



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale
A.a. 2021/2022
Sessione di Laurea Marzo 2022

Progettazione e ottimizzazione strutturale di protesi dentali orientabili

Relatore:

Giorgio De Pasquale

Candidata:

Margherita Durastante

Margherita Durastante

“Progettazione e ottimizzazione strutturale di protesi dentali orientabili”

Abstract

L'implantologia dentale costituisce una delle principali soluzioni a seguito di perdita del dente. Questo lavoro di tesi mira alla progettazione e ottimizzazione strutturale di una protesi dentale orientabile in collaborazione con l'azienda *3P Implafavourite SRL*. Ciò che contraddistingue tale protesi dalle tipologie tradizionali è la connessione sferica a livello del moncone: il movimento angolare della vite all'interno della porzione sferica dello stesso permette di ottenere delle angolazioni comprese tra 0° e 30° . La possibilità di realizzare un certo range di inclinazioni tra gli assi longitudinali dell'impianto e della corona artificiale permette di sopperire a quei casi in cui non sia possibile raggiungere la condizione di parallelismo tra le corone utilizzando impianti allineati. La norma BS EN ISO 14801:2016 definisce le specifiche da rispettare durante le prove di carico su impianti dentali endossei: nel caso della protesi dentale in studio si è ritenuto opportuno fare riferimento alle indicazioni riguardanti un impianto che preveda l'utilizzo di monconi angolati. Si è quindi sviluppato il progetto dei componenti richiesti dalla norma. La progettazione del modello agli elementi finiti della protesi, svolta tramite il software Ansys Workbench, ha previsto una prima fase in cui si è ideato un modello semplificato con un unico volume. Il modello è stato testato al variare delle condizioni di vincolo e carico, il che ha permesso di ottenere un'idea preliminare della distribuzione degli sforzi sulla struttura. A seguito, si è elaborato un modello esplorativo semplificato per lo studio dei contatti tra i componenti, tramite il quale si è analizzato il comportamento di due tipologie di elementi di contatto. Solo una si è dimostrata adatta all'applicazione del contatto a superfici complesse e caratterizzate da curvature. Si è quindi importata la tipologia di contatto scelta al modello strutturale della protesi. Avendone verificato il funzionamento al variare delle condizioni di carico, sono state elaborate delle simulazioni con

l’obiettivo di riprodurre le condizioni di prova descritte dalla norma di riferimento, considerando la struttura nelle configurazioni di angolazione massima e di angolazione intermedia pari a 15°. I risultati ottenuti sono stati validati tramite test meccanici a rottura svolti tramite una macchina di prova universale presso il laboratorio DIMEAS del Politecnico di Torino, in conformità con le disposizioni della normativa di riferimento. La protesi, testata nelle due varianti previste (comprendente di moncone a sezione “normale” e moncone a sezione ridotta), non mostra cedimenti a livello dell’accoppiamento sferico, e giunge a rottura presso la porzione cilindrica del moncone. Uno sviluppo futuro del modello strutturale elaborato potrebbe tenere in considerazione l’attrito esistente tra le superfici dei componenti a contatto, e l’azione del precarico generato dall’accoppiamento filettato tra vite e cappetta sferica.

Indice

Abstract	2
Introduzione.....	5
Capitolo 1: Normativa di riferimento BS EN ISO 14801:2016	17
Capitolo 2: Progettazione componenti per prove sperimentali	20
Capitolo 3: Modellazione preliminare	25
3.1. Importazione dei file CAD sul software Solidworks	25
3.2. Importazione della struttura assemblata sul software Ansys Workbench	26
Capitolo 4: Modello semplificato con unico volume	34
4.1: Modello semplificato dell'impianto (cilindrico)	34
4.2: Analisi FEM preliminare con inclinazione moncone-vite pari a 30°	35
4.3. Affinamento della mesh e risultati del modello a volume unico	38
Capitolo 5: Modello esplorativo del contatto	55
5.1. Modello di contatto fra componenti	55
5.2. Modello di contatto fra materiali differenti	63
5.3. Modello di contatto impianto-moncone	67
5.4. Modello esplorativo dell'intera struttura	72
Capitolo 6 : Modello comprensivo di contatti tra i componenti	77
6.1. Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$	78
6.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$	80
6.3. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$	82
6.4. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$	85
6.5. Modifica del sistema di vincolo e della mesh	87
Capitolo 7: Modellazione delle condizioni di prova.....	89
7.1. Simulazioni preliminari a seguito delle modifiche introdotte	89
7.2. Simulazioni con ridimensionamento al contatto tra le superfici	92
Capitolo 8: Prove sperimentali.....	96
8.1. Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$	98
8.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$	105
8.3. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$	109
8.4. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 15^\circ$	111
Conclusioni.....	115
Bibliografia.....	119

