando la zona calibrata al fine di facilitare l'afferraggio dei provini. Le Tabelle 3.1.1.1 e 3.1.1.2 confrontano sinteticamente la geometria dei provini indicata dalla normativa con quella effettivamente impiegata.

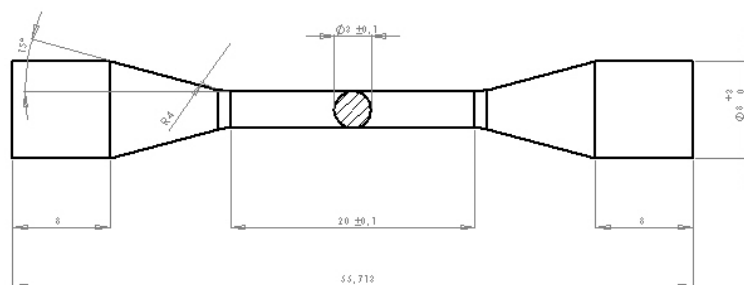


Figura 3.1.1.3 – Geometria del provino con spallamenti conici

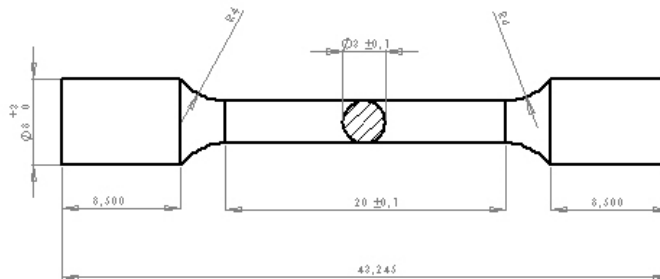


Figura 3.1.1.4 – Geometria del provino con spallamenti radiali

Denominazione	Simbolo	Unità di misura	Valore nominale UNI EN ISO 22674	Valore nominale di progetto
Diametro della sezione calibrata	d	mm	3	3
Lunghezza della parte calibrata	L_c	mm	18	20
Lunghezza totale	L_t	mm	≥ 42	≥ 55
Angolo delle spalle coniche	-	°	15	15

Tabella 3.1.1.1 - Confronto tra le caratteristiche geometriche dei provini con spallamento conico prescritti da UNI EN ISO 22674 e quelli impiegati nello studio

Denominazione	Simbolo	Unità di misura	Valore nominale UNI EN ISO 22674	Valore nominale di progetto
Diametro della sezione calibrata	d	mm	3	3
Lunghezza della parte calibrata	L_c	mm	18	20
Lunghezza totale	L_t	mm	≥ 42	≥ 47
Raggio di raccordo delle spalle	-	mm	4	4

Tabella 3.1.1.1 - Confronto tra le caratteristiche geometriche dei provini con spallamento radiale prescritti da UNI EN ISO 22674 e quelli impiegati nello studio

In letteratura esistono diversi studi inerenti le migliori configurazioni di accrescimento dei provini al fine di ottenere le massime proprietà meccaniche. Ad esempio in (40) si dimostra come la direzione di posizionamento dei provini nel piano di lavoro influenzi le proprietà

meccaniche. In particolare quando l'angolo tra la direzione di accrescimento e la forza di trazione che viene applicata è pari a zero si ottiene il maggior carico di rottura. Nel caso in esame sono state prese in considerazione le seguenti configurazioni:

- ✓ Configurazione 1: asse del provino disposto nel piano di lavoro della macchina;
- ✓ Configurazione 2: asse del provino disposto ortogonalmente al piano di lavoro della macchina.

In Figura 3.1.1.5 vengono mostrate, a titolo d'esempio, le configurazioni analizzate

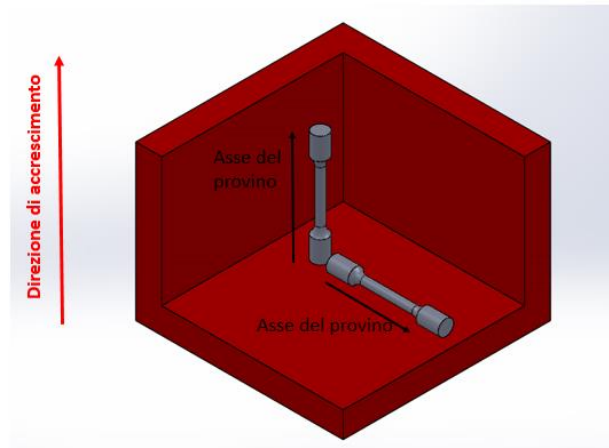


Figura 3.1.1.5 – Disposizione dei provini

Pertanto sono stati realizzati:

- ✓ Cinque provini con spallamenti conici secondo la configurazione 1;
- ✓ Cinque provini con spallamenti con raggio di raccordo secondo la configurazione 1;
- ✓ Cinque provini con spallamenti con raggio di raccordo secondo la configurazione 1;

Per ricavare le tensioni di rottura dei provini e per verificare quale fosse la configurazione di realizzazione dei provini che consente la miglior precisione geometrica è stato necessario provvedere alle misure dimensionali dei provini impiegando la macchina di misura automatica OGP Flash CNC 300 presente presso il laboratorio LIN del dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

3.1.2 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA

Per ogni provino sono stati misurati i seguenti parametri, il cui riferimento viene chiarito in Figura 3.1.2.1:

- ✓ Diametro della zona calibrata;
- ✓ Lunghezza della zona calibrata;
- ✓ Errore di rettilineità della generatrice superiore;
- ✓ Errore di rettilineità della generatrice inferiore;
- ✓ Errore di rettilineità del tratto cilindrico A superiore;
- ✓ Errore di rettilineità del tratto cilindrico A inferiore;

- ✓ Errore di rettilineità del tratto cilindrico B superiore;
- ✓ Errore di rettilineità del tratto cilindrico B inferiore;
- ✓ Errore di parallelismo della generatrice superiore;
- ✓ Errore di parallelismo della generatrice inferiore;
- ✓ Errore di parallelismo del tratto A superiore;
- ✓ Errore di parallelismo del tratto A inferiore;
- ✓ Errore di parallelismo del tratto B superiore;
- ✓ Errore di parallelismo del tratto B inferiore;

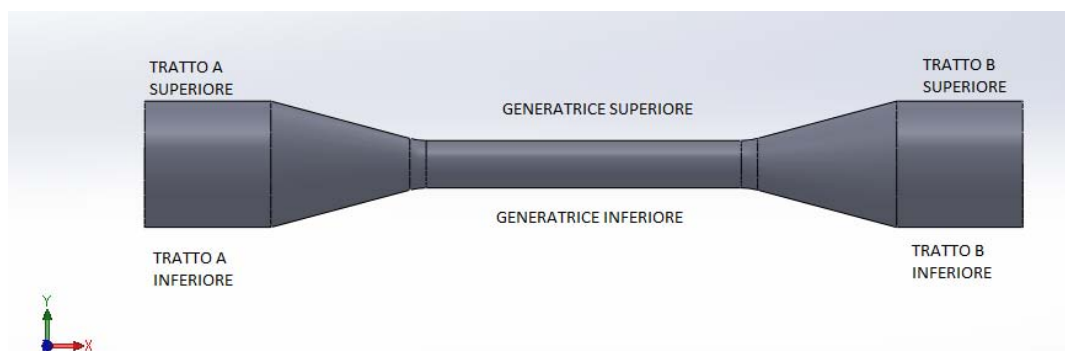


Figura 3.1.2.1 – Descrizione dei riferimenti impiegati

Le misure sono state eseguite su due piani ortogonali tra di loro e successivamente ne è stata eseguita la media nel seguente modo:

- ✓ $Diametro\ medio = \frac{D_1 + D_2}{2}$;
- ✓ $Errore\ di\ rettilineità = \frac{1}{2} \sqrt{rett_1^2 + rett_2^2}$;
- ✓ $Errore\ di\ parallelismo = \frac{1}{2} \sqrt{par_1^2 + par_2^2}$.

I risultati sono presentati nelle Tabelle da 3.1.2.1 a 3.1.2.7 e nei Grafici da 3.1.2.1 a 3.2.1.14.

	N° Provino	Diametro zona calibrata [mm]	Valore medio [mm]	Lunghezza zona calibrata [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	3,01		20,31	
	2	2,96		20,11	
	3	2,98	2,98	20,18	20,17
	4	2,99		20,12	
	5	2,95		20,13	
Radiali – configurazione 2	1	2,97		19,85	
	2	2,99		19,92	
	3	2,98	2,99	19,98	19,95
	4	3,02		20,11	
	5	2,99		19,88	

Radiali – configurazione 2	1	2,96		19,70	
	2	2,97		19,78	
	3	2,96	2,97	19,78	19,74
	4	2,97		19,74	
	5	2,97		19,68	

Tabella 3.1.2.1 – Diametro e lunghezza della zona calibrata dei provini

	N° Provino	Rettilinearità generatrice superiore [mm]	Valore medio [mm]	Rettilinearità generatrice inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,07		0,09	
	2	0,07		0,08	
	3	0,09	0,06	0,07	0,08
	4	0,06		0,08	
	5	0,03		0,09	
Radiali – configurazione 2	1	0,09		0,09	
	2	0,06		0,12	
	3	0,06	0,07	0,10	0,09
	4	0,08		0,09	
	5	0,12		0,08	
Radiali – configurazione 2	1	0,08		0,08	
	2	0,07		0,07	
	3	0,06	0,08	0,08	0,08
	4	0,06		0,08	
	5	0,06		0,09	

Tabella 3.1.2.2 – Errore di rettilinearità della generatrice superiore e inferiore dei provini

	N° Provino	Rettilinearità A superiore [mm]	Valore medio [mm]	Rettilinearità A inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,04		0,06	
	2	0,05		0,05	
	3	0,06	0,04	0,03	0,05
	4	0,04		0,05	
	5	0,03		0,05	
Radiali – configurazione 2	1	0,09		0,04	
	2	0,12	0,08	0,07	0,06

	3	0,10		0,10	
	4	0,06		0,05	
	5	0,05		0,06	
Radiali – configurazione 2	1	0,03		0,05	
	2	0,03		0,06	
	3	0,01	0,03	0,02	0,04
	4	0,04		0,03	
	5	0,03		0,03	

Tabella 3.1.2.3 – Errore di rettilineità del tratto A superiore e inferiore dei provini

	N° Provino	Rettilineità B superiore [mm]	Valore medio [mm]	Rettilineità B inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,05		0,05	
	2	0,06		0,07	
	3	0,07	0,06	0,04	0,06
	4	0,03		0,06	
	5	0,07		0,09	
Radiali – configurazione 2	1	0,16		0,12	
	2	0,08		0,12	
	3	0,07	0,1	0,11	0,11
	4	0,07		0,10	
	5	0,13		0,08	
Radiali – configurazione 2	1	0,05		0,03	
	2	0,02		0,04	
	3	0,03	0,04	0,04	0,04
	4	0,05		0,02	
	5	0,03		0,05	

Tabella 3.1.2.4 – Errore di rettilineità del tratto B superiore ed inferiore dei provini

	N° Provino	Parallelismo generatrice superiore [mm]	Valore medio [mm]	Parallelismo generatrice inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,09		0,11	
	2	0,12		0,09	
	3	0,12	0,11	0,08	0,10
	4	0,09		0,10	
	5	0,15		0,13	

Radiali – configurazione 2	1	0,16		0,19	
	2	0,15		0,18	
	3	0,14	0,15	0,18	0,18
	4	0,17		0,17	
	5	0,14		0,18	
Radiali – configurazione 2	1	0,17		0,17	
	2	0,15		0,14	
	3	0,18	0,17	0,17	0,18
	4	0,19		0,20	
	5	0,17		0,20	

Tabella 3.1.2.5 – Errore di parallelismo della generatrice superiore ed inferiore dei provini

	N° Provino	Parallelismo A superiore [mm]	Valore medio [mm]	Parallelismo A inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,12		0,12	
	2	0,14		0,12	
	3	0,09	0,11	0,05	0,09
	4	0,08		0,06	
	5	0,15		0,09	
Radiali – configurazione 2	1	0,12		0,12	
	2	0,13		0,12	
	3	0,21	0,13	0,17	0,13
	4	0,08		0,09	
	5	0,09		0,12	
Radiali – configurazione 2	1	0,10		0,13	
	2	0,12		0,12	
	3	0,06	0,10	0,07	0,10
	4	0,15		0,13	
	5	0,07		0,07	

Tabella 3.1.2.6 – Errore di parallelismo del tratto A superiore ed inferiore dei provini

	N° Provino	Parallelismo B superiore [mm]	Valore medio [mm]	Parallelismo B inferiore [mm]	Valore medio [mm]
Conici – configurazione 1	1	0,07		0,07	
	2	0,16	0,11	0,13	0,09
	3	0,11		0,04	

	4	0,10		0,07	
	5	0,12		0,14	
Radiali – configurazione 2	1	0,27		0,13	
	2	0,12		0,14	
	3	0,12	0,16	0,12	0,13
	4	0,15		0,15	
	5	0,17		0,10	
Radiali – configurazione 2	1	0,09		0,09	
	2	0,10		0,10	
	3	0,04	0,08	0,05	0,08
	4	0,07		0,08	
	5	0,08		0,09	

Tabella 3.1.2.7 – Errore di parallelismo del tratto B superiore ed inferiore dei provini

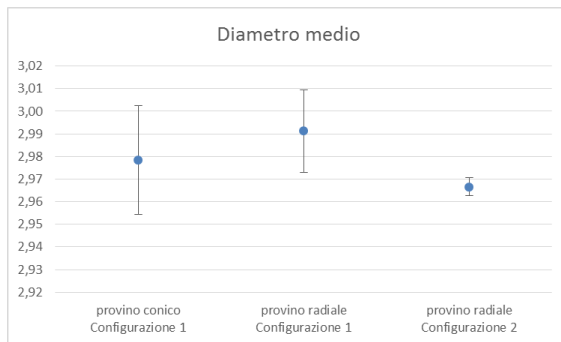


Grafico 3.1.2.1 – Diametro medio della zona calibrata dei provini analizzati

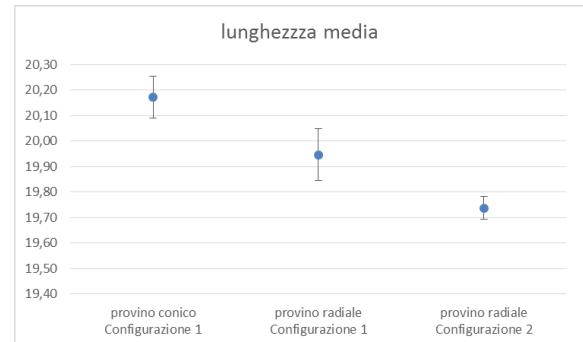


Grafico 3.1.2.2 – Lunghezza della zona calibrata dei provini analizzati

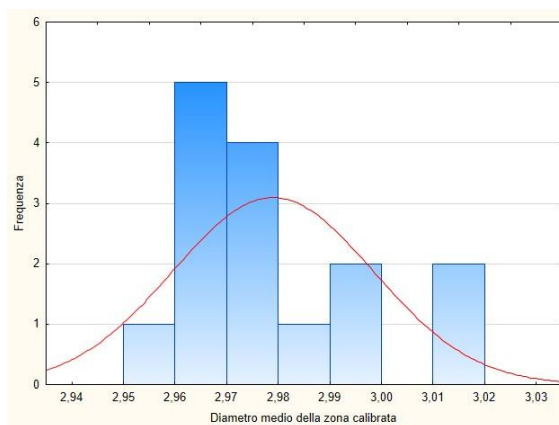


Grafico 3.1.2.3 – Distribuzione del diametro medio della zona calibrata dei provini analizzati

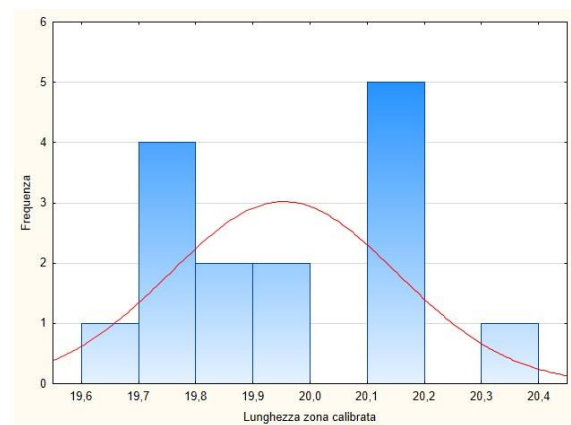


Grafico 3.1.2.4 – Distribuzione della lunghezza della zona calibrata dei provini analizzati

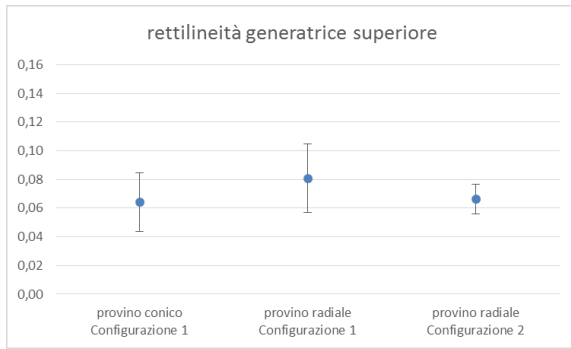


Grafico 3.1.2.5 – Errore di rettilineità della generatrice superiore

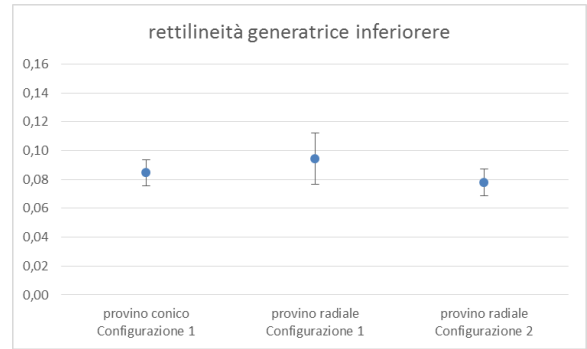


Grafico 3.1.2.6 – Errore di rettilineità della generatrice inferiore

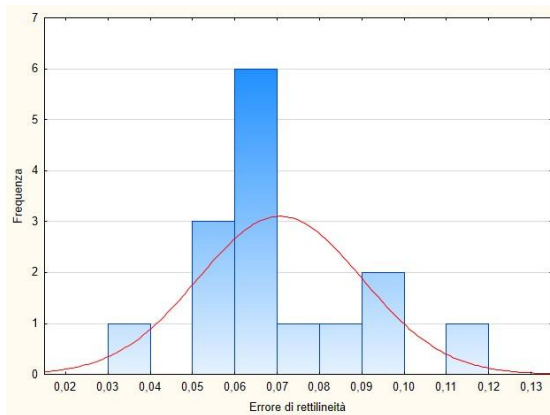


Grafico 3.1.2.7 – Distribuzione dell'errore di rettilineità della generatrice superiore

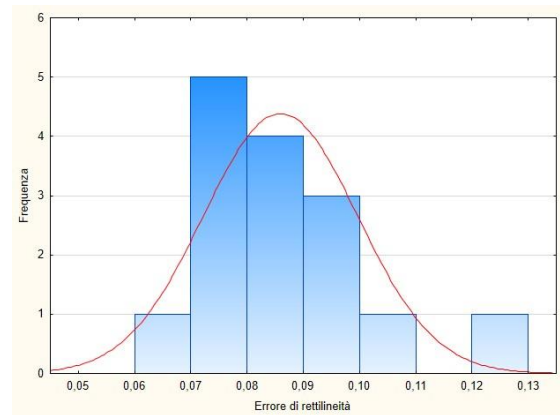


Grafico 3.1.2.8 – Distribuzione dell'errore di rettilineità della generatrice inferiore

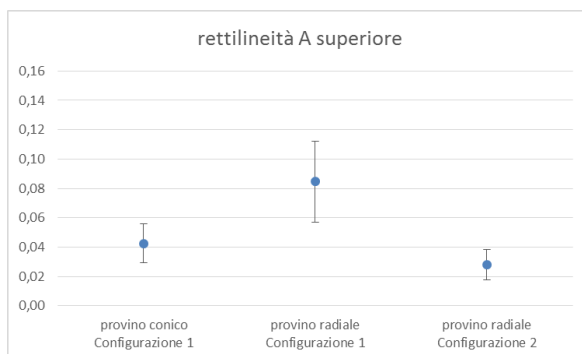


Grafico 3.1.2.9 – Errore di rettilineità del tratto A superiore

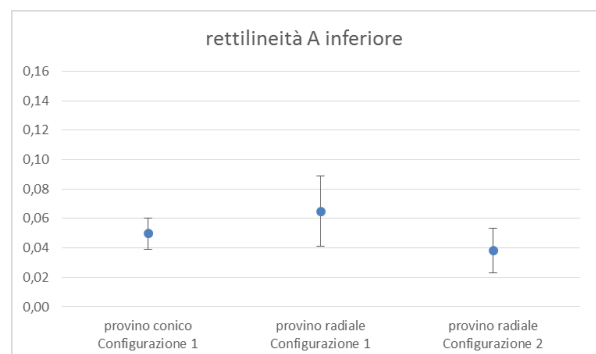


Grafico 3.1.2.10 – Errore di rettilineità del tratto A inferiore

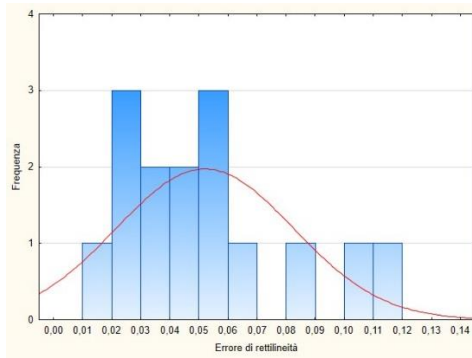


Grafico 3.1.2.11 – Distribuzione dell'errore di rettilineità del tratto A superiore

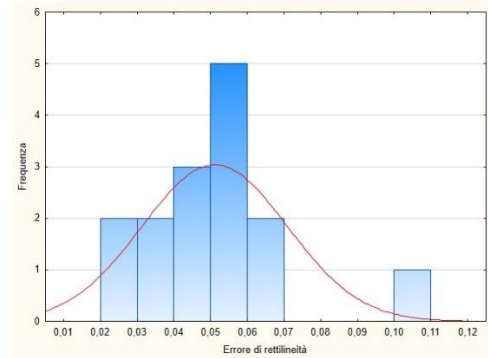


Grafico 3.1.2.12 – Distribuzione dell'errore di rettilineità del tratto A inferiore

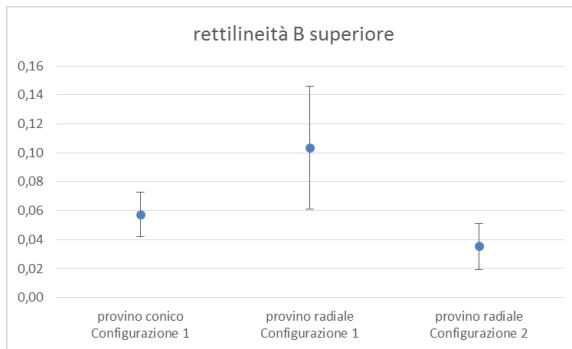


Grafico 3.1.2.13 – Errore di rettilineità del tratto B superiore

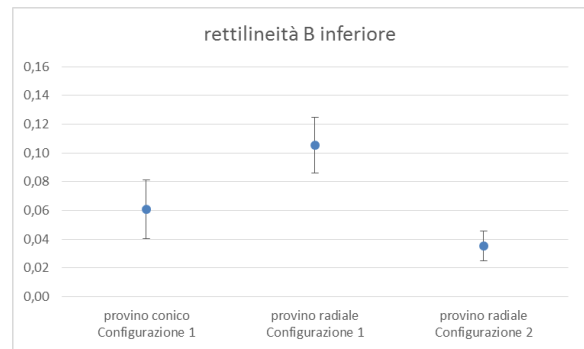


Grafico 3.1.2.14 – Errore di rettilineità del tratto B inferiore

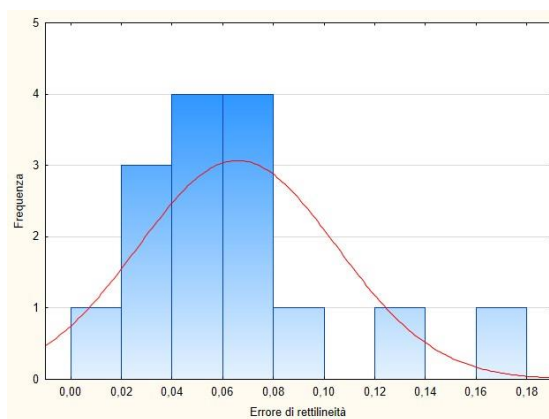


Grafico 3.1.2.15 – Distribuzione dell'errore di rettilineità del tratto B superiore

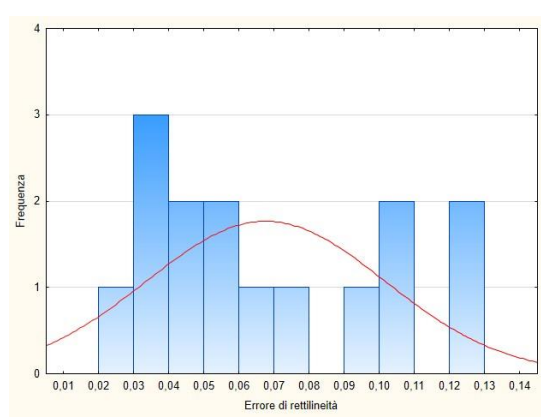


Grafico 3.1.2.16 – Distribuzione dell'errore di rettilineità del tratto B inferiore

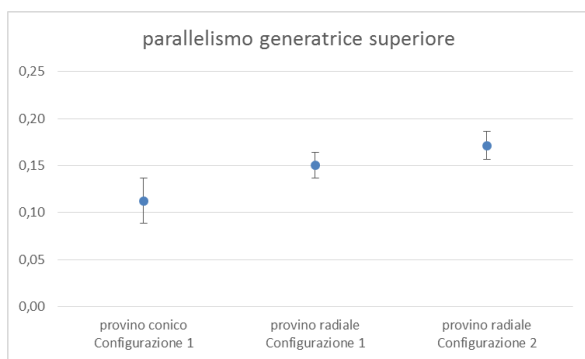


Grafico 3.1.2.17 – Errore di parallelismo della generatrice superiore

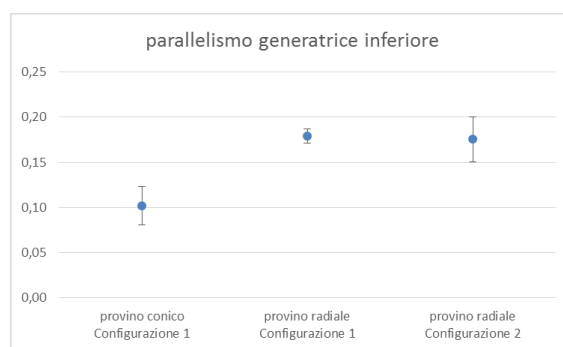


Grafico 3.1.2.18 – Errore di parallelismo della generatrice inferiore

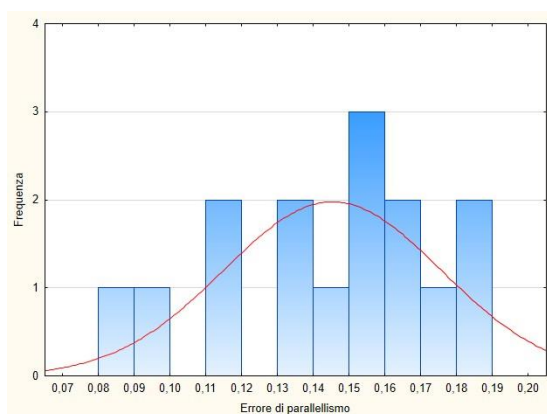


Grafico 3.1.2.17 – Distribuzione dell'errore di parallelismo della generatrice superiore

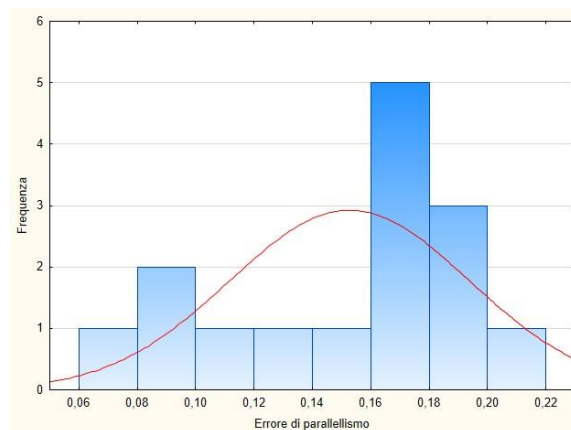


Grafico 3.1.2.18 – Distribuzione dell'errore di parallelismo della generatrice inferiore

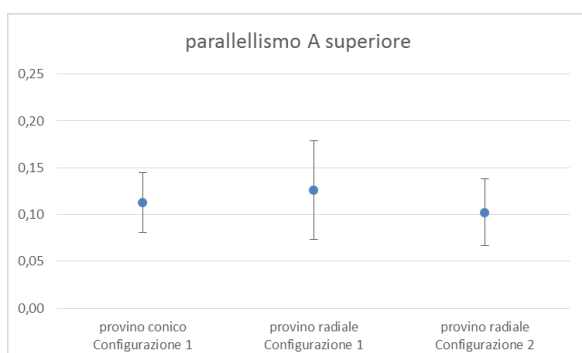


Grafico 3.1.2.19 – Errore di parallelismo del tratto A superiore

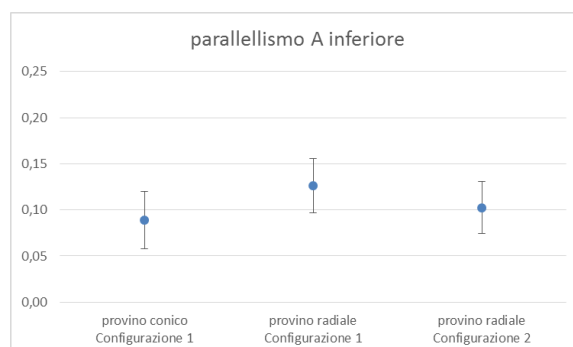


Grafico 3.1.2.20 – Errore di parallelismo del tratto A inferiore

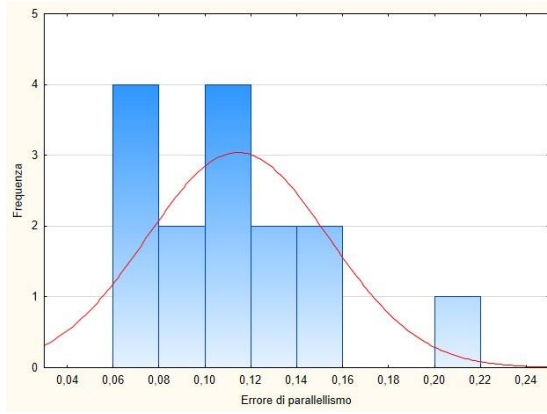


Grafico 3.1.2.21 – Distribuzione dell'errore di parallelismo del tratto A superiore

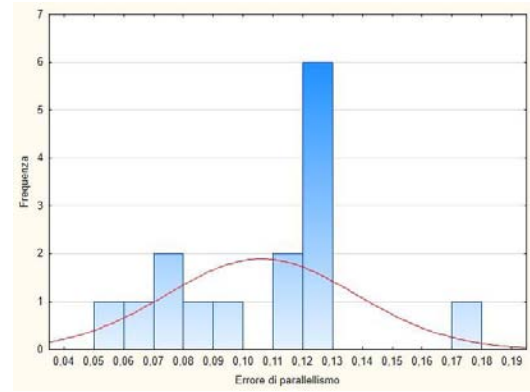


Grafico 3.1.2.22 – Distribuzione dell'errore di parallelismo del tratto A inferiore

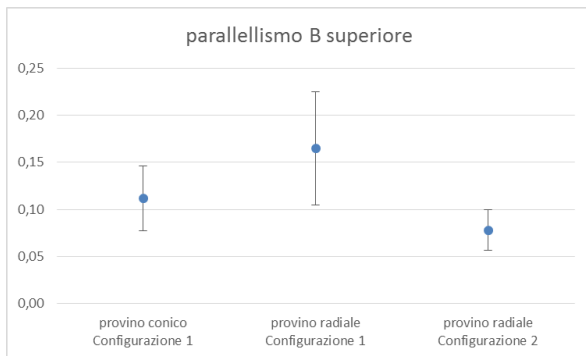


Grafico 3.1.2.23 – Errore di parallelismo del tratto B superiore

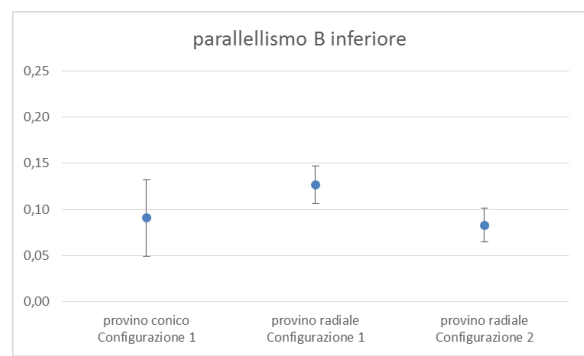


Grafico 3.1.2.24 – Errore di parallelismo del tratto B inferiore

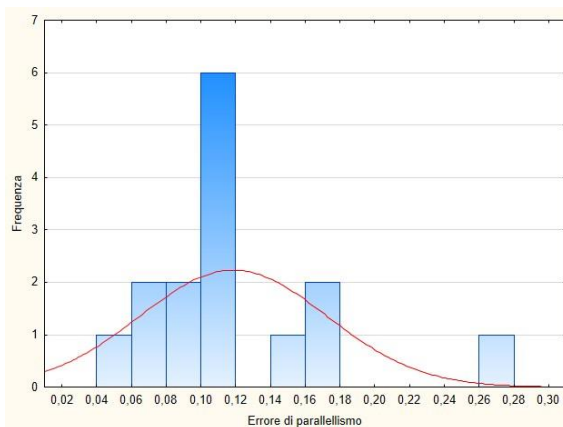


Grafico 3.1.2.25 – Distribuzione dell'errore di parallelismo del tratto B superiore

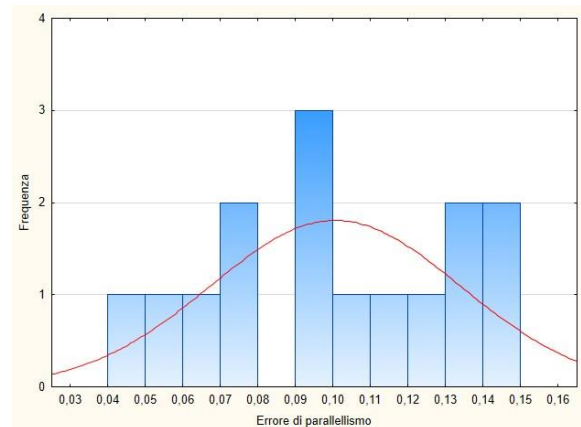


Grafico 3.1.2.26 – Distribuzione dell'errore di parallelismo del tratto B inferiore

3.1.3 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Le prove meccaniche sono state eseguite con l'attrezzatura descritta nei paragrafi precedenti (macchina di prova Galdabini SUN 2500). Di seguito, in Tabella 3.1.3.1 e nei Grafici da 3.1.3.1. a 3.1.3.4, si riportano i risultati ottenuti per le tre diverse tipologie di provini

	N° provino	σ_R [MPa]	σ_R media [MPa]	Deviazione standard σ [MPa]
Conici-C1	1	1175	1184	12
	2	1200		
	3	1191		
	4	1183		
	5	1169		
Radiali-C1	1	1196	1183	13
	2	1190		
	3	1192		
	4	1167		
	5	1171		
Radiali C2	1	1065	1061	4
	2	1061		
	3	1054		
	4	1063		
	5	1065		

Tabella 3.1.3.1 – Risultati della prova di trazione

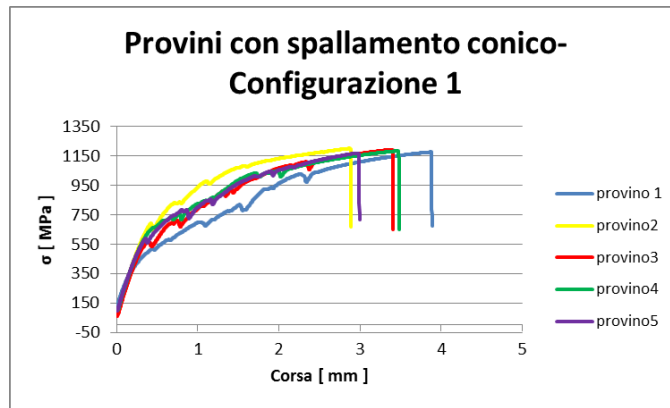


Grafico 3.1.3.1 – Risultati della prova di trazione dei provini con spallamento conico ottenuti secondo la Configurazione 1

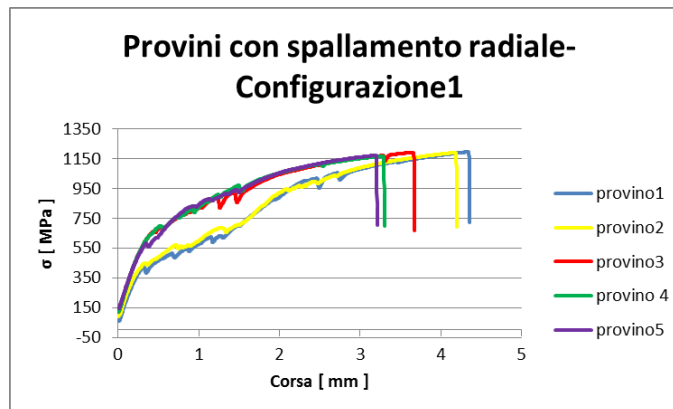


Grafico 3.1.3.2 – Risultati della prova di trazione dei provini con spallamento radiale ottenuti secondo la Configurazione 1

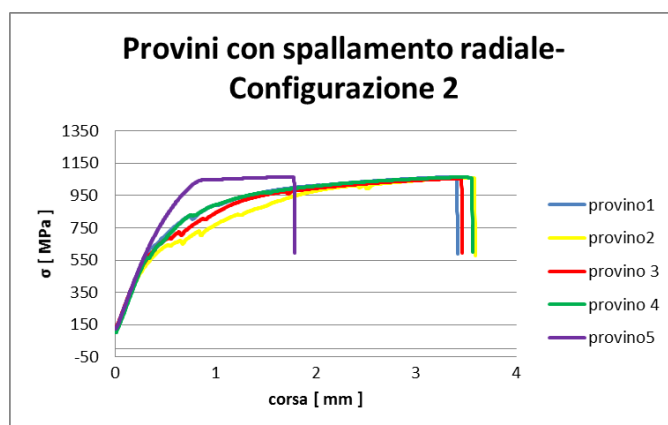


Grafico 3.1.3.3 – Risultati della prova di trazione dei provini con spallamento radiale ottenuti secondo la Configurazione 2

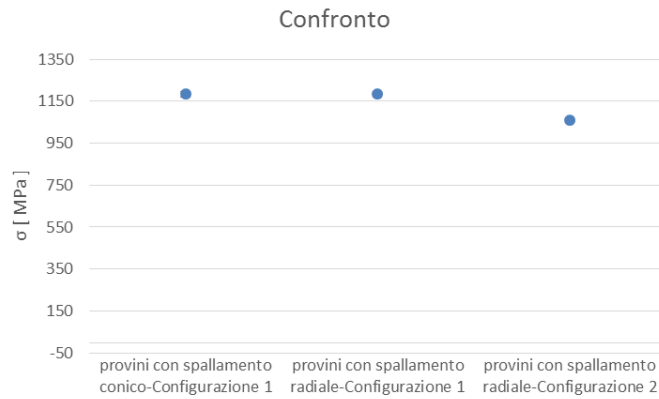


Grafico 3.1.3.4 – Confronto della tensione di rottura tra i provini

3.1.4 COMMENTI

Dai risultati delle misurazioni geometriche svolte si evince come il processo di sinterizzazione laser selettiva permetta di ottenere provini che rispettino le tolleranze geometriche imposte, inerenti il diametro e la lunghezza della zona calibrata. Per quanto riguarda gli errori di rettilineità e di parallelismo, essi sono contenuti entro i 130 μm e i 300 μm rispettivamente. La configurazione che permette di ottenere minori errori di parallelismo e rettilineità è quella che prevede di disporre i provini con l'asse ortogonale al piano di lavoro della macchina. Ciò è, pertanto, da imputare alla modalità di realizzazione stesse.

Per quanto riguarda il carico di rottura, tutti i provini analizzati presentano un carico di rottura largamente superiore a quello imposto dalla normativa UNI EN ISO 22674 (21) a testimonianza della validità del processo di Fusione Laser Selettiva. Esso permette di ottenere strutture dense e compatte con proprietà meccaniche elevate e rappresenta una valida alternativa ai processi tradizionali. Tuttavia dalle prove meccaniche di trazione, risulta come sia la configurazione in cui l'asse del provino viene disposto in direzione ortogonale rispetto al piano di lavoro, a presentare i minori carichi di rottura. Tale risultato è strettamente connesso con le modalità di fabbricazione. Infatti disponendo il provino con asse ortogonale al piano di lavoro della macchina, durante la sinterizzazione laser si depositano dei layer di polveri creando delle microgiunzioni disposte ortogonalmente al carico applicato. Di contro, disponendo l'asse del campione nel piano di lavoro della macchina, si vanno a creare layer con delle microgiunzioni più estese e disposte secondo il carico che verrà applicato.

Inoltre, a parità di configurazione, la geometria del provino non sembra influenzare significativamente il risultato ottenuto, a dimostrazione del fatto che entrambe le tipologie di provini proposti dalla normativa UNI EN ISO 22674 (21) permettono di ottenere i medesimi risultati.

Si può, inoltre, osservare come il valore medio rilevato sia di poco inferiore ai 1200 MPa, diverso, pertanto dal valore nominale dichiarato dal fornitore e pari a 1350 MPa.

Sebbene la differenza non sia marcata, in termini di caratteristiche indagate, tali risultati hanno orientato la scelta della geometria da adottare verso la “Configurazione di tipo 1”, ovvero con l’asse del provino posto nel piano di lavoro della macchina.

Inoltre si può vedere, dai grafici che riportano le curve “Tensione-Corsa”, ottenuti tramite le prove di trazione, come si sia riscontrato un notevole problema di scivolamento dei provini tra le ganasce, che determina, appunto, l’ottenimento di curve con dei gradini. Tale comportamento è da imputare alla natura del materiale metallico impiegato. Infatti i provini si presentavano con una durezza particolarmente elevata che non permetteva alle ganasce di “indentarli” e quindi di afferrarli nel modo corretto. Per risolvere tale problema è stato necessario riprogettare le ganasce, decidendo di adottare la geometria con spallamenti conici per quanto riguarda i provini.

3.2 SECONDA FASE: CARATTERIZZAZIONE DEI GIUNTI SALDATI

La seconda parte del lavoro svolto rappresenta il fulcro principale dell’attività. In questa fase sono stati testati i campioni realizzati dai laboratori odontotecnici coinvolti. Dalla prima fase è emerso come i sistemi di afferraggio presenti non fossero adeguati: i provini slittavano con la conseguenza di ottenere delle curve di “Tensione-Corsa” che presentavano numerosi gradini. Risultava, pertanto, evidente la necessità di intervenire riprogettando e modificando le ganasce della macchina di prova. Tale riprogettazione viene descritta nei paragrafi successivi, ed ha condotto, anche, ad una ulteriore modifica del provino. Infatti, dal momento che con il nuovo sistema di bloccaggio i provini vengono afferrati attraverso la parte conica e non più sfruttando le estremità cilindriche, tali estremità possono essere ridotte di molto consentendo un risparmio non trascurabile di materiale. Decisa, quindi la geometria da adottare, i campioni sono stati spediti ai singoli laboratori all’interno del apposito kit. Si ricorda che i provini vengono realizzati come monoblocco, successivamente tagliati e spediti ai laboratori che realizzano il giunto saldato. I dati raccolti, una volta elaborati hanno permesso di asserire la conformità delle giunzioni saldate realizzate con quanto stabilito dalle normative UNI EN ISO 9333 (17) e UNI EN ISO 28319 (23).

3.2.1 PROGETTAZIONE DELLE GANASCE.

La necessità di ottenere delle curve regolari, senza i tipici scalini dovuti allo slittamento, ha condotto alla riprogettazione delle ganasce medesime. Si è deciso di impiegare dei sistemi di bloccaggio che afferrassero il provino sulla parte conica, ritenendo, in tal modo, di sopperire alle problematiche incontrate.

L’attrezzatura già esistente è stata misurata accuratamente, permettendo di ottenere i principali dati relativi agli ingombri, necessari al fine della riprogettazione. Le ganasce così ottenute sono state simulate impiegando il software ANSYS 14.5. Per la simulazione è stata impiegata una mesh di dimensioni generali pari ad un millimetro che è stata infittita nelle zona di contatto.

Per quanto riguarda il tipo di contatto è stato impiegato il contatto di tipo “Bonded” tra ganasce e supporto e di tipo “No Separation” tra ganasce e provino. Infatti nel caso di contatto

di tipo “Bonded” non vi è né slittamento né separazione tra i due corpi, come è ragionevole presumere che avvenga nel caso della zona di contatto tra le ganasce e il supporto. Mentre, per quanto riguarda il contatto di tipo “No Separation”, esso è simile al precedente con la differenza che in questo caso vi può essere un leggero slittamento tra le facce a contatto. Per ciò che concerne i vincoli ed i carichi applicati, è stato imposto un incastro alla base del supporto delle ganasce ed è stata applicata una tensione pari a quella di rottura del Cr-Co (circa 1200 Mpa) al provino.

La geometria elaborata ed esempi di mesh sono visibili nelle Figure seguenti.

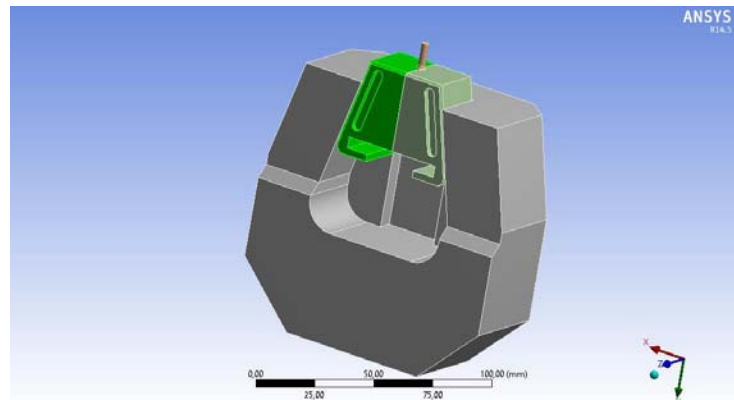


Figura 3.2.1.1 – Geometria del modello analizzata

La simulazione ha permesso di evidenziare le aree maggiormente critiche. Tali aree possono essere viste in figura e sono situate, ovviamente nella zona di contatto tra il provino e la ganascia.

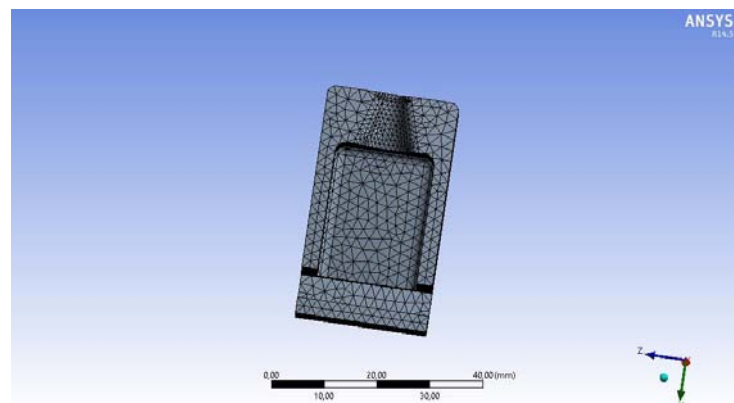


Figura 3.2.1.2 – Geometria e mesh della ganascia progettata

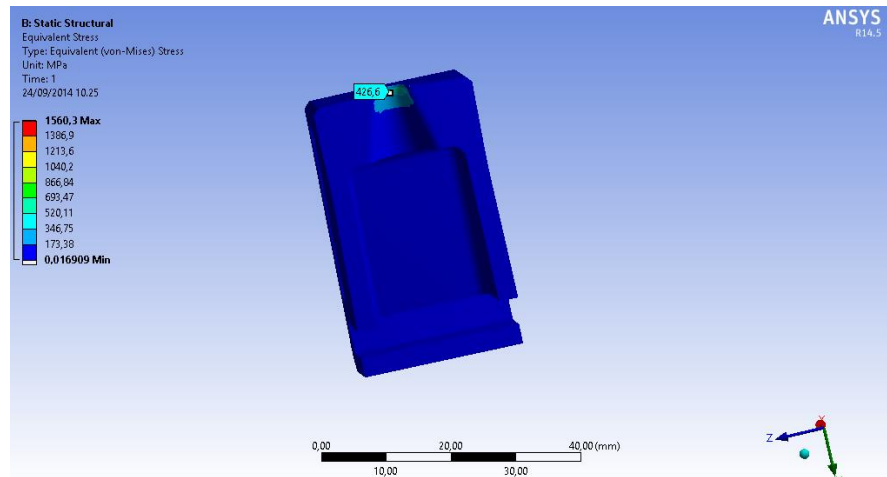


Figura 3.2.1.3 – Stato di tensione nella ganasce

Il picco di tensione massimo si ha, ovviamente in corrispondenza del provino, mentre per quanto riguarda la ganasce si può vedere come si raggiungano valori intorno ai 500 Mpa.

Considerando che il materiale scelto per la realizzazione delle ganasce è lo stesso Cr-Co e che esso ha una tensione di snervamento, dichiarata dal fornitore delle polveri, una volta sinterizzato pari a 1020 Mpa si ha un coefficiente di sicurezza pari a:

$$\nu = \frac{1020}{500} \approx 2$$

Ritenuto accettabile.

3.2.2 GEOMETRIA DEL PROVINO

La riprogettazione delle ganasce ha permesso di intervenire anche sulla geometria del provino, in particolare eliminando gran parte dei tratti cilindrici. La geometria definitiva, impiegata, è visibile in Figura 3.2.2.1 mentre in Tabella 3.2.2.1 si riporta la sintesi dei principali parametri geometrici e un confronto con la configurazione proposta dalla normativa UNI EN ISO 22674 (21).