Introduzione

L'implantologia dentale è diventata al giorno d'oggi una delle principali soluzioni a cui si ricorre in caso di perdita del dente. Le cause di perdita del dente possono essere molteplici, correlate principalmente allo stato dell'intero apparato dentale (precedenti perdite di denti, condizioni del periodonto, presenza di carie, ecc...), a fattori di tipo socio-demografico (età, fumo (1), alimentazione) o a patologie di varia natura come malattie cardiache, ictus, aterosclerosi, tumori alla bocca o alla gola, diabete, artrite reumatoide (2).

Da un punto di vista funzionale la perdita di un dente richiede necessariamente la sostituzione dello stesso, al fine di ripristinarne il rapporto con l'osso mandibolare o mascellare e di evitare la modifica della disposizione dei denti adiacenti, con conseguente compromissione della normale masticazione.

La funzione meccanica dell'organo dentale dipende:

- dalla forza e dalla durezza delle fasi costituenti la sua struttura (smalto e dentina);
- dalla forza dell'osso che lo supporta;
- dalla resilienza e le proprietà di trasferimento di carico della membrana parodontale.

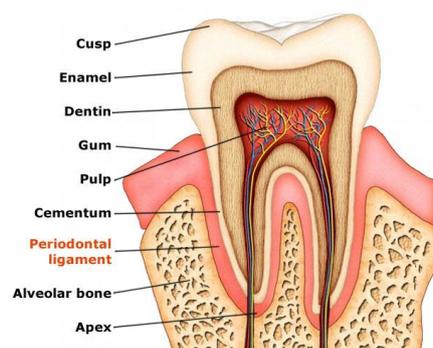


Figura 1: Struttura del dente e del legamento parodontale (2).

La membrana parodontale (detta anche *legamento parodontale*, o *periodonto*) consiste in un insieme di fibre di collagene orientate in modo obliquo rispetto alla superficie del dente, connesse sia alla radice dentale sia all'osso alveolare. Essa funge da strato di sospensione, e permette che il carico di compressione agente sul dente venga convertito essenzialmente in un carico di trazione agente su tutto l'osso circostante. Grazie alle proprietà viscoelastiche dei tessuti molli la membrana riesce ad assorbire energia e permette una distribuzione omogenea degli stress nell'osso, benefica per il mantenimento della normale struttura di esso.

Le forze a cui l'organo dentale è normalmente soggetto riguardano principalmente gli atti di masticazione e morso. Mentre il morso può essere descritto come un carico impulsivo, la masticazione prevede l'applicazione di un carico ciclico, definito dalle fasi di chiusura e apertura della mascella. In media, la fase di chiusura dura dai 400 ai 450 ms, mentre l'apertura dai 450 ai 500 ms (3). Si stima che la masticazione abbia, per ogni pasto, una durata totale tra gli 8 e i 16 minuti in media, cioè da 500 000 a un milione di cicli all'anno. Le forze di masticazione variano con l'età, con il sesso e con la posizione del dente. Di seguito si riportano dei valori tipici di forze di masticazione a seconda del dente considerato:

- Molari: da 390 a 800 N;
- Premolari e canini: da 208 a 288 N;
- Incisivi: da 155 a 200 N.

Mancuso et al. (4) mostra come la forza di masticazione massima nel caso di una protesi dentale fissa possa risultare pari al 60...200% della forza in condizioni fisiologiche (5). Lo stesso si verifica anche per quanto riguarda il morso. Tokmakidis et al. (6) definisce i carichi applicati ad una singola protesi dentale fissa come pari a nove volte i carichi presenti nel caso di una dentatura naturale.

Quando un dente viene sostituito da un impianto, quindi, bisogna fare in modo di emulare il più possibile le relazioni di tipo geometrico e meccanico con i denti adiacenti. Al giorno d'oggi il

trattamento implantare è stato documentato tanto quanto qualsiasi altra tecnica dentistica con prevedibile sopravvivenza a lungo termine e alta percentuale di successo (7).

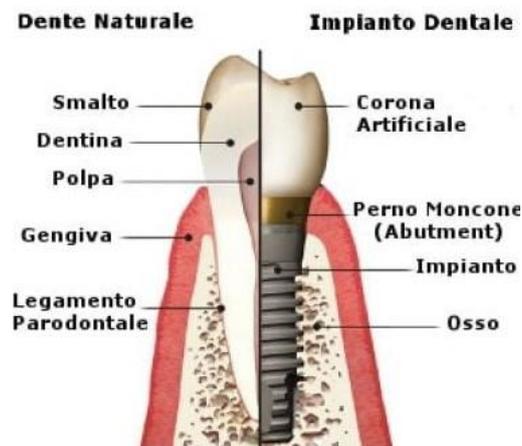


Figura 2: Struttura di un comune impianto dentale bifasico.

Come si può osservare in Fig. 2, la protesi dentale nella sua interezza è costituita da impianto, moncone (o *abutment*), eventuali viti di fissaggio e corona artificiale.

Al giorno d'oggi gli impianti endossei utilizzati si definiscono “root form” (*radice*): il corpo cilindrico o conico dell'impianto viene inserito direttamente in una cavità di una estrazione fresca, oppure in un foro ricavato dall'osso per trapanazione. Esso è quindi direttamente a contatto con il tessuto osseo e costituisce il componente maggiormente coinvolto nel processo di osteointegrazione. L'osteointegrazione è definita come la diretta connessione strutturale e funzionale tra il tessuto osseo “vivo” e la superficie dell'impianto (8), tra cui dovrebbe essere impedito qualsiasi tipo di movimentazione.

A ciò segue il fissaggio del moncone all'impianto, e questo può avvenire in due momenti differenti a seconda della tecnica chirurgica utilizzata. A tal fine si definiscono due tipologie di procedure, a cui si possono associare diversi componenti per quanto riguarda la protesi: la tecnica “one-stage” e la tecnica “two-stage”.

La tecnica “one-stage” prevede un solo intervento chirurgico:

- si espone l'osso con un'incisione dei tessuti gengivali;

- si inserisce l’impianto (l’osso è stato preventivamente preparato tramite trapanazione). Ad esso è aggiunta una *vite curativa*, che sporge dal tessuto gengivale;
- i tessuti vengono suturati;
- dopo qualche mese di guarigione la vite curativa viene sostituita con il moncone (9).

Nella maggior parte dei casi, in realtà, la tecnica “one-stage” prevede l’utilizzo di un impianto monofasico, propriamente detto “one-piece”, in cui l’impianto e il moncone costituiscono un unico componente. Durante l’intervento, quindi, non è prevista l’aggiunta di una vite curativa.



Figura 3: impianto “one-piece” prodotto dall’azienda 3P Implafavourite SRL.

La tecnica “two-stage”, invece, prevede due interventi chirurgici:

- dopo aver inciso i tessuti gengivali e aver preparato l’osso tramite trapanazione, si inserisce l’impianto. Ad esso viene avvitata una *vite di copertura* molto sottile, che ha il compito di coprire esclusivamente l’apertura dell’impianto;
- I tessuti gengivali vengono riposizionati e suturati al di sopra dell’impianto;
- Dopo un periodo di guarigione opportuno, i tessuti vengono nuovamente incisi. La vite di copertura viene sostituita con una vite curativa che sporge dai tessuti gengivali;
- I tessuti vengono suturati;
- Dopo un ulteriore periodo di guarigione, la vite curativa viene sostituita con il moncone (10).

Al fine di comprendere quale delle due tecniche sia da preferirsi, si è svolta una ricerca in letteratura, da cui però si può concludere che la scelta di una tecnica piuttosto che dell'altra dipenda da diversi fattori, come ad esempio la condizione dell'osso del paziente, le indicazioni del costruttore della protesi, il tempo di guarigione necessario al caso, ecc... e non da un'oggettiva maggior efficienza di una delle due procedure. Diversi autori dimostrano che utilizzando come parametro di valutazione uno degli aspetti più critici che riguardano l'implantologia, cioè la *perdita di osso marginale (MBL)* (8) intorno agli impianti, i due approcci siano da considerarsi pressoché equivalenti. Uno studio approvato dal *Comitato di Revisione istituzionale dell'Università di Scienze Mediche di Shiraz* riporta quanto osservato su 140 pazienti (100 donne e 40 uomini, in un range di età dai 18 ai 65 anni) che hanno richiesto complessivamente 310 trattamenti implantari. I pazienti sono stati divisi casualmente in due gruppi in base all'approccio "one-stage" o "two-stage". Grazie alle radiografie periapicali postoperatorie processate tramite il software Adobe Photoshop CS5 si è calcolato l'*MBL*. Sono stati svolti dei test indipendenti in modo da poter confrontare il valor medio dell'*MBL* tra i due gruppi. Sono stati considerati rilevanti valori di *p-value* (anche detto *livello di significatività*) inferiori di 0,05.