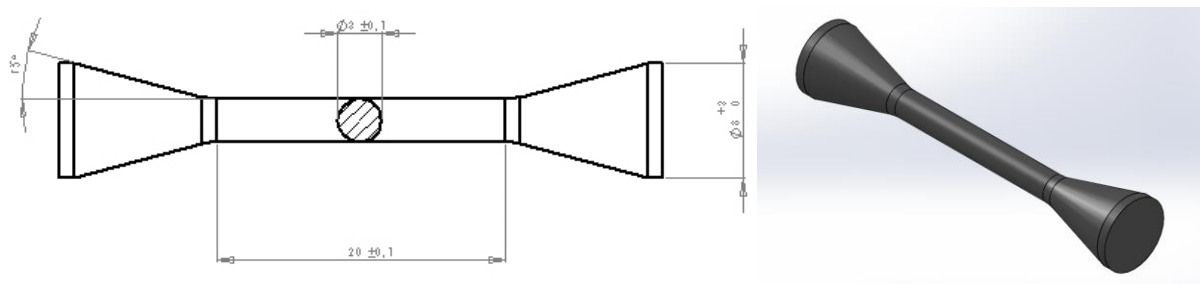


Figura 3.2.2.1 – Geometria dei provini adottata

Denominazione	Simbolo	Unità di misura	Valore nominale UNI EN ISO 22674	Valore nominale di progetto
Diametro della sezione calibrata	d	mm	3	3
Lunghezza della parte calibrata	L _c	mm	18	20
Lunghezza totale	L _t	mm	≥42	≥ 41
Angolo delle spalle coniche	-	°	15	15

Tabella 3.2.2.1 - Confronto tra le caratteristiche geometriche dei provini con spallamento conico prescritti da UNI EN ISO 22674 e quelli adottati

3.2.3 APPARATO DI MISURA PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA

Preliminarmente alle prove di trazione statiche è stato necessario misurare i provini al fine di ricavare il valore del diametro medio della zona calibrata, indispensabile per calcolare la tensione di rottura. Per eseguire le misure è stata impiegata la macchina di misura ottica OGP Flash CNC 300 presente nel laboratorio LIN del dipartimento ICEA dell'Università di Padova descritta in precedenza. Al fine di velocizzare e facilitare le misurazioni è stato realizzato un supporto di gesso (Figura 3.2.3.1 (a) e (b)), su cui disporre i provini. I provini, pertanto, sono stati disposti sul supporto, avendo cura di identificarli univocamente ed è stata elaborata una routine di misura. In particolare sono stati campionati:

- ✓ 11 punti all'interno della zona calibrata;
- ✓ 10 punti nelle zone coniche.

Ciò ha permesso di ricavare il valore medio della zona calibrata e l'errore di rettilineità del asse del provino.

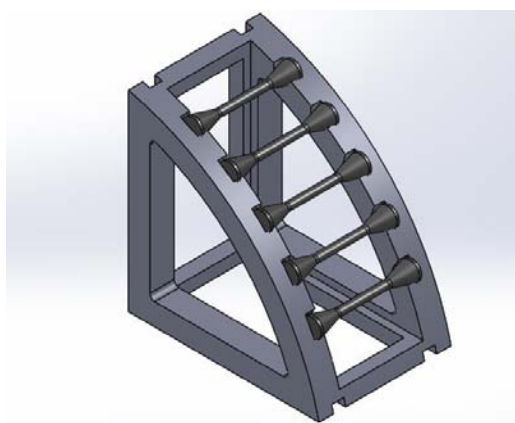


Figura 3.2.3.1 (a) – Modello CAD del supporto per la misurazione dei provini per prove di trazione



Figura 3.2.3.1 (b) – Esempio di posizionamento dei provini sul supporto di gesso e di misurazione



Figura 3.2.3.1 (c) – Esempio di provino per prove di trazione

3.2.4 RISULTATI DELLE MISURAZIONI

In Tabella 3.2.4.1 e nei Grafici 3.2.4.1 e 3.2.4.2 si riportano i risultati delle misurazioni eseguite. Si ricorda come il diametro della zona calibrata debba presentare un valore nominale di 3 mm con una tolleranza di $\pm 0.1\text{ mm}$. In particolare, pertanto, nella Tabella 3.2.4.1 viene riportato il valore del diametro medio (espresso in millimetri), la relativa conformità e il valore dell'errore di rettilineità dell'asse riscontrato. I Grafici 3.2.4.1 e 3.2.4.2, invece, illustrano la distribuzione dei valori del diametro medio della zona calibrata e dell'errore di rettilineità dell'asse rispettivamente.

RAPPORTO DI PROVA	DIAMETRO MEDIO [mm]	CONFORMITÀ	RETTILINEITÀ DELL'ASSE [mm]
RP01	3,19	NO	0,19
RP02	3,02	SI	0,12
RP05	2,99	SI	0,09
RP07	2,92	SI	0,13
RP08	2,94	SI	0,06
RP09	2,85	NO	0,08
RP10	2,98	SI	0,14
RP13	2,97	SI	0,07
RP16	2,97	SI	0,12
RP17	3,04	SI	0,12
RP18	2,97	SI	0,04
RP19	2,98	SI	0,03
RP23	3,01	SI	0,17
RP25	2,89	NO	0,09
RP27	2,97	SI	0,03
RP28	2,93	SI	0,10
RP30	2,95	SI	0,06
RP31	2,98	SI	0,11
RP32	3,45	NO	0,48
RP33	2,96	SI	0,08
RP34	2,97	SI	0,13
RP40	2,90	SI	0,08
RP47	2,97	SI	0,05
RP48	2,99	SI	0,04
RP52	2,97	SI	0,04

RP56	2,96	SI	0,08
RP72	3,01	SI	0,06
RP77	2,98	SI	0,02

Tabella 3.2.4.1 – Risultati della caratterizzazione geometrica dei provini

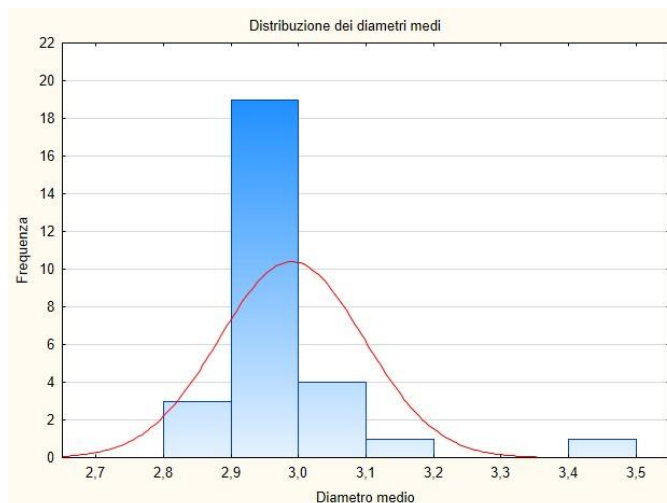


Grafico 3.2.4.1 – Distribuzione dei valori del diametro medio della zona calibrata

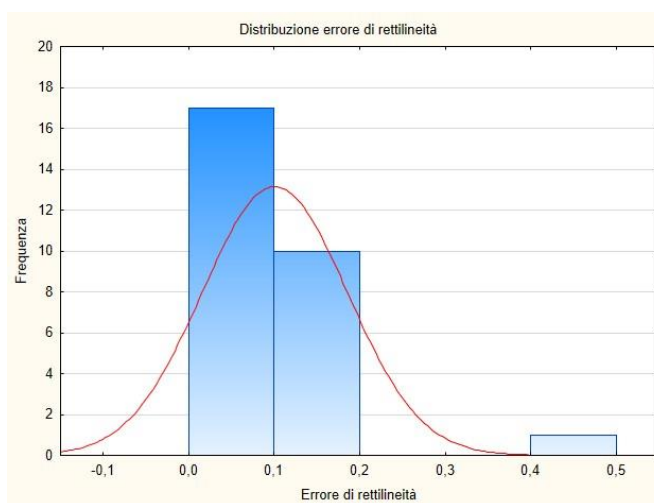


Grafico 3.2.4.2 – Distribuzione dei valori del errore di rettilineità dell'asse dei provini

3.2.5 COMMENTI

Dalla Tabella 3.2.4.1 si vede come il valore del diametro medio della zona calibrata sia entro le tolleranze imposte nella maggioranza dei casi. Infatti solo quattro laboratori hanno realizzato dei campioni non conformi, e quindi in oltre l'85% dei casi le lavorazioni svolte sono state accurate. Probabilmente, nei restanti casi, i laboratori non hanno recepito in maniera corretta le indicazioni contenute nei protocolli di realizzazione delle giunzioni saldate, nei quali si specifica, in accordo con lo standard UNI EN ISO 9333 (17), che il diametro della zona calibrata dopo la realizzazione della saldatura deve essere riportato entro le tolleranze previste, qualora non lo sia. Tuttavia, in particolare, un solo laboratorio ha realizzato un

campione il cui valore del diametro medio della zona calibrata eccedeva di molto le tolleranze imposte. Per quanto riguarda la distribuzione dei valori, escludendo quest'ultimo caso, essa può essere ritenuta Gaussiana con valore medio pari a 2,97 mm e deviazione standard pari a 0,06 mm. Infine per quanto riguarda l'errore di rettilineità del asse dei provini esso, escludendo il laboratorio che ha realizzato un provino largamente fuori tolleranza in termini di diametro medio, esso si attesta entro i 0,2 mm con un valore medio pari a 0,09 mm e deviazione standard σ di 0,04 mm.

Pertanto, in generale, si può asserire come i laboratori coinvolti si siano impegnati a rispettare i protocolli di realizzazione forniti e a realizzare dei campioni per la verifica della resistenza della giunzioni saldate geometricamente conformi a quanto previsto.

3.2.6 PROVE DI TRAZIONE

Le prove di trazione svolte hanno come obiettivo l'identificazione del carico di rottura delle giunzioni saldate e il successivo confronto con il limite imposto dalla normativa UNI EN ISO 9333 (17). La macchina di prova impiegata è la Galdabini SUN 2500 descritta in precedenza.

Le prove sono state realizzate seguendo la procedura di prova riportata nell'Appendice II. Pertanto, una volta identificato in modo univoco il provino e fissato tra i cunei di afferraggio si procede con l'azzeramento del sistema e l'applicazione del carico di trazione fino a rottura. La prova viene eseguita in accordo a quanto riportato nello standard UNI EN ISO 9333 (17), in controllo di spostamento con una velocità di allontanamento delle ganasce pari a 1,5 mm/min. durante la prova vengono registrati i valori istantanei di forza e spostamento, utilizzati per la realizzazione delle curve di trazione "forza-spostamento".



Figura 3.2.6.1 – Esempio di provino portato a rottura

3.2.7 MODALITÀ DI ANALISI DEI RISULTATI

Il monitoraggio dei segnali di forza F e la determinazione del diametro d della zona calibrata dei provini, ha permesso il calcolo della tensione normale indotta sul provino, mediante la relazione:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

dove S_0 è l'area della sezione iniziale della parte calibrata, calcolata come

$$S_0 = \pi \frac{d^2}{4}$$

Diagrammando la tensione istantanea in funzione della corsa della traversa è stato possibile ricavare i vari grafici “Tensione-Spostamento” presenti in Appendice III e di cui viene riportato un esempio in Figura 3.2.7.1

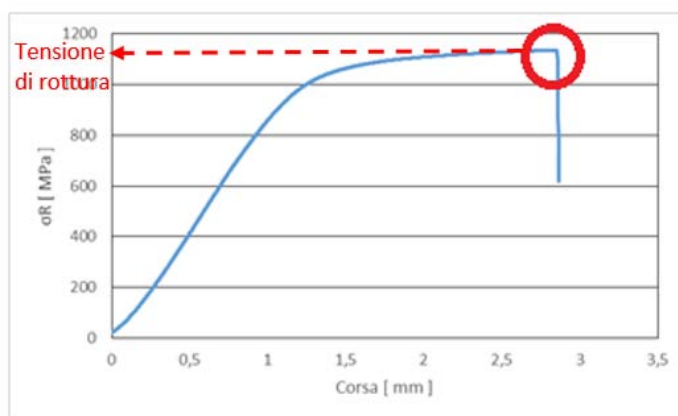


Figura 3.2.7.1 – Esempio di curva “Tensione-Corsa”

Analizzando i dati è stato, altresì, possibile ricavare il valore massimo della tensione rilevato, calcolando quindi la tensione di rottura delle singole giunzioni saldate. È stata eseguita la media dei risultati ottenuti dai laboratori partecipanti che sono risultati esser conformi. Questo ha permesso di realizzare, per ogni laboratorio, un grafico che permette di confrontare visivamente il risultato ottenuto con il risultato medio e di cui si riporta un esempio in Figura 3.2.7.2

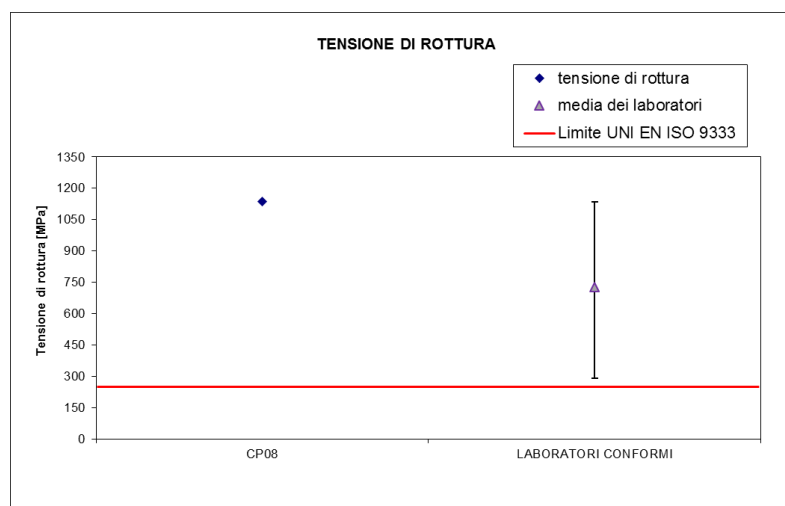


Figura 3.2.7.2 – Esempio di grafico realizzato per ogni laboratorio partecipante

3.2.8 RISULTATI

In Appendice III sono riportate le curve ed i grafici ricavati per ogni singolo campione. Di seguito si riportano sinteticamente i dati ottenuti. In Tabella 3.2.8.1 si riporta il rapporto di prova, il risultato ottenuto in termini di carico di rottura (espresso in MPa), il limite imposto dalla normativa UNI EN ISO 9333 (17) e la relativa conformità. Mentre il Grafico 3.2.8.1 riassume sinteticamente i dati ottenuti e permette di verificare visivamente il superamento

della prova. Infine il Grafico 3.2.8.2 illustra la distribuzione dei valori del carico di rottura delle giunzioni saldate.

RAPPORTO DI PROVA	σ_R [MPa]	LIMITE UNI EN ISO 9333 [MPa]	LIMITE UNI EN ISO 28319 [MPa]	CONFORMITÁ
RP01	455	250	350	SI
RP02	993	250	350	SI
RP05	632	250	350	SI
RP07	434	250	350	SI
RP08	1135	250	350	SI
RP09	678	250	350	SI
RP10	1032	250	350	SI
RP13	364	250	350	SI
RP16	990	250	350	SI
RP17	496	250	350	SI
RP18	1039	250	350	SI
RP19	572	250	350	SI
RP23	687	250	350	SI
RP25	507	250	350	SI
RP27	907	250	350	SI
RP28	1021	250	350	SI
RP30	885	250	350	SI
RP31	921	250	350	SI
RP32	465	250	350	SI
RP33	811	250	350	SI
RP34	905	250	350	SI
RP40	595	250	350	SI
RP47	362	250	350	SI
RP48	373	250	350	SI
RP52	962	250	350	SI
RP56	291	250	350	SI
RP72	916	250	350	SI
RP77	955	250	350	SI

Tabella 3.2.8.1 – Risultati in termini di tensioni di rottura delle prove di trazione

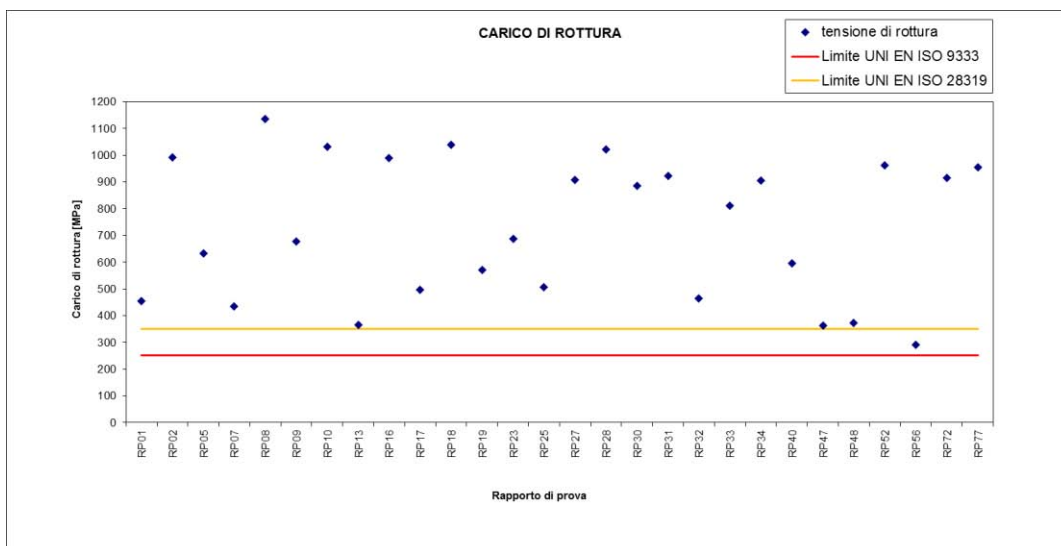


Grafico 3.2.8.1 – Risultati in termini di tensioni di rottura delle prove di trazione

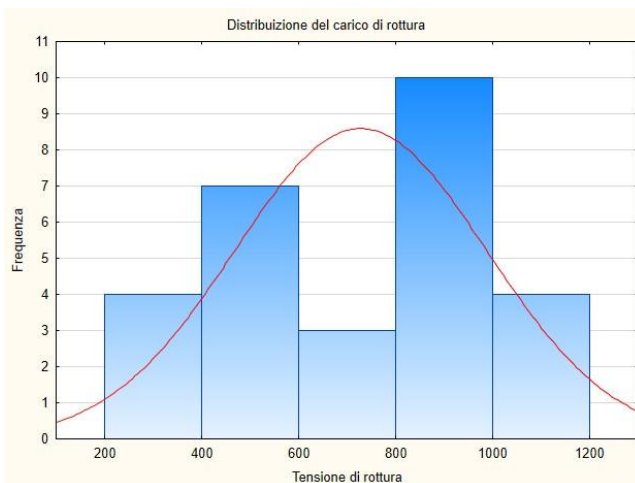


Grafico 3.2.8.2 – Distribuzione della tensione di rottura rilevata

3.2.9 COMMENTI

Dalla tabella 3.2.8.1 si vede come tutti i campioni testati risultino superare il limite di 250 MPa, imposto dalla normativa UNI EN ISO 9333 (18), mentre un solo campione non rispetta il limite imposto da (23). Il valore medio risulta essere pari a 728 MPa. Tuttavia, in questo caso la distribuzione dei valori della tensione di rottura non risulta Gaussiana, bensì essa è maggiormente rappresentata da una distribuzione di tipo bimodale. Si possono infatti identificare chiaramente due diverse mode. In quest'ottica, pertanto, i provini si possono suddividere in due gruppi di pari numerosità:

- ✓ Il primo gruppo contiene i campioni che hanno ottenuto un risultato inferiore ai 700 MPa ed ha un valor medio pari a 494 MPa con una deviazione standard di 125 MPa (Grafico 3.2.9.1);

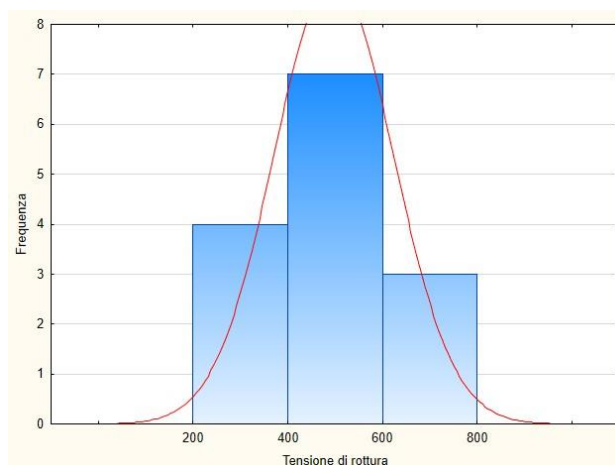


Grafico 3.2.9.1 – Distribuzione della tensione di rottura del primo gruppo di campioni

- ✓ Il secondo contiene i provini che hanno superato il test mostrando una tensione di rottura superiore ai 800 MPa con valor medio pari a 962 MPa e una deviazione standard di 81 MPa (Grafico 3.2.9.2).

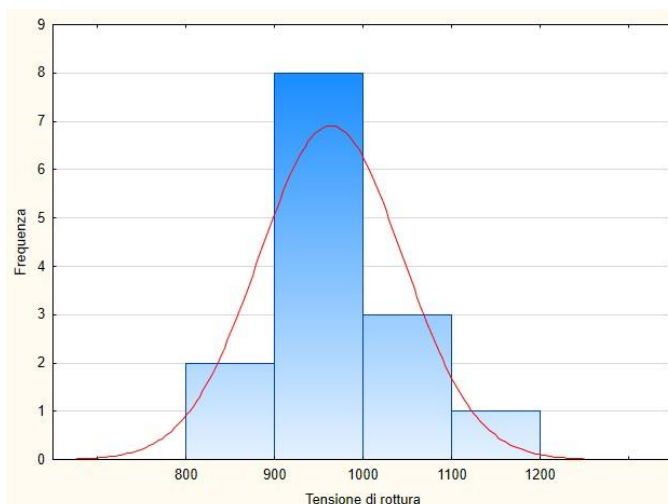


Grafico 3.2.9.2 – Distribuzione della tensione di rottura del secondo gruppo di campioni

Tale risultato è sicuramente da imputare alle modalità di realizzazione delle giunzioni saldate. Il secondo gruppo di laboratori ha dimostrato di avere maggiori capacità nella realizzazione delle saldature e di sfruttare al meglio il materiale di base, che presenta una tensione di rottura di circa 1200 Mpa.

CAPITOLO 4. ADESIONE TRA METALLO E CERAMICA

Un forte legame lungo l'interfaccia tra lega e ceramica rappresenta uno dei requisiti essenziali per la durata dei dispositivi dentali in metallo-ceramica (40). In tal senso la scelta dei materiali da utilizzare e le modalità di realizzazione delle protesi hanno un impatto decisivo sul successo dei dispositivi dentali. Anche in questo caso il lavoro svolto può essere suddiviso in due fasi:

- ✓ Nella prima fase ci si è concentrati sulla messa a punto della procedura di prova e sull'individuazione di quale fosse la configurazione di posizionamento dei provini nella macchina di sinterizzazione migliore al fine di ottenere le più elevate proprietà meccaniche e le migliori caratteristiche di precisione geometrica;
- ✓ Nella seconda fase sono state svolte le prove finalizzate alla determinazione della tensione di distacco tra metallo e ceramica al fine di verificare la conformità delle realizzazioni.

4.1 PRINCIPI DI ADESIONE

Nonostante il meccanismo di adesione non sia ancora stato ben definito (41), si ritiene che le modalità di legame lungo l'interfaccia tra metallo e ceramica che si possono identificare sono (42) (44) (4):

- Legame chimico:** il legame chimico è il principale legame che si forma tra metallo e ceramica. È stato dimostrato come il processo di ossidazione della superficie del metallo sia di fondamentale importanza per favorire il legame (44), anche se uno strato troppo elevato di ossidi può diminuire l'adesione tra i materiali interessati. La presenza di elementi non nobili in lega favorisce la formazione di ossidi metallici in superficie, che generano legami chimici con la ceramica (45); in particolare la formazione di ossidi di stagno e di indio (46) (47), ossidi di nichel, di cromo o di titanio (48) favoriscono l'adesione tra metallo e ceramica. Lo schema del legame può essere rappresentato come mostrato in **Error! Reference source not found..1**: gli atomi di silice contenuti nella ceramica reagiscono con gli atomi di ossigeno realizzando il legame.

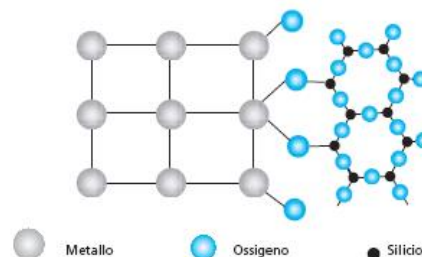


Figura 4.1.1 – Schematizzazione del legame chimico tra metallo e ceramica

- Legame meccanico:** la presenza di microasperità sulla superficie della lega migliora i fenomeni di ritenzione. Il processo di sabbatura permette di ottenere una superficie della lega irregolare, con conseguente aumento della area totale disponibile per l'unione con la ceramica, garantendo così una buona ritenzione della stessa (40) (49).

Inoltre la scelta dei materiali da utilizzare, aventi coefficiente di dilatazione termica compatibili tra di loro (leggermente inferiore per la ceramica poiché la ceramica non può sopportare sforzi di trazione elevati), fa sì che in seguito al raffreddamento si generi un carico compressivo che, oltre ad aumentare la resistenza meccanica a trazione della ceramica, migliora il legame meccanico. Generalmente valori accettabili di $\Delta\alpha = \alpha_m - \alpha_c$ si attestano tra $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e $1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (50).

- c) **Forze di Van Der Waal:** sono legami secondari di debole entità e di natura elettrostatica che nascono tra molecole. Teoricamente i legami generati con le forze di Van Der Waal sono centinaia di volte meno resistenti rispetto ai legami chimici, ma in alcuni sistemi metallo-ceramica possono assumere valori rilevanti (51).

4.2 GEOMETRIA DEL PROVINO

La configurazione geometrica nominale dei provini da realizzare, suggerita dalla UNI EN ISO 9693-1 (18), è riportata in Figura 4.2.1. Ciascun provino si presenta come una lamina rettangolare di metallo avente lunghezza 25 ± 1.0 mm, larga 3 ± 0.1 mm e spessa 0.5 ± 0.1 mm sulla quale è applicata, al centro della lunghezza, una placchetta in ceramica di dimensioni 8 ± 0.1 mm \times 3 ± 0.1 mm \times 1.1 ± 0.1 mm. In Tabella 4.2.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche geometriche nominali.

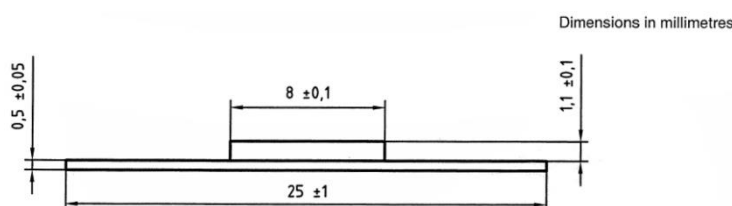


Figura 4.2.1 – Geometria del provino

Denominazione	Simbolo	Unità di misura	Valore nominale UNI EN ISO 9693
Lunghezza della lamina metallica	LM	mm	25
Larghezza della lamina metallica	HM	mm	3
Spessore della lamina metallica	dM	mm	0.5
Lunghezza della lamina metallica	LC	mm	8
Larghezza della lamina metallica	HC	mm	3
Spessore della lamina metallica	SC	mm	1.1

Tabella 4.2.1 – Principali caratteristiche geometriche dei provini

4.3 PROTOCOLLO PROVE PER LABORATORI ODONTOTECNICI

I provini oggetto dell'indagine sono stati forniti ai laboratori odontotecnici che hanno partecipato al progetto di ricerca, sotto forma di barrette metalliche su cui eseguire la

ceramizzazione. Per uniformare le modalità di fabbricazione dei provini da parte dai vari laboratori sono stati stilati e consegnati ai tecnici di laboratorio i “Protocolli di preparazione di provini per la prova di flessione”, procedure di supporto agli odontotecnici nella realizzazione dei provini. Il protocollo relativo alla prova di flessione è riportato in Appendice V.

4.4 ATTREZZATURA E APPARATO DI PROVA

La prova di flessione si effettua mediante la stessa macchina di prova impiegata per le prove di trazione descritta nel Capitolo 2 (Galdabini SUN 2500). Al fine di sollecitare i provini a flessione è stato impiegato il supporto in Figura 4.4.1. Come suggerito nella norma UNI EN ISO 9693 (18), l’attrezzatura prevede due rulli (1) di diametro 2 mm, posti ad una distanza di 20 mm, necessari per sostenere il provino. Il provino è disposto in modo tale da presentare la placchetta di ceramica rivolta verso il basso. Dalla parte opposta alla ceramica, ed in posizione centrale, viene applicato il carico per mezzo dello spostamento di un punzone (2) avente estremità raccordata di raggio pari a 1 mm. Affinché gli assi dei due cilindri di supporto siano mantenuti in posizione essi vengono fissati per mezzo di adesivo alla cella di carico (3). Per regolare ed aggiustare la posizione del punzone si impiegano delle viti micrometriche (4). La cella di carico viene bloccata alla base dell’attrezzatura (5). In modo simile anche il rullo superiore è montato sulla macchina di prova e collegato alla cella di carico da 25 kN (6). Per misurare la forza applicata durante la prova si impiega la cella di carico montata sulla macchina di prova. Il moto dell’attuatore oleodinamico che aziona il punzone è controllato in velocità per mezzo di un LVDT che ne misura lo spostamento istantaneo. Le condizioni di prova sono sintetizzate in Tabella 4.4.1.



Figura 4.4.1 (a) – Attrezzatura di prova

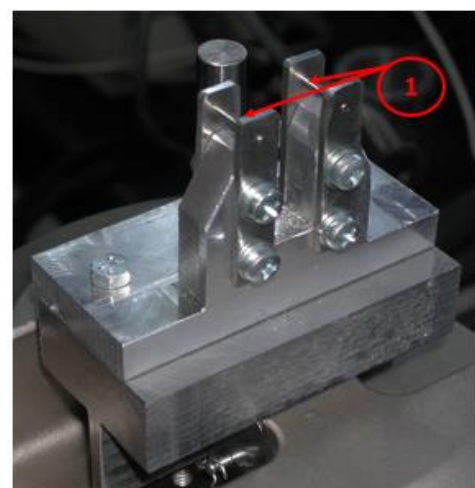


Figura 4.4.1 (b) – Attrezzatura di prova

Dispositivi di prova	
Macchina di prova	Galdalbins SUN 2500
Cella di carico	Galdalbins da 25 kN
Velocità di applicazione del carico	1.5 mm/min

Tabelle 4.4.1 – Attrezzatura di prova

4.5 PRIMA FASE

L'obiettivo di questa prima fase di misurazioni e prove era quello di valutare la migliore configurazione di posizionamento nella macchina di sinterizzazione laser selettiva al fine di ottimizzare sia le caratteristiche meccaniche sia quelle di precisione geometrica. Sono state prese in esame tre diverse configurazioni visibili in Figura 4.5.1:

- ✓ Configurazione 1: vede il posizionamento della lamina metallica con l'area di dimensioni $25 \times 3 \text{ mm}$ nel piano di lavoro della macchina;
- ✓ Configurazione 2: vede il posizionamento della lamina metallica con l'area di dimensioni $3 \times 0,5 \text{ mm}$ nel piano di lavoro della macchina;
- ✓ Configurazione 3: vede il posizionamento della lamina metallica con l'area di dimensioni $25 \times 0,5 \text{ mm}$ nel piano di lavoro della macchina;

e per ogni configurazione sono stati esaminati cinque campioni.

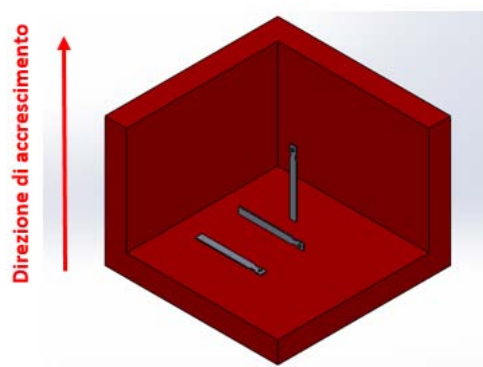


Figura 4.5.1 – Configurazioni di posizionamento dei provini

4.5.1 RISULTATI CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA

Le principali caratteristiche geometriche prese in esame sono:

- ✓ Lo spessore medio delle lamine metalliche, indicato con S ;

- ✓ La larghezza media delle lamine metalliche, indicata con H;
- ✓ La lunghezza media della lamine metalliche, indicata con L;
- ✓ La planarità delle lamine metalliche;
- ✓ L'errore di parallelismo (L1) delle facce di lunghezza 25 mm;
- ✓ L'errore di parallelismo (L2) delle facce di lunghezza 3 mm.

Al fine di indagare tali aspetti è stata impiegata la macchina di misura automatica OGP Flash CNC 300, precedentemente descritta (Capitolo 2), ed un calibro centesimale. In particolare lo spessore delle varie lamine è stato acquisito tramite l'impiego di un calibro centesimale, mentre le altre grandezze di interesse sono state campionate tramite una routine implementata dalla macchina di misura automatica.

I risultati sono riassunti nelle Tabelle da 4.5.1.1 a 4.5.1.4. In particolare in Tabella 4.5.1.1 si riporta, per ogni provino, lo spessore, la lunghezza e la larghezza (espresse in millimetri) e nella Tabella 4.5.1.2 si riportano i relativi valori medi con la deviazione standard. In Tabella 4.5.1.3 si riportano i valori degli errori di planarità e parallelismo, per ogni singolo campione esaminato, mentre in Tabella 4.5.1.4 se ne riportano i valori medi con deviazione standard. I Grafici da 4.5.1.1 a 4.5.1.1 illustrano i risultati ottenuti.

		S [mm]	L [mm]	H [mm]
CONFIGURAZIONE 1	Provino1	0,51	24,99	3,00
	Provino2	0,51	24,99	3,00
	Provino3	0,51	24,97	3,00
	Provino4	0,51	24,97	2,99
	Provino5	0,51	25,00	3,00
CONFIGURAZIONE 2	Provino1	0,54	25,19	2,97
	Provino2	0,54	25,24	2,97
	Provino3	0,54	25,17	2,98
	Provino4	0,54	25,29	2,98
	Provino5	0,54	25,21	2,98
CONFIGURAZIONE 3	Provino1	0,53	24,96	3,10
	Provino2	0,53	24,95	3,11
	Provino3	0,53	24,96	3,08
	Provino4	0,54	24,98	3,13
	Provino5	0,54	24,97	3,10

Tabella 4.5.1.1 – Spessore, lunghezza e larghezza dei provini

	S [mm]	σ [mm]	L [mm]	σ [mm]	H [mm]	σ [mm]
Configurazione1	0,51	0,01	24,99	0,01	3,00	0,00
Configurazione 2	0,54	0,00	25,22	0,04	2,97	0,00
Configurazione3	0,53	0,01	24,96	0,01	3,11	0,02

Tabella 4.5.1. – Valori medi di spessore, lunghezza e larghezza dei provini

		Planarità [mm]	Parallellismo L1 [mm]	Parallellismo L2 [mm]
CONFIGURAZIONE 1	Provino1	0,09	0,02	0,05
	Provino2	0,09	0,02	0,06
	Provino3	0,06	0,02	0,05
	Provino4	0,10	0,02	0,05
	Provino5	0,09	0,01	0,05
CONFIGURAZIONE 2	Provino1	0,12	0,05	0,05
	Provino2	0,11	0,03	0,05
	Provino3	0,15	0,09	0,05
	Provino4	0,06	0,04	0,05
	Provino5	0,04	0,15	0,05
CONFIGURAZIONE 3	Provino1	0,06	0,04	0,09
	Provino2	0,06	0,05	0,06
	Provino3	0,05	0,04	0,07
	Provino4	0,04	0,04	0,07
	Provino5	0,05	0,03	0,06

Tabella 4.5.1.3 – Errori di planarità e parallellismo dei provini

	Planarità [mm]	σ [mm]	Parallellismo L1 [mm]	σ [mm]	Parallellismo L2 [mm]	σ [mm]
Configurazione 1	0,09	0,02	0,02	0,01	0,05	0,00
Configurazione 2	0,10	0,04	0,07	0,05	0,05	0,00
Configurazione 3	0,05	0,01	0,04	0,01	0,07	0,01

Tabella 4.5.1.4 – Valori medi degli errori di planarità e parallelismo dei provini

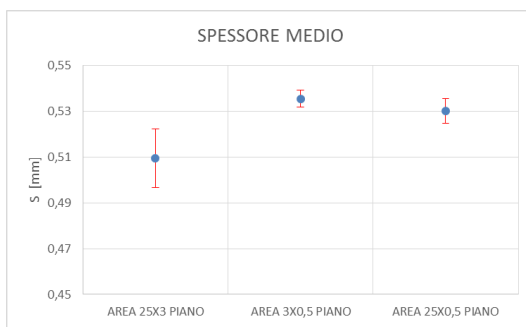


Grafico 4.5.1.1 – Spessore medio dei provini

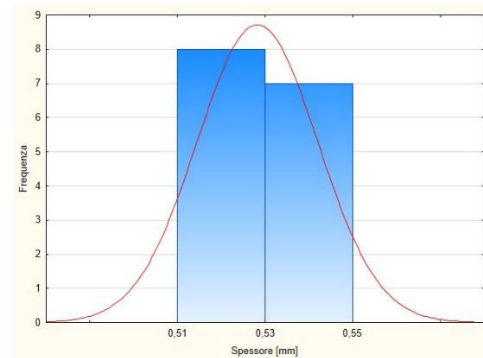


Grafico 4.5.1.2 – Distribuzione dello spessore medio dei provini

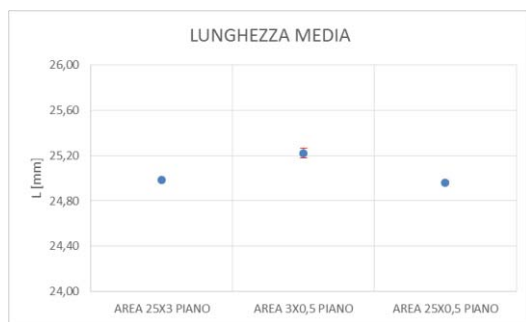


Grafico 4.5.1.3 – Lunghezza media dei provini

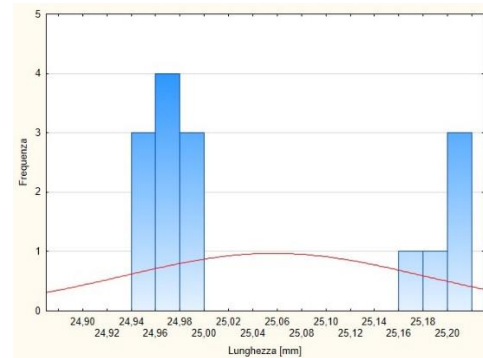


Grafico 4.5.1.4 – Distribuzione della lunghezza media dei provini

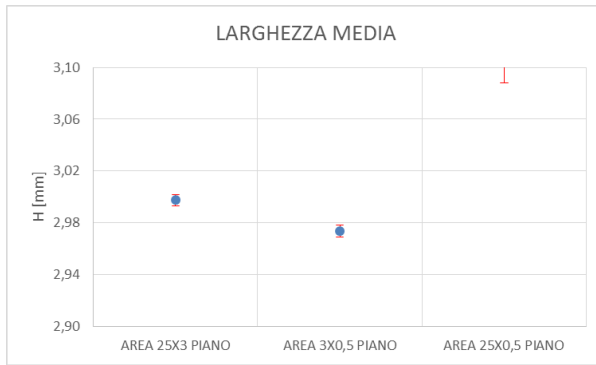


Grafico 4.5.1.5 – Larghezza media dei provini

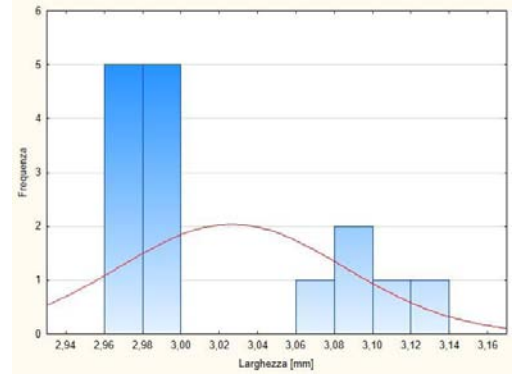


Grafico 4.5.1.6 – Distribuzione della larghezza media dei provini

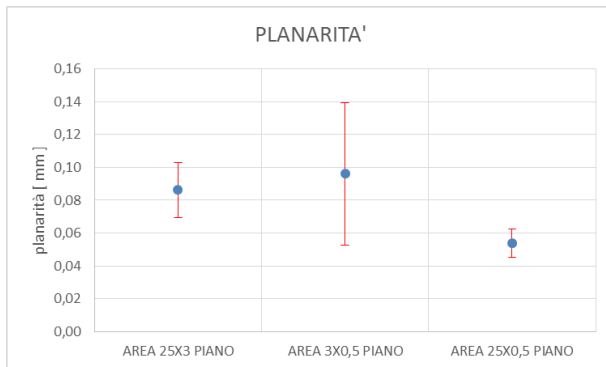


Grafico 4.5.1.7 – Errore di planarità dei provini

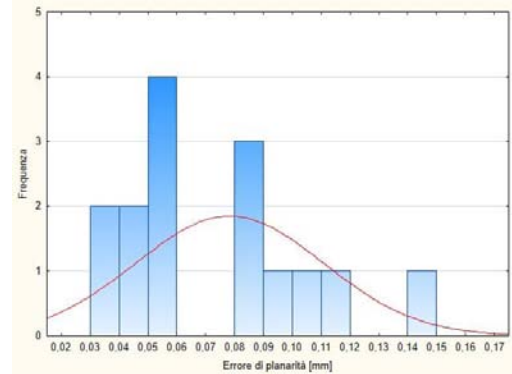


Grafico 4.5.1.8 – Distribuzione dell'errore di planarità dei provini

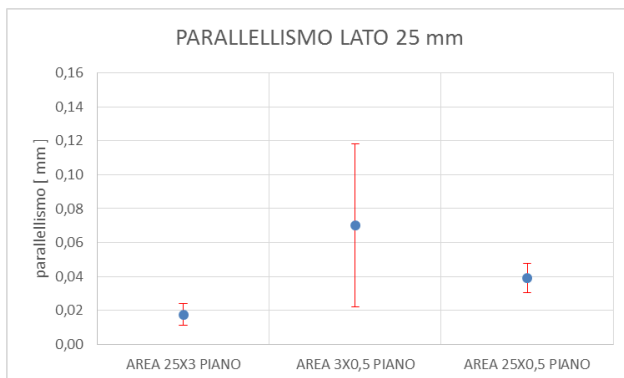


Grafico 4.5.1.9 – Errore di parallelismo L1 dei provini

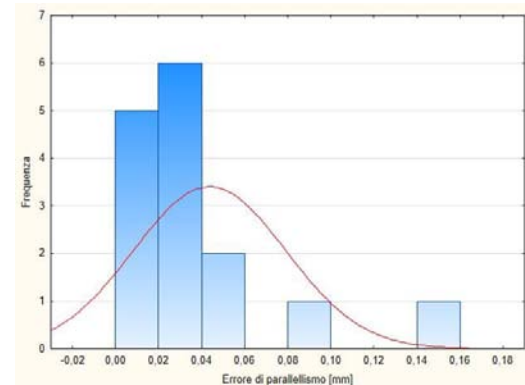


Grafico 4.5.1.10 – Distribuzione dell'errore di parallelismo L1 dei provini

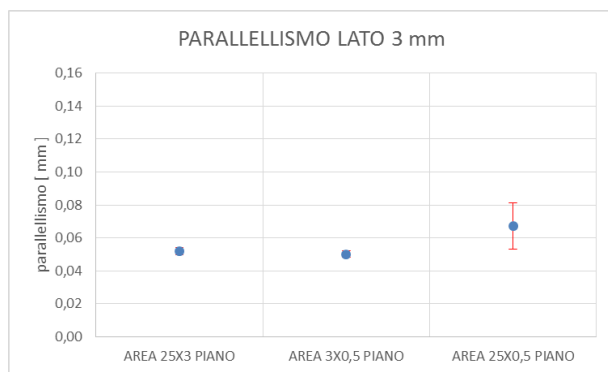


Grafico 4.5.1.11 – Errore di parallelismo L2 dei provini

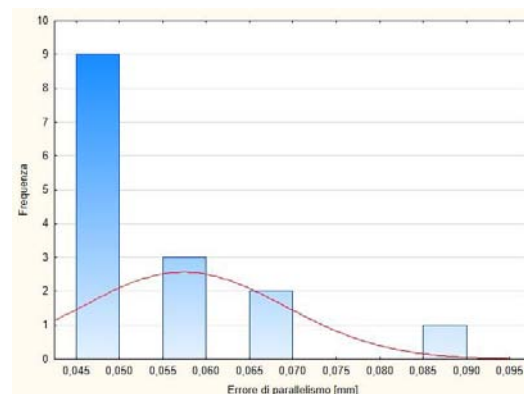


Grafico 4.5.1.12 – Distribuzione dell'errore di parallelismo L2 dei provini

4.5.2 COMMENTI

Come si evince dai dati sopra esposti, tutti i provini rispettano le tolleranze geometriche imposte ad ulteriore dimostrazione della buona precisione costruttiva che permette di ottenere la tecnica di Fusione Laser Selettiva. Per quanto riguarda l'errore medio di planarità, esso è pari a 0,09 mm, 0,10 mm e 0,05 mm rispettivamente per le Configurazioni 1, 2 e 3. Valori contenuti che presentano il minimo in corrispondenza della Configurazione 3, ovvero con il posizionamento dell'area 25x0,5 mm della barretta metallica nel piano di lavoro della macchina. I valori dell'errore di parallelismo medi dei lati di lunghezza pari a 25 mm sono 0,02 mm, 0,04 mm e 0,07 mm per le tre configurazioni. Pertanto la configurazione 1 (con l'area di 25x3 mm disposta nel piano di lavoro della macchina) è quella che permette di minimizzare tale errore. Infine, per quanto concerne l'errore di parallelismo dei lati di lunghezza pari a 3 mm, i valori medi sono 0,05mm, 0,05 mm e 0,07 mm. In questo caso è la configurazione 2 (con l'area di 3x0,5 mm disposta nel piano di lavoro della macchina) che permette di minimizzare tale errore, anche se la differenza con la configurazione 1 non è molto marcata.

In conclusione tutte e tre le configurazioni permettono di ottenere provini con buone caratteristiche geometriche. La scelta, pertanto, è ricaduta sui provini realizzati disponendo l'area di dimensioni 25x0,5 mm nel piano di lavoro della macchina (configurazione 3) in quanto permette di ottimizzare il carico di lavoro della macchina stessa e i tempi ciclo.

4.5.3 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Nella prova a flessione a tre punti i provini vengono vincolati mediante due appoggi e caricati da un punzone in corrispondenza della mezzeria. Durante la prova vengono registrati la forza applicata, mediante una cella di carico, e la corsa della traversa. Tali parametri consentono di stimare il modulo di Young del materiale impiegato oltre a valutare quale configurazione permetta di ottenere la forza massima. Il metodo di analisi dei dati è presentato di seguito.

4.5.4 ANALISI DEI DATI

Data la geometria in figura, la tensione massima viene raggiunta in corrispondenza della mezzeria e può essere calcolata con la formula di Navier nel modo seguente:

$$\sigma = \frac{M h}{I} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

La deformazione massima, a sua volta, può essere calcolata in funzione della freccia nel modo seguente (53):

$$\varepsilon = f \frac{6h}{l^2}$$

Dove f è appunto il valore della freccia ricavato dalla corsa della traversa.

Il modulo di Young espresso tramite la relazione seguente

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

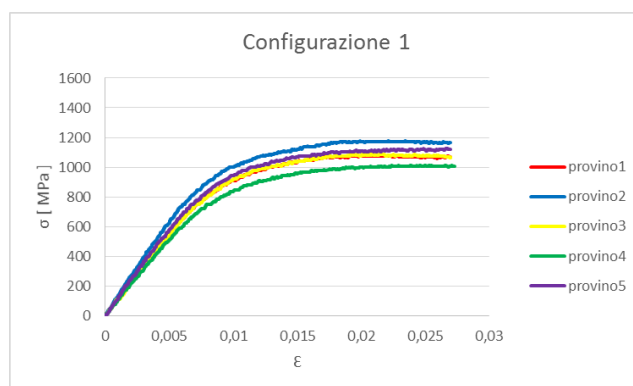
può essere stimato prendendo due coppie di dati sperimentali. In particolare scegliendo i punti per i quali si ha $F_1 = (F_{max})/10$ e $F_2 = (F_{max})/2$ si ottiene:

$$E = \frac{F_{max}}{f_2 - f_1} \frac{l^3}{10bh^3}$$

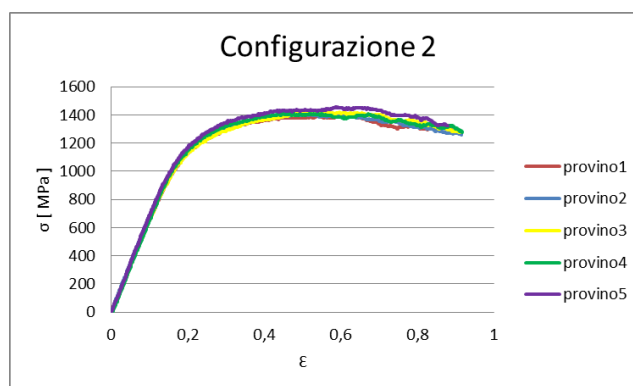
Per ogni configurazione esaminata sono stati, quindi, ricavati i valori di tensione e forza massimi, i relativi valori del modulo di elasticità. Successivamente è stata eseguita la media per permetterne il confronto. Nelle tabelle 4.5.4.1, 4.5.4.2 e 4.5.4.3 si riportano i risultati ottenuti per ogni provino e per ogni configurazione in termini di forza massima, tensione massima e modulo di Young stimato. La Tabella 4.5.4.4 riporta, invece, la sintesi con i rispettivi valori medi. Nei Grafici 4.5.4.1, 4.5.4.2 e 4.5.4.3 mostrano le tensioni di rottura σ_R in funzione della deformazione ε per ogni provino analizzato. Infine i grafici 4.5.4.4, 4.5.4.5 e 4.5.4.6 permettono un confronto tra le diverse configurazioni dei provini.