Vengono riportati i risultati dello studio:

Surgical Approach	Population (n)	Implants
Group A- One stage	9	17
Group B- Two stage	5	14

Figura 4: i gruppi soggetti allo studio suddivisi in base all'approccio chirurgico (8).

Surgical Approach	Mean±SD of MBL
One-stage	0.760±0.04 mm
Two-stage	0.842±0.04 mm

Figura 5: la media ± SD della perdita di osso marginale (8).

Il *p-value* per l'*MBL* era maggiore di 0,05, il che indica una differenza trascurabile tra entrambi gli approcci "one-stage" e "two-stage".

In generale, il vantaggio di un intervento "one-stage" consiste nella riduzione del periodo del trattamento, che porta il paziente a risultati estetici e funzionali in tempi minori (8). Solitamente si richiede un tempo di guarigione dell'impianto dai 2 ai 6 mesi (in alcuni casi viene caricato immediatamente). Inoltre, nel caso in cui non sia prevista la vite curativa e si utilizzino impianti monofasici, si potrebbe ridurre il rischio di contaminazione batterica tra le superfici delle protesi bifasiche e di compromettere i tessuti in via di guarigione intorno all'impianto, nonché l'eventuale formazione di infiltrazioni e micro-gap tra i componenti (11). Bisogna però considerare gli aspetti più critici che questa procedura comporta, come ad esempio la necessità di una pianificazione chirurgica e di una progettazione della protesi molto più accurate, come anche la gestione dell'inclinazione tra impianto e moncone.

L'intervento "two-stage", invece, viene tipicamente preferito nel caso in cui il paziente presenti una ridotta densità ossea e un ridotto spessore dell'osso, fattori che potrebbero comportare complicazioni durante il processo di osteointegrazione (come ad esempio pazienti fumatori, osteoporotici, ecc...). Dal momento che l'intervento a due fasi richiede per il paziente un'attesa complessiva di circa un mese in più rispetto all'inserimento di un impianto monofasico, è solitamente eseguito in quei casi in cui non si ha un'immediata necessità in termini estetici (8). Ad ogni modo la scelta di sottoporre il paziente a due interventi permette di garantire un follow-up più completo e graduale del soggetto nel periodo successivo all'inserimento dell'impianto. Infine, il fatto di inserire il moncone dopo il primo periodo di guarigione permette di poter scegliere separatamente la tipologia dei due componenti.

Nel caso in cui si prediliga (per il caso clinico in questione) una protesi che comprenda separatamente sia impianto che moncone, il mercato al giorno d'oggi propone svariate tipologie di connessioni tra essi. In particolare, si possono identificare tre classi in base all'interfaccia risultante con la cresta ossea: connessioni *no interface*, *butt-joints* (interno e esterno) e *platform-switched* (vedi Figura 5 e 6) (12).

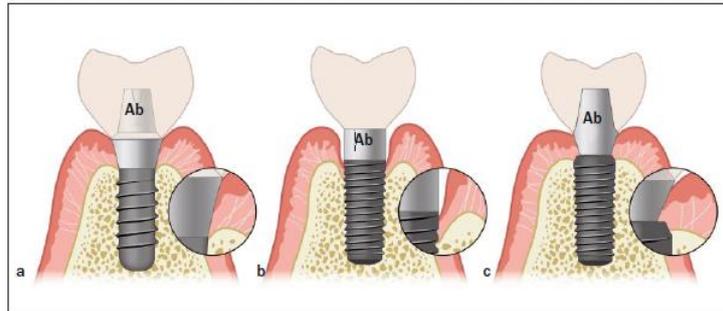


Figura 6: le tre tipologie principali di connessioni impianto-moncone: a) “no interface”, b) “butt-joint”, c) “platform-switched”. Ab= moncone. (12)

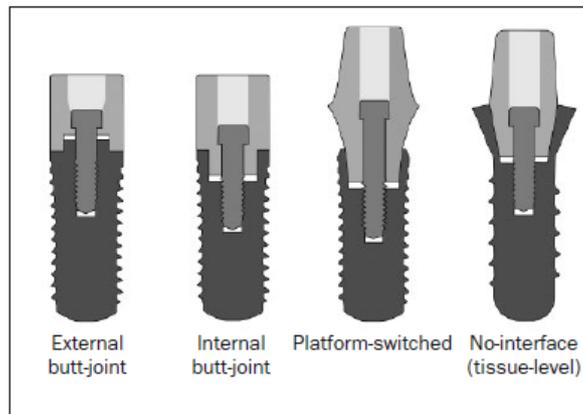


Figura 7: differenti tipologie di connessioni impianto-moncone (o corona) presso la cresta ossea: “butt-joint” esterno, “butt-joint” interno, “platform-switched” e “no-interface”. (12)