Configurazione 1: area 25x3 disposta nel piano di lavoro della macchina

N° provino	F max [N]	σ max [MPa]	E [MPa]
1	28	1081	110
2	30	1178	127
3	28	1086	111
4	26	1014	105

Tabella 4.5.4.1 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 1**Grafico 4.5.4.1 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 1****Configurazione 2: area 3x0,5 disposta nel piano di lavoro della macchina**

N° provino	F max [N]	σ max [MPa]	E [MPa]
1	40	1398	128
2	40	1408	134
3	40	1422	131
4	41	1413	138
5	41	1458	142

Tabella 4.5.4.2 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 2**Grafico 4.5.4.2 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 2**

Configurazione 3: area 25x0,5 disposta nel piano di lavoro della macchina

N° provino	F max [N]	σ max [MPa]	E [MPa]
1	40	1398	128
2	40	1408	134
3	40	1422	131
4	41	1413	138
5	41	1458	142

Tabella 4.5.4.3 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 3

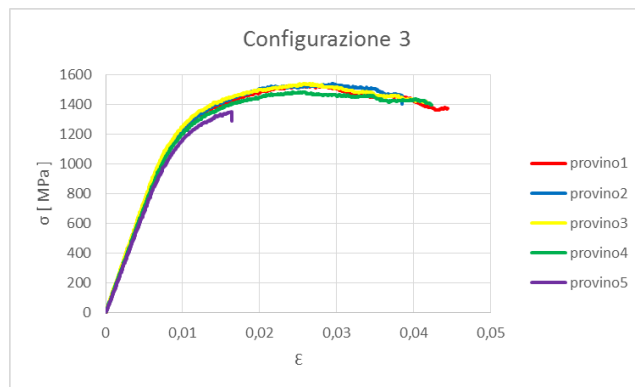


Grafico 4.5.4.3 – Risultati dei provini ottenuti secondo la Configurazione 3

	F max media [N]	σ [N]	E [GPa]	σ [GPa]	σ max media [MPa]	σ [MPa]
Configurazione 1	28	1	115	9	1097	61
Configurazione 2	40	1	134	5	1420	23
Configurazione 3	40	1	143	5	1487	81

Tabella 4.5.4.4 – Sintesi dei risultati dei provini analizzati

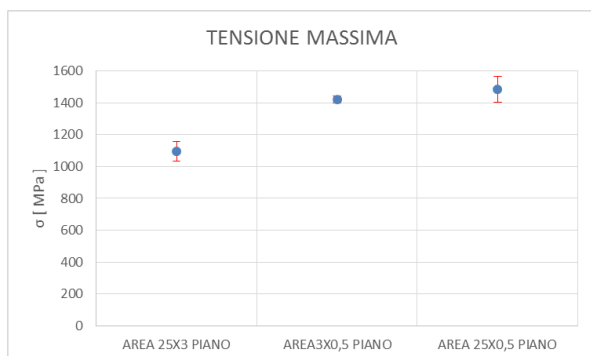


Grafico 4.5.4.4 – Confronto tra i provini in termini di tensione massima

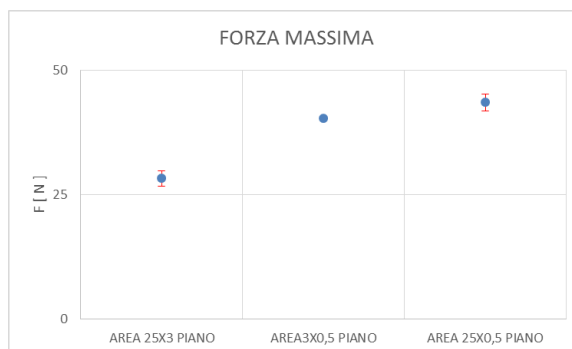


Grafico 4.5.4.5 – Confronto tra i provini in termini di forza massima

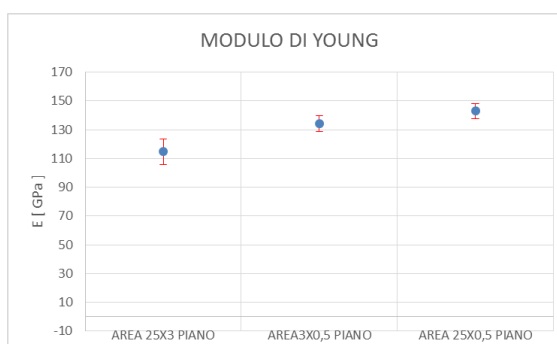


Grafico 4.5.4.6 – Confronto tra i provini in termini di modulo di Young

4.5.5 COMMENTI

L'analisi dei dati permette di verificare come la tensione massima media, pari a circa 1500 MPa si raggiunga impiegando i provini ottenuti con la configurazione 3. Per quanto riguarda il valore medio stimato del modulo di Young, esso è sempre massimo in corrispondenza di tale configurazione e raggiunge valori di circa 150 GPa. Si vuole evidenziare come questo valore si discosti dal valore nominale dichiarato dal fornitore delle polveri (circa 200 GPa). Tale discrepanza può essere imputata sia alle modalità di fabbricazione che non rispettano strettamente le indicazioni del fornitore sia alle modalità con cui è stato stimato. Sarebbe, infatti, più corretto ricavare il valore del modulo elastico mediante una prova di trazione uniassiale impiegando un estensometro. Purtroppo non si disponeva di un estensometro con una base di misura adeguata alla lunghezza dei provini per le prove di trazione.

Ad ogni modo, anche in questo caso, tutte le configurazioni presentano valori simili tra di loro e la scelta, come già preannunciato nei paragrafi precedenti, è ricaduta sui provini realizzati secondo la configurazione 3 per i motivi sopra discussi.

4.6 SECONDA FASE

Nella seconda fase dello studio ci si è concentrati nella realizzazione delle prove a flessione per la valutazione della tensione di distacco tra metallo e ceramica. L'attrezzatura impiegata è la medesima di quella usata nella fase precedente. La normativa di riferimento, in questo caso, è lo standard UNI EN ISO 9693 (18). Essa fornisce il limite minimo di tensione di distacco

tra metallo e ceramica che i provini devono avere per essere conformi e dà indicazioni riguardo al calcolo di tale tensione. Essa viene calcolata registrando il valore della forza di distacco e moltiplicandola per un fattore correttivo k . Tale coefficiente può essere determinato in due modi diversi. Il primo metodo consiste nel determinarlo per via grafica mediante il diagramma riportato in Figura 4.6.1. Noto lo spessore d_M della lamina metallica e le caratteristiche di rigidità della stessa, il coefficiente k è determinato leggendo il valore corrispondente nelle ordinate. In alternativa la norma prevede l'uso di un algoritmo, il cui diagramma di flusso è riportato in Figura 4.6.2. In questo lavoro l'algoritmo proposto è stato sviluppato in un foglio di calcolo Excell.

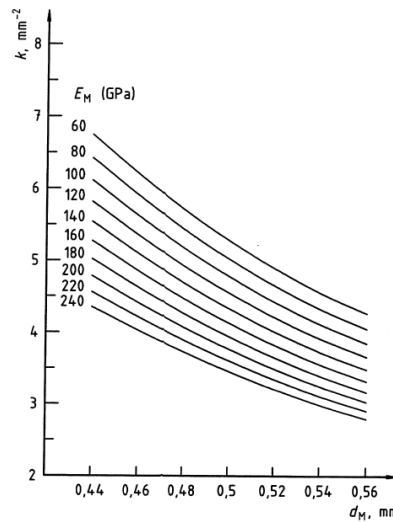


Figura 4.6.1 – Diagramma per il calcolo del coefficiente k

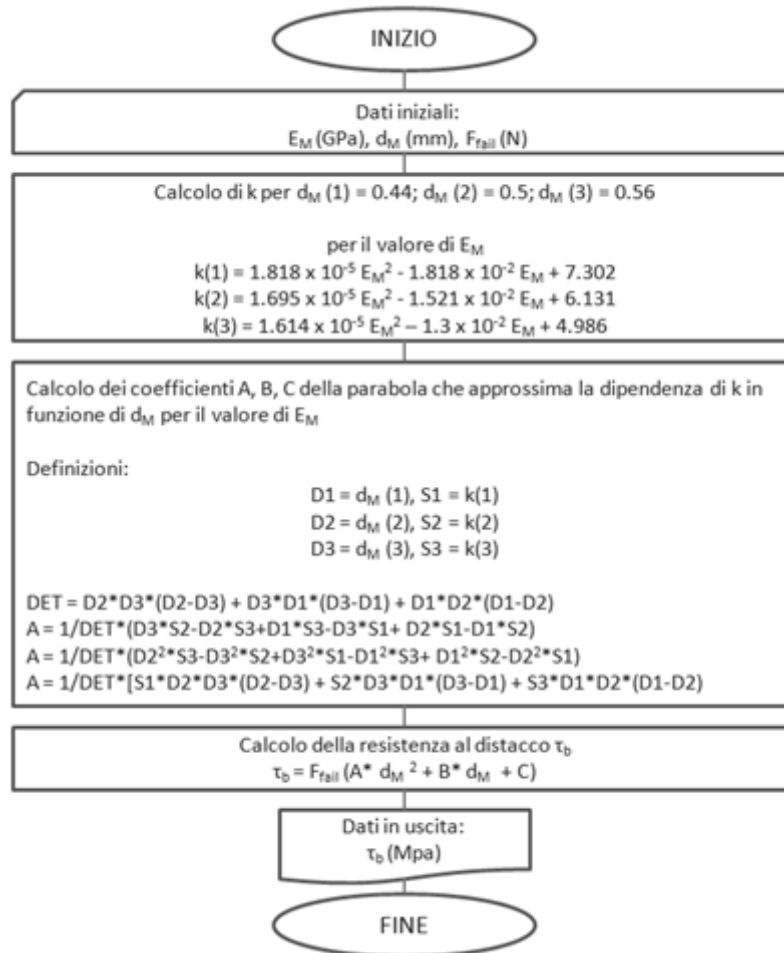


Figura 4.6.1 – Algoritmo per il calcolo del coefficiente k

Per il calcolo della tensione di distacco, come espresso precedentemente, è necessario conoscere lo spessore della lamina metallica. Pertanto, preliminarmente alle prove è stato necessario determinare le caratteristiche geometriche dei provini.

4.6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA



Figura 4.6.1.1 – Esempio di provini per prove di flessione

La determinazione delle principali caratteristiche geometriche dei provini è stata eseguita mediante l'impiego di un calibro centesimale. Non è stato possibile usare, come si pensava inizialmente, la macchina di misura automatica OGP Flash CNC 300 a causa dell'elevata variabilità dei provini dovuta alla realizzazione della ceramizzazione: non tutti i laboratori,

infatti, hanno eseguito la ceramizzazione nella medesima posizione e con le medesime dimensioni, circostanza che rende estremamente difficile l'impiego di un sistema di misura automatico, certamente molto veloce ed efficiente ma non estremamente flessibile come richiesto dal caso in esame.

I risultati vengono presentati in Tabella 4.6.1.1, dove si riporta per ogni kit considerato:

- ✓ Il rapporto di prova;
- ✓ Lo spessore medio indicato con S ed espresso in millimetri;
- ✓ La lunghezza media indicata con L ed espressa in millimetri;
- ✓ La larghezza media indicata con H ed espressa in millimetri;
- ✓ Il provino considerato;
- ✓ La conformità.

			Provino1	Provino2	Provino3	Conformità
RP01	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,95	24,97	25,02	SI
		H[mm]	2,94	3,00	2,94	SI
	Ceramica	S[mm]	1,11	1,16	1,19	SI
		L[mm]	7,92	8,05	8,06	SI
		H[mm]	2,97	2,95	2,95	SI
RP02	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,82	24,96	25,02	SI
		H[mm]	3,00	2,98	3,04	SI
	Ceramica	S[mm]	1,25	1,38	1,37	NO
		L[mm]	7,99	7,99	7,52	NO
		H[mm]	2,83	2,91	2,90	NO
RP05	Lamina	S[mm]	0,54	0,52	0,51	SI
		L[mm]	25,03	24,98	25,01	SI
		H[mm]	3,02	2,95	2,97	SI
	Ceramica	S[mm]	1,32	1,15	1,15	SI
		L[mm]	8,06	8,12	7,82	NO
		H[mm]	3,06	2,86	2,96	NO
RP08	Lamina	S[mm]	0,53	0,55	0,53	SI
		L[mm]	24,86	24,97	24,81	SI
		H[mm]	3,03	3,05	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,52	1,61	1,45	NO
		L[mm]	7,97	8,02	7,89	NO
		H[mm]	3,29	3,27	3,21	NO
RP09	Lamina	S[mm]	0,53	0,51	0,51	SI
		L[mm]	25,01	24,87	25,01	SI
		H[mm]	2,96	2,94	2,95	SI
	Ceramica	S[mm]	1,72	1,96	2,06	NO
		L[mm]	8,31	8,03	8,31	NO
		H[mm]	3,24	3,20	3,13	NO

RP10	Lamina	S[mm]	0,55	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,85	24,88	24,97	SI
		H[mm]	3,01	3,02	3,04	SI
	Ceramica	S[mm]	1,31	1,24	1,28	NO
		L[mm]	7,95	8,00	7,94	SI
		H[mm]	3,17	3,09	3,27	NO
RP13	Lamina	S[mm]	0,55	0,55	0,55	SI
		L[mm]	24,87	24,93	24,93	SI
		H[mm]	3,10	3,10	3,10	SI
	Ceramica	S[mm]	1,42	1,70	1,68	NO
		L[mm]	8,20	8,08	8,40	NO
		H[mm]	3,32	3,57	3,42	NO
RP16	Lamina	S[mm]	0,54	0,55	0,54	SI
		L[mm]	24,92	24,85	24,77	SI
		H[mm]	3,05	3,04	3,07	SI
	Ceramica	S[mm]	1,72	1,37	1,54	NO
		L[mm]	8,05	8,18	8,39	NO
		H[mm]	3,26	3,29	3,26	NO
RP17	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,81	25,06	25,02	SI
		H[mm]	2,96	2,96	2,99	SI
	Ceramica	S[mm]	1,34	1,24	1,24	NO
		L[mm]	8,13	8,25	8,18	NO
		H[mm]	3,14	3,04	3,06	SI
RP18	Lamina	S[mm]	0,55	0,55	0,55	SI
		L[mm]	24,94	24,94	24,96	SI
		H[mm]	2,99	3,06	3,10	SI
	Ceramica	S[mm]	1,64	1,67	1,62	NO
		L[mm]	8,27	8,44	8,16	NO
		H[mm]	3,35	3,40	3,34	NO
RP19	Lamina	S[mm]	0,53	0,53	0,51	SI
		L[mm]	24,88	24,94	24,91	SI
		H[mm]	3,06	2,98	3,02	SI
	Ceramica	S[mm]	1,36	1,32	1,39	NO
		L[mm]	8,23	8,18	8,10	NO
		H[mm]	3,30	3,28	3,25	NO
RP23	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,96	24,86	25,04	SI
		H[mm]	2,99	3,04	2,97	SI
	Ceramica	S[mm]	1,59	1,52	1,61	NO
		L[mm]	8,17	8,04	8,13	NO
		H[mm]	3,20	3,18	3,23	NO
RP25	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,53	SI
		L[mm]	24,90	25,04	24,89	SI

	Ceramica	H[mm]	2,99	2,94	2,99	SI
		S[mm]	1,35	1,45	1,48	NO
		L[mm]	7,73	7,42	7,27	NO
		H[mm]	3,01	2,93	2,99	SI
RP27	Lamina	S[mm]	0,54	0,54	0,54	SI
		L[mm]	24,87	24,55	24,99	SI
		H[mm]	3,04	3,02	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,60	1,62	1,61	NO
		L[mm]	8,79	8,78	8,49	NO
		H[mm]	3,37	3,31	3,33	NO
RP30	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,51	SI
		L[mm]	24,99	25,00	24,93	SI
		H[mm]	3,03	3,02	2,99	SI
	Ceramica	S[mm]	1,04	1,04	1,08	SI
		L[mm]	7,96	7,94	8,04	SI
		H[mm]	2,99	3,02	3,14	NO
RP31	Lamina	S[mm]	0,53	0,53	0,53	SI
		L[mm]	24,85	24,81	24,91	SI
		H[mm]	3,00	3,01	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,26	1,06	1,19	NO
		L[mm]	8,07	7,80	7,73	NO
		H[mm]	3,08	3,07	3,05	SI
RP32	Lamina	S[mm]	0,51	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,95	24,99	25,02	SI
		H[mm]	2,97	3,05	2,96	SI
	Ceramica	S[mm]	1,24	1,25	1,39	NO
		L[mm]	7,98	8,08	7,96	SI
		H[mm]	3,20	3,34	3,26	NO
RP34	Lamina	S[mm]	0,51	0,52	0,54	SI
		L[mm]	24,94	24,94	25,08	SI
		H[mm]	2,95	2,97	2,92	SI
	Ceramica	S[mm]	1,27	1,11	1,15	SI
		L[mm]	7,31	7,49	7,78	NO
		H[mm]	2,91	2,97	2,87	NO
RP40	Lamina	S[mm]	0,54	0,52	0,53	SI
		L[mm]	24,94	24,87	24,91	SI
		H[mm]	3,08	3,06	3,02	SI
	Ceramica	S[mm]	1,62	1,50	1,45	NO
		L[mm]	8,11	8,09	8,00	SI
		H[mm]	3,21	3,28	3,17	NO
RP62	Lamina	S[mm]	0,51	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,78	24,87	24,91	SI
		H[mm]	2,95	3,02	2,94	SI
	Ceramica	S[mm]	1,46	1,24	1,47	NO
		L[mm]	7,64	7,94	7,62	NO

		H[mm]	3,08	3,16	3,03	NO
RP72	Lamina	S[mm]	0,55	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,93	24,83	24,88	SI
		H[mm]	2,98	2,99	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,28	1,36	1,37	NO
		L[mm]	8,14	8,16	8,14	NO
		H[mm]	3,30	3,18	3,30	NO
RP77	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,53	SI
		L[mm]	24,90	24,91	24,98	SI
		H[mm]	3,00	3,05	3,10	SI
	Ceramica	S[mm]	1,47	1,53	1,45	NO
		L[mm]	8,00	8,05	7,93	SI
		H[mm]	3,07	3,04	3,00	SI

Nota:

- S = spessore medio;
- L = lunghezza media;
- H = larghezza media.

Tabella 4.6.1.1 – Risultati della caratterizzazione geometrica

4.6.2 COMMENTI

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 4.6.1.1, si vede come le tolleranze geometriche imposte alla barretta metallica siano sempre rispettate. Altrettanto non si può dire, invece, per quanto riguarda la ceramizzazione. In pochi casi, infatti, le tolleranze sono state rispettate. Ciò può essere imputato sia alla scarsa attenzione prestata dai tecnici di laboratorio che hanno eseguito la lavorazione, sia, soprattutto, alle difficoltà connesse con la lavorazione stessa. Infatti le dimensioni della barretta metallica sono contenute e non è facile realizzare una ceramizzazione che sia all'interno delle strette tolleranze indicate dalla normativa. Probabilmente anche la dima fornita non si presta in maniera ottima a tale fine.

4.6.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Per identificare la forza di distacco sono stati realizzati dei diagrammi per ogni provino "Forza-Spostamento" in cui si riporta il valore della forza applicata dal punzone in funzione della corsa del punzone medesimo. La forza di distacco è stata stimata identificando il picco della curva che si riscontra prima del brusco calo della forza resistente. Identificata la forza di rottura F_{FAIL} è stato possibile ricavare la tensione di distacco dalla relazione

$$\tau_b = F_{FAIL} * k$$

Dove si ricorda che il coefficiente di correzione k , che dipende dalle caratteristiche meccaniche della lamina metallica e dallo spessore della stessa, è determinato numericamente attraverso l'algoritmo proposto dalla norma UNI EN ISO 9693 (18). In Figura 4.6.3.1 è riportato un esempio di grafico "Forza-Spostamento".

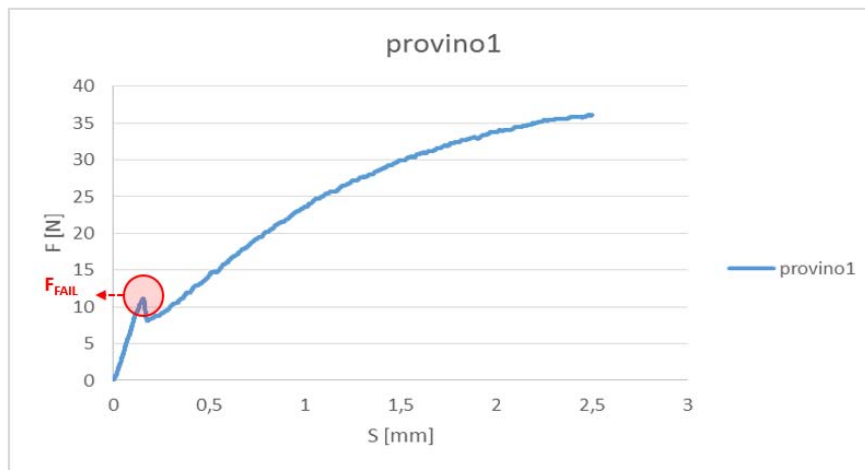


Figura 4.6.3.1 – Esempio di grafico “Forza-Spostamento”

I risultati ottenuti sono confrontati con i limiti prescritti dalla normativa, che richiede un valore minimo di resistenza al distacco di 25 MPa in determinate condizioni di prova. Il laboratorio risulta conforme se il valore medio della tensione di rottura è superiore al limite sopra citato.

Inoltre, per ogni laboratorio, è stato realizzato un grafico, inserito nei report che vengono consegnati, che permette di confrontare il risultato conseguito con il valore medio ottenuto dai laboratori conformi. Un esempio è riportato in Figura 4.6.3.2.

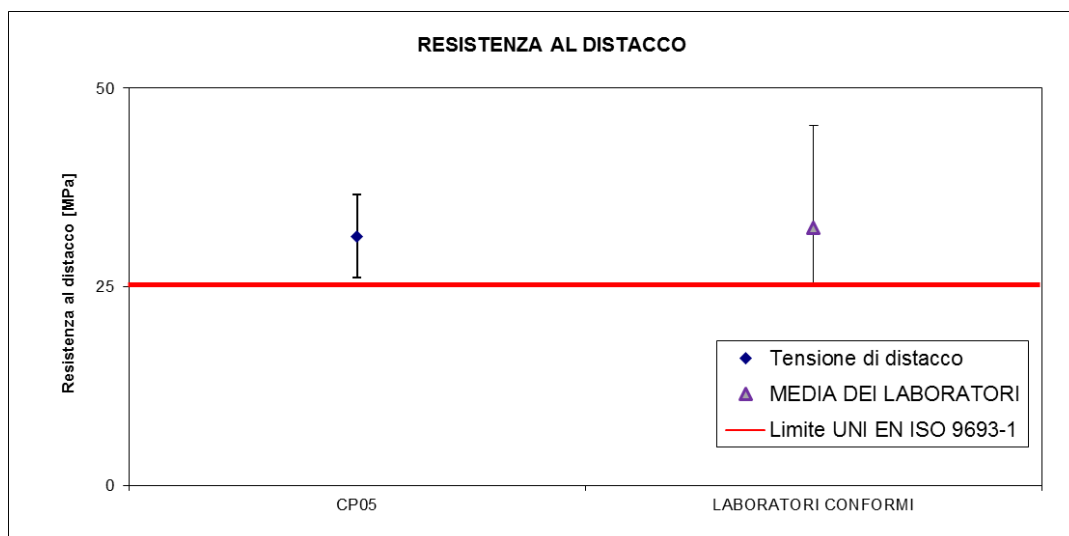


Figura 4.6.3.2 – Esempio di grafico inserito nei report destinati ai laboratori partecipanti

4.6.4 RISULTATI

In Appendice III sono riportate le curve e i valori misurati delle caratteristiche meccaniche per i sistemi di metallo-ceramica testati. Di seguito si riportano sinteticamente i risultati ottenuti. Si ricorda che i laboratori partecipanti sono in totale 28. Tuttavia un laboratorio ha eseguito la ceramizzazione solo su una barretta metallica, determinando, quindi, la propria non conformità. Per questo motivo il risultato non viene riportato nei grafici seguenti.

Forza di distacco

In Tabella 4.6.4.1 si riportano i valori minimi, massimi e medi della forza di distacco F_{FAIL} e nel Grafico 4.6.4.1 si illustra la distribuzione dei valori dalla forza media di distacco. Nel Grafico 4.6.4.2 si riassumono sinteticamente i risultati e vengono evidenziati i laboratori che non hanno superato la prova.

RAPPORTO DI PROVA	F_{FAIL} MINIMA [N]	F_{FAIL} MASSIMA [N]	F_{FAIL} MEDIA [N]
RP01	24	28	26
RP02	12	15	14
RP05	26	37	31
RP07	25	30	27
RP08	22	23	23
RP09	19	30	25
RP10	26	28	27
RP13	31	34	32
RP16	23	28	25
RP17	42	44	43
RP18	30	33	31
RP19	32	39	36
RP23	22	26	23
RP25	22	23	22
RP27	23	42	34
RP28	33	36	35
RP30	35	40	38
RP31	27	36	32
RP32	34	41	37
RP33	31	32	32
RP34	16	22	20
RP40	26	27	27
RP47	41	45	50
RP48	28	34	30
RP52	31	35	33
RP56	-	28	-
RP72	30	36	32
RP77	30	39	34

Tabella 4.6.4.1 – Risultati in termini di forza di distacco

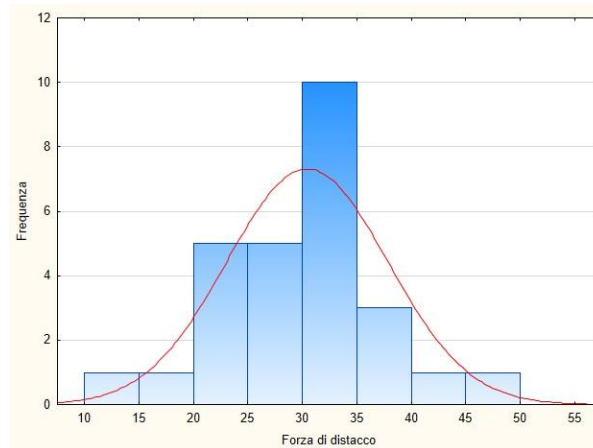


Grafico 4.6.4.1 – Distribuzione della forza di distacco

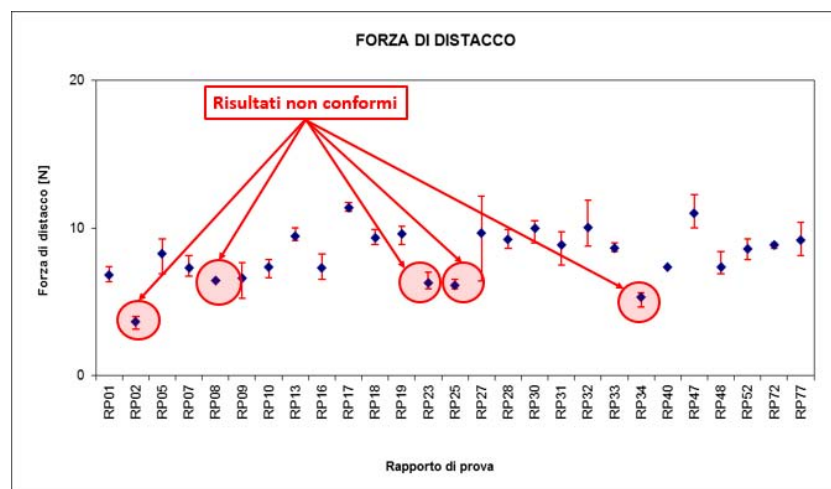


Grafico 4.6.4.2 – Risultati in termini di forza di distacco

Tensione di distacco

In Tabella 4.6.4.2 si riassumono i risultati medi ottenuti da ciascun laboratorio, indicando il rapporto di prova, i valori calcolati della tensione di distacco minima, massima e media, il limite imposto dalla normativa e la relativa conformità. Il Grafico 4.6.4.3 illustra la distribuzione della tensione di rottura. Infine il Grafico 4.6.4.4 riporta sinteticamente i risultati ed evidenzia i laboratori non conformi.

RAPPORTO DI PROVA	τ_b MINIMA [MPa]	τ_b MASSIMA [MPa]	τ_b MEDIA [MPa]	LIMITE [MPa]	CONFORMITÀ
RP01	24	28	26	25	SI
RP02	12	15	14	25	NO
RP05	26	37	31	25	SI
RP07	25	30	27	25	SI
RP08	22	23	23	25	NO
RP09	19	30	25	25	SI
RP10	26	28	27	25	SI
RP13	31	34	32	25	SI

RP16	23	28	25	25	SI
RP17	42	44	43	25	SI
RP18	30	33	31	25	SI
RP19	32	39	36	25	SI
RP23	22	26	23	25	NO
RP25	22	23	22	25	NO
RP27	23	42	34	25	SI
RP28	33	36	35	25	SI
RP30	35	40	38	25	SI
RP31	27	36	32	25	SI
RP32	34	41	37	25	SI
RP33	31	32	32	25	SI
RP34	16	22	20	25	NO
RP40	26	27	27	25	SI
RP47	41	45	50	25	SI
RP48	28	34	30	25	SI
RP52	31	35	33	25	SI
RP56	-	28	-	25	NO
RP72	30	36	32	30	SI
RP77	30	39	34	30	SI

Tabella 4.6.4.2 – Risultati in termini di tensione di distacco

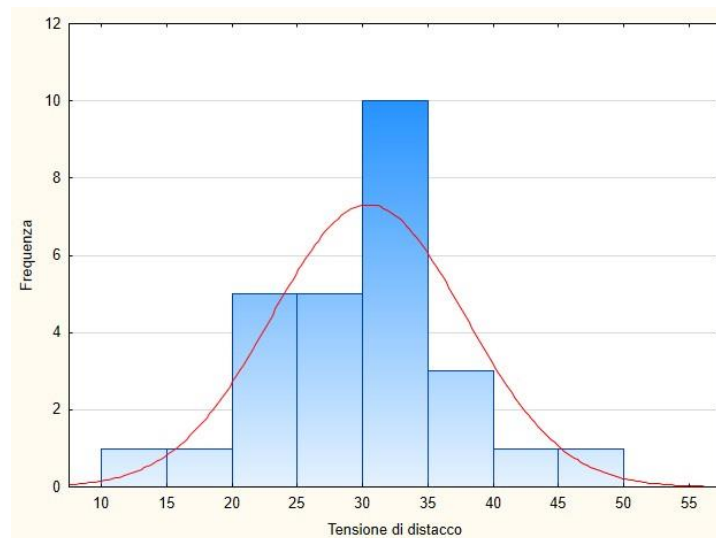


Grafico 4.6.4.1 – Distribuzione della tensione di distacco

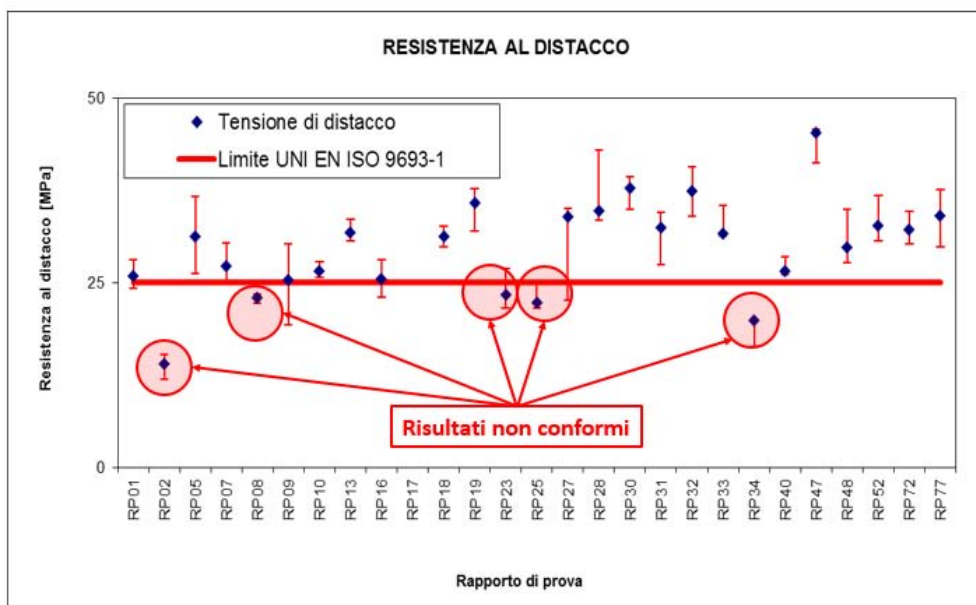


Grafico 4.6.4.4 – Risultati in termini di tensione di distacco

4.6.5 COMMENTI

Dall’analisi dei dati è emerso che sei laboratori su 28 (quindi circa il 21%) non sono riusciti a realizzare dei provini in accordo con le direttive imposte dallo standard UNI EN ISO 22674 (21). Di questi un laboratorio ha realizzato la ceramizzazione su una sola barretta metallica e, quindi, sebbene il risultato ottenuto da tale provino fosse conforme, il giudizio sulla conformità non può che essere negativo.

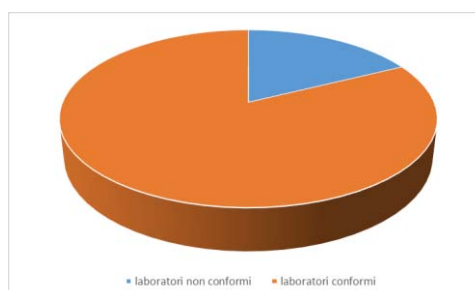


Grafico 4.6.5.1 – Illustrazione della percentuale di laboratori conformi e non

In generale la prova di flessione per la verifica dell’adesione tra metallo e ceramica è risultata presentare le maggiori criticità. Per quanto riguarda il valore medio della tensione di distacco dei laboratori conformi esso è pari a 33 MPa con una deviazione standard di 9 MPa, superiore quindi, anche se non di molto, al limite dei 25 MPa. Tuttavia tali valori sono in accordo con quelli tipici che si riscontrano in letteratura che variano tra i 30 e i 35 MPa (42) (53). Essi sono, però, inferiori a quanto riportato da (56).

Si può, infine, concludere che, presentando maggiori criticità, la prova di flessione, se opportunamente integrata nella prassi di laboratorio, può diventare un efficace strumento per ottenere informazioni relative alla qualità e perizia con cui si eseguono le lavorazioni

impiegando, in particolare, strutture realizzate con processi tecnologici innovativi, come il processo di Fusione Laser Selettiva.

CAPITOLO 5. MISURAZIONI SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE

5.1 INTRODUZIONE

Lo scopo delle misurazioni è quello di indagare le eventuali deformazioni prodotte dal processo di ceramizzazione svolto dai laboratori sulle sottostrutture protesiche in Co-Cr realizzate mediante la tecnica di sinterizzazione laser selettiva.

La sottostruttura in esame è composta da un ponte protesico di quattro elementi che può essere visto in Figura 5.1.1.



Figura 5.1.1 – Esempio di sottostruttura metallica

Indagare l'eventuale deformazione risulta cruciale in quanto essa può determinare il mancato corretto accoppiamento tra la protesi e i monconi, dei pazienti, realizzati dall'odontotecnico. Tale circostanza può determinare il distacco del cemento posto e possibili, pericolose, infiltrazioni batteriche e formazione di carie secondarie.

Al fine di indagare l'eventuale deformazione, viene valutato il gap marginale presente tra le sottostrutture metalliche ed un modello, sempre realizzato in Cobalto-Cromo, dei monconi, prima e dopo il processo di ceramizzazione. Pertanto le varie sottostrutture, una volta prodotte, sono state inviate al dipartimento ICEA dell'Università di Padova, dove sono state misurate e successivamente inviate, all'interno dell'apposito kit, ai vari laboratori, che hanno provveduto alla realizzazione del rivestimento ceramico, ed infine sono state nuovamente misurate.

Come già detto nel Capitolo 2, in letteratura non si trovano dei valori universalmente condivisi del gap marginale massimo che dovrebbe essere presente in una protesi realizzata in modo corretto. In questa sede si è deciso di adottare le direttive AIMAD (40) che prevedono la presenza di una distanza marginale massima pari a 100 μm .

Anche in questo caso il lavoro è stato diviso in due fasi: una prima fase preliminare necessaria per mettere a punto la procedura di misura e valutare la ripetibilità del processo impiegato (al fine di verificarne la validità); una seconda fase di misurazioni vere e proprie.

5.2 APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale impiegato consiste nella macchina di misurazione automatica OGP Flash CNC 300 descritta nel Capitolo 2. Essa è stata impiegata sia nella prima fase di validazione della procedura sia nella seconda fase di misurazioni vere e proprie. Per rendere possibile l'esecuzione delle misure è stato necessario realizzare un supporto in gesso dove il modello di monconi viene posizionato. Successivamente le sottostrutture protesiche vengono poste sul modello medesimo e mantenute in posizione grazie al ausilio di un elemento elastico. La medesima routine di misura è stata, ovviamente, impiegata sia nella fase preliminare sia in quella successiva.

5.3 PRIMA FASE: VALUTAZIONE DELLA RIPETIBILITÀ DEL PROCESSO DI MISURA

Al fine di validare la procedura di misurazione è stato necessario eseguire delle prove di ripetibilità. Ciò è stato fatto andando ad acquisire 5 misurazioni della medesima sottostruttura. I risultati acquisiti vengono riportati in Tabella 5.3.1 e nei Grafici da 5.3.1 a 5.3.5. Nelle tabelle si riporta:

- ✓ Il lato preso in esame;
- ✓ Il punto considerato;
- ✓ Il relativo gap medio frutto di cinque misurazioni;
- ✓ La deviazione standard associata al gap medio.

Si può osservare come, innanzitutto, il gap marginale presente sia inferiore al limite stabilito di 100 μm . Inoltre la ripetibilità, espressa tramite la deviazione standard σ , risulta molto buona con un valore minimo pari a 8 μm . In particolare essa risulta più bassa in corrispondenza dei lati 2 e 4. Ciò è da imputare al processo di misurazione adottato. Infatti in questi due lati, la routine di misura prevede che l'allineamento della macchina venga eseguito manualmente. Questo ovviamente, introducendo il fattore umano, pregiudica l'ottenimento di una ripetibilità della misura elevata come quella che si ottiene negli altri due lati. Infine il gap medio totale presente risulta pari a 34 μm con una deviazione standard di 16 μm .

LATO	PUNTO	GAP MEDIO [μm]	σ [μm]
Lato 1	1	24	2
	2	20	0
	3	22	1
	4	8	1
	5	8	1

	6	33	1
	7	41	1
	8	46	0
	9	44	1
	10	42	1
Lato 2	1	26	2
	2	15	8
	3	31	3
	4	38	1
	5	38	1
Lato 3	10	44	1
	9	49	1
	8	50	1
	7	56	0
	6	46	1
	5	18	2
	4	6	1
	3	12	2
	2	21	1
	1	19	2
Lato 4	1	38	3
	2	49	8
	3	63	4
	4	59	3
	5	43	1

Tabella 5.3.1 – Risultati della misura di ripetibilità

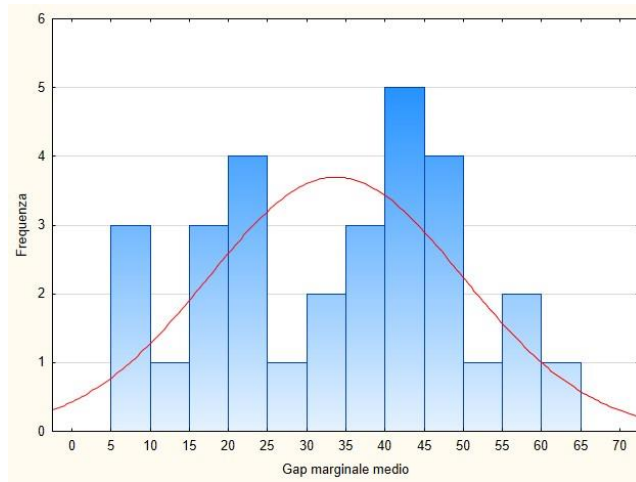


Grafico 5.3.1 – Distribuzione del gap marginale medio

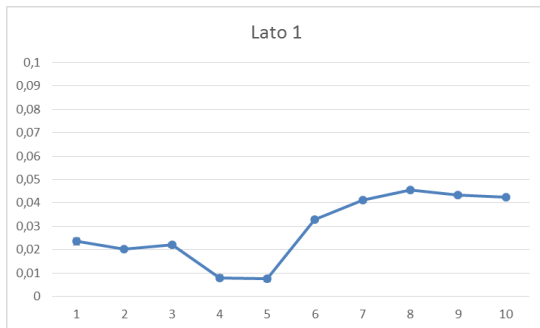


Grafico 5.3.2 – Gap marginale medio inerente il “Lato 1” della sottostruttura

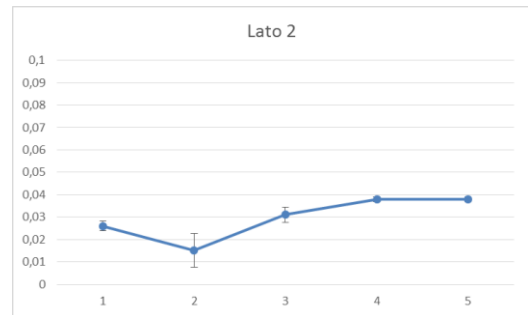


Grafico 5.3.3 - Gap marginale medio inerente il “Lato 2” della sottostruttura

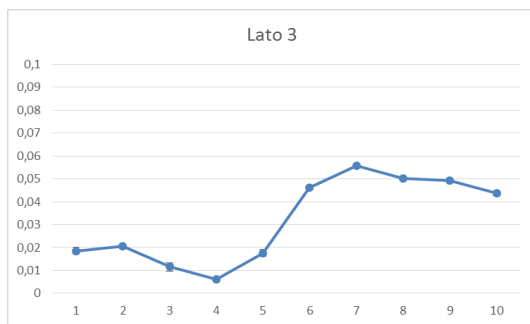


Grafico 5.3.4 - Gap marginale medio inerente il “Lato 3” della sottostruttura

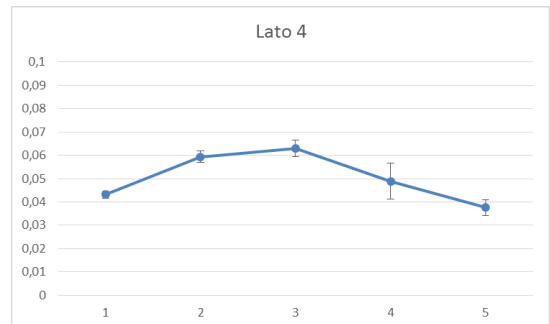


Grafico 5.3.5 - Gap marginale medio inerente il “Lato 4” della sottostruttura

5.4 SECONDA FASE

Realizzata la routine di misura e validato il processo stesso verificandone la buona ripetibilità è stato possibile passare alla seconda fase in cui ci si è concentrati sulla misurazione delle sottostrutture metalliche protesiche prima e dopo il processo di ceramizzazione al fine di valutare l'eventuale presenza di deformazione indotta sulle sottostrutture medesime.

Anche questa seconda fase può, a sua volta, essere suddivisa in due parti. Nella prima parte sono state misurate 80 sottostrutture metalliche non ancora ceramizzate che sono state inviate ad altrettanti laboratori. Nella seconda parte sono state misurate 28 protesi ceramizzate realizzate dai laboratori che hanno consegnato il kit che era stato loro inviato nei tempi previsti. Gli aspetti fondamentali di questa fase e i risultati ottenuti vengono discussi di seguito.

5.4.1 PROCEDURA DI ESECUZIONE DELLE MISURE.

La procedura di misurazione si basa sulla routine elaborata nella prima fase.

Preliminarmente all'esecuzione delle misure è stato necessario identificare in modo univoco le sottostrutture. In particolare è stata impiegata la seguente numerazione:

- ✓ Una numerazione da 1-1 a 10-1 per le sottostrutture appartenenti al primo lotto;
- ✓ Una numerazione da 11-2 a 25-2 per le sottostrutture appartenenti al secondo lotto;
- ✓ Una numerazione da 26-3 a 30-3 per le sottostrutture appartenenti al terzo lotto;
- ✓ Una numerazione da 31-4 a 40-4 per le sottostrutture appartenenti al quarto lotto;
- ✓ Una numerazione da 41-5 a 60-5 per le sottostrutture appartenenti al quinto lotto;
- ✓ Una numerazione da 61-6 a 80-6 per le sottostrutture appartenenti al sesto lotto.

Per identificare la modalità di fabbricazione è stato impiegato un numero: 1 per la prima e 2 per la seconda.

In particolare la modalità di fabbricazione 1 impiega polveri di granulometria pari a 20 µm, mentre la modalità 2 impiega polveri di granulometria pari a 40 µm.

Si sottolinea come solo le sottostrutture appartenenti al terzo lotto di produzione siano state realizzate impiegando la modalità di fabbricazione 1

Come già descritto nel paragrafo precedente, le sottostrutture sono state poste sul modello dei monconi e mantenute in posizione impiegando un elemento elastico. È stato necessario identificare i vari lati del modello. In particolare è stata impiegata la seguente modalità:

- ✓ "Lato 1": in corrispondenza del lato del modello che presenta la marcatura;
- ✓ "Lato 2": in corrispondenza del lato più corto del molare;
- ✓ "Lato 3": in corrispondenza del lato del modello opposto a quello che presenta la marcatura;
- ✓ "Lato 4": in corrispondenza del lato più corto del canino.

Per ogni sottostruttura sono state acquisite le misurazioni di 30 punti. In particolare:

- ✓ 5 punti sul canino in corrispondenza del lato 1;

- ✓ 5 punti sul molare in corrispondenza del lato 1;
- ✓ 5 punti sul molare in corrispondenza del lato 2;
- ✓ 5 punti sul molare in corrispondenza del lato 3;
- ✓ 5 punti sul canino in corrispondenza del lato 3;
- ✓ 5 punti sul canino in corrispondenza del lato 4.

Un esempio di punti acquisiti è visibile in Figura 5.4.1.1



Figura 5.4.1.1 – Esempio di acquisizione dei punti

La routine impiegata misura il gap presente andando ad identificare i livelli di grigio dell'immagine. Con maggior dettaglio, essa individua le zone più nere corrispondenti all'ombra data dalla presenza di gap marginale tra le sottostrutture e il modello dei monconi e calcola l'area e il raggio del centroide associato. Il gap marginale viene valutato come il doppio del raggio del centroide così calcolato.

Inoltre la procedura di misura viene riportata anche nell'Appendice alla voce "Protocollo di misurazione si sottostrutture protesiche".

Infine, qualora il gap marginale fosse al di sotto di una certa soglia (tipicamente al di sotto dei 2 μm) il sistema di misura falliva nel calcolare il gap presente. In questi casi è stato attribuito il valore di 0 μm al gap presente.

5.4.2 RISULTATI PRIMA PARTE E MODALITÀ DI ANALISI DEI RISULTATI

Di seguito (nelle Tabelle da 5.4.2.1 a 5.4.2.6 e nel Grafico 5.4.2.1) sono riportati i risultati delle misurazioni eseguite sulle sottostrutture protesiche non ceramizzate. Nelle tabelle si riporta:

- ✓ Il codice della sottostruttura;
- ✓ La modalità di fabbricazione;
- ✓ Il gap marginale medio espresso in μm ;
- ✓ Il valore massimo del gap marginale rilevato, sempre espresso in μm ;
- ✓ La conformità della sottostruttura;
- ✓ Il numero di punti non conformi.

Per ciò che concerne la conformità, inizialmente era stato deciso di ritenere le sottostrutture protesiche conformi qualora non presentassero un valore del gap marginale misurato superiore ai 100 μm in nessun punto. Tuttavia ciò richiedeva da parte dell'azienda produttrice un controllo sulle sottostrutture prima che queste venissero inviate all'Università. Pertanto, per facilitare il compito da parte della suddetta azienda coinvolta e sgravarla da un carico di lavoro oneroso è stato scelto di ammettere come conformi tutte quelle sottostrutture che non presentino un gap marginale superiore ai 100 μm in più di cinque punti di misura. Ciò non inficia gli obbiettivi della misurazione né l'attestazione finale per due motivi. Il primo dei quali è il fatto che in letteratura non esiste un valore unico di gap marginale a cui attenersi e la soglia dei 100 μm è stata scelta in osservanza alle indicazioni fornite da AIMAD. In secondo luogo lo scopo delle misure non è tanto quello di verificare il valore assoluto del gap presente, individuandone il massimo, ma quello di confrontare le misurazioni prima e dopo il processo di ceramizzazione eseguito dai laboratori coinvolti al fine di accertare l'assenza di eventuali deformazioni e quindi di asserire e attestare la qualità della lavorazione svolta dai laboratori medesimi.

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
1-1	2	33	17	67	SI	0
2-1	2	18	16	52	SI	0
3-1	2	16	12	45	SI	0
4-1	2	23	17	85	SI	0
5-1	2	22	14	66	SI	0
6-1	2	20	11	44	SI	0
7-1	2	38	20	77	SI	0
8-1	2	26	16	75	SI	0
9-1	2	31	22	85	SI	0
10-1	2	22	19	59	SI	0

Tabella 5.4.2.1 – Dati relativi al primo lotto

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
11-2	2	31	23	73	SI	0
12-2	2	26	20	73	SI	0
13-2	2	32	17	73	SI	0
14-2	2	20	15	51	SI	0
15-2	2	32	22	80	SI	0
16-2	2	24	25	85	SI	0

17-2	2	24	15	64	SI	0
18-2	2	53	30	97	SI	0
19-2	2	19	13	50	SI	0
20-2	2	30	30	74	SI	0
21-2	2	37	39	93	SI	0
22-2	2	24	15	61	SI	0
23-2	2	31	24	73	SI	0
24-2	2	45	28	98	SI	0
25-2	2	18	15	54	SI	0

Tabella 5.4.2.2 – Dati relativi al secondo lotto

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
26-3	1	43	31	105	NO	1
27-3	1	27	22	95	SI	0
28-3	1	43	17	79	SI	0
29-3	1	25	13	54	SI	0
30-3	1	19	16	73	SI	0

Tabella 5.4.2.3 – Dati relativi al terzo lotto

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
31-4	2	17	15	61	SI	0
32-4	2	26	19	64	SI	0
33-4	2	18	16	52	SI	0
34-4	2	19	17	52	SI	0
35-4	2	21	16	51	SI	0
36-4	2	22	15	56	SI	0
37-4	2	20	15	58	SI	0
38-4	2	17	13	42	SI	0
39-4	2	18	15	59	SI	0
40-4	2	21	13	46	SI	0

Tabella 5.4.2.4 – Dati relativi al quarto lotto

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
41-5	2	16	13	44	SI	0
42-5	2	20	14	47	SI	0

43-5	2	15	10	35	SI	0
44-5	2	15	9	29	SI	0
45-5	2	15	15	51	SI	0
46-5	2	16	14	56	SI	0
47-5	2	14	12	53	SI	0
48-5	2	18	16	50	SI	0
49-5	2	15	10	42	SI	0
50-5	2	15	13	45	SI	0
51-5	2	19	12	45	SI	0
52-5	2	16	13	39	SI	0
53-5	2	19	13	56	SI	0
54-5	2	14	11	44	SI	0
55-5	2	15	10	44	SI	0
56-5	2	13	11	39	SI	0
57-5	2	19	14	44	SI	0
58-5	2	13	12	42	SI	0
59-5	2	13	10	44	SI	0
60-5	2	20	20	76	SI	0

Tabella 5.4.2.5– Dati relativi al quinto lotto

CAMPIONE	MODALITÀ DI FABBRICAZIONE	GAP MEDIO [μm]	DEVIAZIONE STANDARD σ [μm]	VALORE MASSIMO GAP [μm]	CONFORMITÀ	NUMERO DI PUNTI NON CONFORMI
61-6	2	31	25	89	SI	0
62-6	2	31	20	68	SI	0
63-6	2	20	18	62	SI	0
64-6	2	27	17	68	SI	0
65-6	2	29	18	74	SI	0
66-6	2	39	26	95	SI	0
67-6	2	35	25	110	SI	1
68-6	2	33	19	74	SI	0
69-6	2	32	20	106	SI	1
70-6	2	32	19	76	SI	0
71-6	2	29	17	58	SI	0
72-6	2	29	17	75	SI	0
73-6	2	32	25	123	SI	1
74-6	2	31	19	69	SI	0
75-6	2	36	21	72	SI	0
76-6	2	32	20	77	SI	0
77-6	2	21	16	59	SI	0
78-6	2	32	19	76	SI	0
79-6	2	47	25	100	SI	0
80-6	2	41	18	78	SI	0

Tabella 5.4.2.6– Dati relativi al sesto lotto

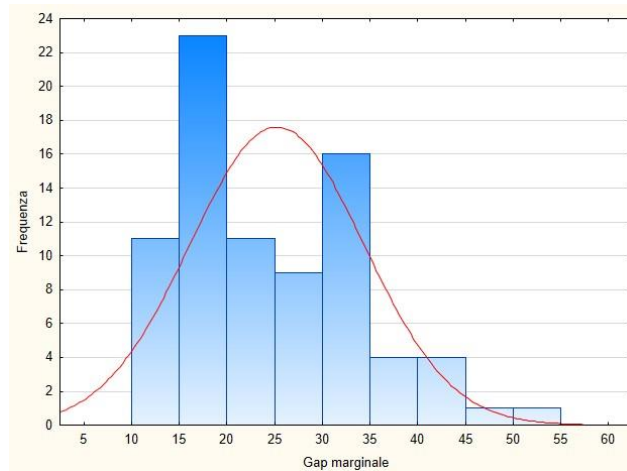


Grafico – 5.4.2.1 – Distribuzione del gap marginale medio

5.4.3 COMMENTI

Innanzitutto si evince dalle tabelle come tutte le sottostrutture esaminate risultino conformi in accordo con i parametri scelti. Per quanto riguarda le sottostrutture appartenenti al terzo lotto e realizzate secondo la prima modalità di fabbricazione, inizialmente presentavano dei valori del gap marginale che eccedevano i 100 μm in molti punti. Ciò è da imputare alla modalità di realizzazione stessa. Impiegando, infatti, polveri di granulometria 20 μm , le sottostrutture ottenute, presentano, senza l'intervento successivo da parte di un operatore, una superficie più irregolare che pregiudica il valore del gap marginale. Di contro, questo problema, si presenta in maniera molto meno accentuata nel caso delle sottostrutture protesiche ottenute impiegando la modalità di fabbricazione 2, ovvero usando polveri di granulometria 40 μm . Tale circostanza, unita al fatto che la modalità 1 di fabbricazione è più onerosa sia dal punto di vista dei tempi che dei costi, ha spinto per l'impiego della modalità 2 per quanto riguarda i lotti dal quarto al sesto ed in generale per i lotti successivi.

Sempre dall'analisi dei dati si può vedere come le sottostrutture realizzate secondo la modalità 2 di produzione presentino un gap marginale medio totale pari a 25 μm con una variabilità tra i campioni, espressa mediante la deviazione standard, pari a 9 μm . Mentre, per quanto riguarda le sottostrutture appartenenti al terzo lotto, esse presentano un gap marginale medio totale pari a 31 μm con una deviazione standard di 6 μm .

Tali risultati evidenziano la precisione che si può raggiungere impiegando le tecniche di produzione che sfruttano la sinterizzazione laser selettiva, in particolar modo quando si devono realizzare componenti dalla geometria complessa come, appunto, nel caso di sottostrutture protesiche per applicazioni dentali, dimostrando, pertanto, le ampie opportunità che queste nuove tecnologie permettono di sfruttare.

5.4.4 RISULTATI PARTE SECONDA E MODALITÀ DI ANALISI DEI RISULTATI

La seconda parte delle misurazioni prevede di valutare le sottostrutture protesiche sulle quali i vari laboratori coinvolti avevano eseguito il processo di ceramizzazione. Il valore del gap misurato è stato confrontato con quello ricavato nella prima parte al fine di valutare se il processo in esame avesse indotto delle deformazioni rilevanti.

Le modalità di misurazione sono analoghe a quelle impiegate nella prima fase. I dati raccolti sono stati elaborati ed è stata rilevata la differenza, in termini di gap marginale, tra prima e dopo il processo di ceramizzazione, come espresso di seguito:

$$\Delta Gap = Gap_{post-ceramizzazione} - Gap_{pre-ceramizzazione}$$

Onde evitare la formulazione di un giudizio errato si è deciso di applicare il criterio di Chauvenet per filtrare i dati. Pertanto è stata calcolato il valor medio, la deviazione standard e lo scarto ridotto della differenza di distanza marginale in accordo con le seguenti formule:

$$\Delta Gap_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Gap_i}{n};$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Gap_{medio} - \Delta Gap_i)^2}{n - 1}};$$
$$z_i = \frac{\Delta Gap_i - \Delta Gap_{medio}}{\sigma}.$$

Per un numero di punti pari a 30, e nell'ipotesi di distribuzione Gaussiana dei valori, il criterio prevede di scartare tutti quei dati che presentano un valore assoluto dello scarto ridotto superiore a 2,35

$$|z_i| > z_{limite} = 2,35$$

Questo, pertanto, ha portato ad eliminare, in alcuni casi, un certo numero di punti che si è rivelato contenuto. Infatti il numero massimo di punti eliminati per sottostruttura indagata è stato pari a 2, ovvero a circa il 7% dei punti totali.

Al fine di asserire o meno l'insorgere di una effettiva deformazione rilevante si è scelto di impiegare come criterio discriminante proprio la differenza di gap marginale. Qualora essa si presentasse superiore ai 100 μm si può asserire di essere in presenza di una deformazione consistente che pregiudicherebbe l'impiego della protesi. In Figura 5.4.4.1 si riassume il procedimento svolto.

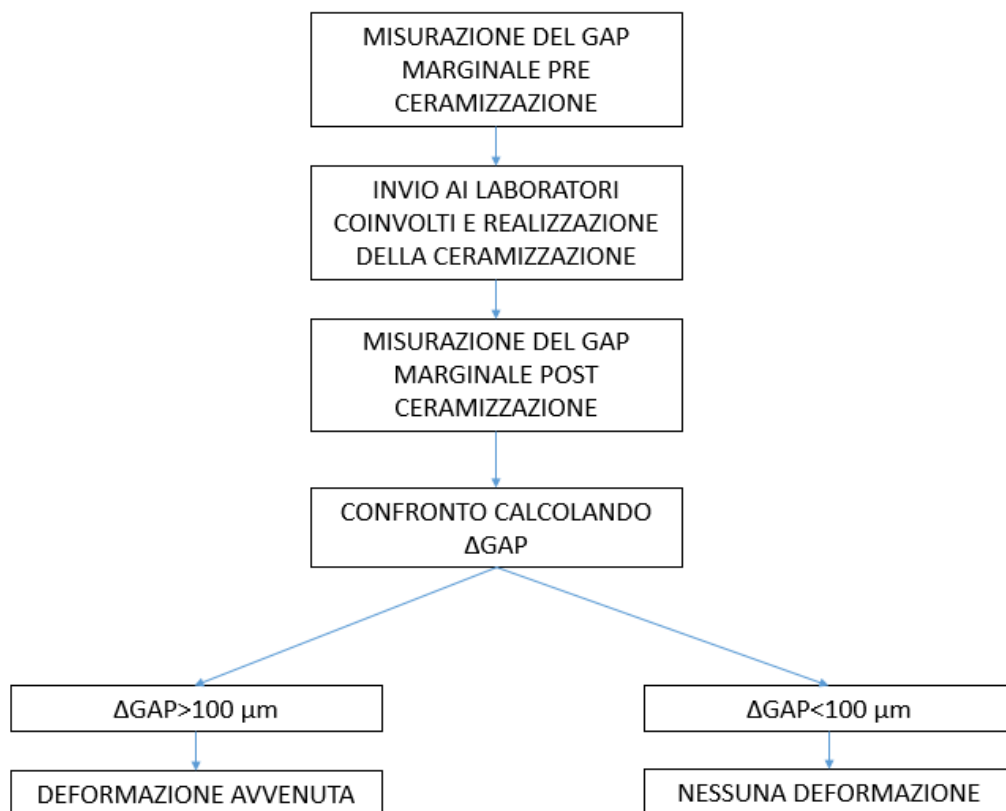


Figura 5.4.4.1 – Schema del processo di valutazione delle sottostrutture protesiche

Inoltre, al fine di ottenere un riscontro visivo ed immediato sono stati realizzati, per ogni caso esaminato dei grafici. In Figura 5.4.4.2 è riportato un esempio di grafico ottenuto per il Lato 1 di una sottostruttura protesica. In esso viene rappresentato l'andamento del gap marginale medio prima e dopo il processo di misurazione. In Figura 5.4.4.3, invece, viene mostrato un esempio di grafico tridimensionale elaborato impiegando il software Matlab. In esso, lungo l'asse x, vengono riportati i 10 punti acquisiti in corrispondenza dei lati 1 e 3 delle sottostrutture, mentre lungo l'asse y vengono plottati i 5 punti rilevati per i lati 2 e 4. Lungo l'asse z viene riportata la differenza di Gap marginale prima e dopo la ceramizzazione. Il programma interpola automaticamente i dati e fornisce una rappresentazione tridimensionale.

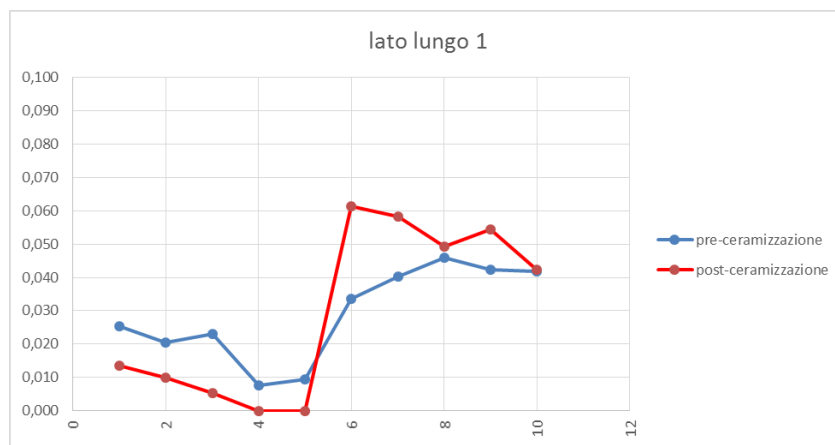


Figura 5.4.4.2 – Esempio di grafico dell’andamento della distanza marginale

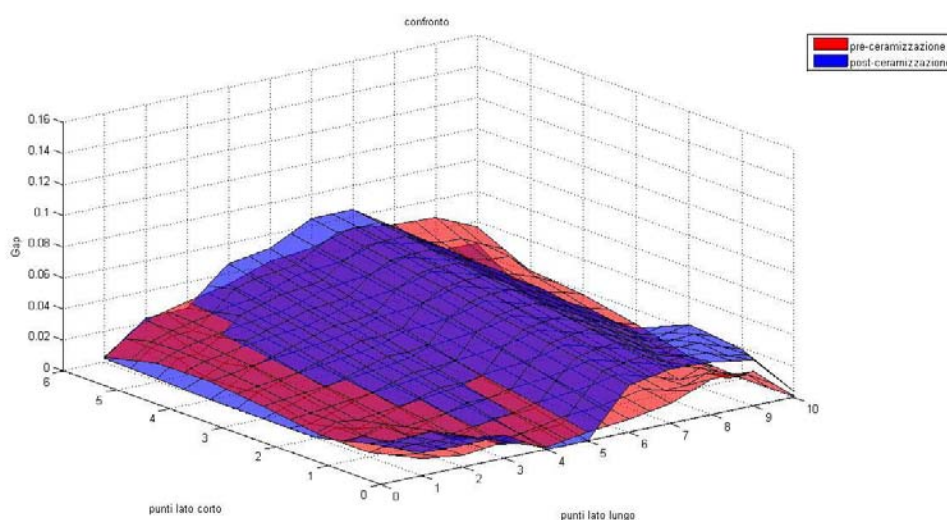


Figura 5.4.4.3 – Esempio di grafico tridimensionale dell’andamento della distanza marginale

In Tabella 5.4.4.1 si riportano i risultati ottenuti. In particolare viene messo in evidenza la variazione di gap marginale media, la relativa deviazione standard, il valore massimo e minimo di tale variazione, la conformità (in base ai criteri stabiliti) e il numero di punti eliminati applicando il criterio di Chauvenet.

Nel Grafico 5.4.4.1 viene rappresentata, invece, la distribuzione dei valori di della differenza di distanza marginale media. Infine il Grafico 5.4.4.2 rappresenta in maniera immediata il risultato ottenuto da ogni laboratorio, riportando il valore medio della differenza di distanza marginale, la banda di valori compresa tra il massimo e il minimo e i limiti simmetrici in corrispondenza dei 100 μm . infine si riporta, anche, in Figura 5.4.4.4 un esempio di grafico fornito ad ogni laboratorio nei rispettivi report di prova.

RAPPORTO DI PROVA	ΔGAP [μm]	σ [μm]	ΔGAP max [μm]	ΔGAP min [μm]	CONFORMITÁ	N° PUNTI ELIMINATI
-------------------	---------------------------------------	----------------------------	---	---	------------	--------------------

RP01	-7	15	28	-34	SI	2
RP02	2	12	22	-21	SI	0
RP05	-1	12	20	-22	SI	2
RP07	16	28	71	-31	SI	0
RP08	3	21	35	-40	SI	0
RP09	7	16	39	-43	SI	1
RP10	7	27	65	-54	SI	0
RP13	2	16	38	-29	SI	0
RP16	8	19	57	-21	SI	1
RP17	5	18	41	-34	SI	0
RP18	7	52	109	-61	SI	0
RP19	3	13	33	-19	SI	0
RP23	0	17	35	-35	SI	0
RP25	16	22	74	-17	SI	1
RP27	3	11	22	-22	SI	1
RP28	20	34	82	-44	SI	0
RP30	3	14	22	-24	SI	1
RP31	9	22	47	-34	SI	1
RP32	-3	14	16	-42	SI	2
RP33	12	13	40	-15	SI	0
RP34	5	10	25	-12	SI	1
RP40	21	27	73	-23	SI	0
RP47	28	25	89	-11	SI	1
RP48	10	24	72	-50	SI	1
RP52	26	24	80	-18	SI	0
RP56	7	13	37	-21	SI	0
RP72	27	28	96	-26	SI	1
RP77	22	19	64	-8	SI	0

Tabella 5.4.4.1 – Risultati della variazione di distanza marginale media

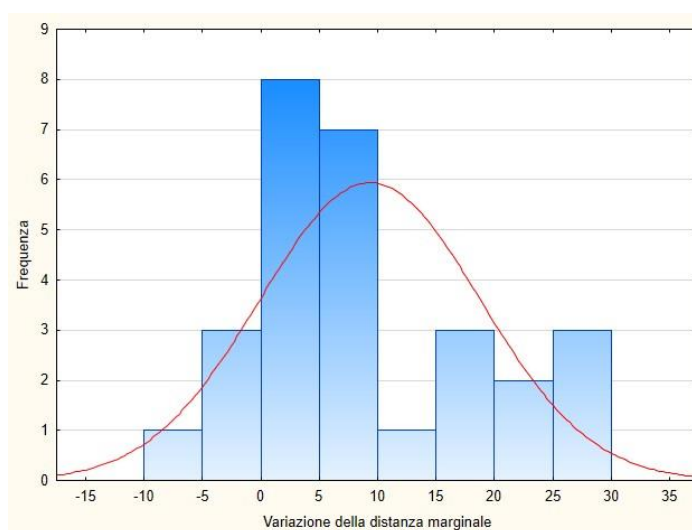


Grafico 5.4.4.1 – Distribuzione della differenza di distanza marginale media

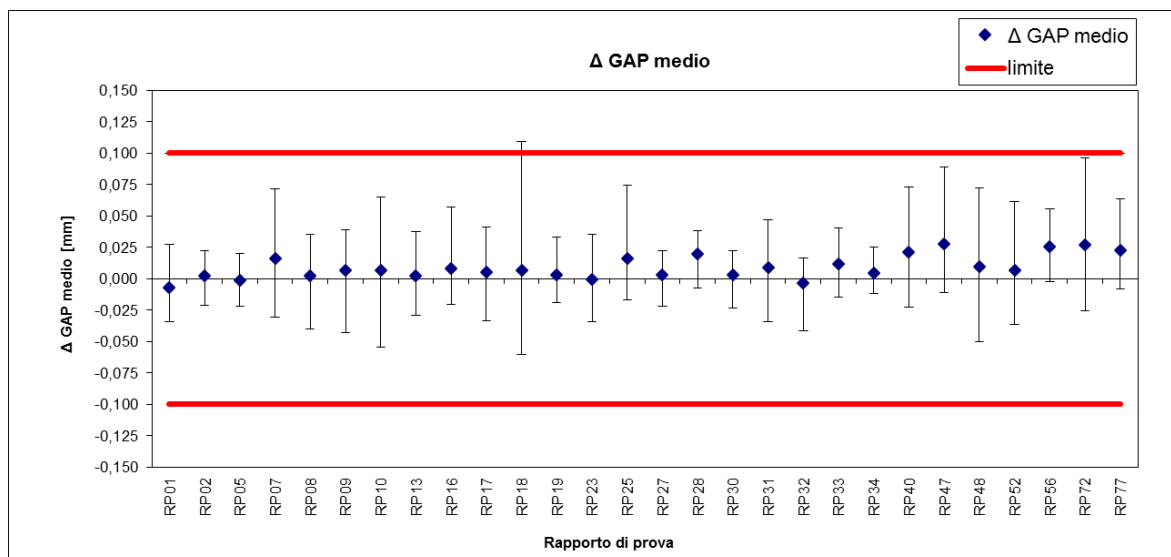


Grafico 5.4.4.2 - Risultati della variazione di distanza marginale media

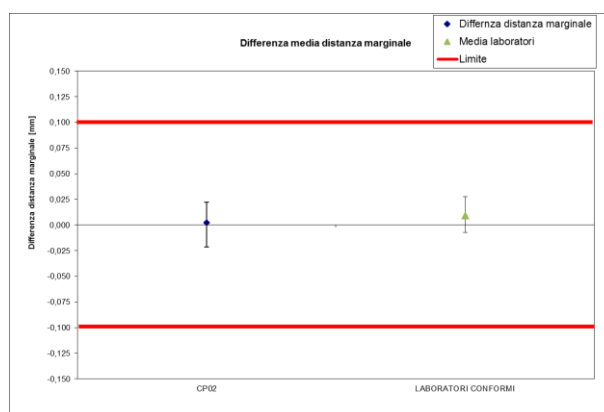


Figura 5.4.4.4 - Esempio di grafico fornito ai laboratori

5.4.5 COMMENTI

Come si evince dai dati riportati, tutti i laboratori partecipanti hanno realizzato delle lavorazioni sulle sottostrutture metalliche che sono risultate conformi con i criteri stabiliti. Il valor medio della differenza di distanza marginale rilevato è pari a 9 μm . In un solo caso (RP18) si vede come il valore massimo della differenza di distanza marginale ecceda i 100 μm . Tuttavia, dal momento che il valore medio è largamente inferiore a questa soglia, si è deciso di ritenere anche questo risultato conforme.

Pertanto, in generale, si può affermare come i laboratori coinvolti abbiano dimostrato una certa perizia ed abilità nel gestire il processo di ceramizzazione impiegando sottostrutture metalliche realizzate mediante Fusione Laser Selettiva. Le deformazioni sono contenute e garantiscono una buona precisione nell'accoppiamento tra le sottostrutture medesime e i monconi, permettendo quindi la realizzazione di una restaurazione dentale corretta, duratura e sicura per i pazienti.

CAPITOLO 6. CONCLUSIONI

Il settore dentale, negli ultimi anni, ha assistito a numerosi cambiamenti con l'introduzione, sempre più massiccia, di tecnologie normalmente diffuse nel settore industriale. Le tecnologie CAD/CAM unite alle tecnologie di "Additive Manufacturing" e al impiego di scanner per la digitalizzazioni delle arcate dentali dei pazienti si stanno imponendo. Tutto questo, ovviamente, pone nuove sfide per i professionisti di questo settore. Essi, da sempre e in accordo con i decreti legislativi, si impegnano a realizzare dispositivi dentali sicuri e duraturi. Tuttavia mancano delle procedure standardizzate volte ad evitare i possibili malfunzionamenti delle protesi in fase di progettazione. Questo spinge i laboratori odontotecnici ad affidarsi a tradizionali e consolidate buone pratiche di fabbricazione, piuttosto che ad affidarsi a controlli e prove finalizzate alla riduzione dei rischi. Inoltre, il quadro normativo, si complica ulteriormente qualora il fornitore delle sottostrutture metalliche non sia il medesimo realizzatore delle protesi finite. In caso di malfunzionamento, infatti, non è facile asserire in modo certo quale soggetto coinvolto nella realizzazione della restaurazione dentale abbia commesso degli errori che hanno pregiudicato la sicurezza o la durata del dispositivo stesso. In tale ottica si inserisce il lavoro svolto. Le prove impiegate, che rispettano le indicazioni fornite dagli standard normativi internazionali e le direttive proposte nelle pubblicazioni tecnico scientifiche del settore, permettono di valutare la perizia e l'abilità da parte dei laboratori odontotecnici nel svolgere le tipiche operazioni connesse con la realizzazione dei dispositivi protesici. In particolare sono state svolte le seguenti prove:

- ✓ Prove di trazione al fine di caratterizzare meccanicamente i giunti saldati e verificare che la tensione di rottura dei medesimi sia superiore al limite imposto dalle normative UNI EN ISO 9333 (17) e UNI EN ISO 28319 (23);
- ✓ Prove di flessione al fine di verificare l'adesione tra metallo e ceramica, determinando la tensione di distacco e confrontandola con il limite imposto da UNI EN ISO 9693-1 (18);
- ✓ Misurazioni della distanza marginale tra le sottostrutture metalliche protesiche e dei modelli di monconi prima e dopo il processo di ceramizzazione. Il confronto tra i dati ricavati ha permesso di asserire l'eventuale presenza di deformazione indotta dal processo medesimo.

Per quanto riguarda le prove di trazione, tutti i laboratori partecipanti sono risultati conformi a quanto previsto da (18). Un solo campione ha dimostrato una tensione di rottura inferiore a quanto previsto da (23). Tuttavia il carico di rottura, mediamente, è risultato essere ben al di sopra di quanto previsto dalle normative. Anche nel caso delle misurazioni delle sottostrutture protesiche i dati raccolti dimostrano come le deformazioni prodotte dal processo di ceramizzazione siano mediamente contenute. Maggiori criticità, invece, si sono riscontrate nella prova di flessione per la determinazione della tensione di distacco tra metallo e ceramica. Un numero contenuto di laboratori, infatti, non è riuscito a realizzare dei campioni che garantissero un forte legame tra lo strato ceramico e il metallo di base non riuscendo,

pertanto, a superare la prova. In generale i valori medi si sono dimostrati coerenti con quanto riportato nella letteratura scientifica.

Tuttavia si può sicuramente asserire come la qualità media delle lavorazioni eseguite dai laboratori partecipanti sia elevata a dimostrazione del livello di servizio offerto dal settore dentale Veneto e del nord Italia in generale.

Infine la prima parte del lavoro ha permesso di verificare come i campioni prodotti impiegando la tecnologia di Fusione Laser Selettiva presentino proprietà meccaniche e di precisione geometrica molto elevate. Ciò dimostra, pertanto, le potenzialità di queste nuove ed emergenti tecnologie. Esse rappresentano una valida alternativa ai processi tradizionali di fusione a cera persa e permettono di ridurre il carattere tipicamente artigianale delle protesi dentali garantendo un maggior livello di ripetibilità e di qualità delle lavorazioni.

CAPITOLO 7. BIBLIOGRAFIA

1. **Galletto, Susanna, et al.** *Le imprese della salute e del benessere in Veneto*. Padova : CCIA di Padova, 2004.
2. [Online] [http://www.osservatoriobiomedicaleveneto.it/index.asp?main=Distretto biomedicale&cat=sections&tipologia=Distretto biomedicale&ID=1](http://www.osservatoriobiomedicaleveneto.it/index.asp?main=Distretto%20biomedicale&cat=sections&tipologia=Distretto%20biomedicale&ID=1).
3. [Online] <http://www.osservatoriobiomedicaleveneto.it/>.
4. **Anusavice, Kenneth J., Shen, Chiayi e Rawls, Ralph H.** *Philips' Science of Dental materials*. St. Louise : Elsevier Inc., 2013. ISBN 979-1-4377-2418-9.
5. *Bite force and occlusion*. **Bakke, Merete. s.l.** : Seminars in Ortodontics, 2006, Vol. 12, p. 120-126.
6. **Balestrini, Giancarlo e Corrao, Carmela R.N.** *Trattato di biomeccanica applicata all'odontoprotesi (Biomeccanica 2)*. Padova : Piccin Nuova Libreria, 1987. Isbn 88-229-0569-0.
7. *Comparison of the bond strenght of laser-sintered and cast metal dental alloys to porcelain*. **Akova, Tolga, et al. s.l.** : Dental materials, 2008, Vol. 24, p. 1400-1404.
8. *Marginal and internal fit of metal-ceramica crowns fabricated with a new laser melting technology*. **Quante, katrin, Ludwing, Klaus e kern, Matthias. s.l.** : Dental materials, 2008, Vol. 24, p. 1311-1315.
9. *Effects of three soldering techniques on the strenght of high-palladium alloy solder joints*. **Chavez, Marisol, Vermilyea, Stanley G. e papazoglou, Efstratios, Brantley, William A. s.l.** : The Journal of prosthetic Dentistry, 1998, Vol. 79, p. 677-84.
10. **Ian, Gibson, David W., Rosen e Brent, Stucker.** *Additive Manufacturing Technologies*. s.l. : Springer, 2010. ISBN: 978-1-4419-1119-3.
11. *Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strenght of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting*. **Lin, Wu, et al. s.l.** : The Journal of Prosthetics dentistry, 2014, Vol. III, p. 51-55.
12. *A comparison of debonding strengths of four metal-ceramic systems with and without opaque porcelain*. **Wood, Marjorie C., Thompson, Geoffrey A. e Agar, John R. s.l.** : The Journal of Prosthetics Dentistry, 2007, Vol. 97, p. 141-149.
13. *Metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting*. **Nan, Xiang, Xian-Zhen, Xin e Jie, Chen, Bin, Wei. s.l.** : The Journal of Prosthetics Dentistry, 2012, Vol. 40, p. 453-457.

-
14. *The fit of cobalt-chromium three-unit fixed dental prostheses fabricated with four different techniques: A comparative in vitro study.* **Ortrop, Anders, et al. s.l.** : Dental materials, 2010, Vol. 27, p. 356-363.
15. *An evaluation of marginal fit of three-unit fixed dental prostheses fabricated by direct metal laser sintering system.* **Kim, Ki-Back, et al. s.l.** : Dental materials, 2013, Vol. 29, p. 91-96.
16. *Internal fit evaluation of crowns prepared using a new dental crown fabrication technique: Laser-sintered Co-Cr crowns.* **Ucar, yurdanur, et al. s.l.** : The journal of Prosthetics Dentistry, 2009, Vol. 102, p. 253-259.
17. *Marginal and internal fit of metal-ceramic crowns babricated with a new laser melting technology.* **Quante, Katrin, Ludwig, Klaus e Kern, Matthias. s.l.** : Dental materials, 2008, Vol. 24, p. 1311-1315.
18. UNI EN ISO 9333:2006 - Dentistry: Brazing Materials. s.l. : **Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006.**
19. UNI EN ISO 9693-1:2012 - Dentistry: Compatibility testting - Part 1: Metal-ceramic systems. s.l. : **Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2012.**
20. [Online] <http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/97046dl.htm>.
21. *A proposal for the classification of dental alloys acoordind to their resistance to corrosion.* **Managranche, Claire e Hornberger, Helga. s.l.** : Dental Materials, 2007, Vol. 23, p. 1428-1437.
22. UNI EN ISO 22674 - Dentistry: Metallic materials for fixed and removable restorations appliances. s.l. : **Ente Nazionale Italiano di Unificazione.**
23. UNI EN ISO 28319:2010 - Dentistry: Laser welding. s.l. : **Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2010.**
24. UNI EN 10002-1:2004 Materiali metallici - prova di trazione parte 1: metodo di prova a temperatura ambiente. Milano : **Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.**
25. *Laser welding of cobalt-chromium removable partial denture alloy.* **NaBadalung, Darunee P. e Nicholls, Jack I. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 1998, Vol. 79, p. 285-290.
26. *Mechanical strength of laser-welded Cobalt-Chromium alloy.* **Baba, N., et al. s.l.** : Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2004, Vol. 69B, p. 121-124.
27. *Tensile strength and corrosion resistance of brazed and lase-welded cobalt-chromium alloy joints.* **Zupancic, Rock, Legat, Andraz e Funduk, nevad. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 2006, Vol. 96, p.273-282.

-
28. *Mechanical and elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy.* **Wiskott, Anselm H. W., et al. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 1997, Vol. 77, p. 607-616.
29. *Tensile strength of soldered gold alloy joints.* **Watanabe, Ikuya, et al. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 1997, Vol. 78, p. 260-266.
30. *Laser Welding of titanium in dentistry.* **Sjogren, Goran, Andersson, Matt e bergam, Maud. Oslo** : Acta odontologica Scandinavica, 1988, Vol. 46, p. 247-253.
31. *Laser welding of a cobalt-chromium removable partial denture alloy.* **NaBadalung, Darunee P. e Nicholls, Jack I. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 1998, Vol. 79, p. 285-290.
32. *Effect of corrosion on the strength of soldered titanium and Ti-6Al-4V alloy.* **Oda, Yutaka e Okabe, Toru. s.l.** : Dental Materials, 1996, Vol. 12, p. 167-172.
33. *Infrared gold alloy brazing on titanium and Ti-6Al-4V alloy surfaces and its application to removable prosthodontics.* **Wakabayashi, Noriyuki, et al. s.l.** : Journal of Prostodontics, 1999, Vol. 8, p. 180-187.
34. *Designs of bond strength tests for metal-ceramic complexes: review of the literature.* **hammad, Ihab A. e Talic, Yousef F.** 1996, Vol. 75.
35. *Study of the bond between gold alloys and porcelain.* **Shell, John S. e Nielsen, John P. s.l.** : Journal of Dental Research, 1962, Vol. 41, p. 1424-1437.
36. *Marginal and internal fits of fixed dental prostheses zirconia retainers.* **Beuer, Florian e al., et. s.l.** : Dental Materials, 2009, Vol. 25, p. 94-102.
37. *Clinical fit of four-unit zirconia posterior fixed dental prostheses.* **Reich, Sven, et al. s.l.** : European Journal of Oral Sciences, 2008, Vol. 116, p. 579-584.
38. *In vitro marginal fit of three all-ceramic crown system.* **Teo, In-Sung, Yang, Jae-Ho e Lee, Jai-Bong. s.l.** : The Journal of Prosthetics Dentistry, 2003, Vol. 90, p. 459-464.
39. *Marginal accuracy of titanium copings fabricated by casting and CAD/CAM techniques.* **Witkowski, Siegbert, Komine, Futoshi e Gerd, Thomas. s.l.** : The Journal of Prosthetics Dentistry, 2006, Vol. 96/1, p. 47-52.
40. *Fit of metal ceramic crowns cast in Au-1.6 wt% Ti alloy for different abutment finish line curvature.* **Tao, Jianxiang e al., et. s.l.** : Dental Materials, 2006, Vol. 22, p. 397-404.
41. **AIMAD.** *Requisiti e criteri di fabbricazione per sistemi metallo-ceramici.* 2014.
42. **Atsushi, Takaichi, et al.** *Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications.* s.l. : Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2013. Vol. 21, p. 67-76.

-
43. *Comparative evaluation of bond strength of various metal-ceramic restorations.* **Korkmaz, Turan e Asar, Volkan. s.l.** : Materials and Design, 2009, Vol. 30, p. 445-451.
44. *Shear bond strength of ceramic system to alternative metal alloys.* **De melo, renata, et al. s.l.** : The Journal of Prosthetic Dentistry, 2005, Vol. 93, p. 64-69.
45. *Comparison of bond strength of pressed ceramic and feldspathic porcelain.* **Schweitzer, Daniel M. e al., et. s.l.** : Journal of Prosthodontics, 2005, Vol. 14, p. 239-247.
46. **Pappalardo, Girolamo.** *Manuale di materiali dentali.* Padova : Piccin Nuova Libreria, 1997. ISBN 88-299-1390-1.
47. *Tensile strength determination of the interface between porcelain fused to gold.* **Kelly, Mike, Asgar, Kamal e O'Brien, William J. s.l.** : Journal of Biomedical Materials Research, 1969, Vol. 3, p.403-408.
48. *X-ray diffraction studies of oxidized high-palladium alloys.* **Brantley, William A, e al., et. s.l.** : Dental Materials, 1996, Vol. 12, p. 333-341.
49. *Adherence controlling elements in ceramic-metal systems.* **Anusavice, kenneth J., Horner, Jack A. e Fairhurst, Carl W. s.l.** : Journal of Dental Research, 1977, Vol. 56, p. 1045-1052.
50. *Transmission electron microscopic investigation of Pd-Ag-In-Sn dental alloy.* **Guo, W. H. e al., et. s.l.** : Biomaterials, 2003, Vol. 24, p. 1705-1712.
51. *Adherence controlling elements in ceramic-metal system. II. non precious alloys.* **Anusavice, kenneth J., Ringle, Robert D. e Fairhurst, Carl W. s.l.** : Journal of Dental Research, 1977, Vol. 56, p. 1053-1061.
52. [Online] http://www.dental-u.com/learning/metal_ceramic.pdf.
53. *Thermal stresses in metal-ceramic specimens for the ISO crack initiation test (three-point flexure bond test).* **Lenz, Jurgen e kessel, Siegfried. s.l.** : Dental Materials, 1998, Vol. 14, p. 277-280.
54. *Study of bond strength of dental porcelain fused to metal.* **Knap, Florian J. e Ryge, Gunnar. s.l.** : Journal of Dental Research, 1966, Vol. 45, p. 1047-1051.
55. **Petrucci, Giovanni.** [Online] <http://www.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Materiali.pdf>.
56. *A comparison of debonding strength of four metal-ceramic systems with and without opaque porcelain.* **Wood, Marjorie C., Thompson, Geoffrey A. e Agar, John R.** 2007, Vol. 97.
57. **Cerardi, Andrea.** *Caratterizzazione Meccanica, Geometrica e Funzionale di Dispositivi Biomedicali .* Padova : s.n., 2009.

APPENDICE I: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI PROVINI IN MATERIALE METALLICO PER LA PROVA DI VERIFICA DEI GIUNTI SALDATI

PROCEDURA

SCOPO

Proporre una procedura per la realizzazione provini saldati, da utilizzare per la caratterizzazione meccanica mediante prova di trazione.

PREMESSA

Si propone per i provini la geometria riportata in Allegato B. Il provino è un monoblocco ottenuto tramite il processo di fusione laser selettiva. Successivamente viene tagliato, inviato al laboratorio nell'apposito kit e saldato secondo le normali procedure di laboratorio. Il provino è utilizzato per la verifica di resistenza statica.

RIFERIMENTI

- | | |
|-----------------------|---|
| UNI EN ISO 9333:2006 | - Dentistry - Brazing materials; |
| UNI EN ISO 28319:2010 | - Dentistry – Laser welding; |
| UNI EN ISO 22674:2006 | - Materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili e le apparecchiature; |

ESAMI E CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che il kit fornito contenga un provino per prove di trazione con geometria conforme a quanto riportato in Allegato B, tagliato in corrispondenza della mezzera.

VERIFICA MATERIALE DENTALE

Il *materiali dentali* impiegati per la realizzazione del provino devono rappresentare la produzione dell'azienda in termini di numerosità di protesi prodotte. Pertanto sono scelti a discrezione dell'azienda. Verificare la presenza di informazioni dettagliate relative all'identificazione e alle proprietà dei materiali impiegati ed ai relativi processi di utilizzo.

In caso di esito negativo dei controlli preliminari contattare il referente.

REALIZZAZIONE DELLA SALDATURA

Allineare e supportare le due parti della fusione separandole con un gap di 0,1-0,2 mm e saldare le parti utilizzando il materiale corretto e seguendo le istruzioni del fornitore. Eseguire il trattamento termico sulla saldatura, solo se specificato nelle procedure standard di laboratorio. In tal caso eseguire il trattamento termico del provino in accordo con le specifiche procedure di laboratorio.

Dopo la saldatura il diametro del provino deve essere $3\pm 0,1$ mm

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Verificare di aver compilato completamente tutti i moduli riportati negli allegati.

AZIONI CONSEGUENTI

Provvedere al confezionamento del provino avendo cura che durante la fase di confezionamento non venga in contatto con sostanze che possano causarne l'ossidazione. Inviare il provino al referente.

ALLEGATI

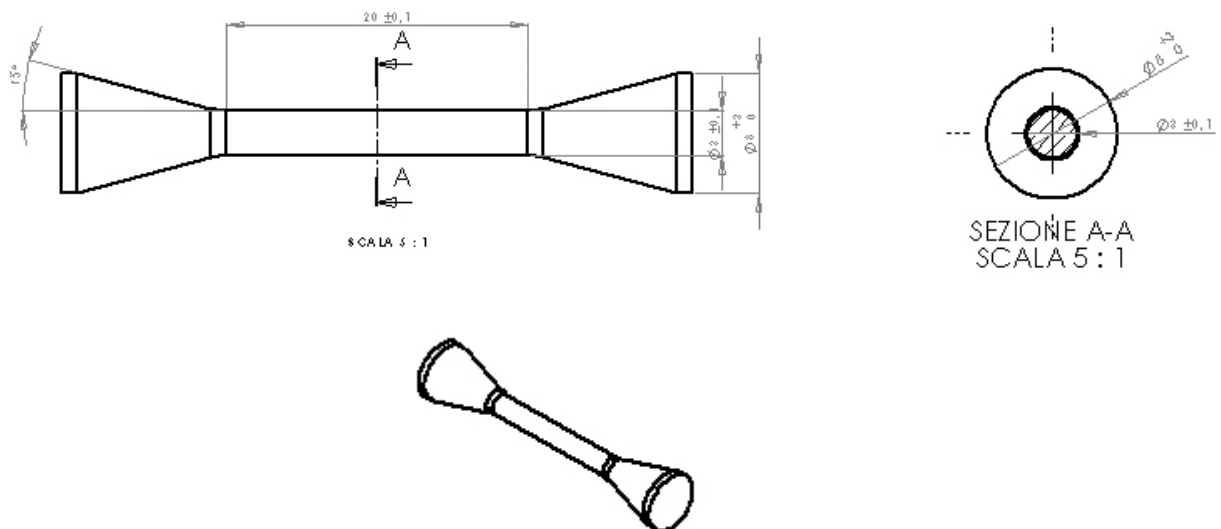
- Allegato A – Sequenza delle azioni da intraprendere;
- Allegato B – Caratteristiche geometriche del provino;
- Allegato C – Modulo 1: Materiali dentali utilizzati;
- Allegato C – Modulo 2: Processi produttivi

Allegato A
SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE

Oggetto: realizzazione di provini saldati, da utilizzare per la caratterizzazione meccanica, mediante prova a trazione. Il seguente schema propone una sequenza di azioni che il costruttore intraprende per la realizzazione dei giunti saldati, dal momento del ricevimento del provino nell'apposito kit al momento della spedizione.

SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE		
DESCRIZIONE	ESEGUITO?	
Azioni preliminari		
Verifica del contenuto del kit fornito	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Realizzazione della saldatura		
Eeguire la saldatura delle due parti	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Annotare le caratteristiche del materiale di apporto di saldatura (Modulo 1 – Allegato C)	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Annotare i parametri critici del processo di saldatura (Modulo 2 – Allegato C)	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Treatamenti termici sul provino	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Annotare i parametri critici di lavorazione per i trattamenti termici (Modulo 2 – Allegato C)	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica dimensionale del provino	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Azioni conclusive		
Controllo visivo dei provini	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Confezionamento dei provini	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica della compilazione dell'Allegato A e Allegato B	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Consegna dei provini al referente	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO

Allegato B
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PROVINO



Allegato C - Modulo 1
MATERIALI DENTALI UTILIZZATI

Oggetto: realizzazione giunti saldati, da utilizzare per la caratterizzazione meccanica, mediante prova a trazione. Il seguente schema riassume le caratteristiche dei materiali dentali utilizzati per la realizzazione dei provini metallici.

CARATTERISTICHE MATERIALE di SALDATURA

Tipo _____

Fornitore _____

Composizione chimica

Oro	Platino	Palladio	Argento	Ferro	Cromo	Cobalto	Nichel	Molibdeno	Manganese	Silicio	Gallio
Au	Pt	Pd	Ag	Fe	Cr	Co	Ni	Mo	Mn	Si	Ga
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Altri elementi:											

Proprietà fisiche materiale di saldatura

Intervallo di fusione	[°C]		Flow temperature	[°C]	
Altre proprietà					

Allegato C - Modulo 2 MATERIALI DENTALI UTILIZZATI

Oggetto: realizzazione giunti saldati, da utilizzare per la caratterizzazione meccanica, mediante prova a trazione.
Il seguente schema riassume le caratteristiche del processo di saldatura impiegato.

Parte 1: SALDATURA	
Tipo di processo impiegato:	
Principali Caratteristiche del processo	
Temperatura di fusione del materiale metallico [°C]	
Tempo di raffreddamento	
Altre note di processo	

Parte 2: TRATTAMENTI TERMICI SULLA SALDATURA

Principali Caratteristiche del processo	
Temperatura massima [°C]	
Tempo di mantenimento [min]	
Tipo di atmosfera	

Altre note di processo

APPENDICE II: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI PROVE STATICHE DI TRAZIONE

SCOPO

Descrivere le modalità di esecuzione della prova di trazione per la caratterizzazione meccanica di giunti saldati.

PREMESSA

Il metodo di prova è basato sulla normativa UNI EN ISO 22674, riguardante i materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili. I provini, realizzati tramite il procedimento di sinterizzazione laser selettiva, vengono tagliati in corrispondenza della mezzeria e fornite ai laboratori all'interno dell'apposito kit.

RIFERIMENTI

- UNI EN ISO 22674:2006 - Materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili e le apparecchiature;
- UNI EN ISO 9693-1:2012 - Sistemi per restaurazioni dentali di metallo-ceramica;
- UNI EN 6892-1:2009 - Materiali metallici – Prova di trazione. Metodo di prova (a temperatura ambiente);

GEOMETRIA DEI PROVINI

I provini sono prodotti secondo la geometria riportata nella figura seguente.



Tolerancing ISO 8015
General Tol. ISO 2768 - fH

I parametri geometrici fondamentali che caratterizzano i provini sono sintetizzati nella tabella seguente.

Simbolo	Unità di misura	Denominazione	Valore Nominale
d	mm	Diametro della sezione calibrata	3
L _c	mm	Lunghezza della parte calibrata	20
S ₀	mm ²	Area della sezione iniziale calibrata	7,07

DETERMINAZIONE DELL'AREA DELLA SEZIONE INIZIALE

L'area della sezione iniziale, da determinare con una precisione di $\pm 1\%$, si può calcolare partendo dalla media aritmetica di due misure sul diametro ottenute in direzione perpendicolari.

MACCHINA DI PROVA

Il sistema di misurazione della forza della macchina di prova deve essere tarato in conformità alla UNI EN ISO 7500-1 e deve essere almeno di classe 1.

CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che strumenti ed attuatori dispongano di certificati di taratura validi o altra documentazione idonea a dimostrarne lo stato di efficienza e garantirne la riferibilità.

PARAMETRI DI PROVA

TEMPERATURA SALA DI PROVA

La prova è eseguita a temperatura ambiente, nei limiti tra 10°C e 35°C.

VELOCITÀ DELLA MACCHINA

Caricare il provino in controllo di deformazione con una velocità il più costante possibile, pari a 500µε/s fino a rottura.

ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova consiste nel sottoporre il provino a sforzo di trazione, allo scopo di determinare le caratteristiche meccaniche del giunto saldato.

METODO DI SERRAGGIO

Fissare rigidamente un singolo provino alla macchina di prova tramite ganasce che si chiudono sulle superfici coniche esterne dei provini secondo la procedura di laboratorio. Adottare ogni cura affinché il provino sia fissato in modo che il carico risulti applicato il più assialmente possibile.

AVVIO DELLA PROVA

Sottoporre il provino a deformazione a velocità costante, mediante l'azione del carico di trazione unidirezionale, applicato ortogonalmente alla sezione del provino. Durante la prova acquisire a intervalli di tempo costanti (min 20 punti al secondo) i valori di forza tramite cella di carico

TERMINE PROVA

La prova ha termine con la rottura del provino con completa separazione delle superfici o con il raggiungimento dei limite di forza, deformazione o spostamento imposti.

SMONTAGGIO DEL PROVINO

Generalmente al termine della prova la macchina è nella condizione di blocco per superamento dei limiti di deformazione: non c'è pressione nel cilindro e la gravità spinge a contatto le due superfici di frattura. Allontanare le ganasce e rimuovere il provino.

DETERMINAZIONE DEL CARICO UNITARIO DI ROTTURA

È il carico unitario corrispondente al carico massimo applicato sul provino nel corso della prova.

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Aggiornare il database.

APPENDICE III: RISULTATI DELLE PROVE STATICHE DI TRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI GIUNTI SALDATI

SCOPO

Sintetizzare i risultati delle prove statiche di trazione per la caratterizzazione meccanica dei giunti saldati svolte sui provini realizzati dai laboratori odontotecnici aderenti al progetto di ricerca.

PREMESSA

La normativa di riferimento per quanto riguarda la resistenza meccanica dei giunti saldati è la UNI EN ISO 9333:2006. Essa prevede che la tensione di rottura del giunto saldato sia superiore ai 250 MPa. I provini testati sono stati realizzati mediante il processo di sinterizzazione laser selettiva. Ogni provino è stato univocamente identificato inserendolo nel kit inviato ai laboratori. Per ogni provino è stata eseguita una prova di trazione statica fino alla rottura. I dati elaborati hanno consentito di individuare il carico di rottura e di asserire l'eventuale conformità per ogni campione testato.