In più, vi sono state delle innovazioni nel tempo anche per quanto riguarda il meccanismo di connessione vero e proprio tra impianto e moncone, come il meccanismo *a vite* e il meccanismo di tipo *cono Morse* (12).

Nel caso di una connessione a vite, la vite viene stretta tramite una coppia che genera un precarico sui componenti. Il precarico deve essere inferiore alla resistenza del materiale, ma maggiore delle forze che normalmente incorrono durante la masticazione. Generalmente il moncone e l'impianto vengono modificate con specifiche caratteristiche in modo da agevolarne il posizionamento e eventualmente prevenire il movimento rotazionale dei componenti che faciliterebbe l'allentamento della vite. A questo scopo si realizzano tipicamente forme esagonali maschio/femmina o coniche maschio/femmina (13). La connessione può essere realizzata sia tramite una filettatura sulla protrusione del moncone (e ovviamente anche sull'impianto), sia tramite l'inserimento di una vite all'interno del moncone.

Nel caso di connessione conometrica, il foro centrale dell'impianto presenta una conicità. Anche la protrusione del moncone presenta una conicità dello stesso angolo. Quando il moncone viene inserito nell'impianto, si esercita sui componenti una forza di pura compressione lungo la direzione verticale, e la connessione viene serrata. Questo meccanismo di connessione è funzione dell'attrito esistente tra le superfici (13).

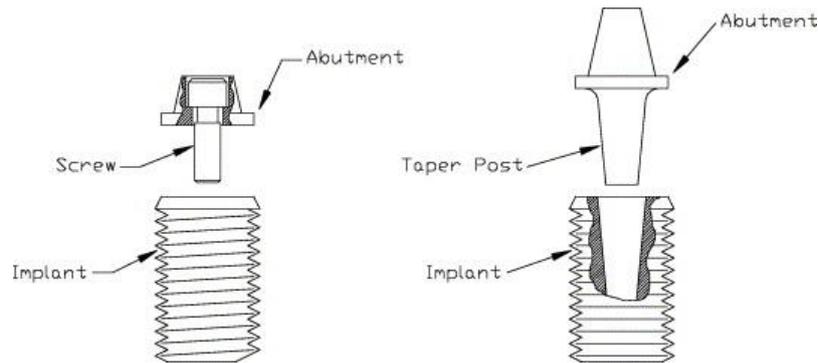


Figura 8: connessione a vite e connessione conometrica (13).

In caso di carenza ossea da parte del paziente e impossibilità di effettuare un intervento di aumento osseo estensivo (14) spesso è necessario collocare gli impianti a delle inclinazioni che risultano difficili da realizzare utilizzando monconi convenzionali (0°) (15), motivo per cui si ricorre all'utilizzo di monconi che presentino una certa inclinazione. I monconi angolati però potrebbero trasferire carichi indesiderati all'impianto o all'osso, e quindi compromettere la prognosi del trattamento. Inoltre, alcuni studi suggeriscono che per gli impianti inclinati i momenti flettenti sono maggiori a livello del moncone angolato (14). Uno studio pubblicato dal "National Journal of Maxillofacial Surgery" (15) propone una valutazione della distribuzione delle tensioni intorno a un impianto dentale considerando angolazioni del moncone differenti (nello specifico 0° , 10° , 15° e 20°). A tal fine è stato realizzato un modello agli elementi finiti tramite il quale si sono simulate condizioni di carico assiale e obliquo fisiologiche. Ciò che si è evinto è che aumentare l'angolazione del moncone comporta effettivamente un aumento delle tensioni di compressione e di trazione, che però si mantengono al di sotto del limite di tolleranza dell'osso. Allo stesso modo uno studio pubblicato da "Biology" (14) riporta i risultati di una ricerca nella letteratura esistente che ha permesso di realizzare un confronto tra 3897 impianti, di cui 2036 assiali e 1951 angolati. I risultati ottenuti in

termini di sopravvivenza e successo dell'impianto sono simili. In più, non si sono riscontrate differenze statisticamente significative per quanto riguarda l'MBL e le complicazioni prostodontiche/biologiche riportate negli articoli sono state ritenute troppo varie e distribuite irregolarmente tra le due tipologie di impianto.

L'utilizzo di monconi angolati però aumenta il costo e la complessità del processo di fabbricazione e di mantenimento (16). In merito a ciò si vuole citare un'alternativa, cioè *la connessione sferica*. Da una ricerca in letteratura si è evinto come l'utilizzo di una connessione che permetta delle rotazioni tridimensionali tra impianto e moncone (come anche l'utilizzo di monconi sferici) costituisca una soluzione valida per i casi clinici descritti precedentemente in merito ai monconi angolati e per correggere eventuali disallineamenti degli impianti.

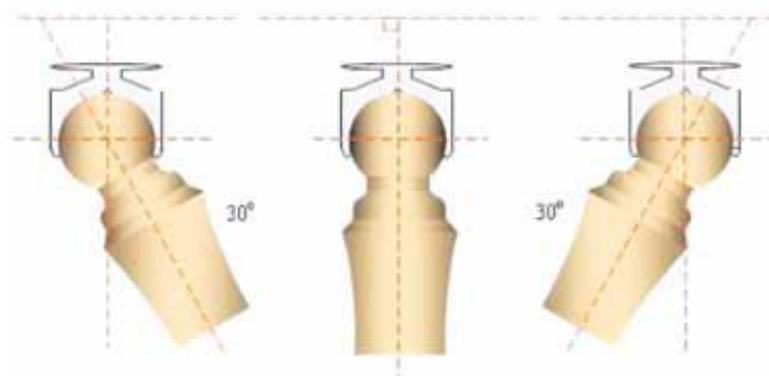


Figura 9: esempio di connessione sferica (17).

Il fatto di consentire una rotazione tra i componenti permette di ottenere un'orientazione parallela dei monconi, anche quando gli impianti divergono fino al 60° l'uno dall'altro o 30° rispetto all'asse verticale (17). In termini di proprietà meccaniche e di tenuta, le connessioni sferiche possono essere utilizzate con successo in applicazioni di restauro dove siano previsti impianti non paralleli. È sconsigliato invece l'utilizzo di impianti paralleli con monconi non paralleli (16).

Una volta assemblati impianto, moncone ed eventuali componenti aggiuntivi si procede con il posizionamento della corona artificiale. Anche in questo caso le modalità di connessione della corona possono essere diverse. Si sottolineano in particolare la *connessione conometrica*, la *connessione a vite* e la *connessione cementata*.



Figura 10: connessione a vite e connessione cementata.

I vantaggi di un approccio che preveda l'utilizzo del cemento consistono in un più facile raggiungimento della condizione di “*passive-fit*” (18) (termine con cui generalmente si indica una condizione per cui la corona non causi carichi statici e deformazioni nella protesi o nella matrice ossea circostante (19)) grazie allo strato di cemento tra il moncone e la corona, l'assenza del foro d'accesso per la vite e quindi la possibilità di avere un piano oclusale intatto e un maggior controllo dell'occlusione. Il principale svantaggio di una protesi cementata, invece, risiede nella difficoltà di rimuovere tutto il cemento in eccesso, il che può portare all'insorgenza di disturbi intorno all'impianto come *mucositi* e *perimplantiti*.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la progettazione e l'ottimizzazione di una protesi dentale orientabile in collaborazione con l'azienda *3P Implafavourite SRL*. Ciò che distingue questa particolare tipologia di protesi è la *connessione sferica* a livello del moncone. È difatti composta da:

- 1) Impianto conico;
- 2) Moncone sferico;
- 3) Vite sferica;
- 4) Cappetta sferica;
- 5) Cappetta per corona.



Figura 11: a) moncone sferico $\text{Ø}3.2$, b) vite sferica, c) cappetta sferica, d) cappetta per corona.

Il movimento angolare della vite all'interno della porzione sferica del moncone permette di ottenere delle angolazioni comprese tra 0° e 30° .