RIFERIMENTI

UNI EN ISO 28319:2010 Odontoiatria - Saldatura laser

UNI EN ISO 9333:2006 Odontoiatria - Materiali da rivestimento

SEDE DELLE PROVE

Le prove sono state eseguite nel laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale del dipartimento ICEA dell'Università di Padova

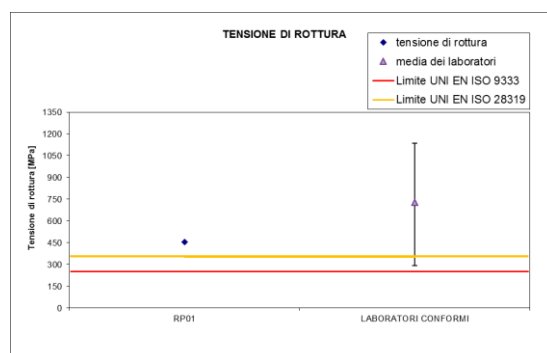
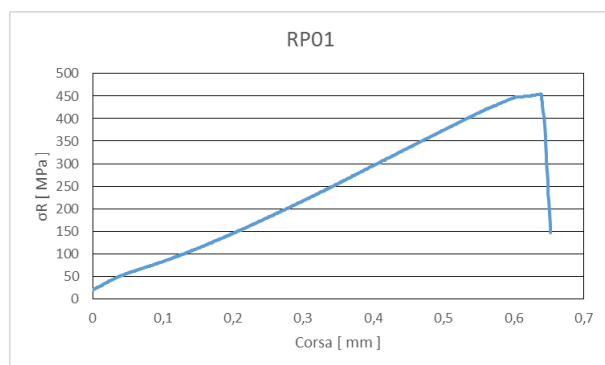
CONDIZIONI DI PROVA

- macchina utilizzata:	Sun2500
- cella di carico:	25 kN
- velocità di allontanamento delle teste:	1,5 mm/min
- software di controllo:	Sun GraphWork 2
- utilizzo estensometro:	non utilizzato

RISULTATI

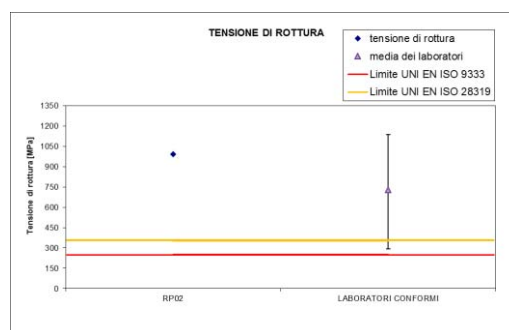
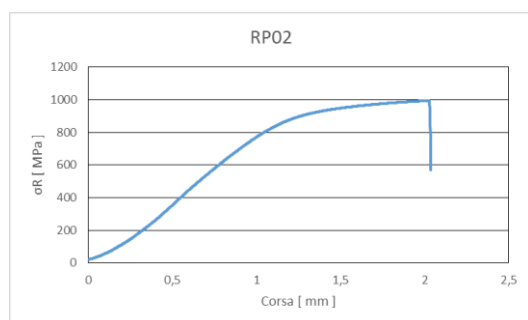
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP01

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,19 mm	3±0,1 mm	455 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



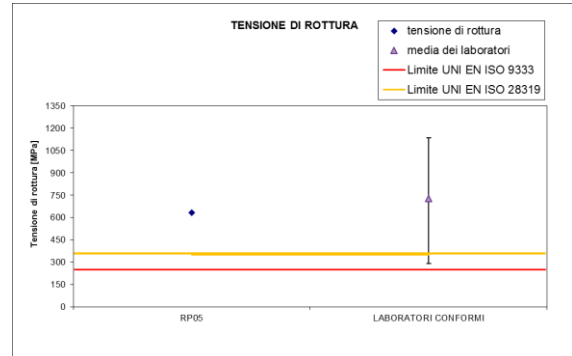
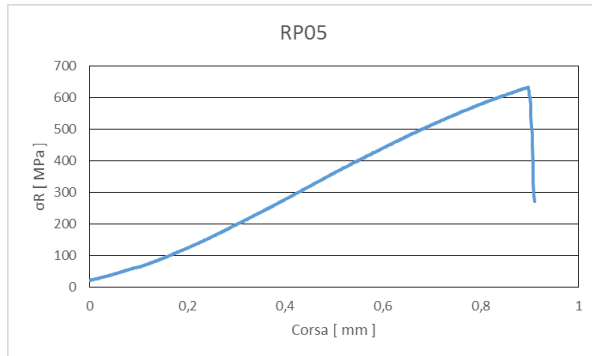
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP02

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



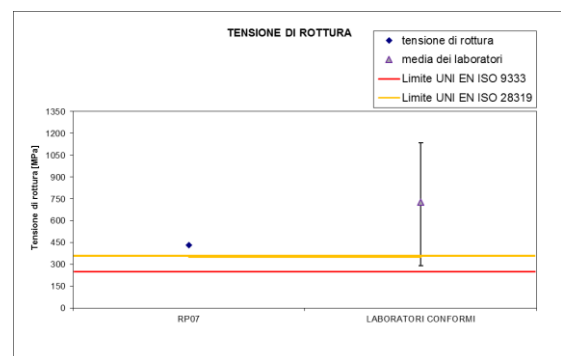
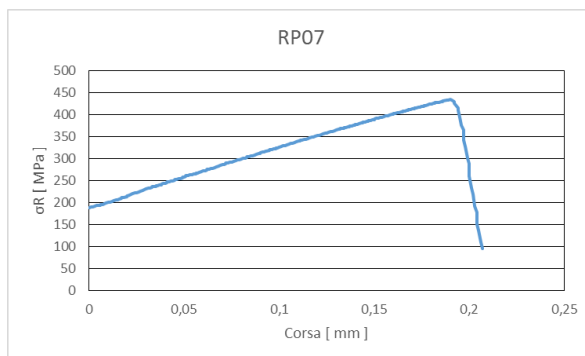
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP05

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,99	3±0,1 mm	632	250 MPa	350 Mpa	SI



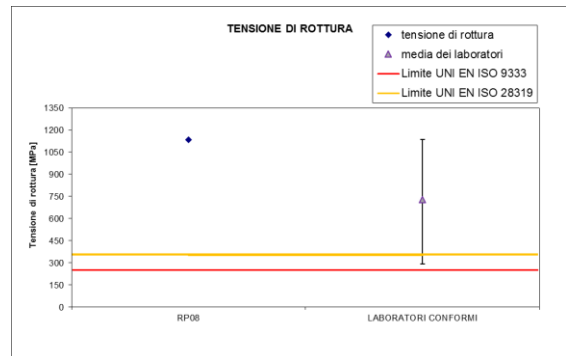
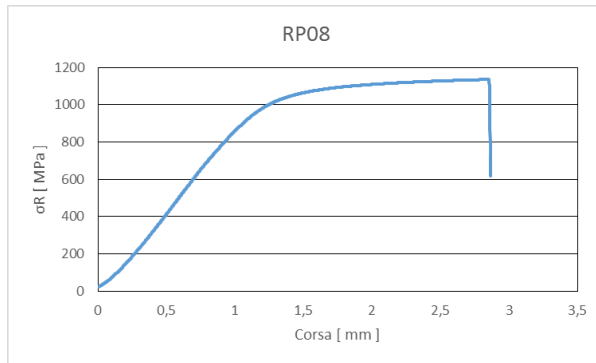
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP07

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,92 mm	3±0,1 mm	434 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



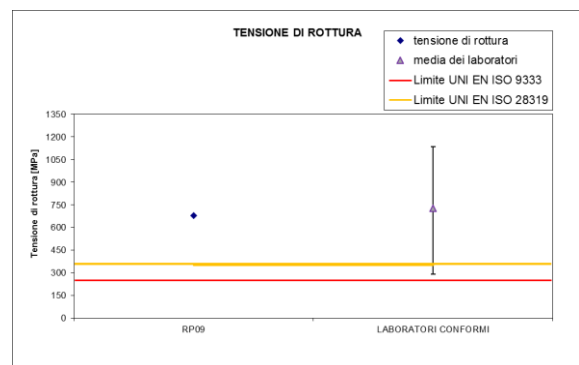
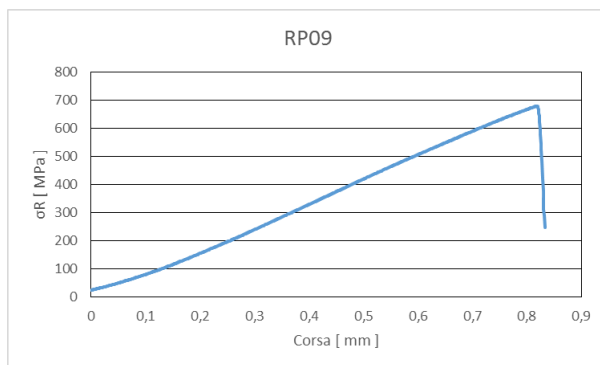
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP08

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,94	3±0,1 mm	1135	250 MPa	350 Mpa	SI



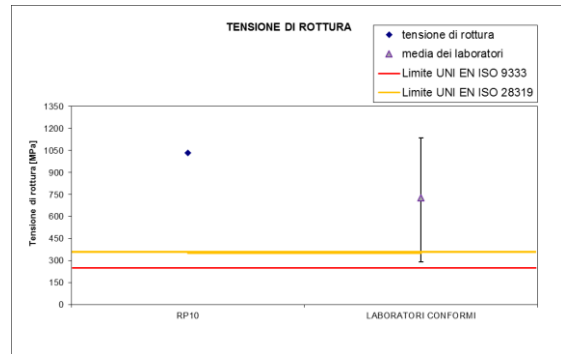
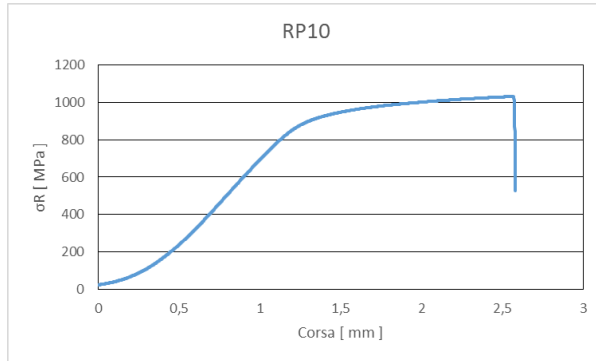
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP09

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,85 mm	3±0,1 mm	678 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



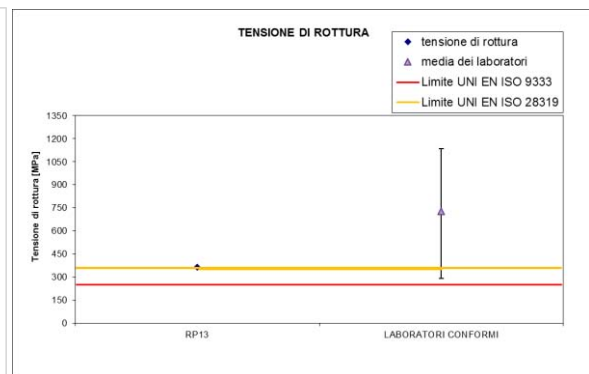
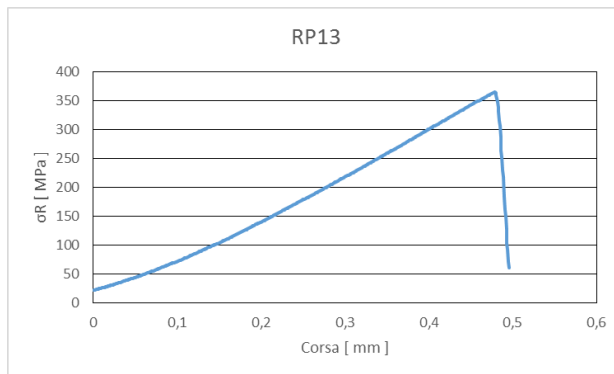
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP10

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,98 mm	3±0,1 mm	1032 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



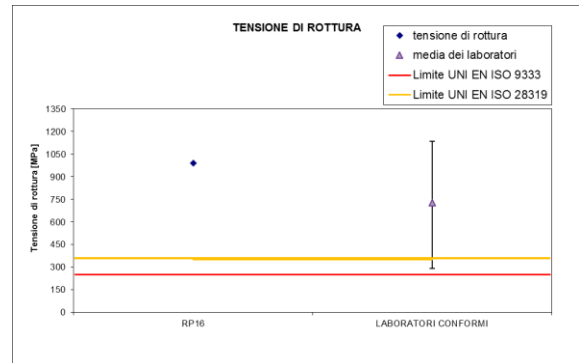
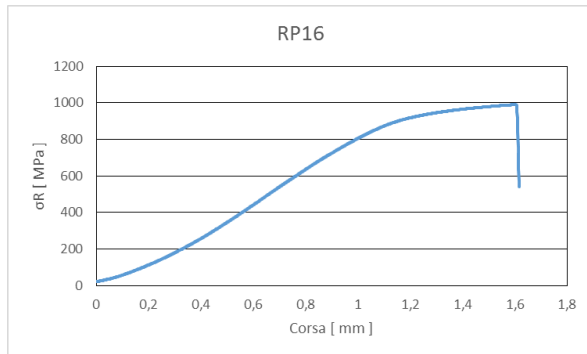
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP13

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	364 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



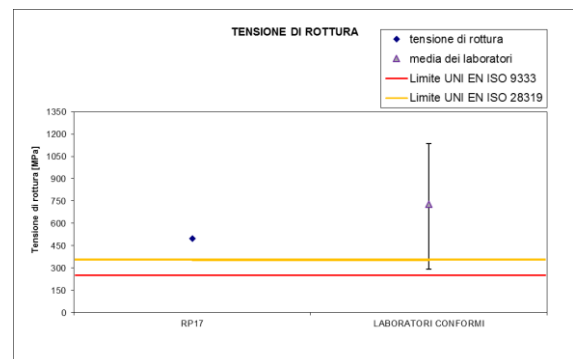
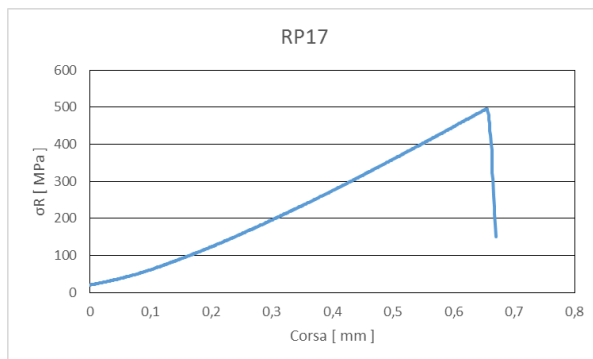
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP16

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	990 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



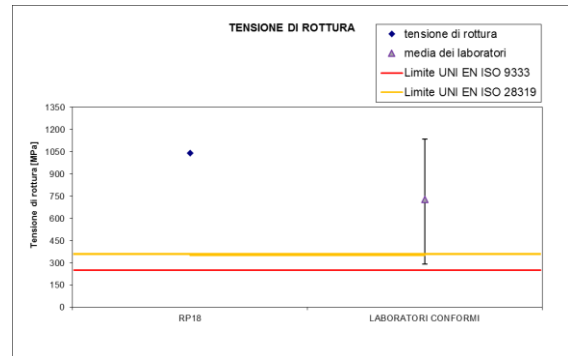
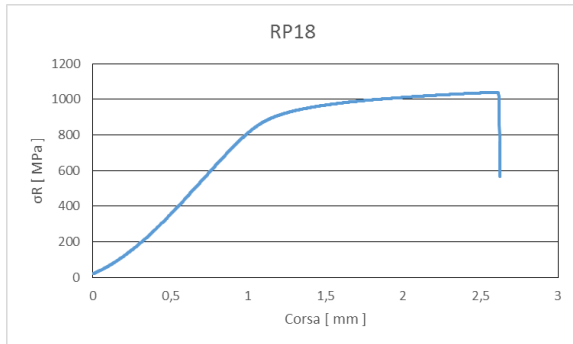
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP17

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,04 mm	3±0,1 mm	496 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



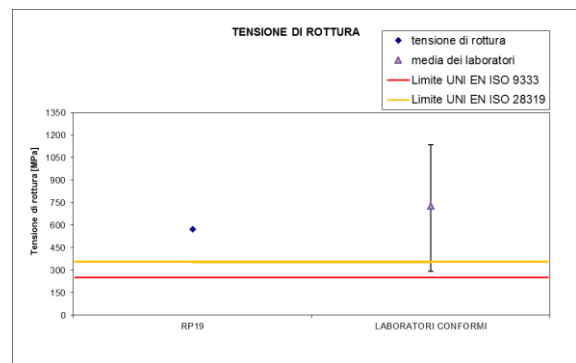
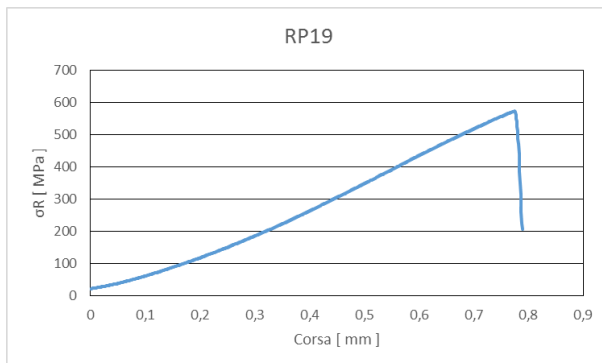
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP18

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	1039 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



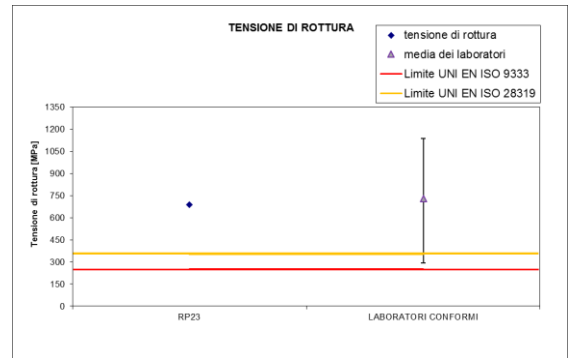
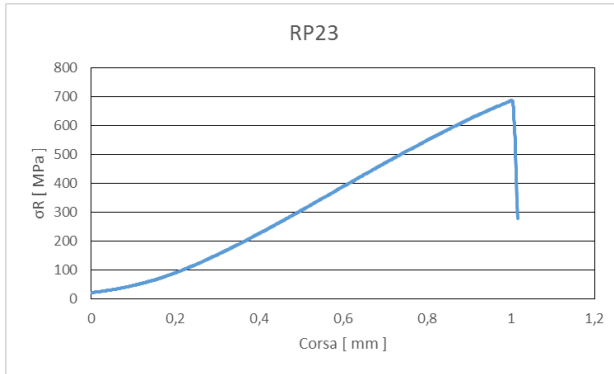
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP19

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,98 mm	3±0,1 mm	572 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



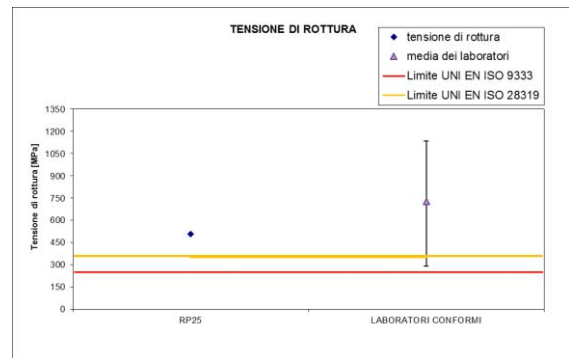
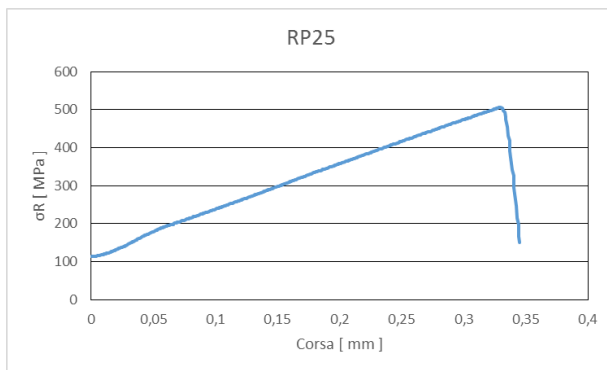
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP23

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,01 mm	3±0,1 mm	687 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



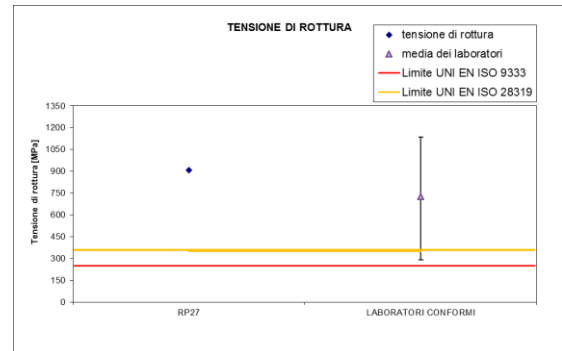
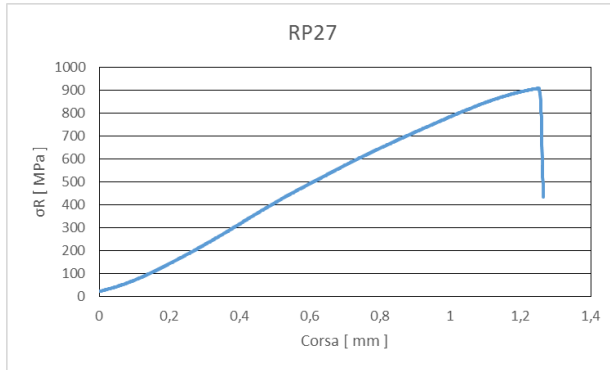
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP25

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,89 mm	3±0,1 mm	507 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



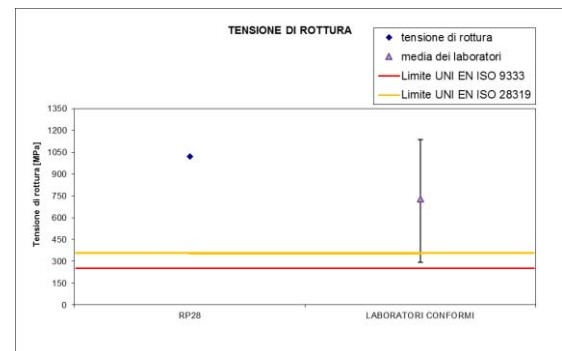
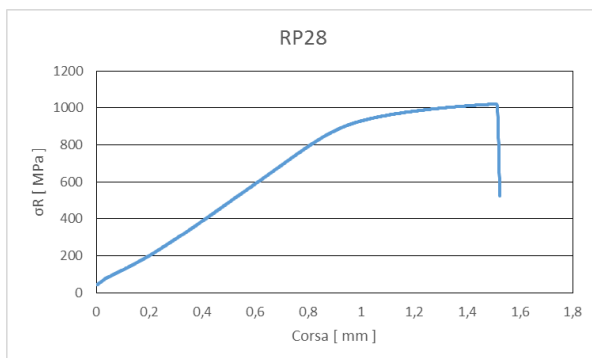
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP27

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	907 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



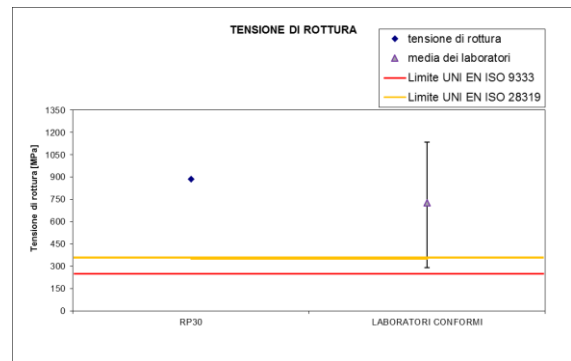
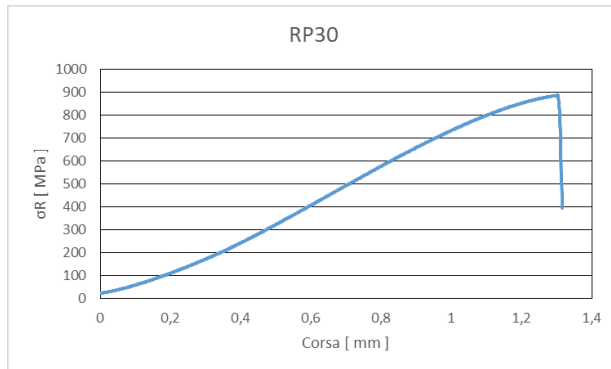
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP28

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



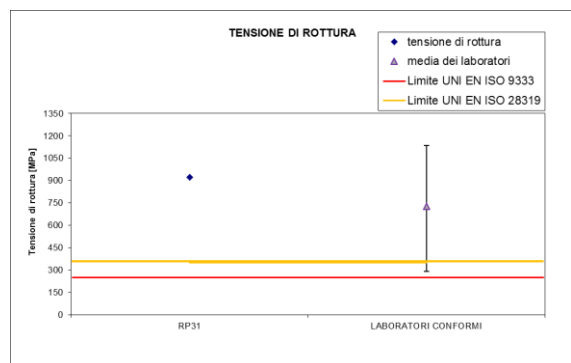
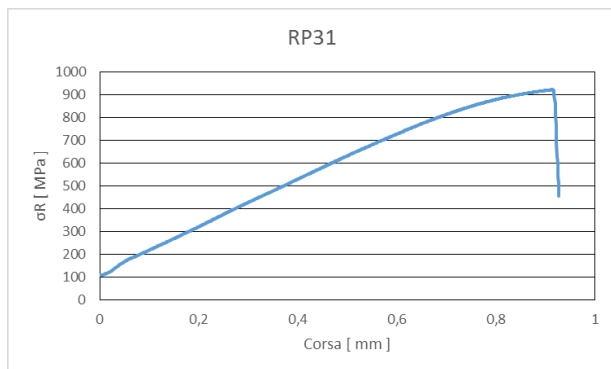
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP30

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,95 mm	3±0,1 mm	885 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



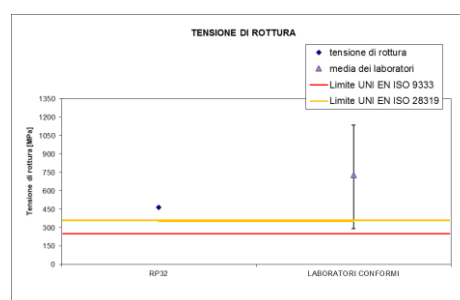
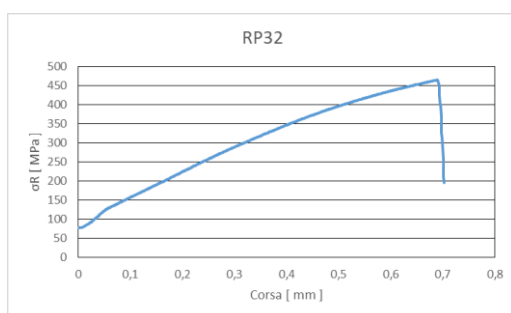
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP31

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,98 mm	3±0,1 mm	921 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



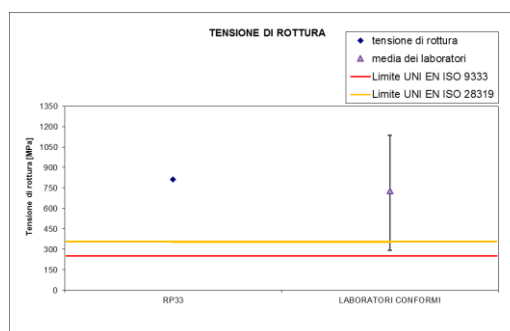
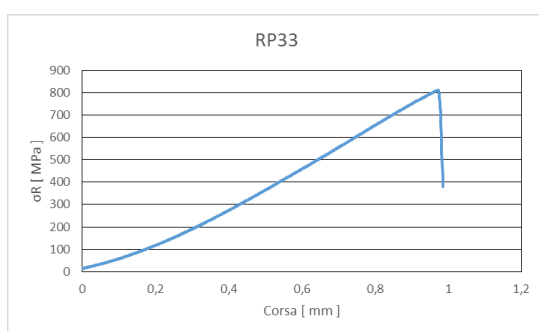
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP32

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,45 mm	3±0,1 mm	465 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



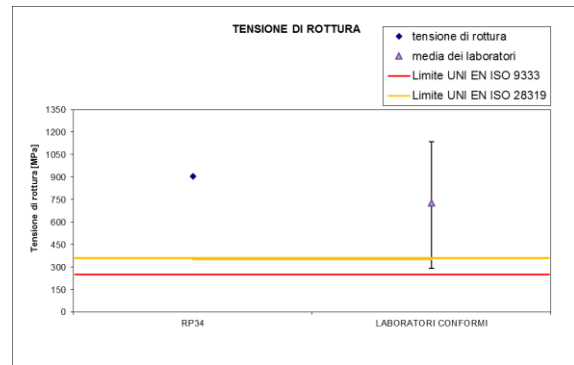
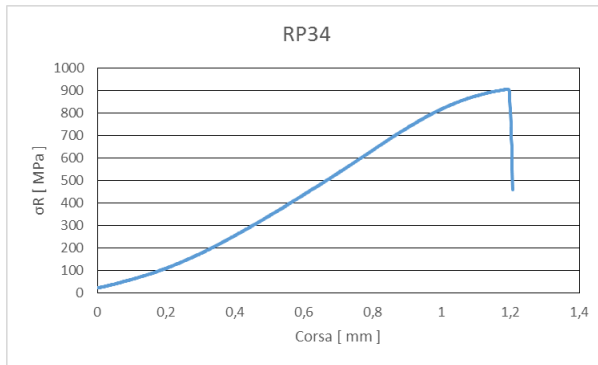
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP33

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



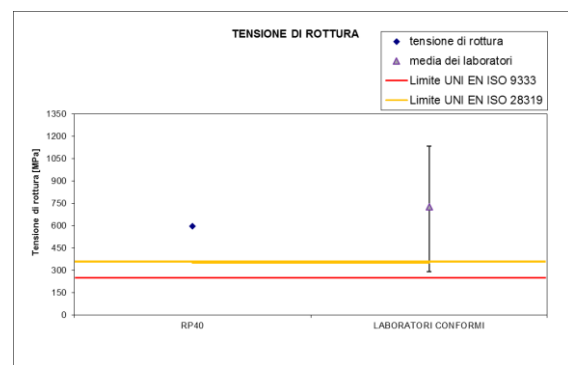
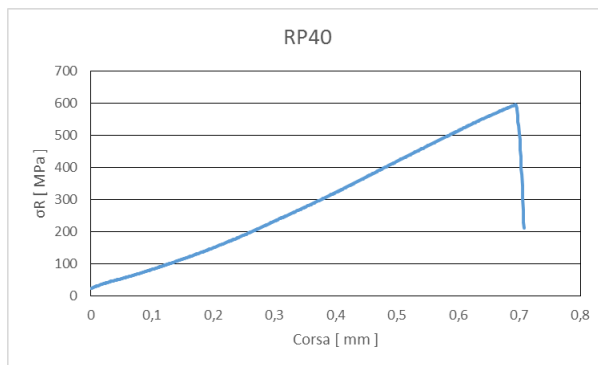
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP34

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	905 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



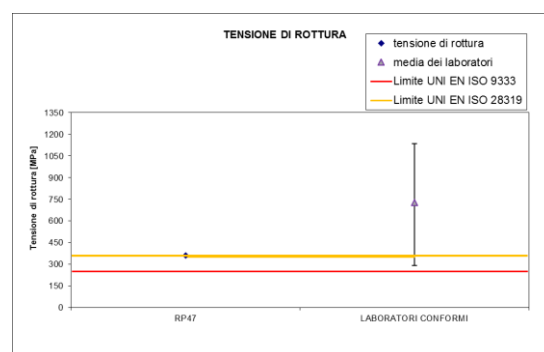
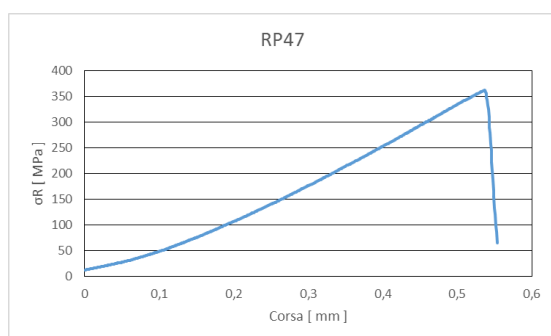
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP40

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,90	3±0,1 mm	595 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



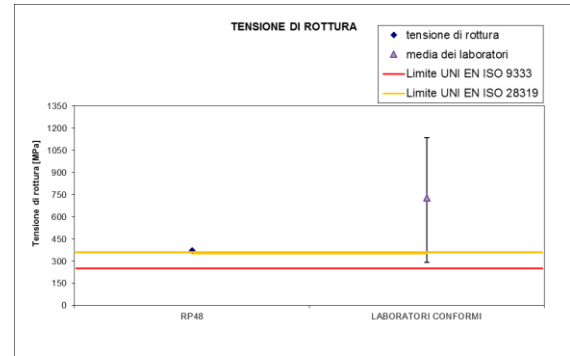
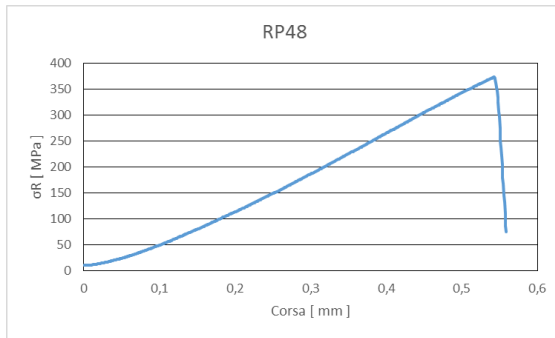
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP47

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



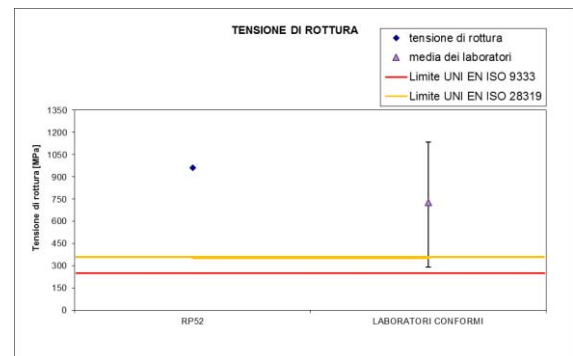
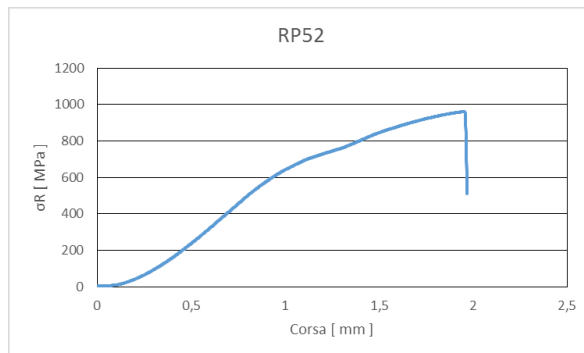
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP48

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



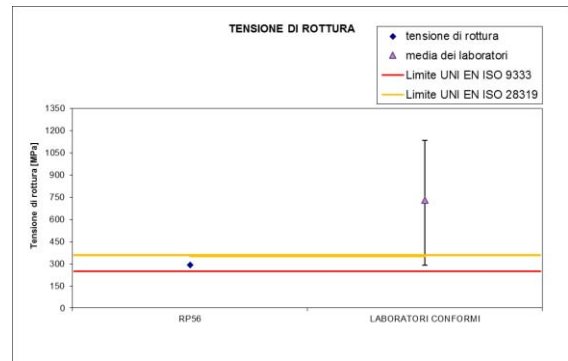
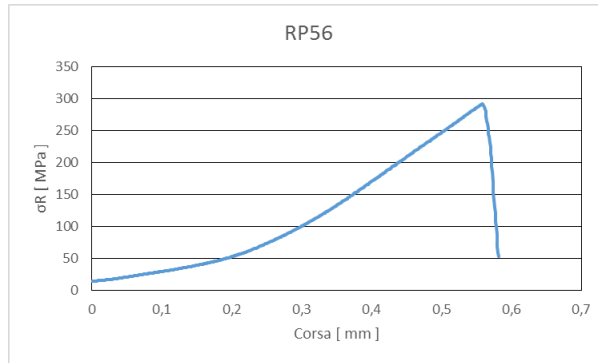
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP52

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,97 mm	3±0,1 mm	962 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



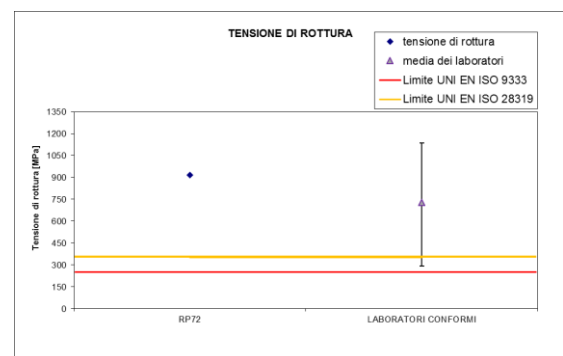
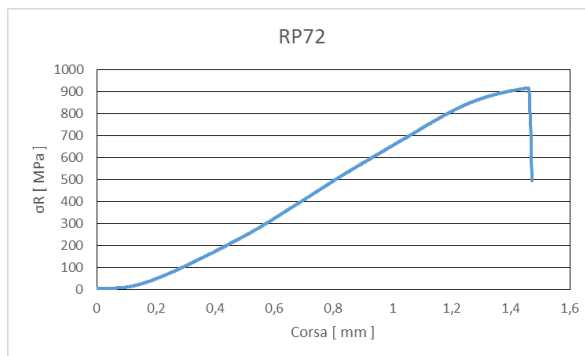
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP56

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,02 mm	3±0,1 mm	993 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



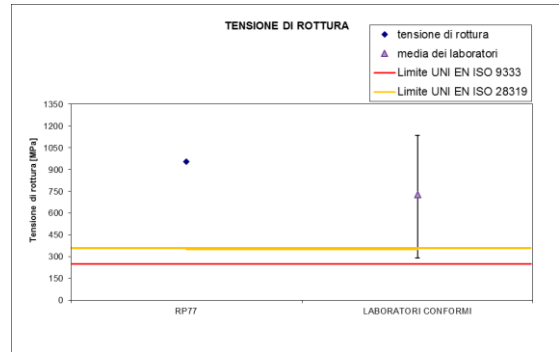
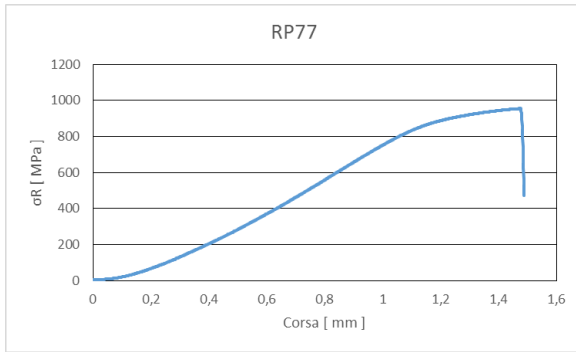
Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP72

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
3,01 mm	3±0,1 mm	916 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



Risultati della prova a trazione sul giunto saldato RP77

Diametro medio misurato	Diametro nominale UNI EN ISO 22674	Carico di rottura misurato	Carico di rottura limite UNI EN ISO 9333	Carico di rottura limite UNI EN 28319	Conformità
2,98 mm	3±0,1 mm	955 MPa	250 MPa	350 Mpa	SI



APPENDICE IV: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI PROVINI PER PROVE DI FLESSIONE

PROCEDURA

SCOPO

Proporre una procedura per la realizzazione di provini da utilizzare per la caratterizzazione meccanica, mediante prova di flessione, di sistemi metallo-ceramica normalmente utilizzati nella fabbricazione della protesi dentaria.

PREMESSA

I provini ottenuti sono in accordo con la norma UNI EN ISO 9693-1:2012. Le informazioni geometriche dei provini in metallo-ceramica sono riportate in Allegato B.

In Allegato A si propone una sequenza di azioni che il laboratorio intraprende per la realizzazione dei provini in metallo-ceramica. Tali azioni prevedono la compilazione di appositi moduli allegati che riassumono le caratteristiche del processo produttivo utilizzato; le informazioni sui materiali dentali e sul processo fornite dai costruttori saranno utilizzate esclusivamente per l'analisi dei risultati ottenuti dalle prove di flessione.

È possibile variare la sequenza delle azioni riportate in Allegato A, purché non sia compromessa la funzionalità dei provini. In tal caso precisare le variazioni in riferimento alla sequenza iniziale.

RIFERIMENTI

UNI EN ISO 9693-1:2012

Dentistry – Compatibility Testing – Part 1: Metal-Ceramic systems;

UNI EN ISO 6872:2008

Dentistry - Ceramic materials

MATERIALI: ESAMI E CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che il kit fornito contenga tre barrette metalliche sui cui eseguire la ceramizzazione. I *materiali ceramici* impiegati per la realizzazione dei provini devono rappresentare la produzione dell'azienda in termini di numerosità di protesi prodotte. Pertanto sono scelti a discrezione dell'azienda.

VERIFICA MATERIALE CERAMICO

Verificare la presenza di informazioni dettagliate relative all'identificazione e alle proprietà del materiale ceramico ed al suo utilizzo.

In caso di esito negativo dei controlli preliminari contattare il referente.

REALIZZAZIONE DEI PROVINI

Realizzare i provini secondo la seguente procedura

TARATURA DELLA TEMPERATURA DEL FORNO

Tarare la temperatura della fornace al valore corretto per l'impasto ceramico scelto. Fare riferimento ai valori consigliati dal produttore del materiale ceramico stesso. La cottura deve garantire superfici lucide per le ceramiche impiegate (ceramica opaca e di corpo)

APPLICAZIONE DELLA CERAMICA ALLA LAMINA DI MATERIALE METALLICO

Applicare uno strato di ceramica opaca sul lato della lamina metallica dove è posto il numero identificativo. La lunghezza del tratto di ceramica deve essere $(8\pm 0,1)$ mm e il tratto deve essere posizionato simmetricamente in centro alla lamina. La larghezza del tratto deve essere pari a quella della lamina metallica.

Applicare su questo uno strato di ceramica di corpo fino a raggiungere uno spessore totale di $(1,1\pm 0,1)$ mm una volta cotto.

La struttura ceramica deve avere forma rettangolare. Se è necessario al fine di ottenere le richieste di spessore e geometria, aggiungere ulteriore ceramica di corpo e rimettere in forno.

FINITURA DELLA CERAMICA

Rifinire attentamente la forma rettangolare della ceramica con un disco. Se necessario rimuovere la ceramica dal lato della lamina metallica. Applicare (se previsto) uno strato di smalto vitreo secondo le prescrizioni del produttore del materiale ceramico.

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Verificare di aver compilato completamente tutti i moduli riportati negli allegati.

AZIONI CONSEGUENTI

Provvedere al confezionamento dei provini avendo cura che durante la fase di confezionamento non vengano in contatto con sostanze che possano causarne il deterioramento. Inviare i provini al referente.

ALLEGATI

Allegato A – Sequenza delle azioni da intraprendere;

Allegato B – Caratteristiche geometriche del provino;

Allegato C – Modulo 1: Materiali dentali utilizzati;

Allegato C – Modulo 2: Processi produttivi.

Allegato A
SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE

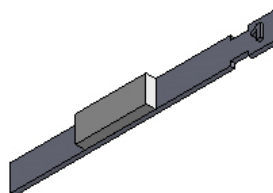
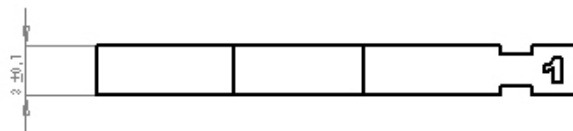
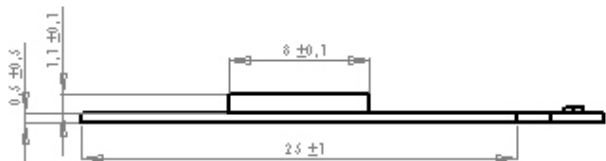
Oggetto: realizzazione di provini per la caratterizzazione meccanica mediante prove di flessione. Il seguente schema propone una sequenza di azioni che il costruttore intraprende per la realizzazione dei provini in materiale metallo-ceramica.

SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE		
DESCRIZIONE	ESEGUITO?	
Esami preliminari		
Verifica del contenuto del kit fornito	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Scelta dei materiali da utilizzare	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica della presenza di informazioni per il materiale ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Controllo visivo del materiale da ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO

Realizzazioni del provino in metallo-ceramica		
Materiale ceramico		
Taratura della temperatura del forno	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Applicazione e cottura strato/i di ceramica opaca sulla lamina metallica	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Applicazione e cottura strato/i di ceramica di corpo	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Finitura del materiale ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Controllo geometrico del materiale ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Annotare le caratteristiche geometriche reali del materiale ceramico nell'Allegato B	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO

Azioni conclusive		
Confezionamento dei provini	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica della compilazione dell'Allegato A, Allegato B, Allegato C	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Consegna dei provini al referente	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO

Allegato B
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL PROVINO



Allegato C - Modulo 1
MATERIALI DENTALI UTILIZZATI

Oggetto: realizzazione di provini per la caratterizzazione meccanica di sistemi metallo-ceramica, mediante prove di flessione. Il seguente schema riassume le caratteristiche dei materiali dentali utilizzati per la realizzazione dei provini.

Provini n°: _____

CARATTERISTICHE MATERIALE CERAMICO OPACO

Tipo
di materiale

Fornitore

Rapporto polveri-acqua:

Temperatura di cottura

Altre proprietà

CARATTERISTICHE MATERIALE CERAMICO di CORPO

Tipo
di materiale

Fornitore

Rapporto polveri-acqua:

Temperatura di cottura

Altre proprietà

**Allegato C - Modulo 2
PROCESSI PRODUTTIVI**

Oggetto: realizzazione di provini per la caratterizzazione meccanica di un sistema metallo-ceramica dentale, mediante prove di flessione. Il seguente schema riassume le principali caratteristiche delle varie fasi del procedimento di preparazione dei provini.

APPLICAZIONE MATERIALE CERAMICO

Ceramica opaca

Applicazione ceramica opaca	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
N° strati applicati		

Ceramica di corpo

N° strati applicati	
---------------------	--

Finitura del materiale ceramico

Utensile impiegato	
Diametro disco	
Granulometria abrasivo	
Applicazione dello smalto	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
Tipo di smalto	

Altre note di processo

APPENDICE V: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI PROVE STATICHE DI FLESSIONE

SCOPO

Descrivere le modalità di esecuzione della prova di flessione per la caratterizzazione meccanica di sistemi metallo-ceramici normalmente utilizzati per la realizzazione di protesi dentarie.

PREMESSA

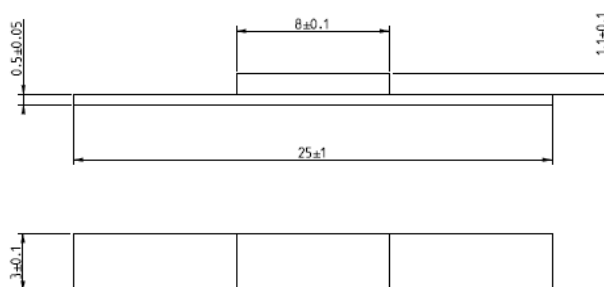
Il metodo di prova è basato sulla normativa UNI EN ISO 9693-1, riguardante i sistemi per restaurazioni dentali di metallo-ceramica. La procedura segue il metodo chiamato "Schwickerath crack initiation test", che prevede la delaminazione sollecitando il provino con un carico posto in mezzera. I provini sono realizzati nei laboratori odontotecnici seguendo le linee guida del protocollo realizzato da ICEA, tuttavia le tecniche impiegate devono rispettare quelle che vengono messe in atto per la produzione standard. La geometria dei provini segue le prescrizioni della normativa presa a modello.

RIFERIMENTI

- UNI EN ISO 9693-1:2012 - Sistemi per restaurazioni dentali di metallo-ceramica;
- UNI EN ISO 6872:2009 - Ceramica dentale
- UNI EN ISO 22674:2006 - Materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili e le apparecchiature.

GEOMETRIA DEI PROVINI

I provini sono prodotti secondo la geometria riportata nella seguente figura.



Tolerancing ISO 8015
General Tol. ISO 2768 - fH

Provino per prova di flessione

I parametri geometrici fondamentali che caratterizzano i provini sono sintetizzati nella seguente tabella.

PARAMETRI GEOMETRICI NOMINALI DEL PROVINO

Simbolo	Unità di misura	Denominazione	Valore Nominale
L_M	mm	Lunghezza della lamina metallica	25
L_C	mm	Lunghezza della placchetta ceramica	8
d_M	mm	Spessore della lamina metallica	0,5
d_C	mm	Spessore della placchetta ceramica	1,1
U	mm	Larghezza della lamina e della placchetta	3

DETERMINAZIONE DELLO SPESSORE DELLA LAMINA METALLICA

Eeguire più misure dello spessore della lamina metallica attraverso calibro centesimale. Lo spessore della lamina metallica si può determinare come media aritmetica dei valori acquisiti, arrotondando la misura al centesimo di millimetro più vicino.

MACCHINA DI PROVA

Il sistema di prova a tre punti deve avere una distanza tra i supporti di 20,0 mm. Un carico centrato è applicato garantendo una velocità di discesa della testa di 1,5 mm/min. I tre punti di contatto (estremità dei supporti e della testa del pistone) devono avere un raggio di raccordo di 1,0 mm.

CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che strumenti ed attuatori dispongano di certificati di taratura validi o altra documentazione idonea a dimostrarne lo stato di efficienza e garantirne la riferibilità.

PARAMETRI DI PROVA

TEMPERATURA SALA DI PROVA

La prova è eseguita a temperatura ambiente, nei limiti tra 10°C e 35°C.

VELOCITÀ DELLA MACCHINA

Caricare il provino applicando una forza ad una velocità il più costante possibile, pari a (1,5±0,5) mm/min fino a cedimento per delaminazione su un lato dello strato di materiale ceramico.

ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova consiste nel sottoporre il provino a sforzo di flessione, allo scopo di determinare le caratteristiche meccaniche dell'interfaccia tra materiale metallico e ceramica.

METODO DI FISSAGGIO DELL'ATTREZZATURA ALLA MACCHINA

L'attrezzatura deve essere correttamente e solidamente installata.

Fissare l'attrezzatura in modo che i supporti ed il punzone siano assialmente privi di giochi. Montare il punzone di carico in modo che risulti centrato rispetto alla posizione dei supporti e con i fianchi paralleli agli stessi.

POSIZIONAMENTO DEL PROVINO SULL'ATTREZZATURA

Collocare il provino sull'attrezzatura in posizione simmetrica rispetto ai supporti, con lo strato ceramico rivolto nella direzione opposta rispetto al punto di applicazione del carico.

AZZERAMENTO DEL SISTEMA

Eseguire l'azzeramento del sistema secondo la procedura di laboratorio.

AVVIO DELLA PROVA

Caricare il provino applicando una forza a velocità costante. La forza deve essere applicata in mezz'ora. Durante la prova misurare il valore del carico e lo spostamento del punzone. Riportare i risultati in un diagramma carico (F) – spostamento (s).

TERMINE PROVA

La prova ha termine per superamento dei limiti imposti alla macchina riportati nella procedura di laboratorio.

SMONTAGGIO DEL PROVINO

Al termine della prova è necessario spostare il pistone nella condizione di inizio prova. Fatto ciò, è possibile rimuovere il provino.

AMMISSIBILITÀ DEI PROVINI

Il risultato della prova è attendibile se il distacco tra metallo e ceramica inizia dalle estremità (una o entrambe). I provini vanno scartati, e la prova va ripetuta, se viceversa la rottura avviene al centro della lamina.

DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL MATERIALE METALLICO

Per ciascun sistema metallo-ceramica da testare eseguire la prova di flessione su 3 provini. Le caratteristiche meccaniche del materiale metallico si determinano come media aritmetica dei risultati ottenuti sulle singole prove.

DETERMINAZIONE DELLA TENSIONE DI DEBONDING τ_b

La tensione τ_b di inizio rottura dell'interfaccia è calcolata per mezzo della seguente equazione

$$\tau_b = k \cdot F_{fail}$$

dove F_{fail} è la forza di rottura (massima forza misurata) e k è un coefficiente che è funzione dello spessore della lamina metallica $d_M(0,5 \pm 0,05 \text{ mm})$ e del valore del modulo di Young E_M del metallo. Il parametro k è calcolato per mezzo di un foglio di calcolo che implementa il flow chart presente sulla normativa di riferimento, restituendo, anche, il valore finale di τ_b .

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Aggiornare il database.

APPENDICE VI: RISULTATI DELLE PROVE DI FLESSIONE

SCOPO

Sintetizzare i risultati della campagna sperimentale volta a determinare la tensione di distacco tra metallo e ceramica dei provini realizzati.

PREMESSA

In letteratura sono presenti numerose prove per la determinazione della tensione di distacco tra metallo e ceramica. La normativa UNI EN ISO 9693-1:2012 consiglia di applicare il test di Schwickerath che consiste in una prova a flessione su tre punti. Inoltre viene fornito il rispettivo algoritmo per il calcolo della tensione a cui avviene il distacco all'interfaccia tra il metallo e la ceramica. Si riportano di seguito i dati raccolti in termini di forza di distacco (espressa in N) e di tensione di distacco (espressa in MPa).

RIFERIMENTI

UNI EN ISO 9693-1:2012 Odontoiatria - Prove di compatibilità

UNI EN ISO 22674:2007 Odontoiatria

SEDE DELLE PROVE

Le prove sono state eseguite nel laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale del dipartimento ICEA dell'Università di Padova

CONDIZIONI DI PROVA

- macchina utilizzata:	Sun2500
- cella di carico:	25 kN
- velocità di discesa del punzone:	1,5 mm/min
- software di controllo:	Sun GraphWork

RISULTATI

Risultati della caratterizzazione geometrica dei provini

			Provino1	Provino2	Provino3	Conformità
RP01	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,95	24,97	25,02	SI
		H[mm]	2,94	3,00	2,94	SI
	Ceramica	S[mm]	1,11	1,16	1,19	SI
		L[mm]	7,92	8,05	8,06	SI
		H[mm]	2,97	2,95	2,95	SI
RP02	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,82	24,96	25,02	SI
		H[mm]	3,00	2,98	3,04	SI
	Ceramica	S[mm]	1,25	1,38	1,37	NO
		L[mm]	7,99	7,99	7,52	NO
		H[mm]	2,83	2,91	2,90	NO
RP05	Lamina	S[mm]	0,54	0,52	0,51	SI
		L[mm]	25,03	24,98	25,01	SI
		H[mm]	3,02	2,95	2,97	SI
	Ceramica	S[mm]	1,32	1,15	1,15	SI
		L[mm]	8,06	8,12	7,82	NO
		H[mm]	3,06	2,86	2,96	NO
RP08	Lamina	S[mm]	0,53	0,55	0,53	SI
		L[mm]	24,86	24,97	24,81	SI
		H[mm]	3,03	3,05	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,52	1,61	1,45	NO
		L[mm]	7,97	8,02	7,89	NO
		H[mm]	3,29	3,27	3,21	NO
RP09	Lamina	S[mm]	0,53	0,51	0,51	SI
		L[mm]	25,01	24,87	25,01	SI
		H[mm]	2,96	2,94	2,95	SI
	Ceramica	S[mm]	1,72	1,96	2,06	NO
		L[mm]	8,31	8,03	8,31	NO
		H[mm]	3,24	3,20	3,13	NO
RP10	Lamina	S[mm]	0,55	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,85	24,88	24,97	SI
		H[mm]	3,01	3,02	3,04	SI
	Ceramica	S[mm]	1,31	1,24	1,28	NO
		L[mm]	7,95	8,00	7,94	SI
		H[mm]	3,17	3,09	3,27	NO
RP13	Lamina	S[mm]	0,55	0,55	0,55	SI
		L[mm]	24,87	24,93	24,93	SI
		H[mm]	3,10	3,10	3,10	SI

	Ceramica	S[mm]	1,42	1,70	1,68	NO
		L[mm]	8,20	8,08	8,40	NO
		H[mm]	3,32	3,57	3,42	NO
RP16	Lamina	S[mm]	0,54	0,55	0,54	SI
		L[mm]	24,92	24,85	24,77	SI
		H[mm]	3,05	3,04	3,07	SI
	Ceramica	S[mm]	1,72	1,37	1,54	NO
		L[mm]	8,05	8,18	8,39	NO
		H[mm]	3,26	3,29	3,26	NO
RP17	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,81	25,06	25,02	SI
		H[mm]	2,96	2,96	2,99	SI
	Ceramica	S[mm]	1,34	1,24	1,24	NO
		L[mm]	8,13	8,25	8,18	NO
		H[mm]	3,14	3,04	3,06	SI
RP18	Lamina	S[mm]	0,55	0,55	0,55	SI
		L[mm]	24,94	24,94	24,96	SI
		H[mm]	2,99	3,06	3,10	SI
	Ceramica	S[mm]	1,64	1,67	1,62	NO
		L[mm]	8,27	8,44	8,16	NO
		H[mm]	3,35	3,40	3,34	NO
RP19	Lamina	S[mm]	0,53	0,53	0,51	SI
		L[mm]	24,88	24,94	24,91	SI
		H[mm]	3,06	2,98	3,02	SI
	Ceramica	S[mm]	1,36	1,32	1,39	NO
		L[mm]	8,23	8,18	8,10	NO
		H[mm]	3,30	3,28	3,25	NO
RP23	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,96	24,86	25,04	SI
		H[mm]	2,99	3,04	2,97	SI
	Ceramica	S[mm]	1,59	1,52	1,61	NO
		L[mm]	8,17	8,04	8,13	NO
		H[mm]	3,20	3,18	3,23	NO
RP25	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,53	SI
		L[mm]	24,90	25,04	24,89	SI
		H[mm]	2,99	2,94	2,99	SI
	Ceramica	S[mm]	1,35	1,45	1,48	NO
		L[mm]	7,73	7,42	7,27	NO
		H[mm]	3,01	2,93	2,99	SI
RP27	Lamina	S[mm]	0,54	0,54	0,54	SI
		L[mm]	24,87	24,55	24,99	SI
		H[mm]	3,04	3,02	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,60	1,62	1,61	NO
		L[mm]	8,79	8,78	8,49	NO

		H[mm]	3,37	3,31	3,33	NO
RP30	Lamina	S[mm]	0,53	0,52	0,51	SI
		L[mm]	24,99	25,00	24,93	SI
		H[mm]	3,03	3,02	2,99	SI
	Ceramica	S[mm]	1,04	1,04	1,08	SI
		L[mm]	7,96	7,94	8,04	SI
		H[mm]	2,99	3,02	3,14	NO
RP31	Lamina	S[mm]	0,53	0,53	0,53	SI
		L[mm]	24,85	24,81	24,91	SI
		H[mm]	3,00	3,01	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,26	1,06	1,19	NO
		L[mm]	8,07	7,80	7,73	NO
		H[mm]	3,08	3,07	3,05	SI
RP32	Lamina	S[mm]	0,51	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,95	24,99	25,02	SI
		H[mm]	2,97	3,05	2,96	SI
	Ceramica	S[mm]	1,24	1,25	1,39	NO
		L[mm]	7,98	8,08	7,96	SI
		H[mm]	3,20	3,34	3,26	NO
RP34	Lamina	S[mm]	0,51	0,52	0,54	SI
		L[mm]	24,94	24,94	25,08	SI
		H[mm]	2,95	2,97	2,92	SI
	Ceramica	S[mm]	1,27	1,11	1,15	SI
		L[mm]	7,31	7,49	7,78	NO
		H[mm]	2,91	2,97	2,87	NO
RP40	Lamina	S[mm]	0,54	0,52	0,53	SI
		L[mm]	24,94	24,87	24,91	SI
		H[mm]	3,08	3,06	3,02	SI
	Ceramica	S[mm]	1,62	1,50	1,45	NO
		L[mm]	8,11	8,09	8,00	SI
		H[mm]	3,21	3,28	3,17	NO
RP62	Lamina	S[mm]	0,51	0,52	0,52	SI
		L[mm]	24,78	24,87	24,91	SI
		H[mm]	2,95	3,02	2,94	SI
	Ceramica	S[mm]	1,46	1,24	1,47	NO
		L[mm]	7,64	7,94	7,62	NO
		H[mm]	3,08	3,16	3,03	NO
RP72	Lamina	S[mm]	0,55	0,54	0,51	SI
		L[mm]	24,93	24,83	24,88	SI
		H[mm]	2,98	2,99	3,01	SI
	Ceramica	S[mm]	1,28	1,36	1,37	NO
		L[mm]	8,14	8,16	8,14	NO
		H[mm]	3,30	3,18	3,30	NO
RP77	Lamina	S[mm]	0,52	0,52	0,53	SI

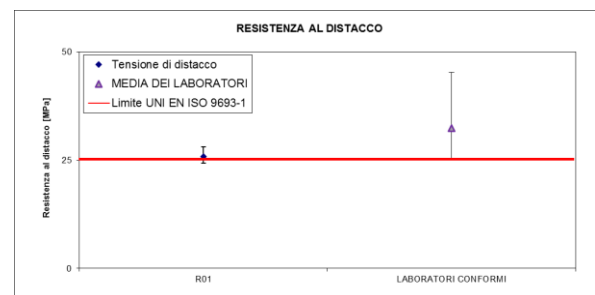
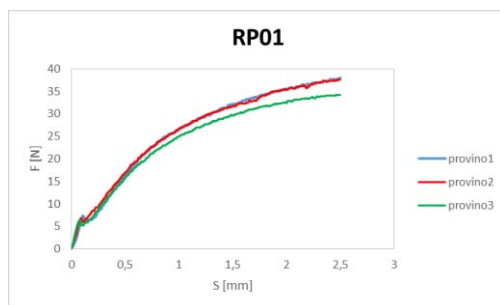
Ceramica	L[mm]	24,90	24,91	24,98	SI
	H[mm]	3,00	3,05	3,10	SI
	S[mm]	1,47	1,53	1,45	NO
	L[mm]	8,00	8,05	7,93	SI
	H[mm]	3,07	3,04	3,00	SI

Nota:

- S = spessore medio;
- L = lunghezza media;
- H = larghezza media.

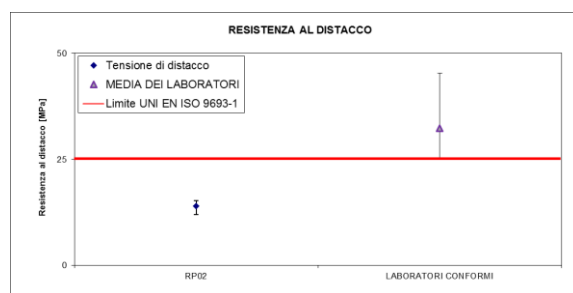
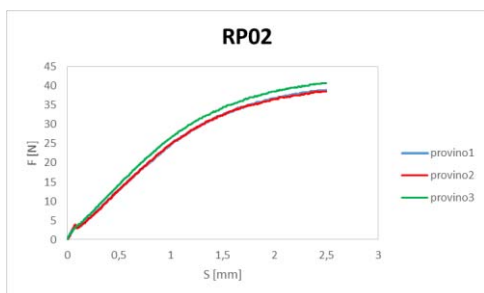
Risultati della prova di flessione RP01

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	28	-	-
Provino 2	25	-	-
Provino 3	24	-	-
Valore medio	26	25	SI



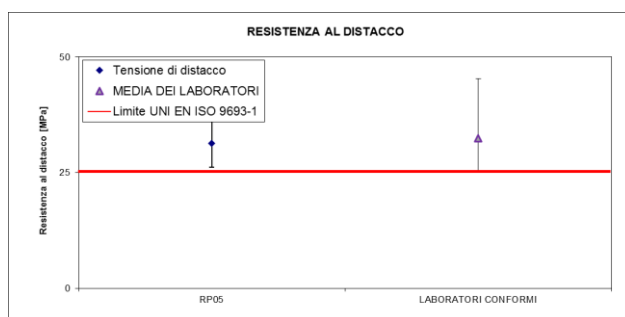
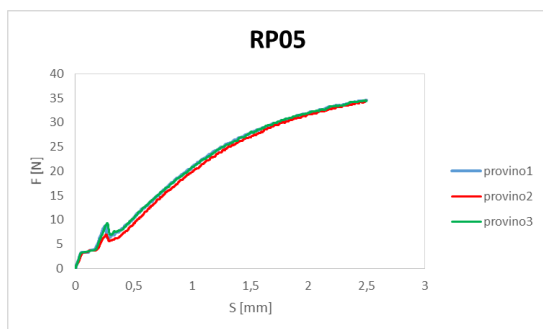
Risultati della prova di flessione RP02

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	12	-	-
Provino 2	15	-	-
Provino 3	15	-	-
Valore medio	14	25	NO



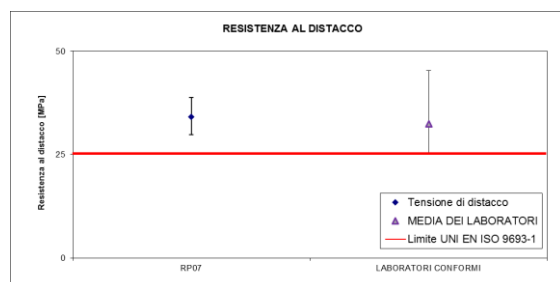
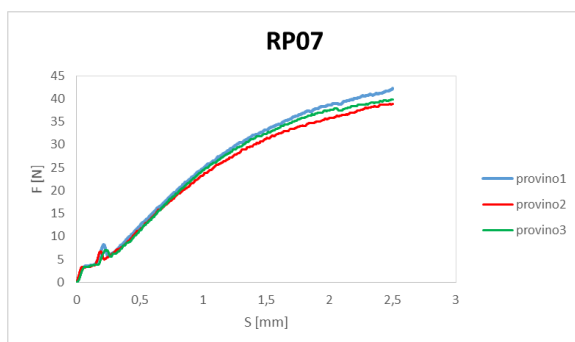
Risultati della prova di flessione RP05

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	31	-	-
Provino 2	26	-	-
Provino 3	37	-	-
Valore medio	31	25	SI



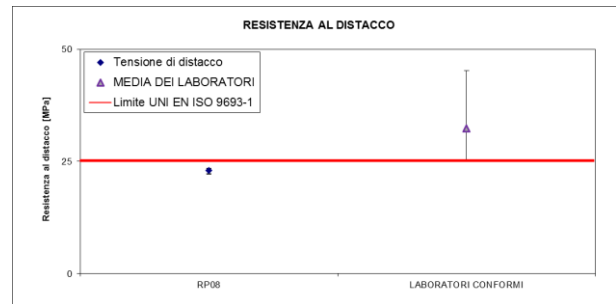
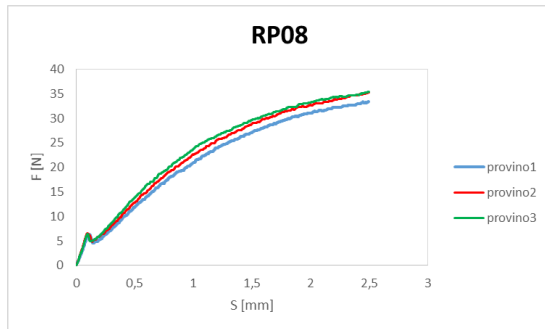
Risultati della prova di flessione RP07

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	30	-	-
Provino 2	25	-	-
Provino 3	26	-	-
Valore medio	27	25	SI



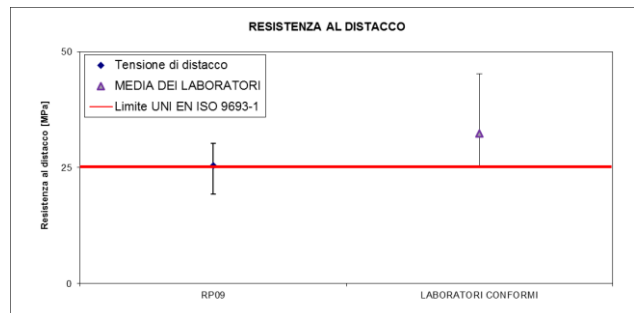
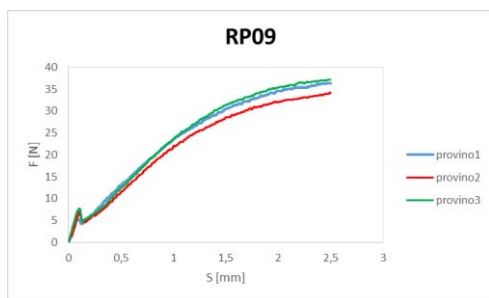
Risultati della prova di flessione RP08

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	23	-	-
Provino 2	22	-	-
Provino 3	23	-	-
Valore medio	23	25	NO



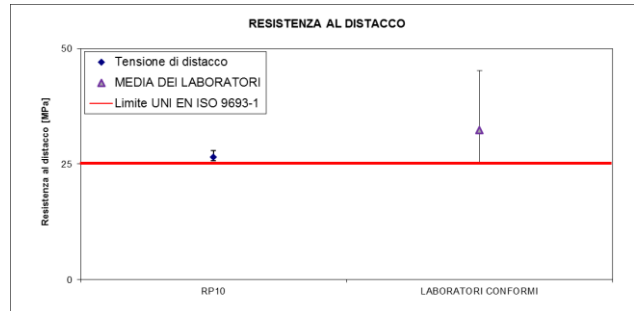
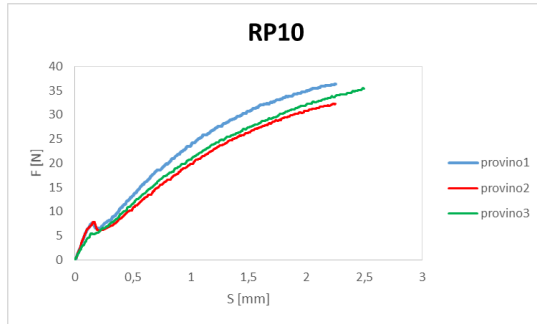
Risultati della prova di flessione RP09

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	19	-	-
Provino 2	27	-	-
Provino 3	30	-	-
Valore medio	25	25	SI



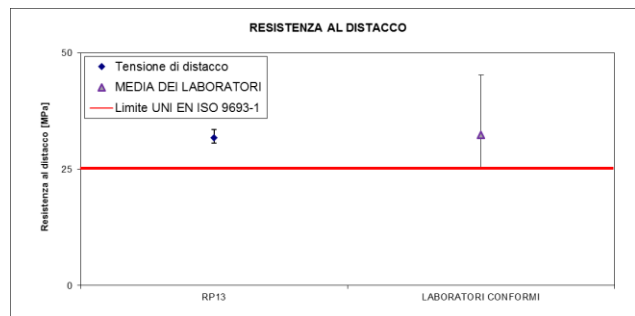
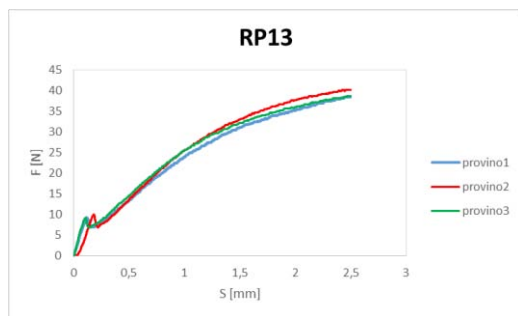
Risultati della prova di flessione RP10

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	26	-	-
Provino 2	28	-	-
Provino 3	26	-	-
Valore medio	27	25	SI



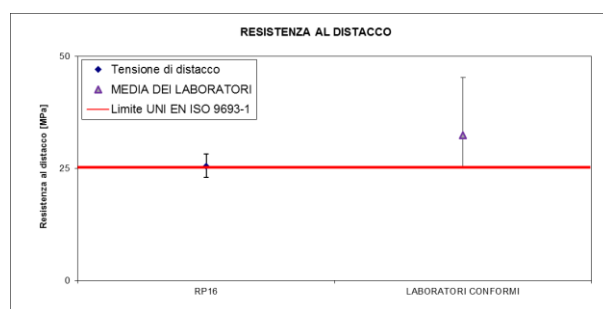
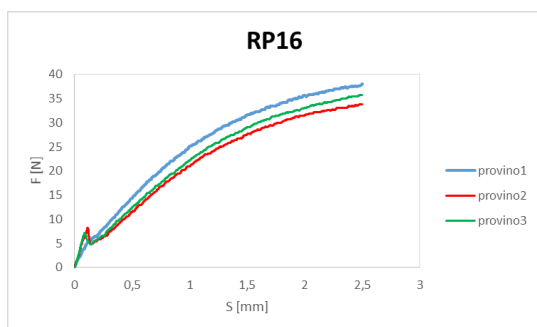
Risultati della prova di flessione RP13

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	31	-	-
Provino 2	34	-	-
Provino 3	31	-	-
Valore medio	32	25	SI



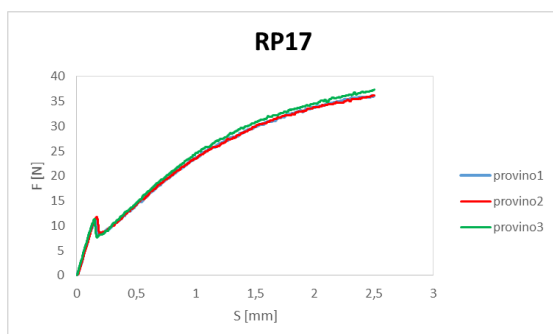
Risultati della prova di flessione RP16

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	23	-	-
Provino 2	28	-	-
Provino 3	25	-	-
Valore medio	25	25	SI



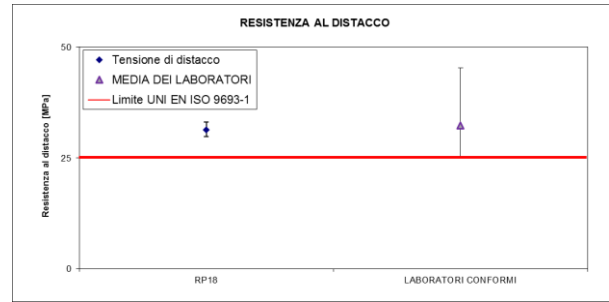
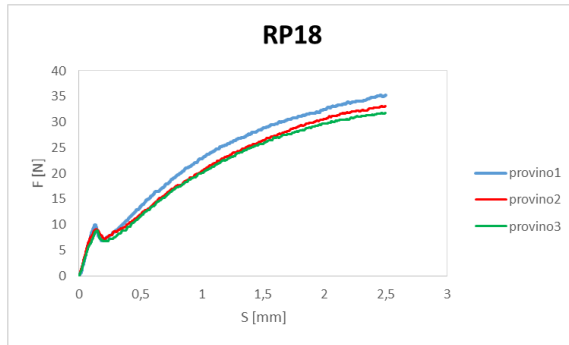
Risultati della prova di flessione RP17

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	42	-	-
Provino 2	44	-	-
Provino 3	42	-	-
Valore medio	43	25	SI



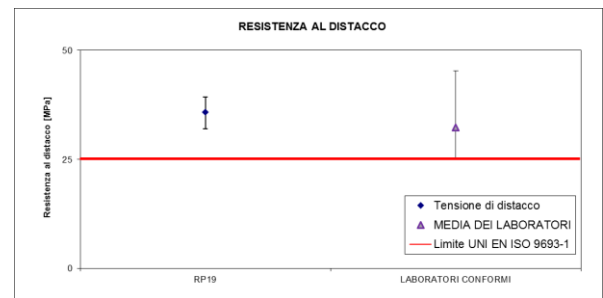
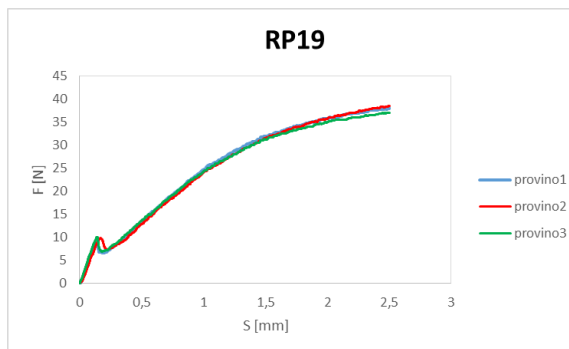
Risultati della prova di flessione RP18

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	33	-	-
Provino 2	31	-	-
Provino 3	30	-	-
Valore medio	31	25	SI



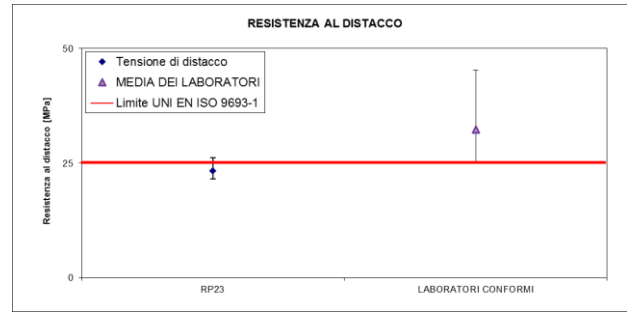
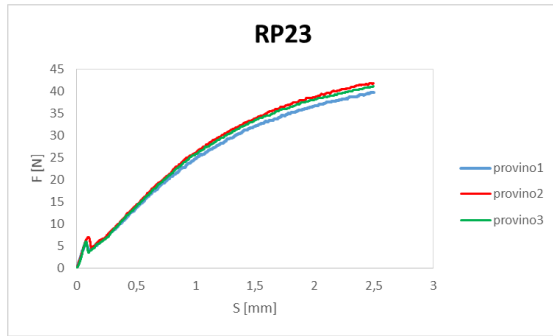
Risultati della prova di flessione RP18

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	32	-	-
Provino 2	36	-	-
Provino 3	39	-	-
Valore medio	36	25	SI



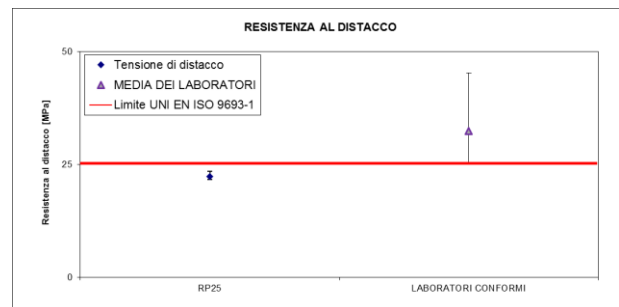
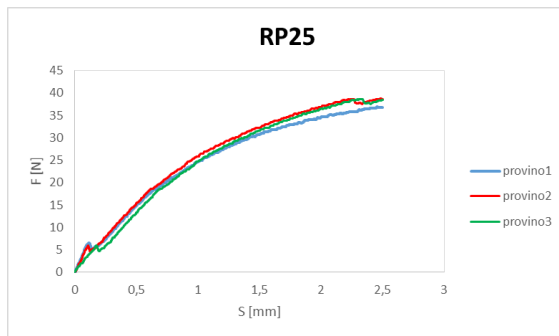
Risultati della prova di flessione RP23

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	22	-	-
Provino 2	26	-	-
Provino 3	22	-	-
Valore medio	23	25	NO



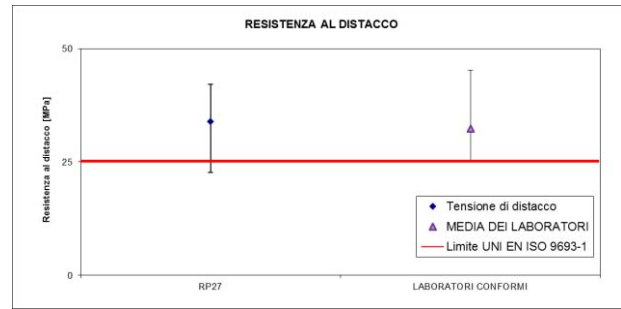
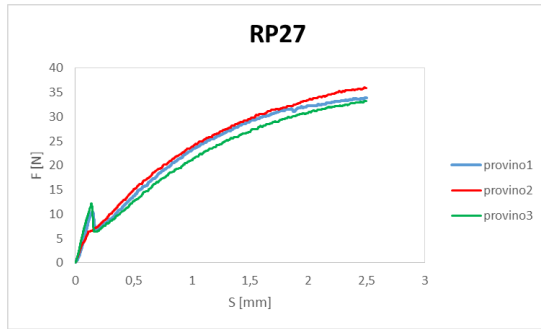
Risultati della prova di flessione RP25

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	23	-	-
Provino 2	22	-	-
Provino 3	22	-	-
Valore medio	22	25	NO



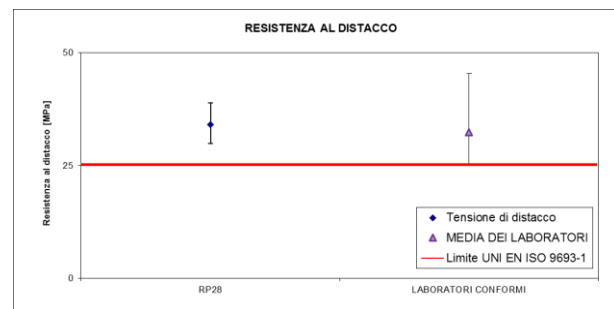
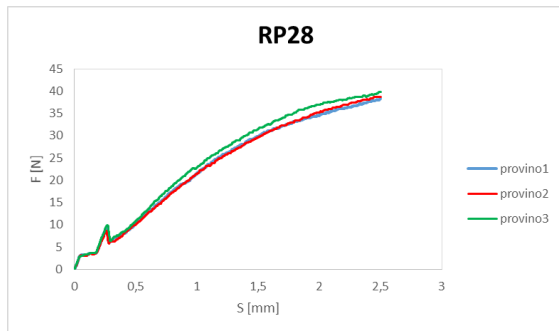
Risultati della prova di flessione RP27

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	37	-	-
Provino 2	23	-	-
Provino 3	42	-	-
Valore medio	34	25	SI



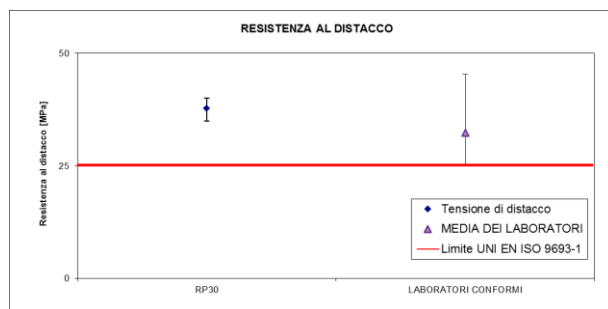
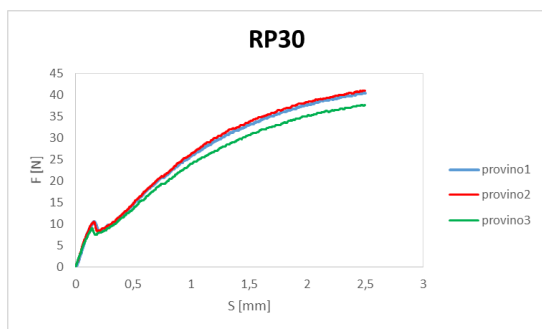
Risultati della prova di flessione RP28

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	12	-	-
Provino 2	15	-	-
Provino 3	15	-	-
Valore medio	14	25	NO



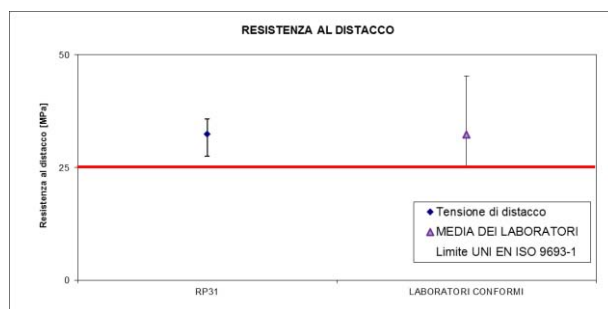
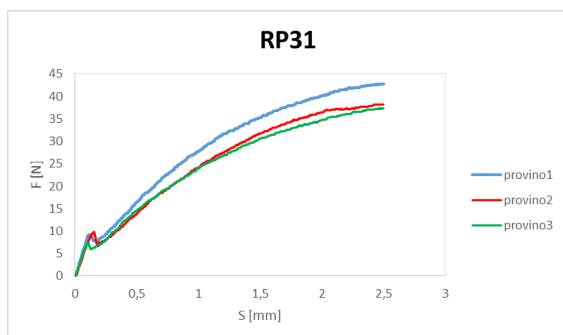
Risultati della prova di flessione RP30

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	38	-	-
Provino 2	40	-	-
Provino 3	35	-	-
Valore medio	38	25	SI



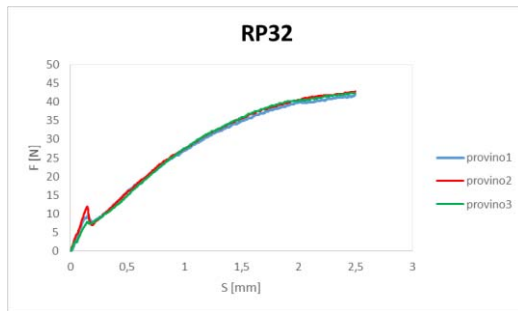
Risultati della prova di flessione RP31

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	34	-	-
Provino 2	36	-	-
Provino 3	27	-	-
Valore medio	32	25	SI



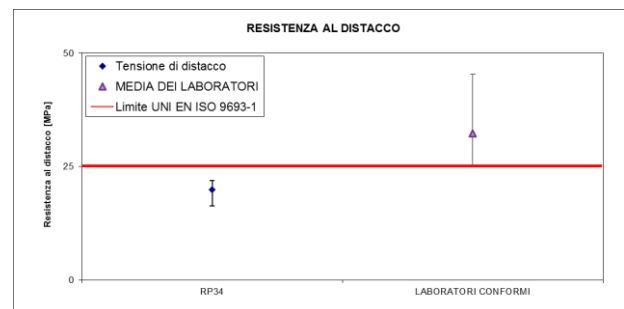
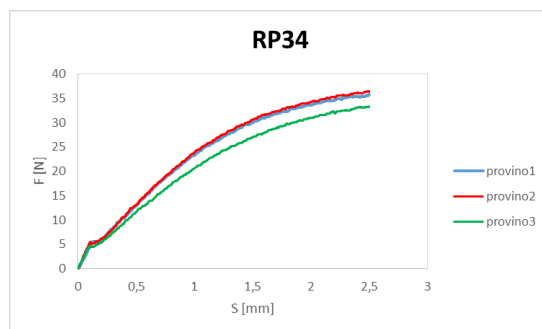
Risultati della prova di flessione RP32

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	37	-	-
Provino 2	41	-	-
Provino 3	34	-	-
Valore medio	37	25	SI



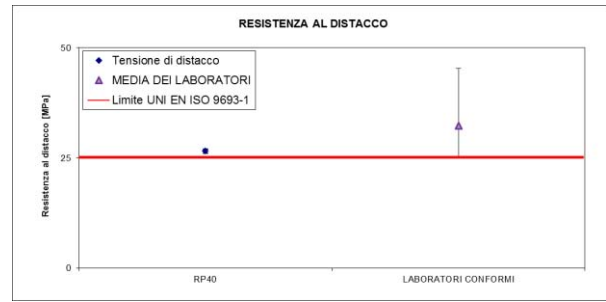
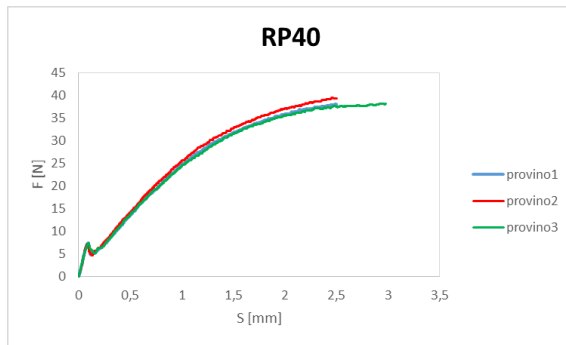
Risultati della prova di flessione RP34

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	22	-	-
Provino 2	21	-	-
Provino 3	16	-	-
Valore medio	20	25	NO



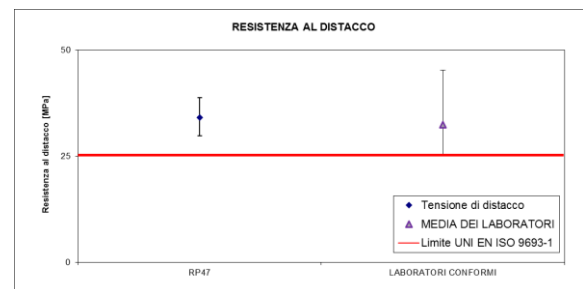
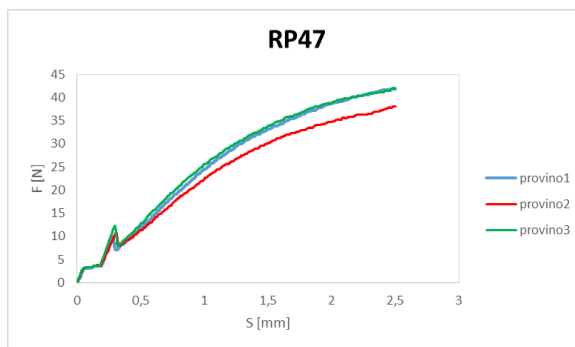
Risultati della prova di flessione RP40

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	26	-	-
Provino 2	27	-	-
Provino 3	27	-	-
Valore medio	27	25	SI



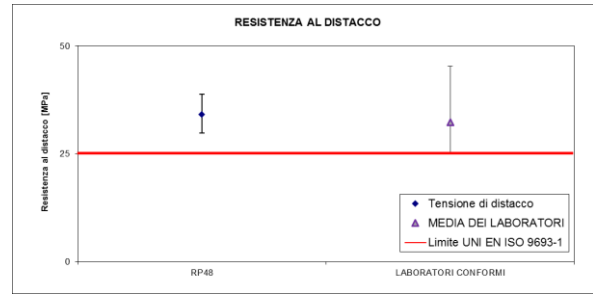
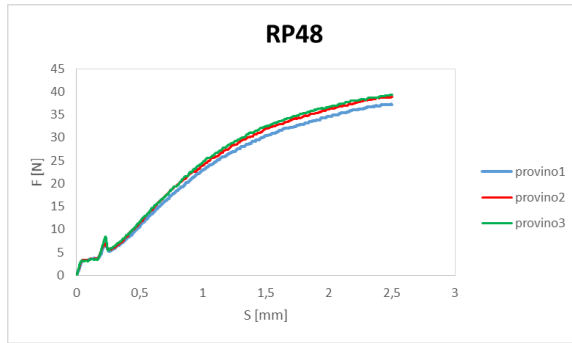
Risultati della prova di flessione RP47

	Resistenza al distacco τ_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	12	-	-
Provino 2	15	-	-
Provino 3	15	-	-
Valore medio	14	25	NO



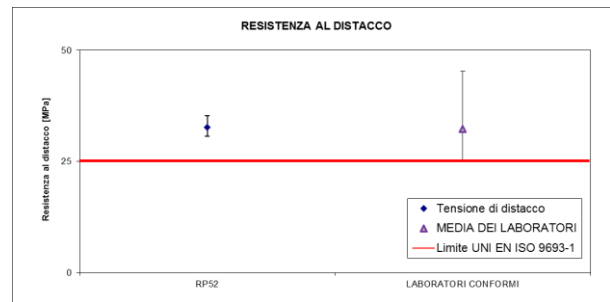
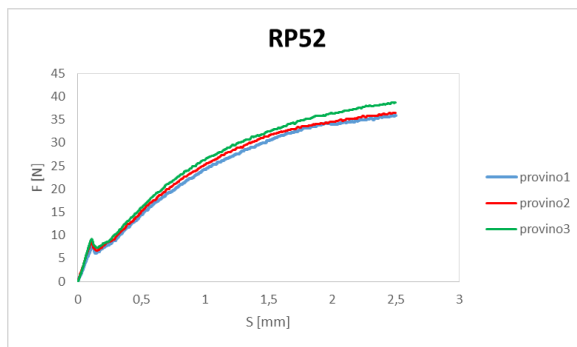
Risultati della prova di flessione RP48

	Resistenza al distacco τ_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	12	-	-
Provino 2	15	-	-
Provino 3	15	-	-
Valore medio	14	25	NO



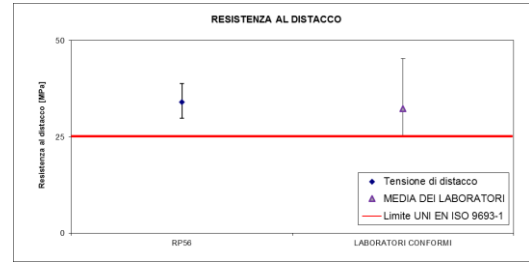
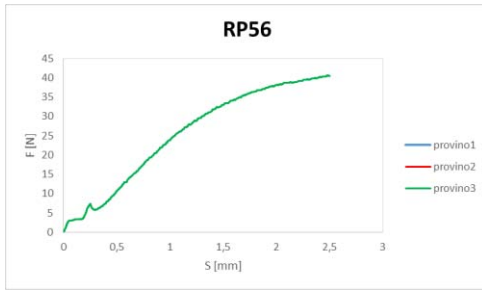
Risultati della prova di flessione RP52

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	31	-	-
Provino 2	32	-	-
Provino 3	35	-	-
Valore medio	33	25	SI



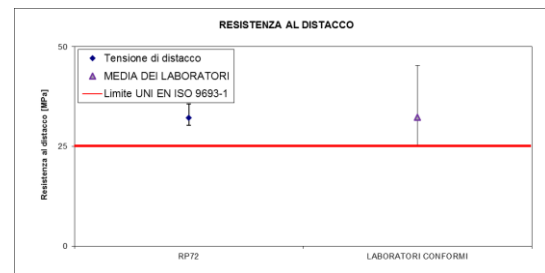
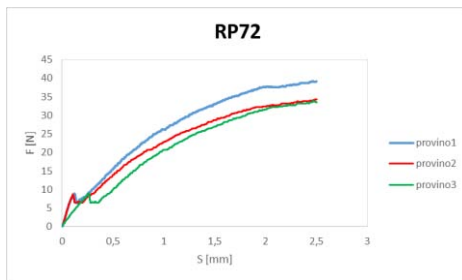
Risultati della prova di flessione RP56

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	12	-	-
Provino 2	15	-	-
Provino 3	15	-	-
Valore medio	14	25	NO



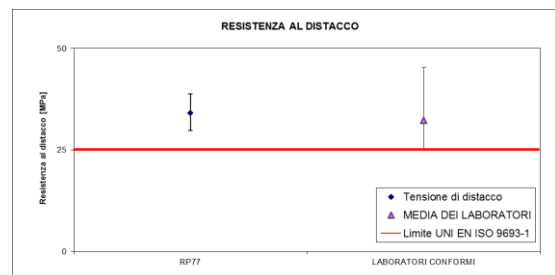
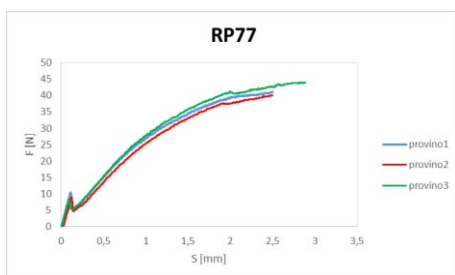
Risultati della prova di flessione RP72

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	30	-	-
Provino 2	31	-	-
Provino 3	36	-	-
Valore medio	32	25	SI



Risultati della prova di flessione RP77

	Resistenza al distacco t_b [MPa]	Limite UNI EN ISO 9693-1 [MPa]	Conformità
Provino 1	39	-	-
Provino 2	34	-	-
Provino 3	30	-	-
Valore medio	34	25	SI



APPENDICE VII: PROTOCOLLO DI PREPARAZIONE DI SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE CERAMIZZATE

PROCEDURA

SCOPO

Proporre una procedura per la realizzazione di sottostrutture protesiche ceramizzate da utilizzare per la valutazione di eventuali deformazioni indotte dal processo di ceramizzazione.

PREMESSA

In Allegato A si propone una sequenza di azioni che il laboratorio intraprende per la realizzazione dei provini. Tali azioni prevedono la compilazione di appositi moduli allegati che riassumono le caratteristiche del processo produttivo utilizzato; le informazioni sui materiali dentali e sul processo fornite dai costruttori saranno utilizzate esclusivamente per l'analisi dei risultati ottenuti dalle prove di flessione.

È possibile variare la sequenza delle azioni riportate in Allegato A, purché non sia compromessa la funzionalità dei provini. In tal caso precisare le variazioni in riferimento alla sequenza iniziale.

RIFERIMENTI

UNI EN ISO 6872:2008 Dentistry - Ceramic materials

MATERIALI : ESAMI E CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che il kit fornito contenga una sottostruttura protesica metallica con il relativo modello di occlusione. I *materiali ceramici* impiegati per la realizzazione dei provini devono rappresentare la produzione dell'azienda in termini di numerosità di protesi prodotte. Pertanto sono scelti a discrezione dell'azienda.

VERIFICA MATERIALE CERAMICO

Verificare la presenza di informazioni dettagliate relative all'identificazione e alle proprietà del materiale ceramico ed al suo utilizzo.

In caso di esito negativo dei controlli preliminari contattare il referente.

REALIZZAZIONE DEI PROVINI

Realizzare i provini secondo la seguente procedura

TARATURA DELLA TEMPERATURA DEL FORNO

Tarare la temperatura della fornace al valore corretto per l'impasto ceramico scelto. Fare riferimento ai valori consigliati dal produttore del materiale ceramico stesso. La cottura deve garantire superfici lucide per le ceramiche impiegate (ceramica opaca e di corpo)

APPLICAZIONE DELLA CERAMICA ALLA SOTTOSTRUTTURA PROTESICA METALLICA

Applicare la ceramica alla sottostruttura metallica avendo cura di **NON** eseguire la ceramizzazione fino al bordo della sottostruttura stessa, ma di lasciare almeno un millimetro. Verificare tramite l'apposito modello l'occlusione.

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Verificare di aver compilato completamente tutti i moduli riportati negli allegati.

AZIONI CONSEGUENTI

Provvedere al confezionamento dei provini avendo cura che durante la fase di confezionamento non vengano in contatto con sostanze che possano causarne il deterioramento. Inviare i provini al referente.

ALLEGATI

Allegato A – Sequenza delle azioni da intraprendere;
Allegato B– Modulo 1: Materiali dentali utilizzati;
Allegato B – Modulo 2: Processi produttivi.

Allegato A
SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE

Oggetto: realizzazione di sottostrutture protesiche ceramizzate per la valutazione delle eventuali deformazioni indotte dal processo di ceramizzazione. Il seguente schema propone una sequenza di azioni che il costruttore intraprende per la realizzazione dei provini in materiale metallo-ceramica.

SEQUENZA DELLE AZIONI DA INTRAPRENDERE		
DESCRIZIONE	ESEGUIITO?	
Esami preliminari		
Verifica del contenuto del kit fornito	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Scelta dei materiali da utilizzare	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica della presenza di informazioni per il materiale ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Controllo visivo del materiale da ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Realizzazioni del provino in metallo-ceramica		
Materiale ceramico		
Taratura della temperatura del forno	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Applicazione e cottura strato/i di ceramica	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Finitura del materiale ceramico	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Controllo dell'occlusione	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Azioni conclusive		
Confezionamento dei provini	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Verifica della compilazione dell'Allegato A, Allegato B	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Consegna dei provini al referente	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO

Allegato B - Modulo 1
MATERIALI DENTALI UTILIZZATI

Oggetto: realizzazione di sottostrutture protesiche ceramizzate per la valutazione delle eventuali deformazioni indotte dal processo di ceramizzazione. Il seguente schema riassume le caratteristiche dei materiali dentali utilizzati per la realizzazione dei provini.

Provini n°: _____

CARATTERISTICHE MATERIALE CERAMICO OPACO

Tipo
di materiale

Fornitore

Rapporto polveri-acqua:		Temperatura di cottura	
Altre proprietà			

CARATTERISTICHE MATERIALE CERAMICO di CORPO

Tipo
di materiale

Fornitore

Rapporto polveri-acqua:		Temperatura di cottura	
Altre proprietà			

Allegato B - Modulo 2
PROCESSI PRODUTTIVI

Oggetto: realizzazione di sottostrutture protesiche ceramizzate per la valutazione delle eventuali deformazioni indotte dal processo di ceramizzazione. Il seguente schema riassume le principali caratteristiche delle varie fasi del procedimento di preparazione dei provini.

APPLICAZIONE MATERIALE CERAMICO

Ceramica opaca

Applicazione ceramica opaca	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
N° strati applicati		

Ceramica di corpo

N° strati applicati	
---------------------	--

Finitura del materiale ceramico

Utensile impiegato		
Diametro disco		
Granulometria abrasivo		
Applicazione dello smalto	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Tipo di smalto		

Altre note di processo

APPENDICE VIII: PROCEDURA DI ESECUZIONE DI MISURE DI SOTTOSTRUTTURE METALLICHE PROTESICHE

SCOPO

Descrivere le modalità di esecuzione della misurazione del gap marginale presente tra le sottostrutture protesiche e il relativo modello di monconi

PREMESSA

I provini, realizzati tramite il procedimento di sinterizzazione laser selettiva, vengono posizionati sul relativo modello di monconi e successivamente viene realizzata la misura

RIFERIMENTI

UNI EN ISO 22674:2006 - Materiali metallici per restaurazioni fisse e amovibili e le apparecchiature;
UNI EN ISO 9693-1:2012 - Sistemi per restaurazioni dentali di metallo-ceramica;
I parametri geometrici fondamentali che caratterizzano i provini sono sintetizzati nella tabella seguente.

MACCHINA DI PROVA

Il sistema di misurazione consiste nella macchina per misurazioni ottiche OGP presente nel laboratorio LIN del dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

CONTROLLI PRELIMINARI

Verificare che la macchina di misura disponga di certificati di taratura validi o altra documentazione idonea a dimostrarne lo stato di efficienza e garantirne la riferibilità.

PARAMETRI DI PROVA

TEMPERATURA SALA DI PROVA

La prova è eseguita a temperatura ambiente, nei limiti tra 10°C e 35°C.

ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova consiste nel misurare il gap marginale presente tra sottostruttura protesica e relativo modello di monconi in diversi punti.

METODO DI POSIZIONAMENTO

Posizionare il modello dei monconi sull'apposito supporto. Fissare la sottostruttura protesica al relativo modello tramite elementi elastici

AVVIO DELLA PROVA

Avviare la macchina e verificare il corretto allineamento del supporto.

ESECUZIONE DELLA PROVA

Avviare la routine di misura elaborata controllando che il sistema acquisisca i punti di misura in modo corretto. Seguire le indicazioni fornite a monitor, avendo cura di girare il supporto quando richiesto.

TERMINE DELLA PROVA

Alla comparsa del messaggio di fine routine, togliere il sistema elastico di fissaggio e rimuovere la sottostruttura.

DETERMINAZIONE DEL GAP MARGINALE

Elaborare i dati forniti in output dal sistema automatico di misura calcolando il gap marginale come il doppio del valore del raggio del centroide fornito.

OPERAZIONI CONCLUSIVE E NOTE

Indicare eventuali punti in cui il sistema di misura sbaglia ad acquisire il dato.
Aggiornare il database.

APPENDICE IX: RISULTATI DELLE MISURAZIONE DELLE SOTTOSTRUTTURE PROTESICHE

SCOPO

Sintetizzare i risultati della campagna sperimentale volta a determinare l'eventuale deformazione indotta sulle sottostrutture protesiche dal processo di ceramizzazione.

PREMESSA

Garantire un buon combaciamento tra la struttura protesica realizzata e i monconi è un requisito fondamentale che ogni sistema finalizzato alla restaurazione dentale deve necessariamente possedere. Infatti, qualora ciò non avvenisse, la protesi non risulterebbe stabile e ritentiva con il rischio di esporre il paziente a malattie paradontali e carie secondarie. In letteratura non esiste un valore stabilito e universalmente accettato che il gap marginale (presente tra le sottostrutture metalliche e i monconi) deve avere. In questa sede si è preso come riferimento il dato indicato e consigliato da AIMAD. Le direttive AIMAD prevedono un valore massimo di 100 µm per tale gap. Le sottostrutture protesiche, pertanto, sono state misurate prima e dopo il processo di ceramizzazione. L'analisi dei dati rilevati e il loro confronto ha permesso di ricavare la differenza di distanza marginale. La non conformità del campione sopravviene qualora la differenza di distanza marginale media (frutto della media di un numero massimo di 30 punti campionati) sia superiore ai 100 µm.