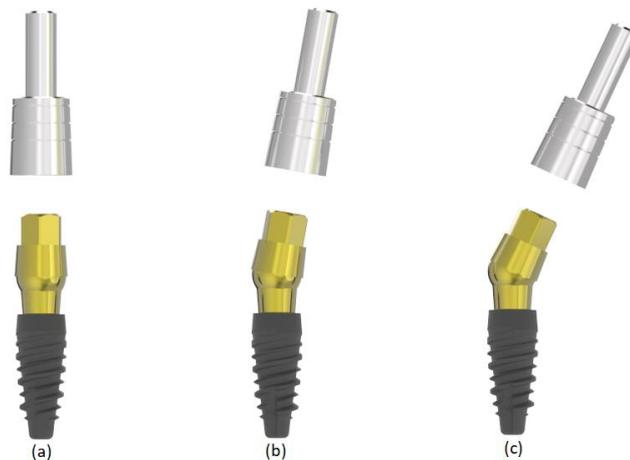


Figura 12: struttura assemblata con possibili angolazioni: a) 0° , b) 15° , c) 30° .

Viene sfruttato il principio della connessione conometrica: l'impianto è caratterizzato da un foro centrale che presenta una conicità pari a 2° , così come il moncone, anch'esso contraddistinto da una conicità di pari angolo, viene inserito e bloccato all'interno del foro tramite una certa pressione. A differenza delle connessioni maggiormente utilizzate fin ora, in cui è previsto il raggiungimento di una condizione "flat-to-flat" (si applica una forza di compressione al moncone fino ad ottenere il contatto tra la base piana del moncone e l'impianto), l'utilizzo del principio a cono Morse prevede che il contatto tra moncone e impianto si realizzi essenzialmente tramite la conicità dei due

componenti, e quindi tramite le superfici laterali del moncone e del foro (tra la base del moncone e l'impianto, infatti, viene mantenuta una certa distanza). In questo modo si ottiene un contatto intimo tra le superfici, e si ha un miglioramento delle prestazioni in termini di contaminazioni batteriche.

All'interno della porzione sferica del moncone si inserisce la vite sferica. La rotazione dell'unità sferica della vite all'interno del moncone permette di ottenere l'angolazione desiderata, che viene poi fissata tramite l'aggiunta della cappetta sferica: sia la porzione cilindrica della vite che il foro della cappetta sferica, infatti, presentano una filettatura complementare. In fase di assemblaggio, l'avvitamento della cappetta alla vite viene realizzato applicando una *coppia di serraggio nominale* pari a $50 \text{ N}^*\text{cm}$ per mezzo di un cricchetto dinamometrico. L'applicazione della coppia di serraggio provoca la compressione della cappetta che si “stringe” attorno al moncone. La combinazione della trazione esercitata sulle vite sferica e della compressione sulla cappetta realizza il serraggio all'angolazione desiderata. A questo punto si aggiunge la cappetta su cui successivamente verrà montata la corona artificiale.

Il meccanismo appena descritto permette di sfruttare quanto detto per le connessioni sferiche: potendo realizzare un certo range di inclinazioni tra impianto e asse della corona artificiale si può sopperire a tutti quei casi citati nella descrizione dei monconi angolati (e quindi, ad esempio, casi clinici in cui la morfologia ossea non permetta l'utilizzo di protesi allineate), senza però la necessità di progettare il moncone con una specifica angolazione (il che non permette eventuali correzioni nel momento dell'inserimento).

Capitolo 1

Normativa di riferimento BS EN ISO 14801:2016

La normativa di riferimento per un impianto dentale endosseo è la norma BS EN ISO 14801:2016 "Odontoiatria - Impianti - Prova di carico dinamico per impianti dentali endossei". Nel documento vengono descritte le modalità con cui devono essere svolti i test sperimentali nel caso di un impianto dentale. Verranno riportati i passi principali, utilizzati per progettare le condizioni di prova e l'occorrente necessario.

Innanzitutto, la norma prevede che nel caso di un impianto endosseo composto da più parti, esso debba essere testato come assemblato in accordo con il suo utilizzo desiderato (ISO 14801:2016, 4.2 *Multi-part endosseous dental implants*).

In merito alla descrizione dei dispositivi di carico da utilizzare (ISO 14801:2016, 5.2 *Loading geometry*), gli impianti vengono suddivisi come segue:

- Impianti che prevedano l'utilizzo di soli monconi allineati;
- Impianti che prevedano l'utilizzo di monconi angolati.

Nel caso della protesi dentale in collaborazione con l'azienda *3P Implafavourite SRL* si è ritenuto opportuno riferirsi alle indicazioni riguardanti un impianto che prevedesse l'utilizzo di monconi angolati, dal momento che una morfologia in cui sia prevista un'angolazione è in ogni modo sfavorevole da un punto di vista tensionale rispetto ad una morfologia allineata.