RIFERIMENTI

Requisiti e criteri di fabbricazione per sistemi metallo-ceramici - AIMAD, documento tecnico, 2014

SEDE DELLE PROVE

Le prove sono state eseguite nel laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale del dipartimento ICEA dell'Università di Padova

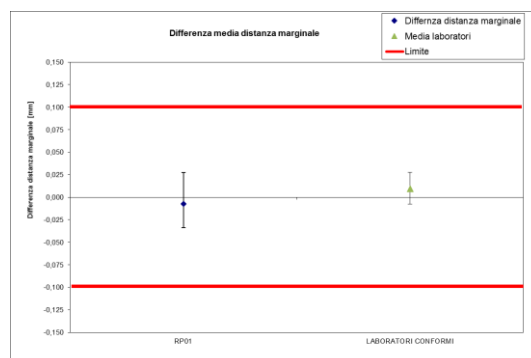
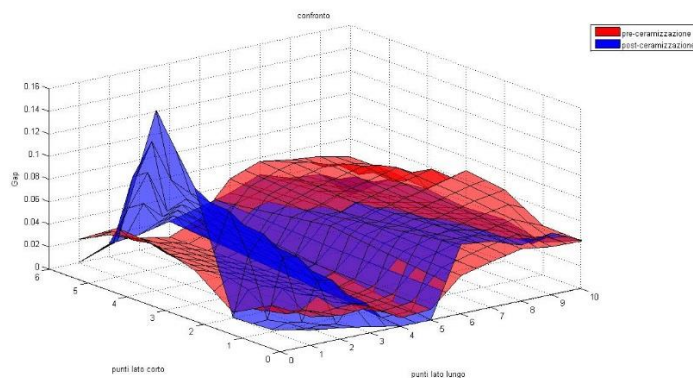
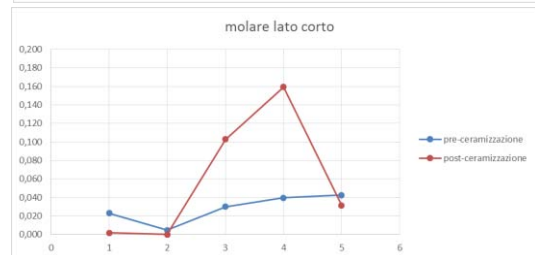
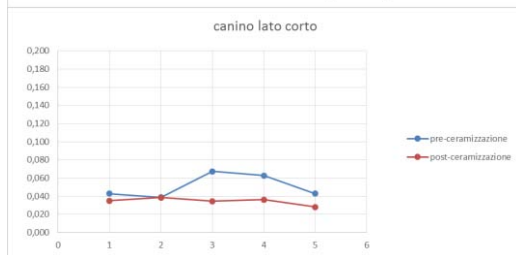
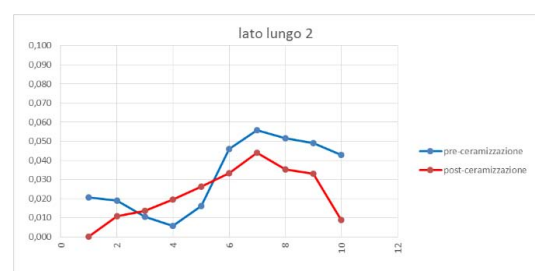
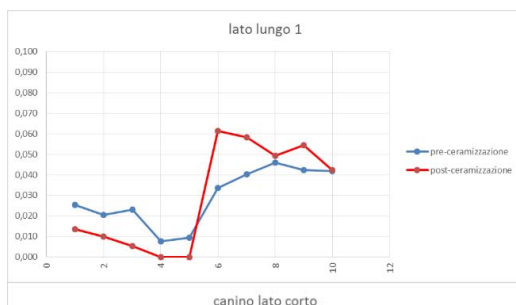
CONDIZIONI DI PROVA

- | | |
|-------------------------------|-------------------|
| - macchina utilizzata: | OGP Flash CNC 300 |
| - numero di punti campionati: | max. 30 |

RISULTATI

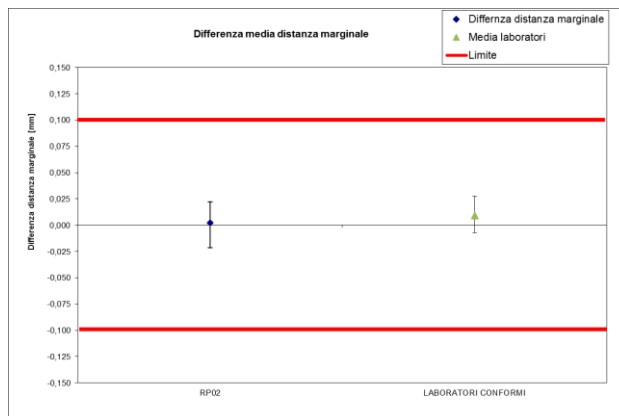
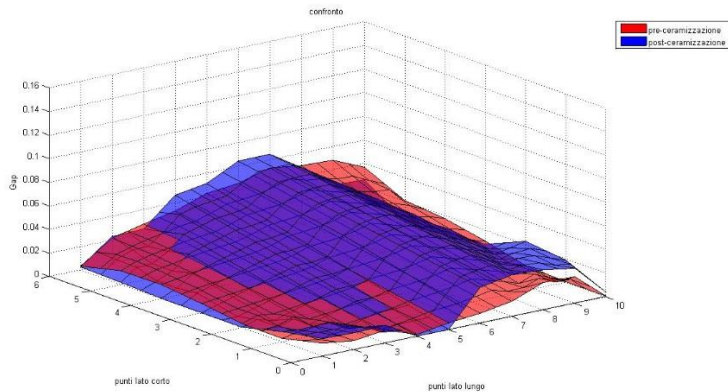
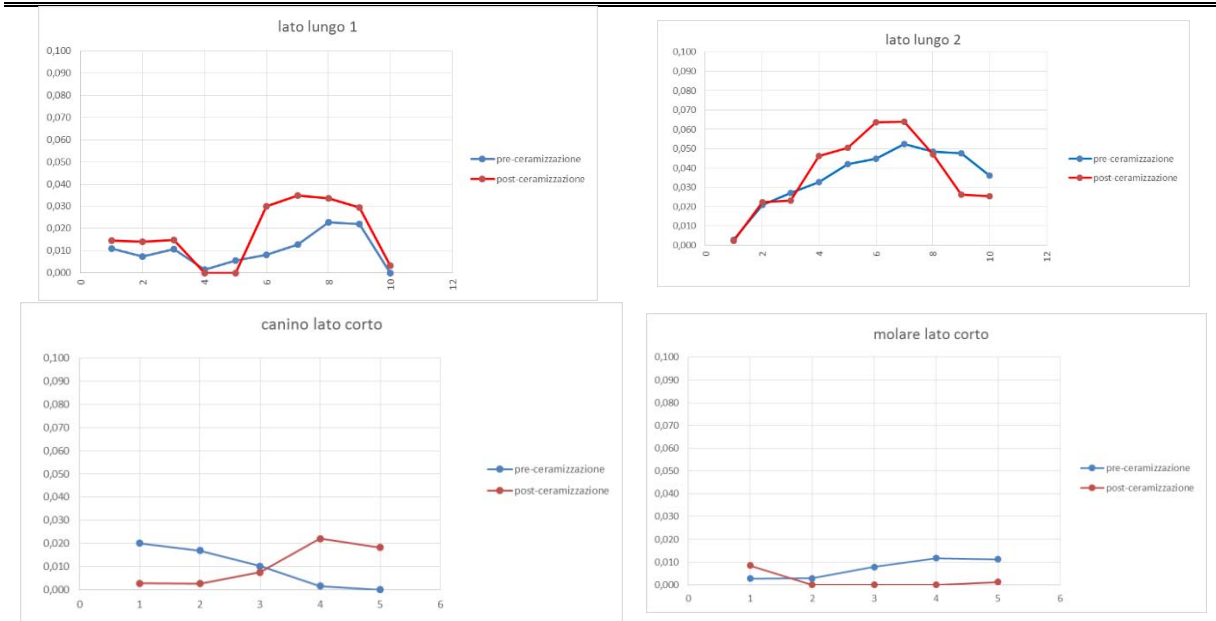
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP01

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
-7	15	28	-34	100	SI



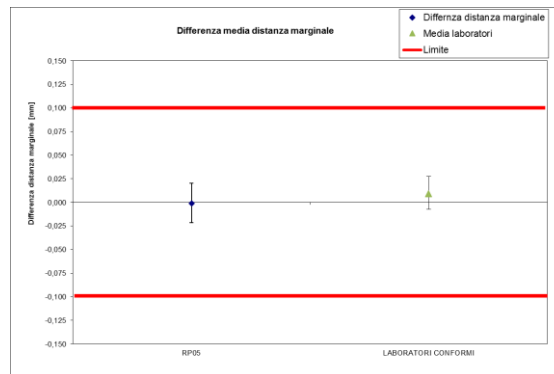
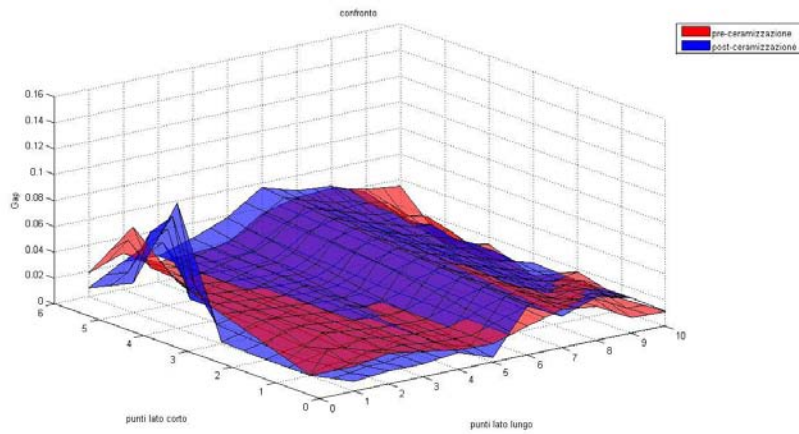
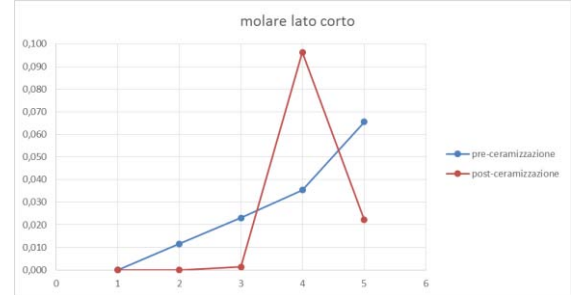
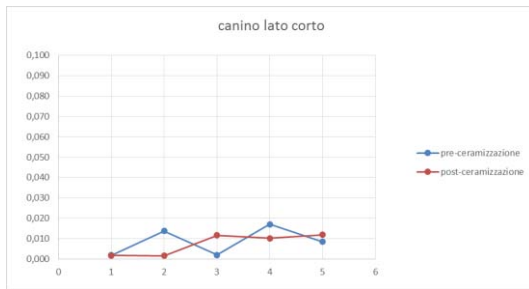
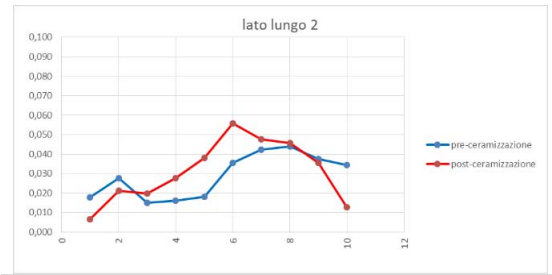
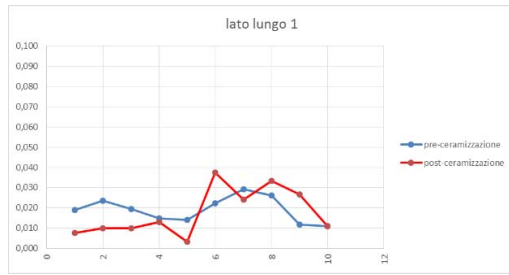
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP02

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
2	12	22	-21	100	SI



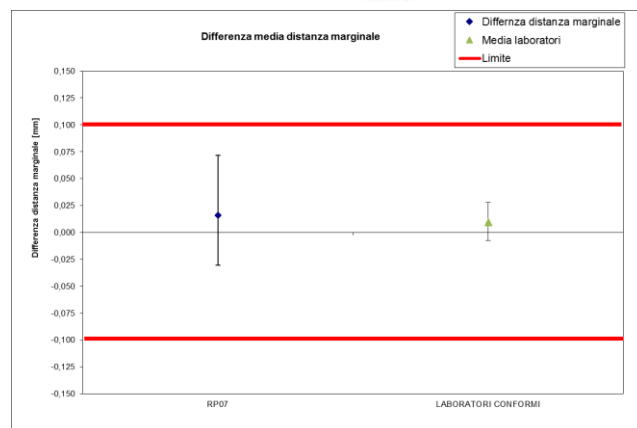
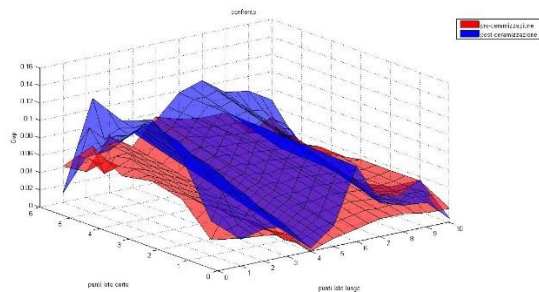
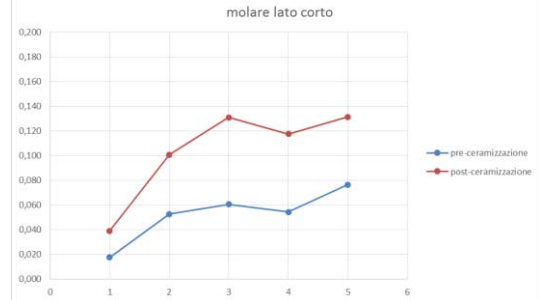
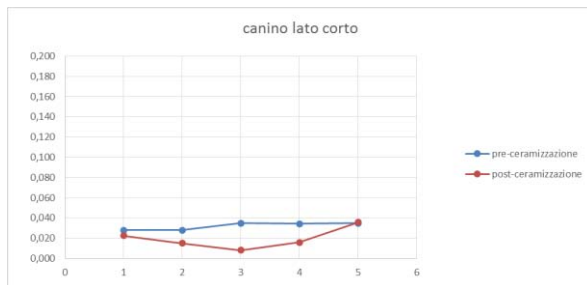
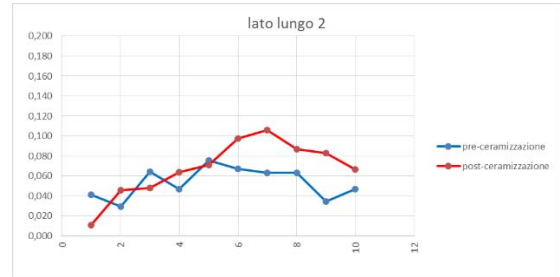
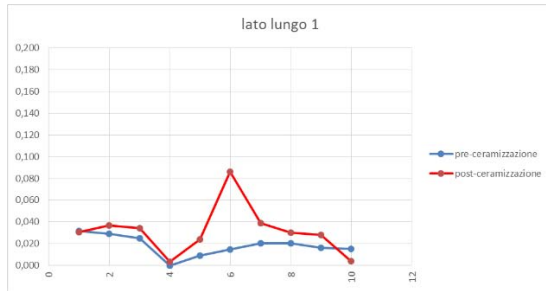
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP05

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
-1	12	20	-22	100	SI



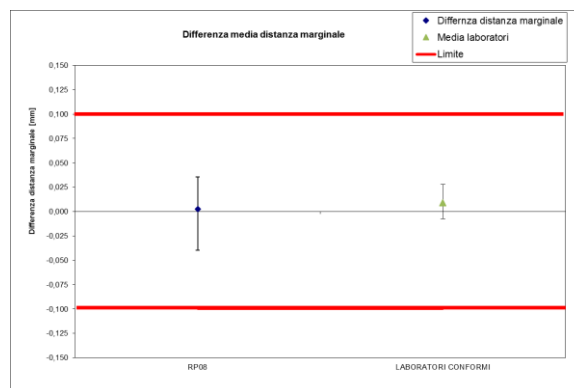
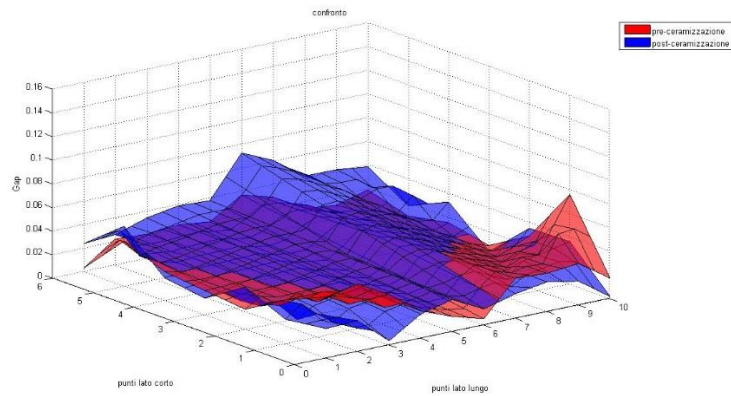
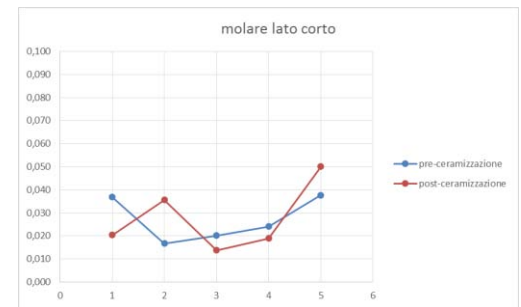
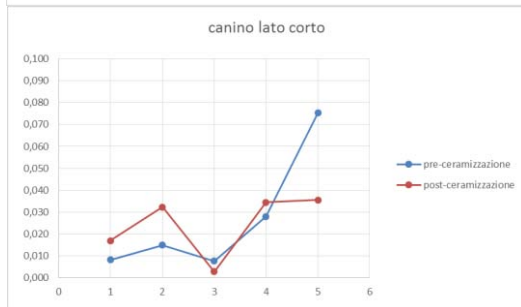
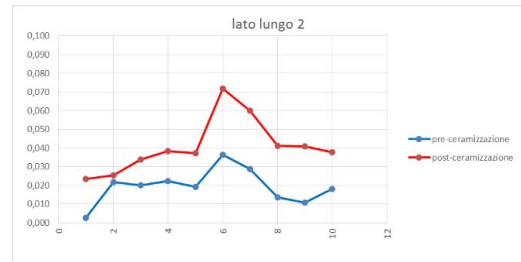
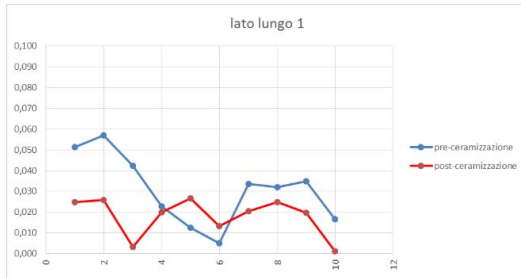
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP07

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
16	28	71	-31	100	SI



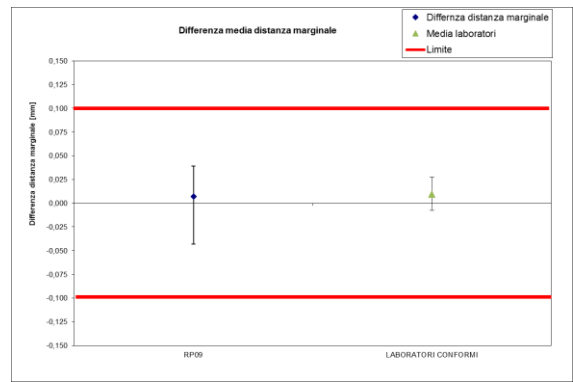
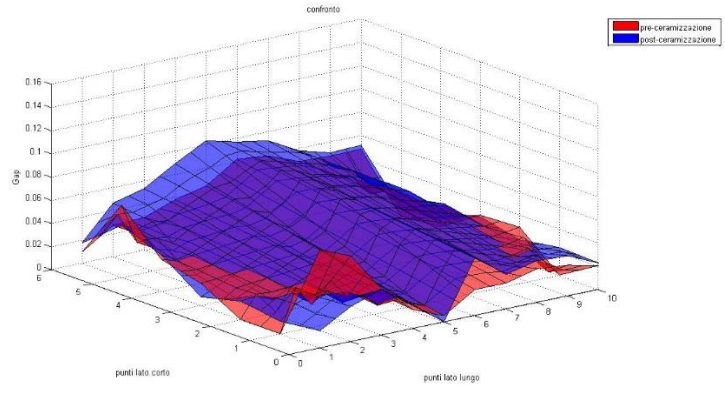
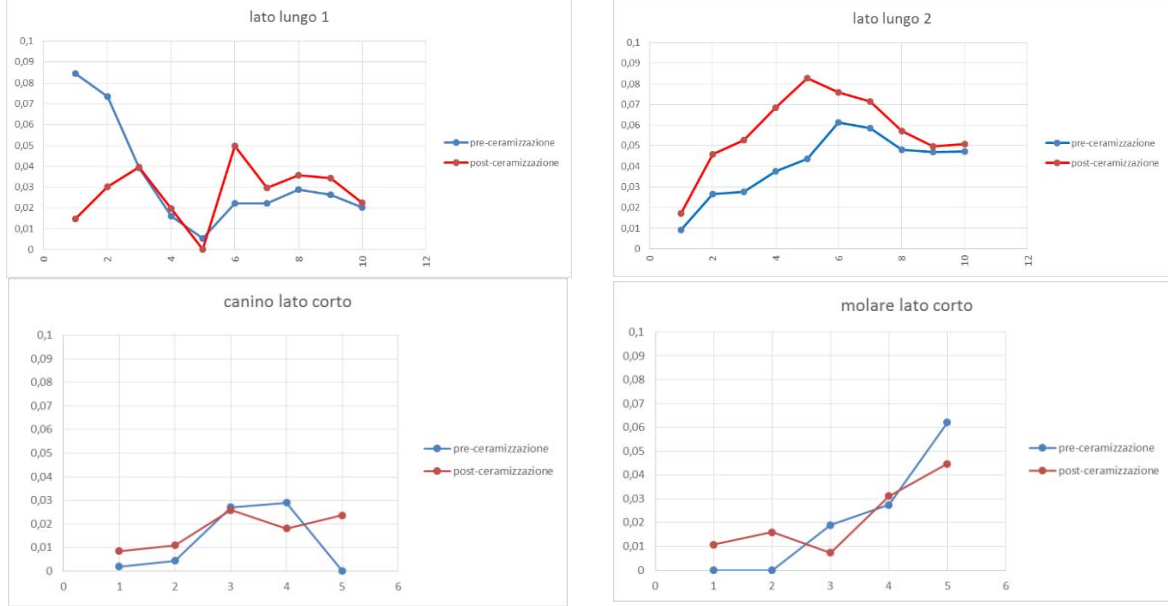
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP08

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
3	21	35	-40	100	SI



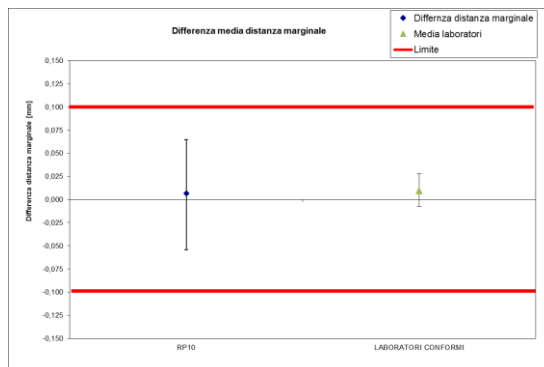
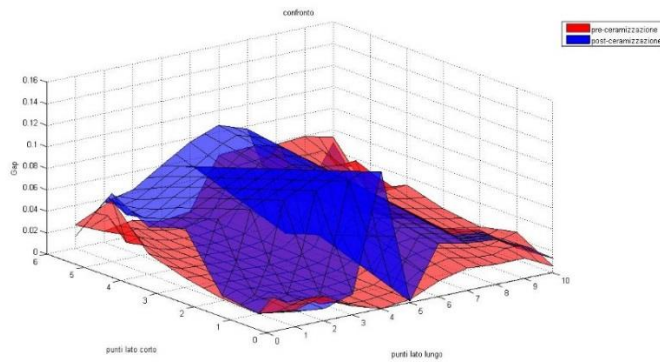
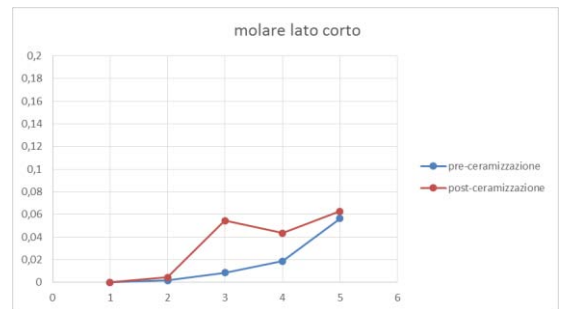
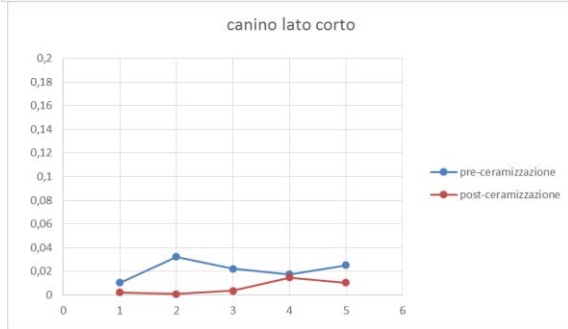
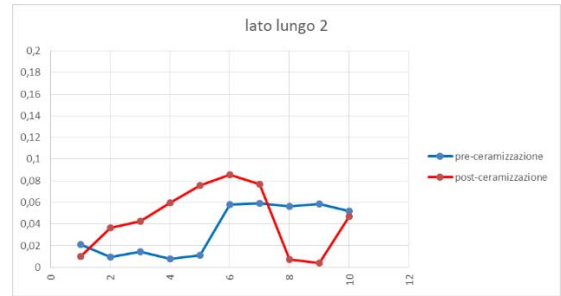
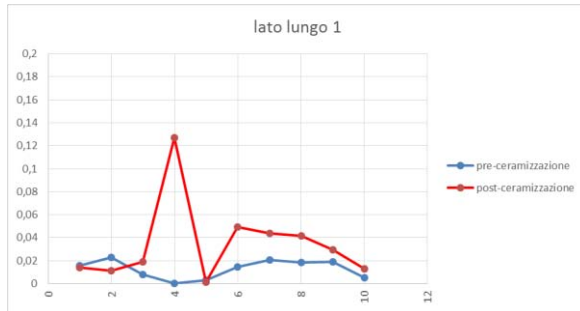
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP09

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
7	16	39	-43	100	SI



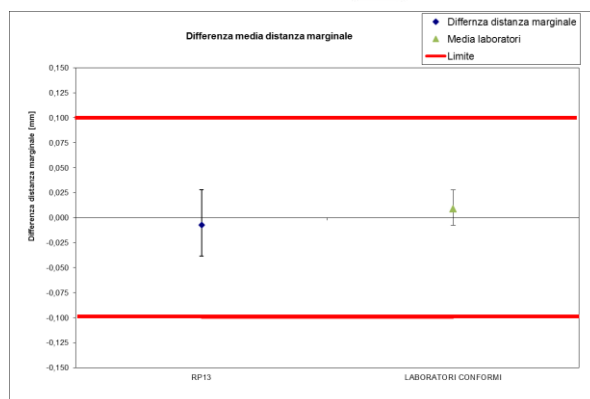
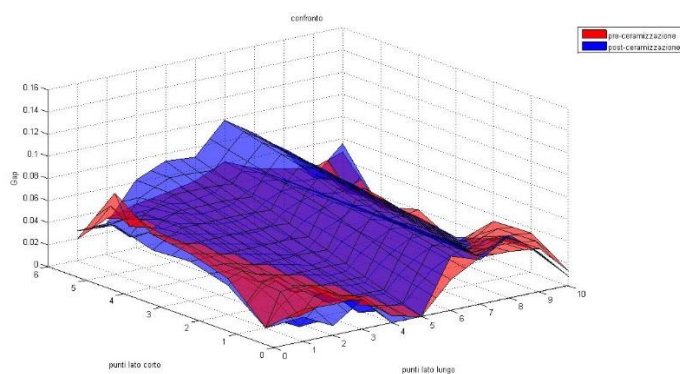
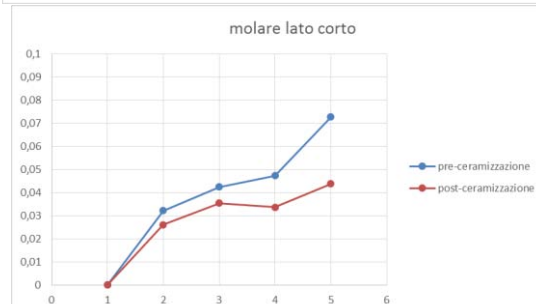
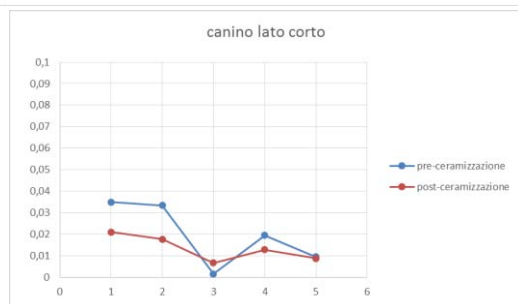
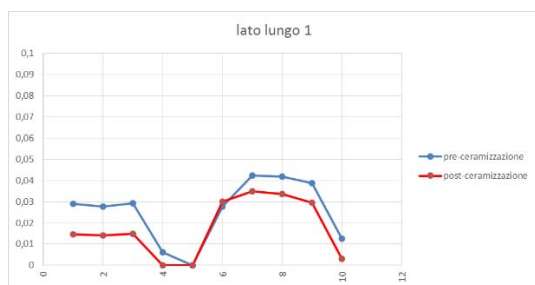
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP10

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
7	27	65	-54	100	SI



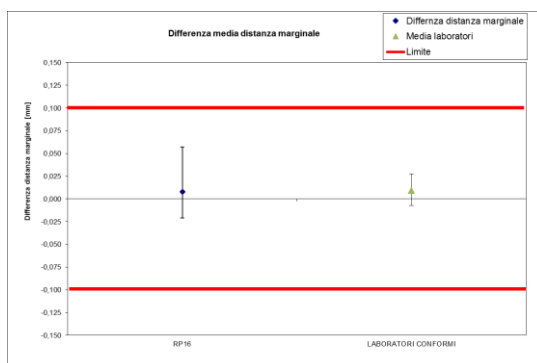
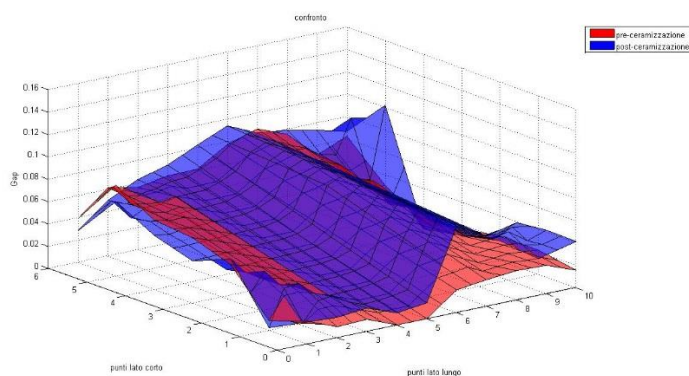
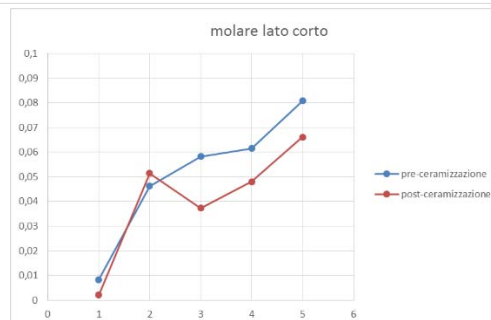
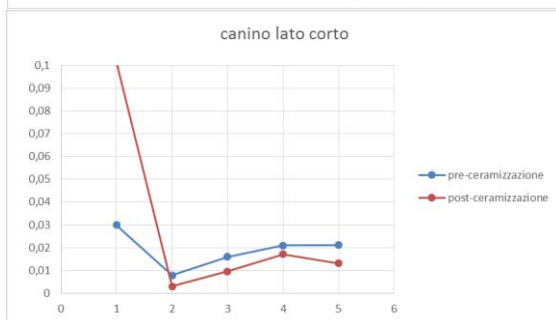
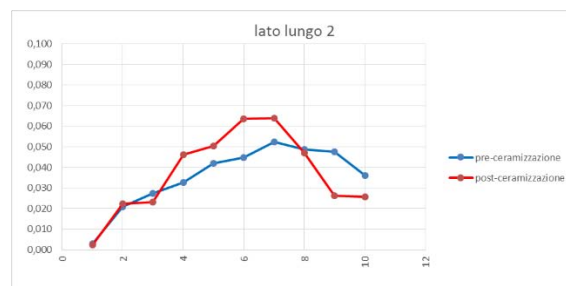
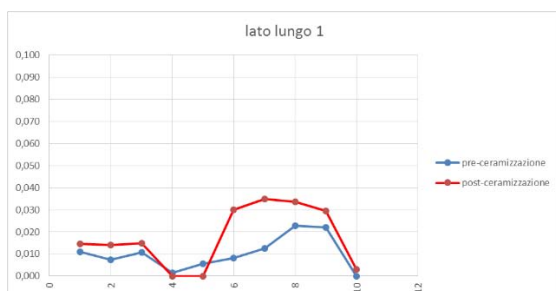
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP13

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
2	16	38	-29	100	SI



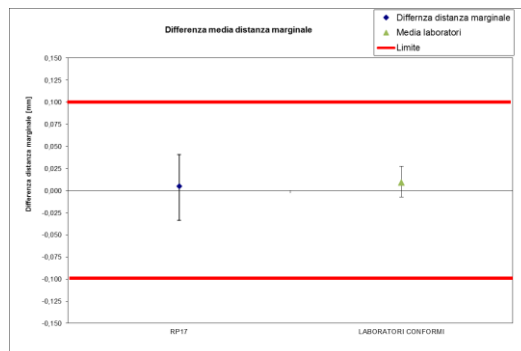
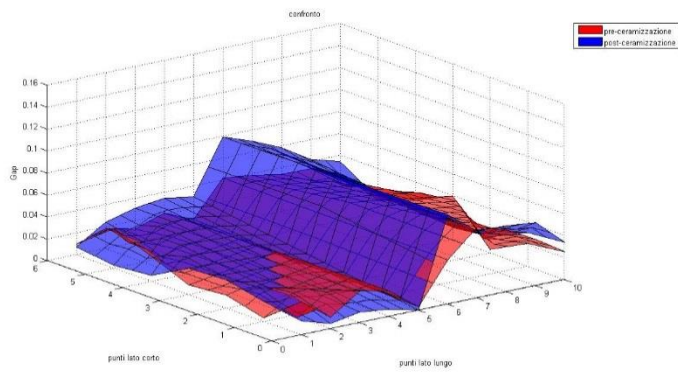
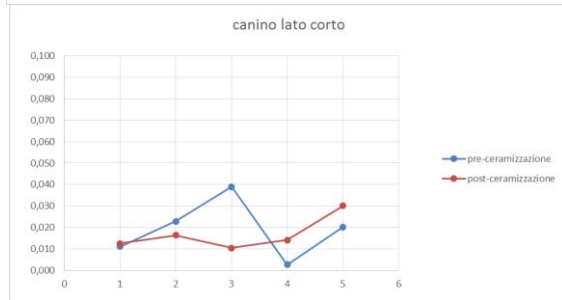
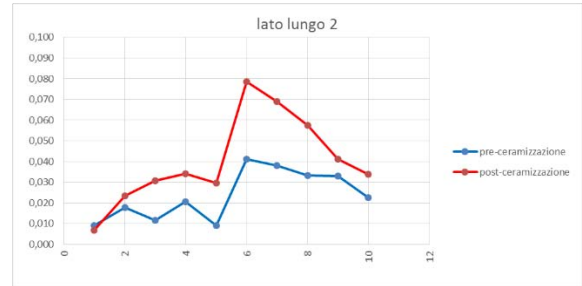
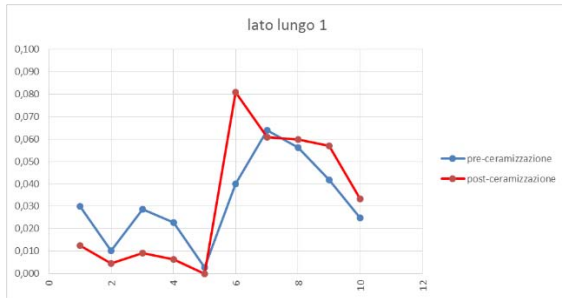
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP16

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
8	19	57	-21	100	SI



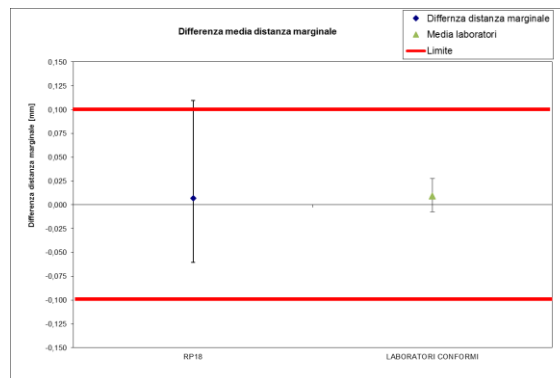
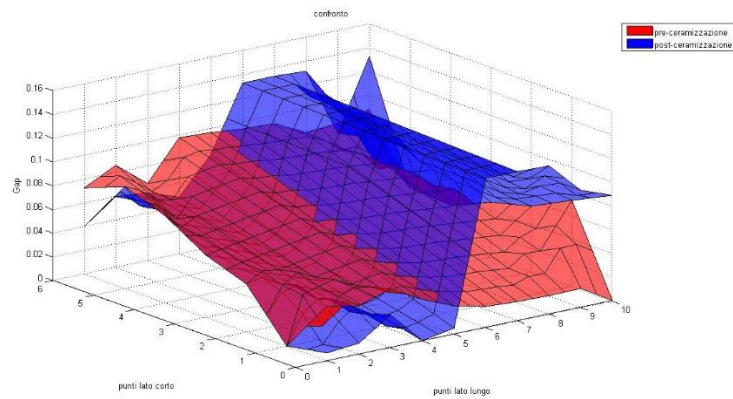
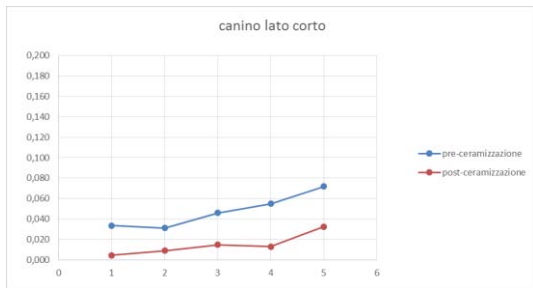
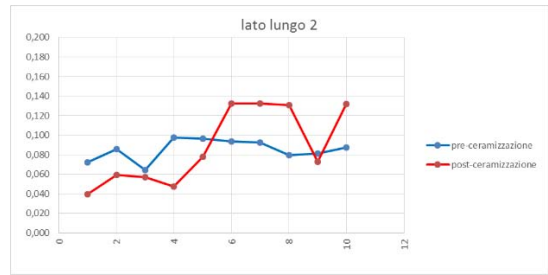
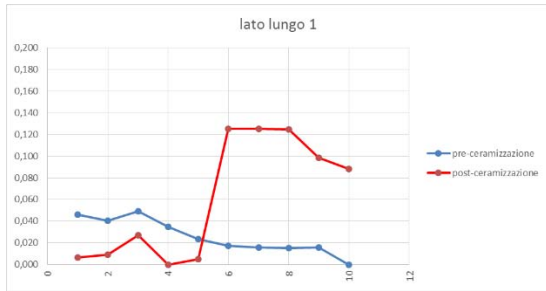
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP17

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
5	18	41	-34	100	SI



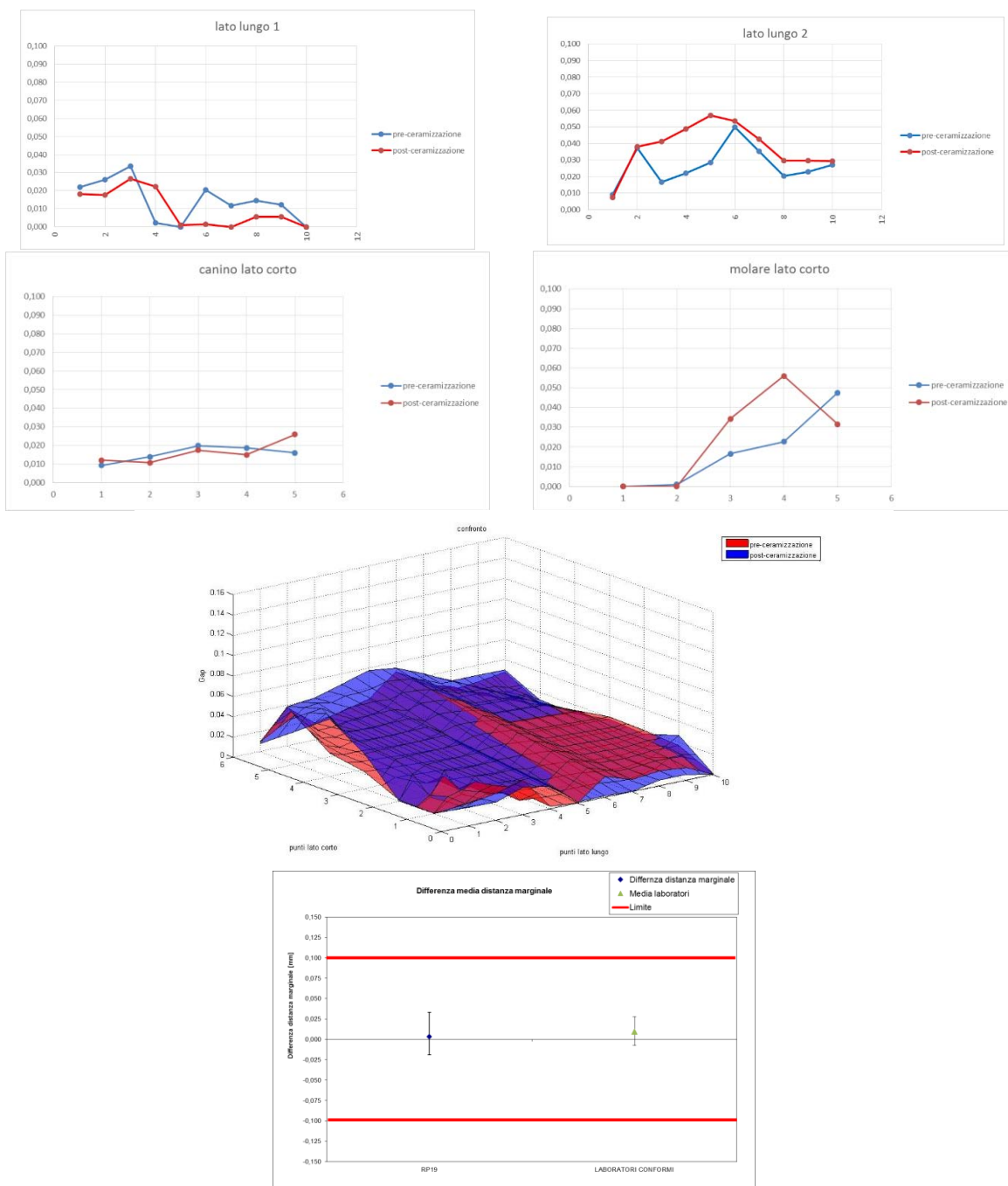
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP18

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
7	52	109	-61	100	SI



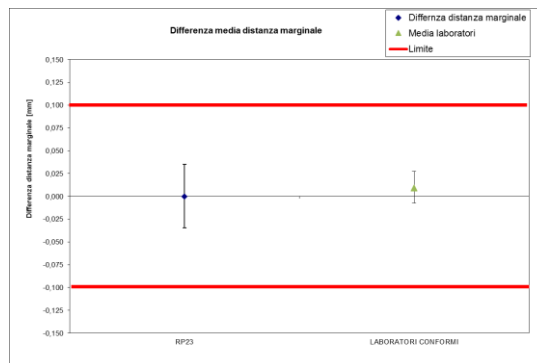
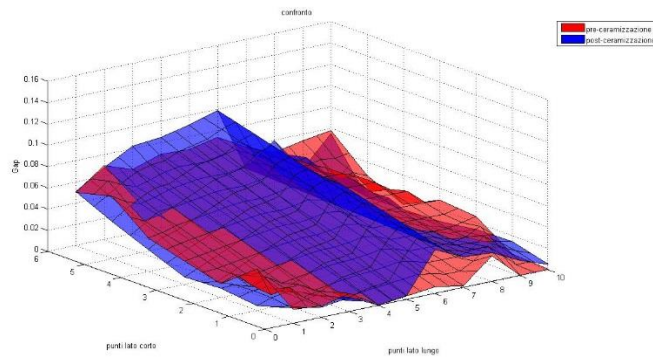
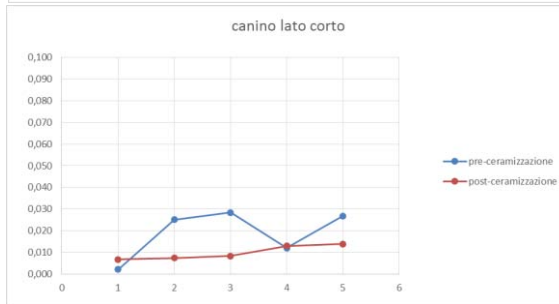
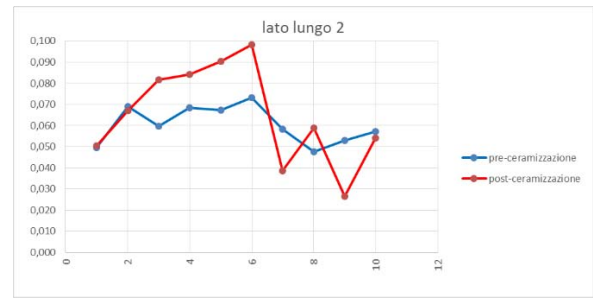
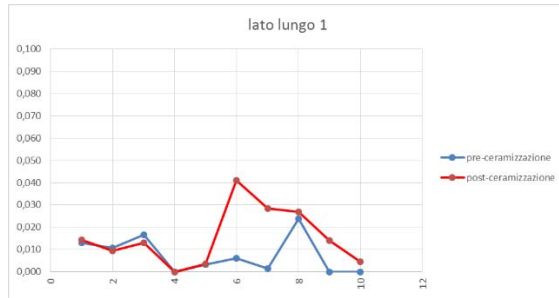
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP19

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
3	13	33	-19	100	SI



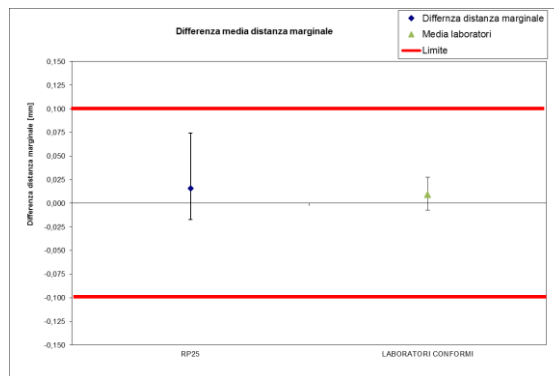
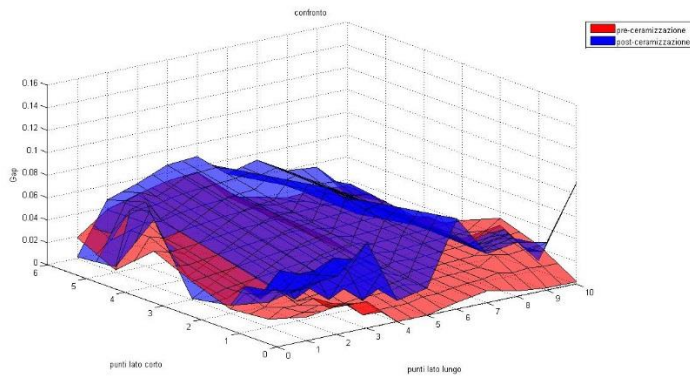
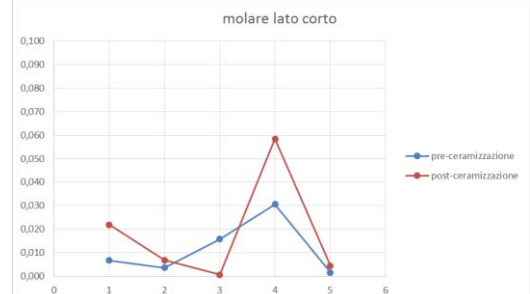
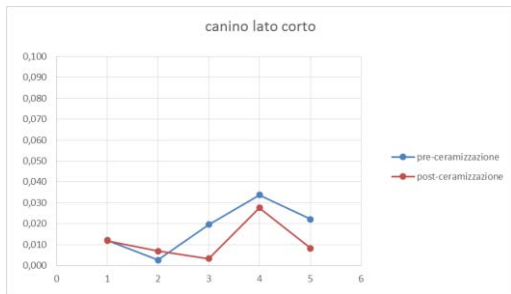
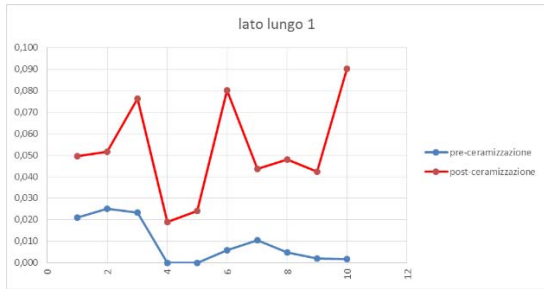
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP23

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
0	17	35	-35	100	SI



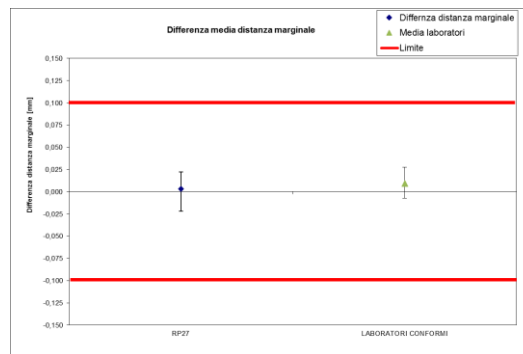
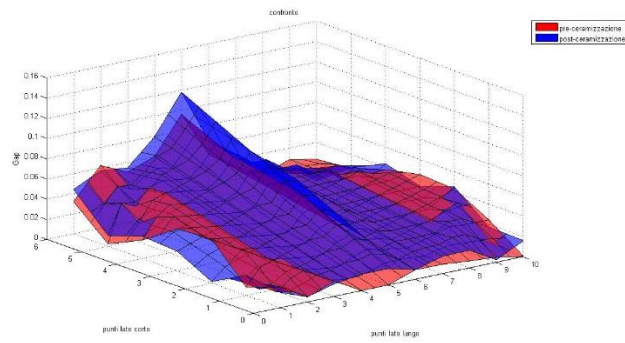
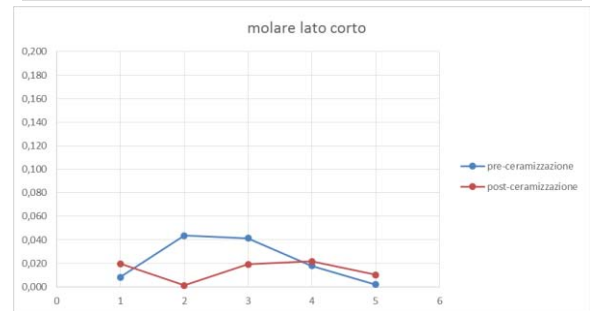
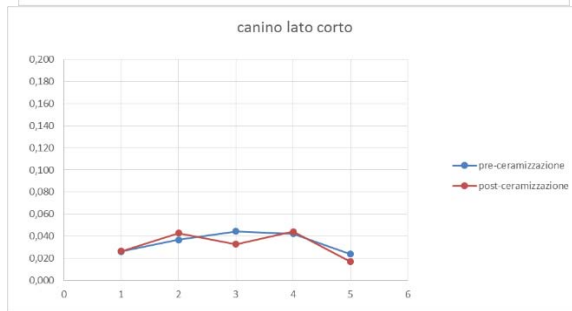
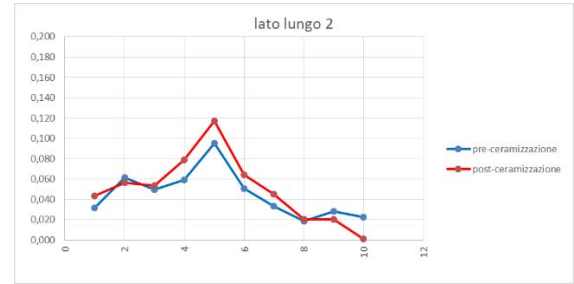
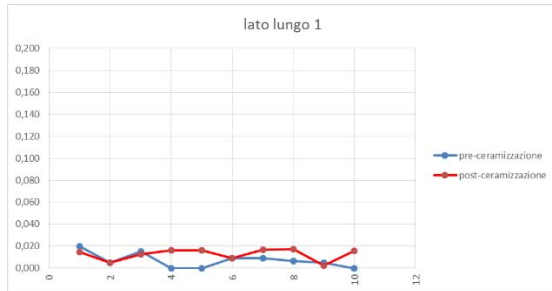
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP25

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
16	22	74	-17	100	SI



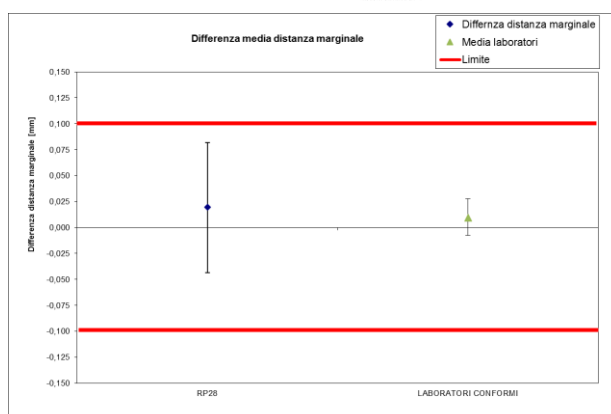
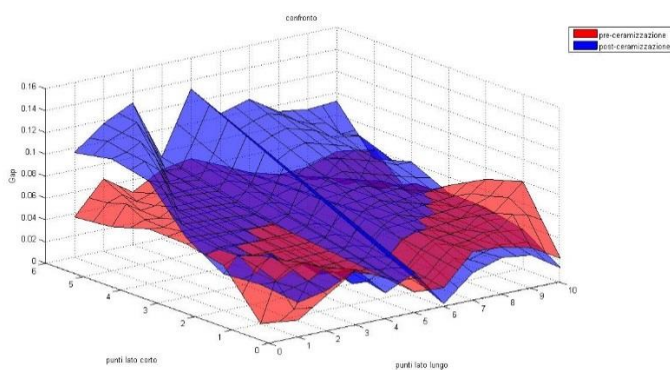
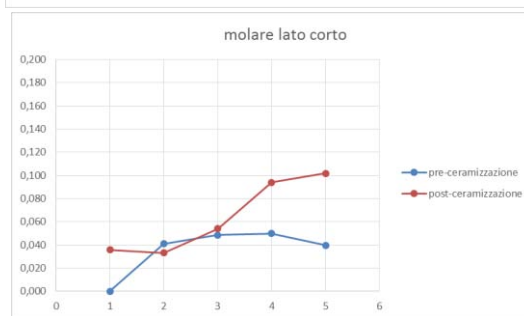
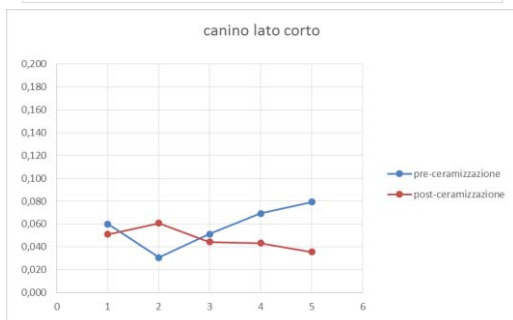
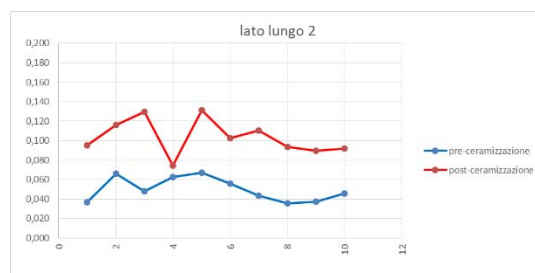
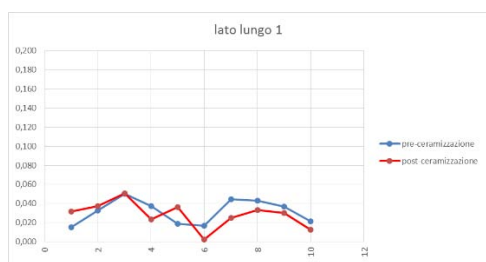
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP27

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
3	11	22	-22	100	SI



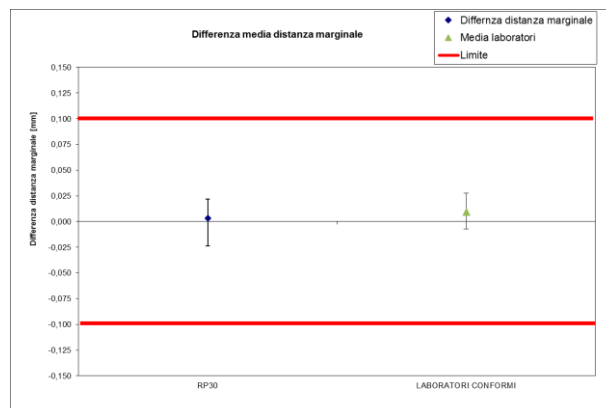
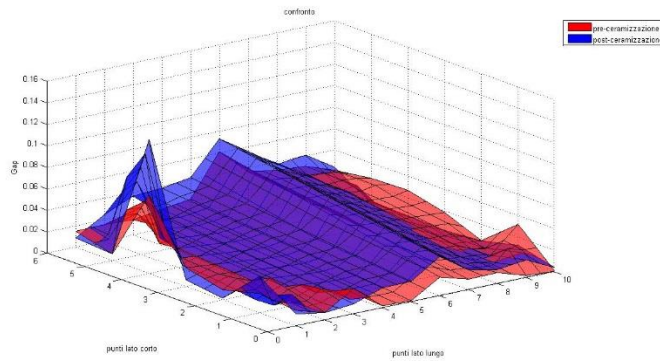
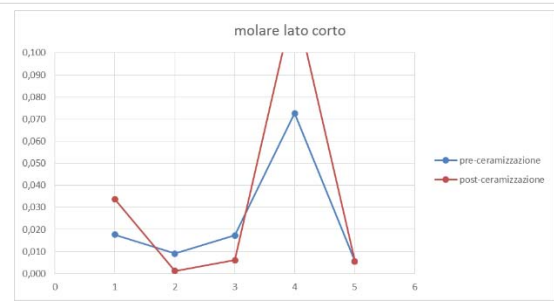
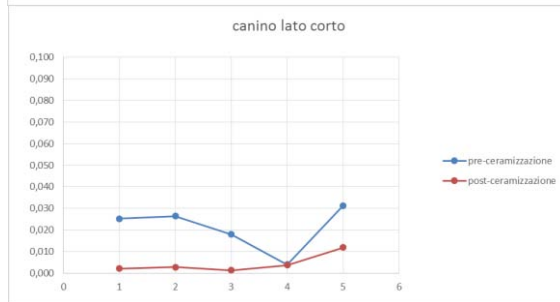
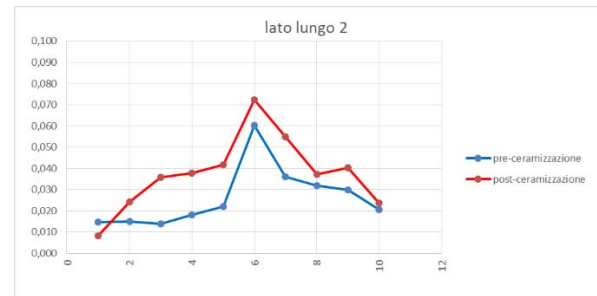
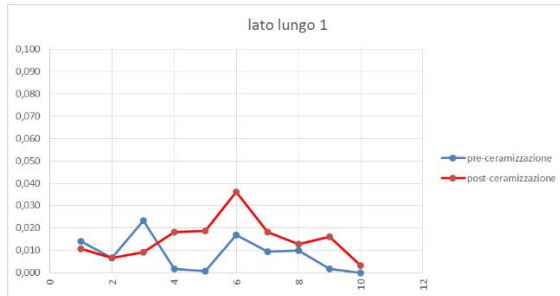
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP28

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
3	11	22	-22	100	SI



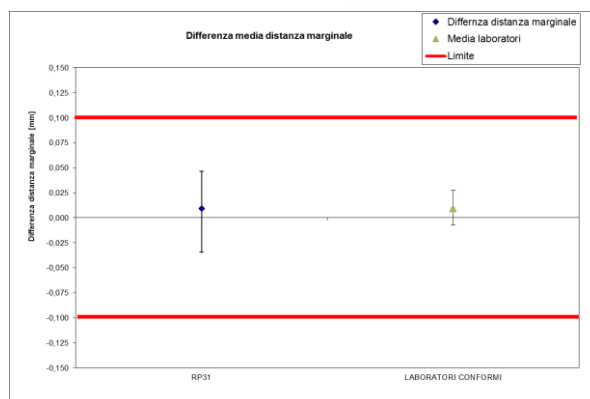
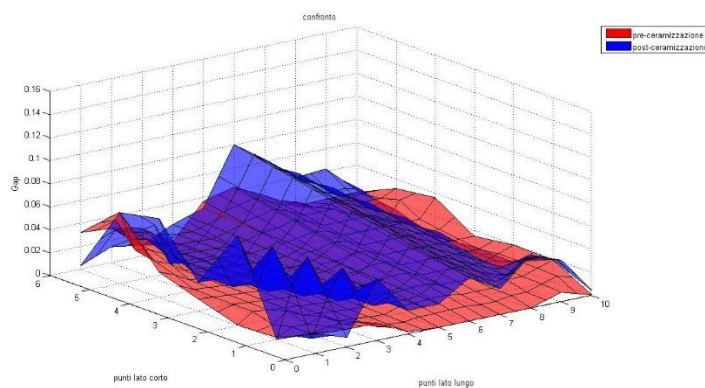
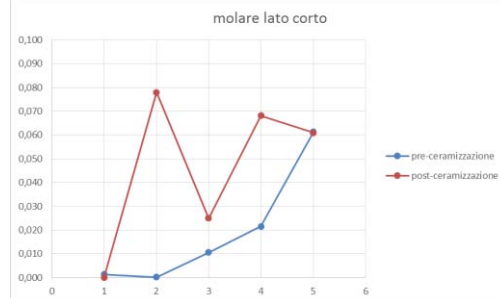
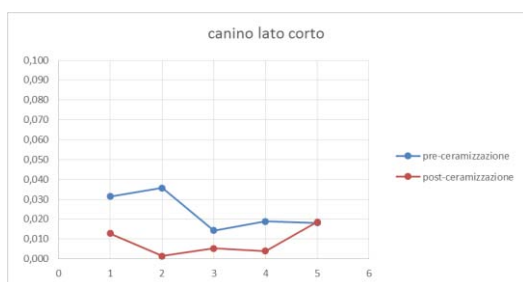
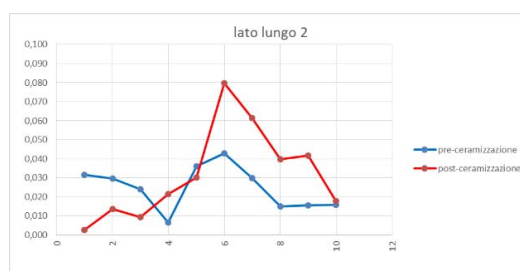
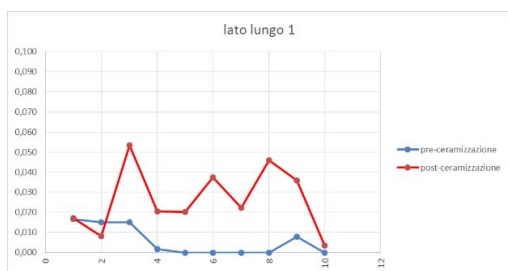
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP30

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
3	14	22	-24	100	SI



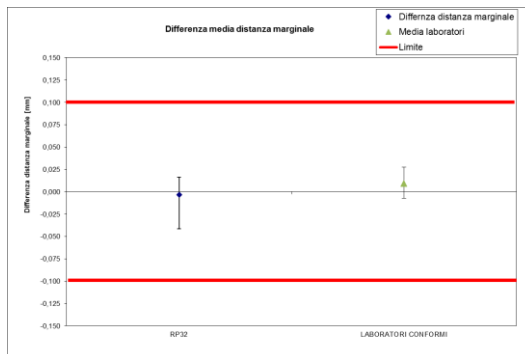
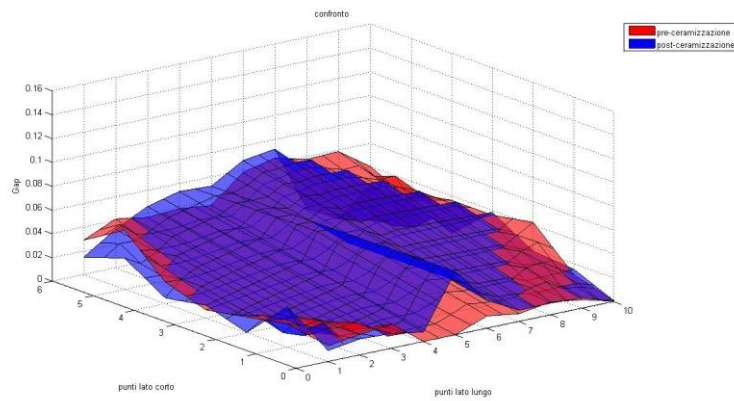
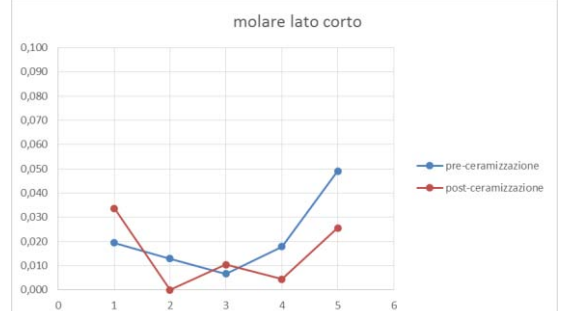
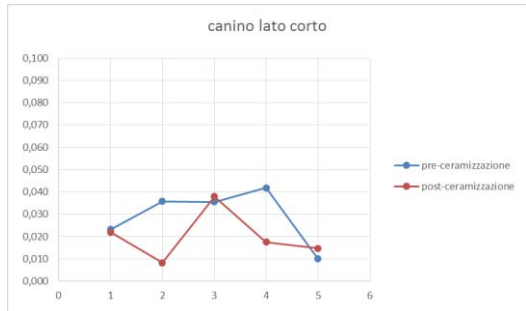
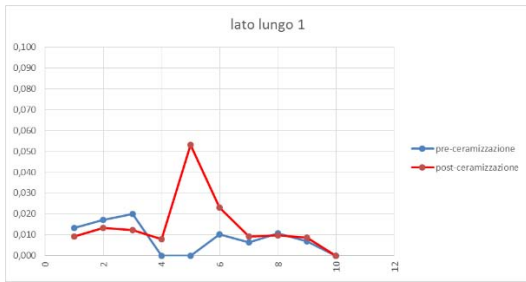
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP31

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
9	22	47	-34	100	SI



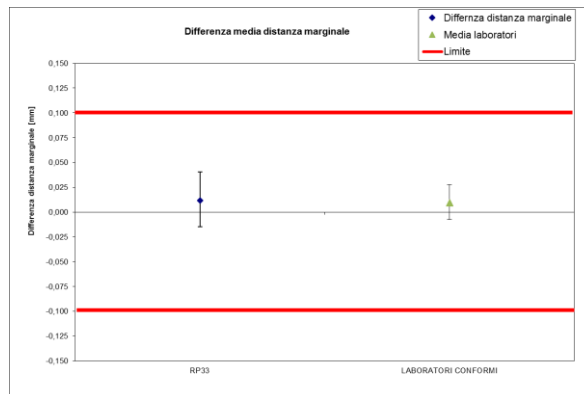
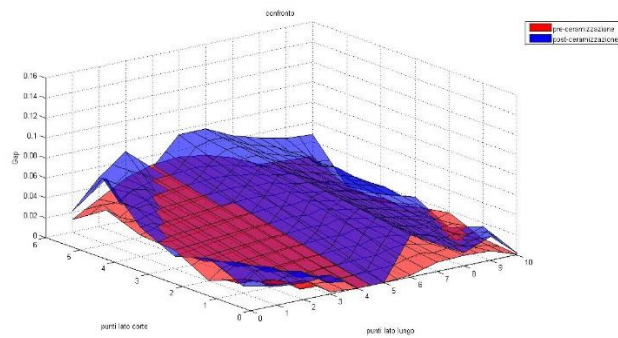
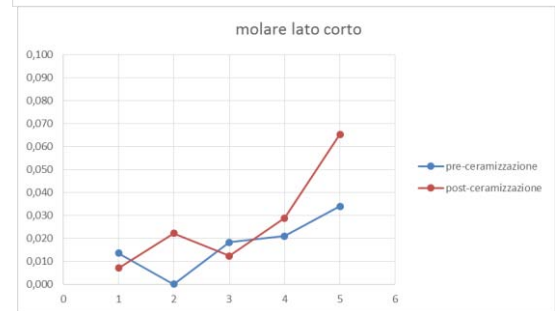
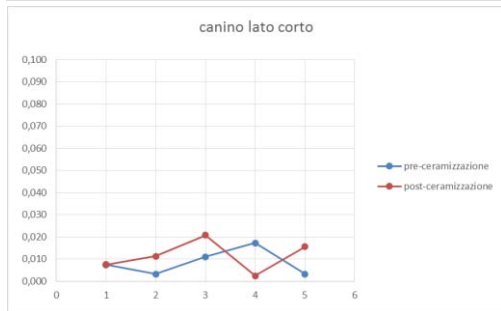
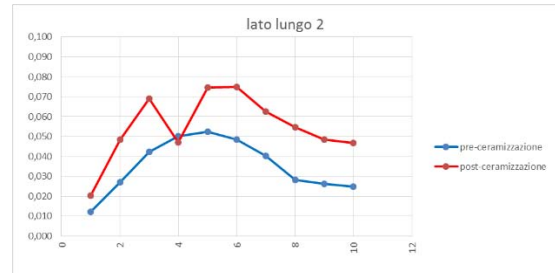
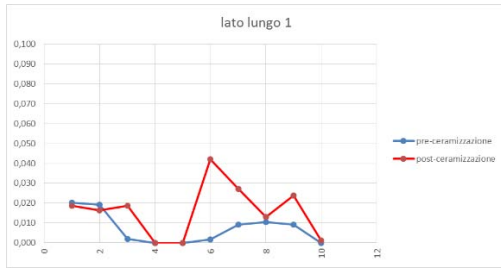
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP32

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
-3	14	16	-42	100	SI



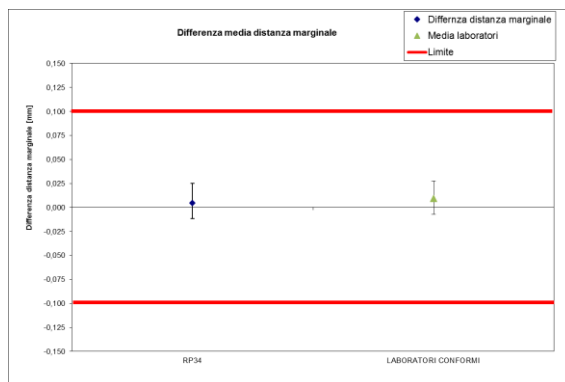
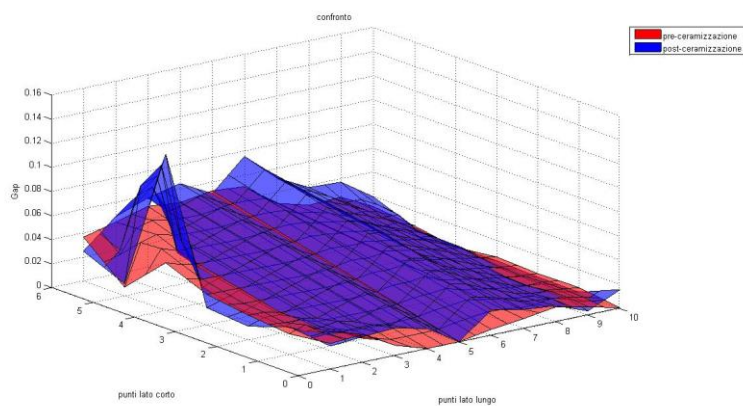
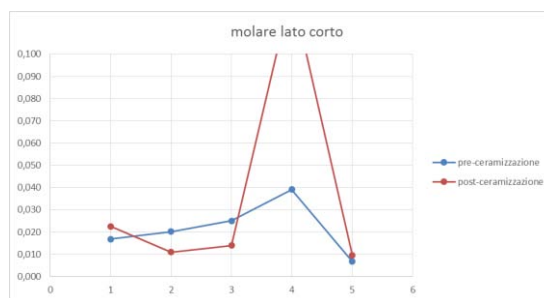
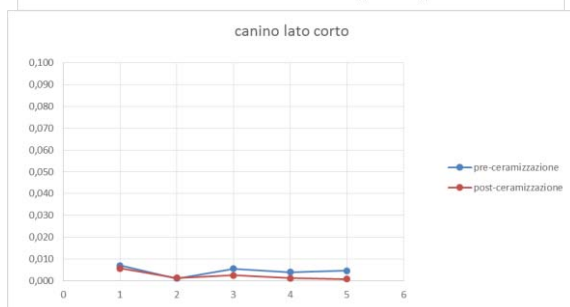
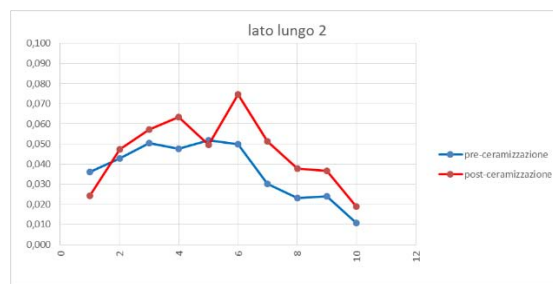
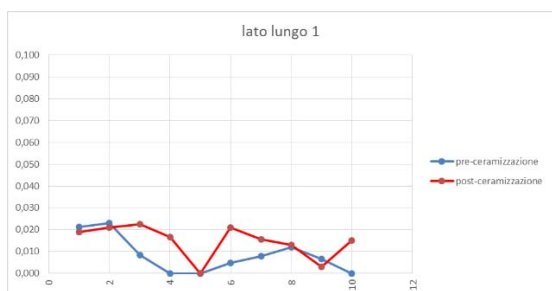
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP33

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
-3	14	16	-42	100	SI



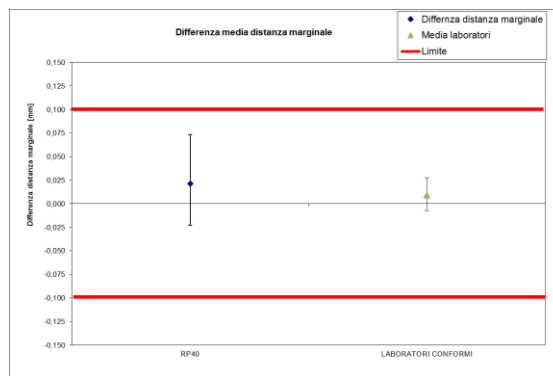
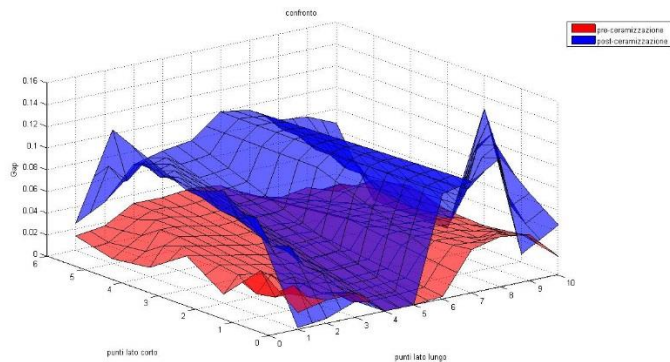
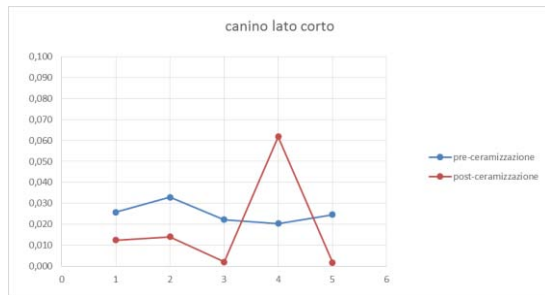
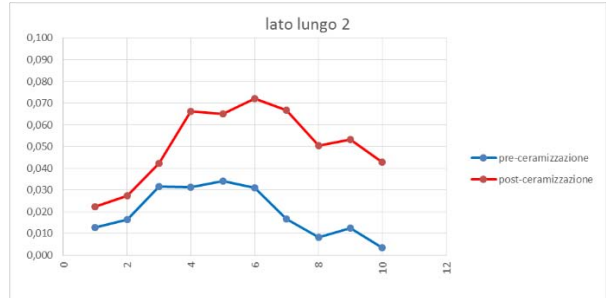
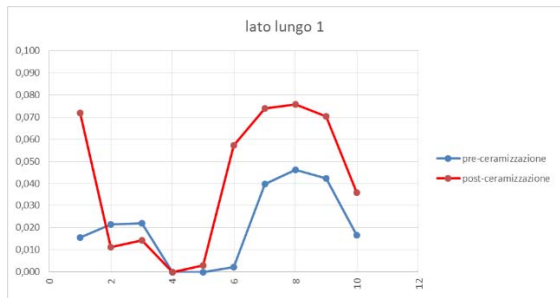
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP34

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
5	10	25	-12	100	SI



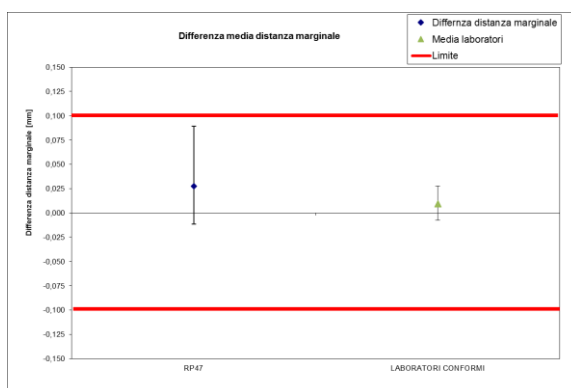
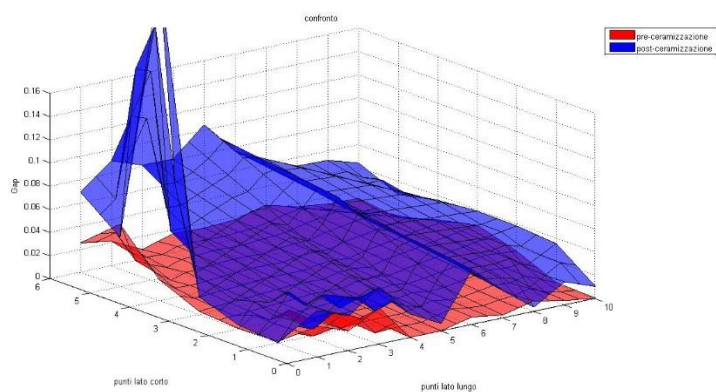
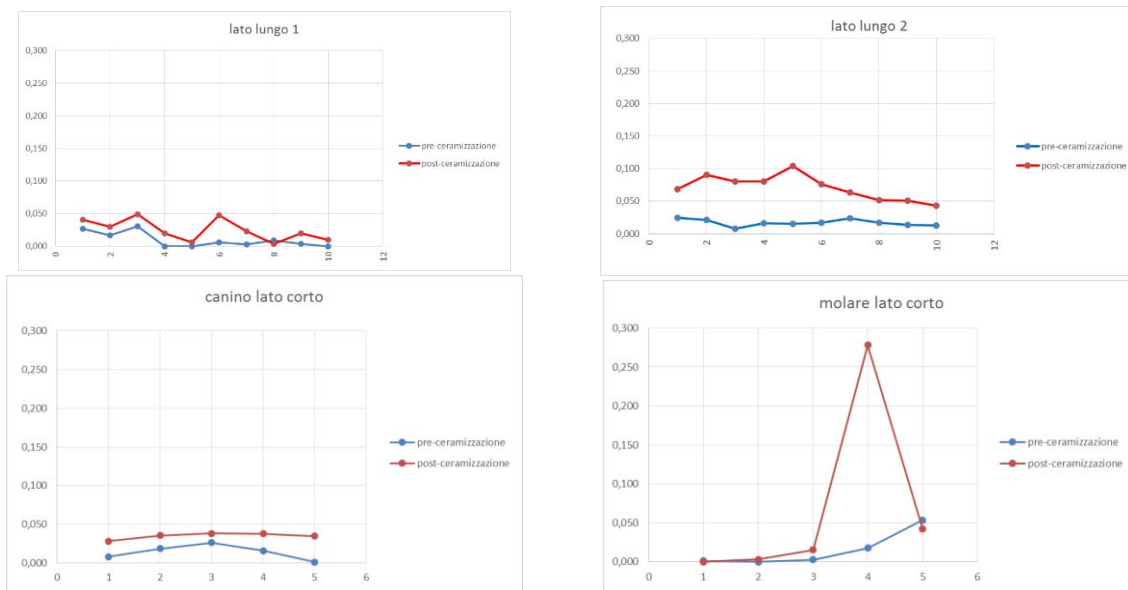
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP40

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
21	27	73	-23	100	SI



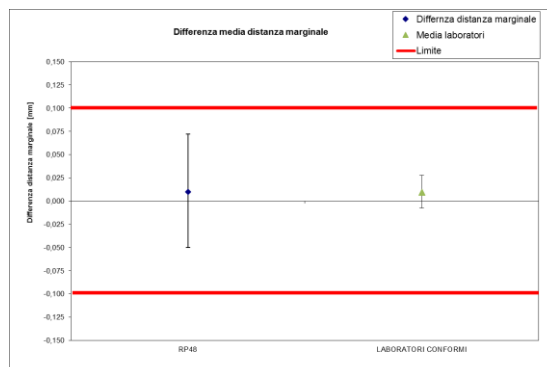
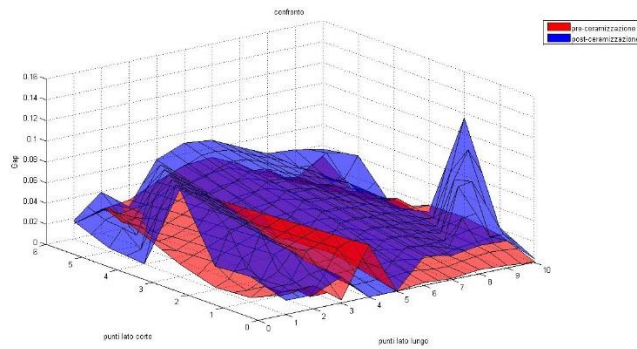
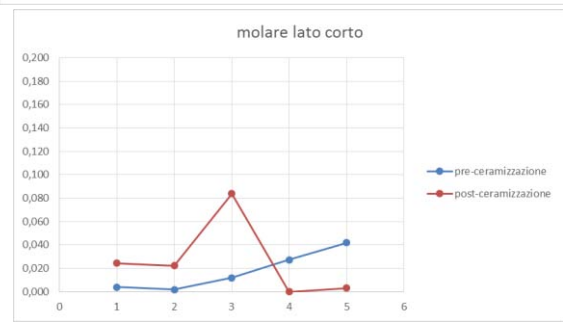
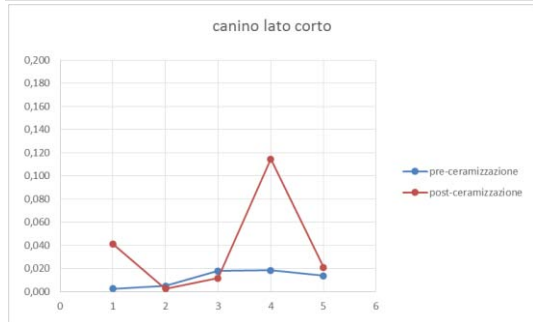
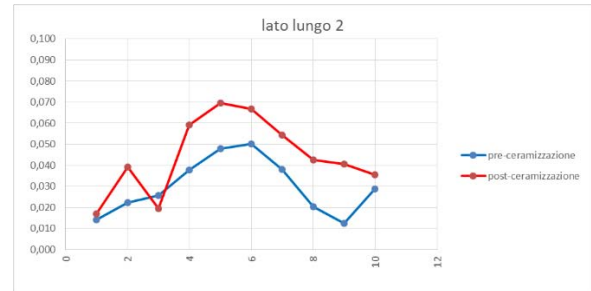
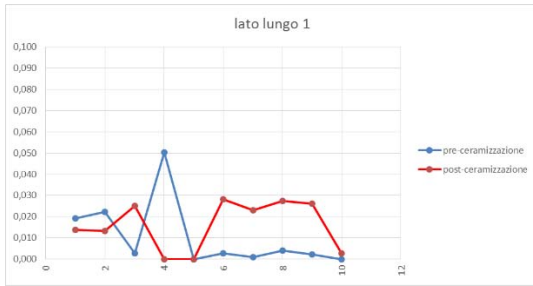
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP47

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
21	27	73	-23	100	SI



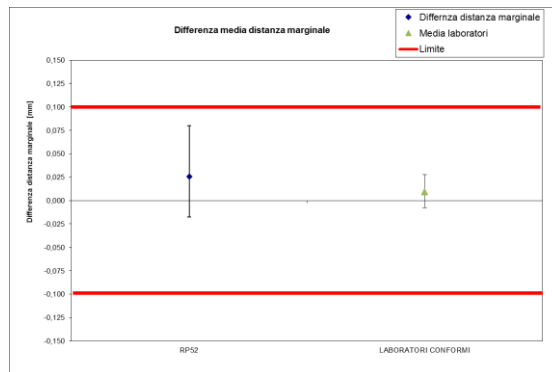
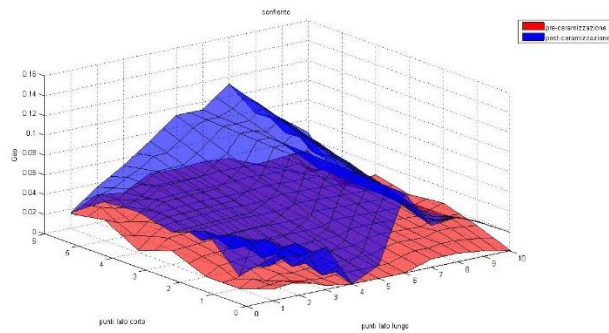
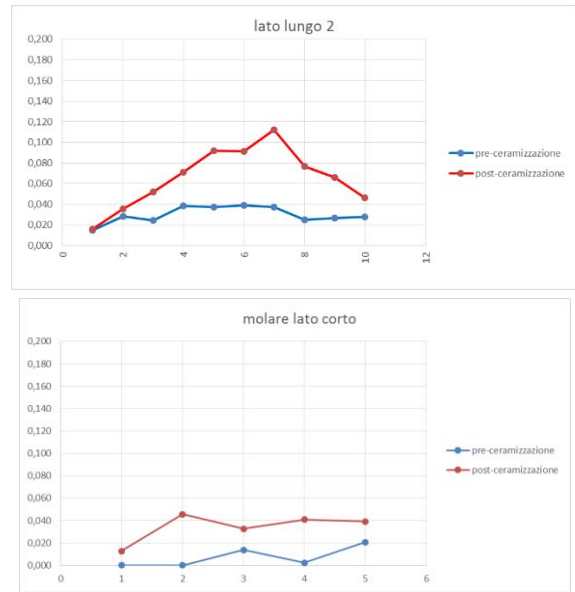
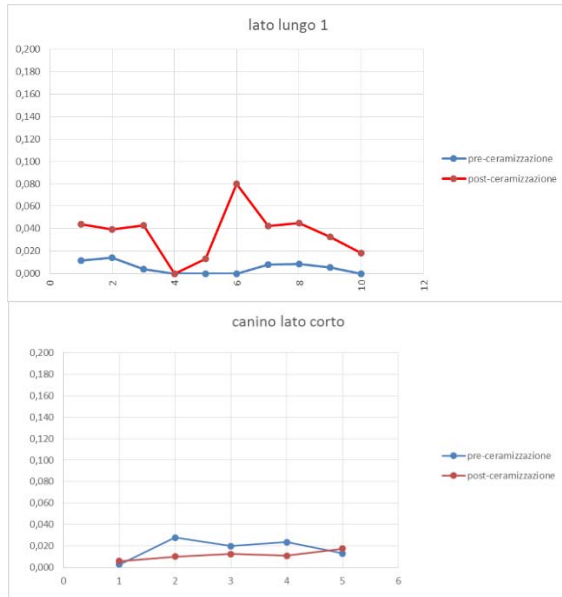
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP48

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
21	27	73	-23	100	SI



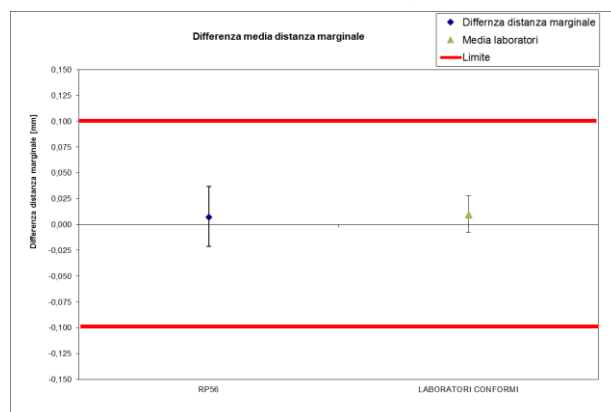
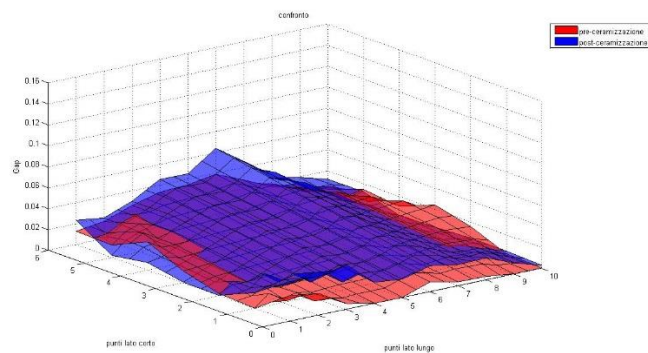
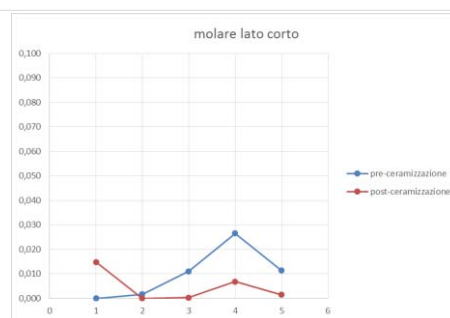
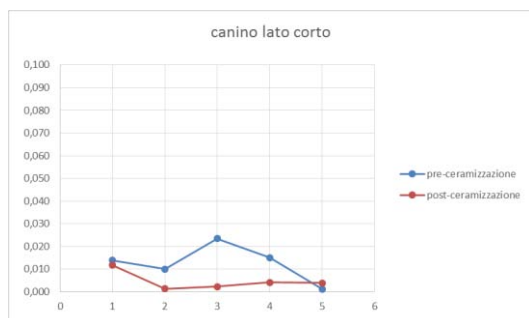
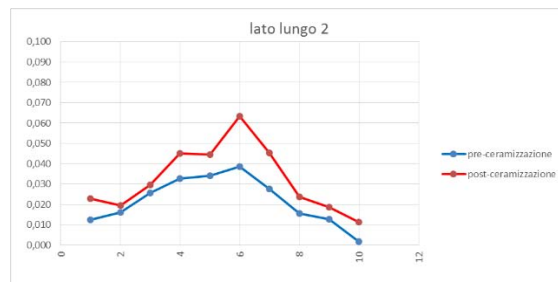
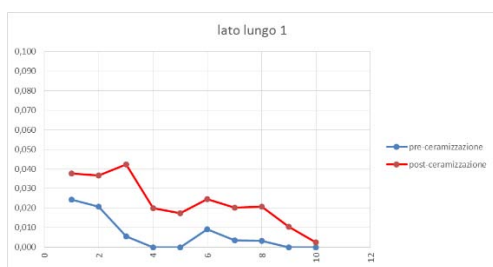
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP52

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
26	24	80	-18	100	SI



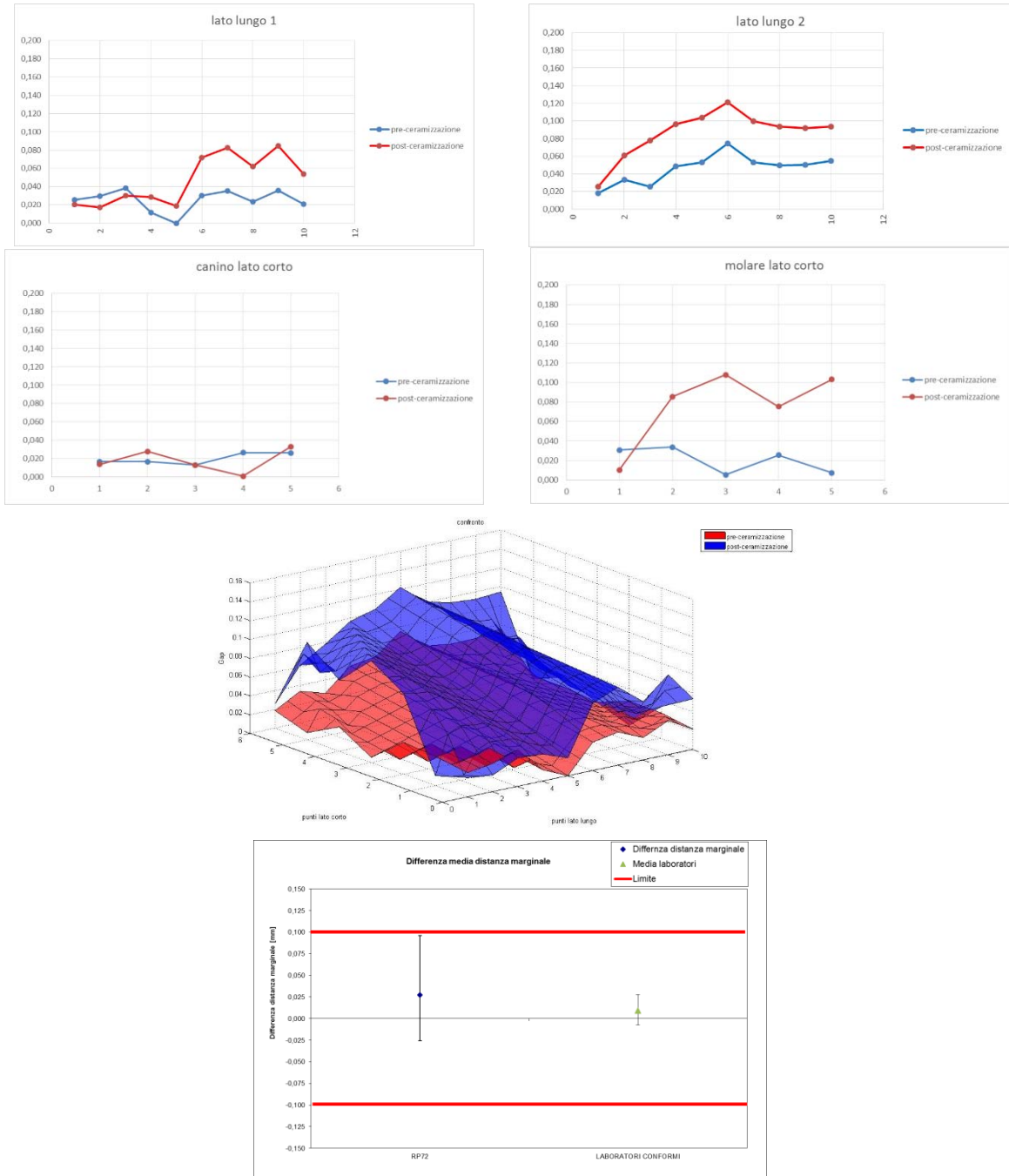
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP56

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
26	24	80	-18	100	SI



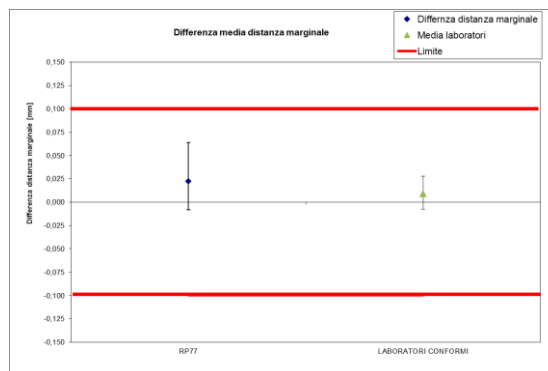
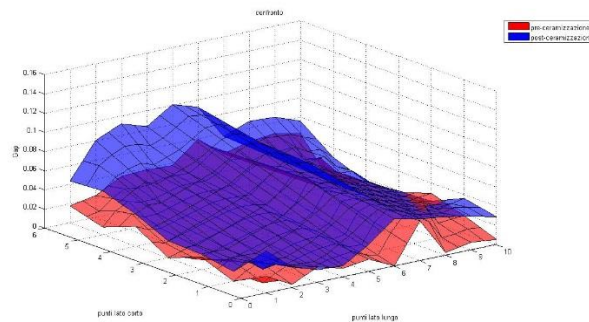
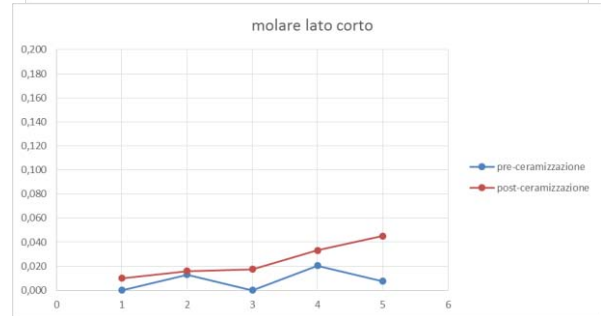
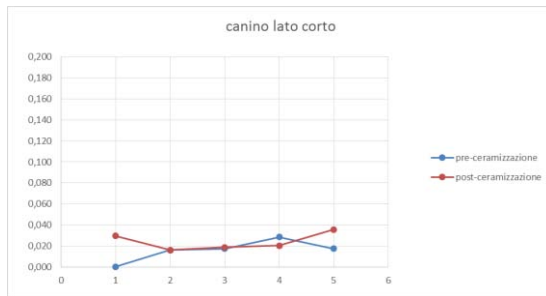
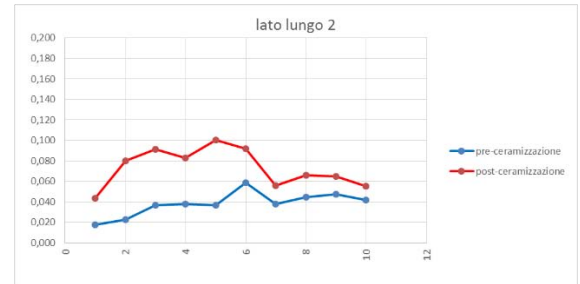
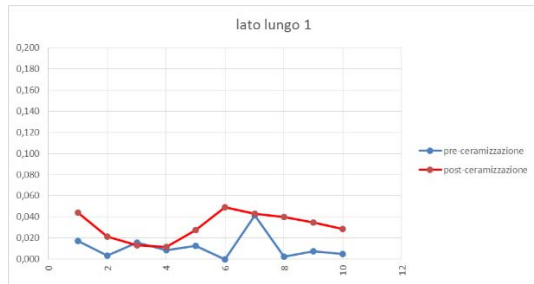
Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP72

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
27	28	96	-26	100	SI



Risultati delle misurazioni della distanza marginale: RP77

Differenza media di distanza marginale [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Differenza di distanza marginale massima [μm]	Differenza di distanza marginale minima [μm]	Limite [μm]	Conformità
22	19	64	-8	100	SI



RINGRAZIAMENTI

Arrivati al termine di questo percorso formativo durato cinque anni i ringraziamenti, oltre ad un fatto dovuto, diventano un piacere personale.

Un ringraziamento particolare va al prof. Roberto Meneghello, mio relatore, per la disponibilità, la cortesia e l'assistenza dimostrate; al prof. Gianmaria Concheri per la cortesia, l'appoggio e le dritte nei momenti di bisogno; all'ing. Matteo Turchetto e al prof. Gianpaolo Savio per il tempo e l'aiuto dedicatami.

Un grazie alla mia famiglia, ai miei genitori Emanuele e Gioia per avermi permesso di compiere questo percorso e per il sostegno, l'incoraggiamento e la fiducia costanti.

Un grazie, infine, a tutti i miei amici, compagni di questa avventura universitaria con i quali ho avuto il piacere di trascorrere momenti indimenticabili.