Un impianto dentale endosseo che preveda l'utilizzo di monconi angolati deve essere vincolato considerando che l'angolo con la direzione di carico della macchina di prova deve essere maggiore

di $10^\circ+2^\circ/-1^\circ$ rispetto all'angolo compreso tra l'asse longitudinale centrale dell'impianto e l'asse longitudinale centrale della porzione inclinata del moncone, indicato come α .

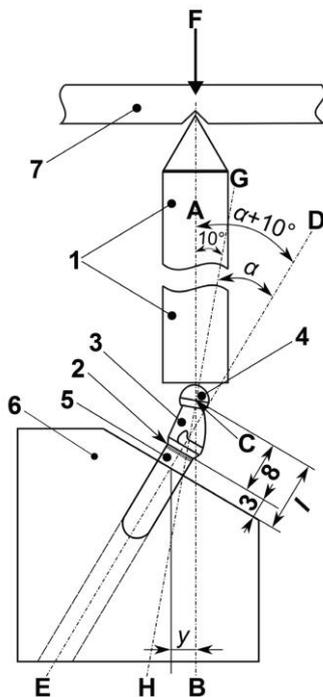


Figura 1.1: schema dell'allestimento di prova per sistemi con monconi angolati:

- 1) Dispositivo di carico;
- 2) Livello osseo nominale;
- 3) Moncone;
- 4) Membro di carico emisferico;
- 5) Impianto;
- 6) Supporto per campione;
- 7) Applicazione della forza.

Il *centro di carico* deve cadere nell'intersezione tra l'asse centrale longitudinale dell'estremità libera del moncone e il piano normale all'asse longitudinale dell'impianto. Deve inoltre essere localizzato ad una distanza di 11 mm (Figura 1.1, l) dal livello di supporto dell'impianto.

Il *carico* (F) deve essere applicato dalla macchina di prova tramite un membro di carico resistente alla deformazione con una *superficie di contatto emisferica* che trasferisca il carico. Deve essere connessa o posta al di sopra dell'estremità libera del moncone. Il centro di carico, che coinciderà con il centro dell'emisfera, deve trovarsi sull'asse longitudinale centrale dell'estremità libera del moncone.

Il carico deve essere applicato alla superficie emisferica tramite un dispositivo di carico (1 in Fig. 1.1) che entri in contatto con la superficie emisferica tramite una superficie piana normale alla direzione di carico.

Il dispositivo di carico che contiene la superficie piana non deve essere vincolato lungo la direzione trasversale, in modo da non ridurre l'intensità del momento flettente applicato [...].

La porzione di ancoraggio all'osso del campione deve essere fissata in un dispositivo di vincolo rigido. La geometria del dispositivo di vincolo deve essere in qualche modo fedele a quanto si osserva in Figura 1.1, e non deve deformare il campione.

Il dispositivo deve vincolare il campione apicalmente ad una distanza pari a $3,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ dal livello osseo nominale, come specificato dalle istruzioni per l'uso dal costruttore.

I *test ciclici*, infine, devono essere condotti applicando un carico uniassiale lungo la direzione A-B (Fig. 1.1). Il carico deve variare sinusoidalmente tra un valore di picco nominale e il 10% del suo valore. La *frequenza del carico* non dovrebbe eccedere i 15 Hz. Nel caso di test in mezzo liquido, la frequenza deve essere $\leq 2 \text{ Hz}$.

Capitolo 2

Progettazione componenti per prove sperimentali

In primo luogo, sono stati progettati tramite software *Solidworks* i componenti richiesti dalla norma BS EN ISO 14801:2016 per il set-up di prova:

- Supporto per i campioni;
- Cappetta sferica.

Sebbene la trattazione analitica riguarderà sia l'impianto CONO-IN 3,8 x 10 mm (dicitura con cui si indica il diametro, pari a 3,8 mm, e la lunghezza, pari a 10 mm) sia l'impianto CONO-IN 3,2 x 8 mm, le prove sperimentali sono state condotte solo per quest'ultimo (come da disposizioni dell'azienda costruttrice).

Dal momento che la protesi oggetto di studio permette di ottenere angolazioni tra l'asse verticale del moncone sferico e l'asse dell'impianto comprese tra 0° e 30° , si è scelto di considerare in sede di prova l'angolazione più sfavorevole da un punto di vista tensionale, pari a 30° , e un'angolazione intermedia pari a 15° .

La progettazione di entrambi i componenti (supporto e cappetta sferica) ha richiesto di considerare l'angolazione in esame, e di garantire in entrambi i casi studiati l'angolazione pari a 10° rispetto alla direzione verticale del carico applicato.

L'azienda *3P Implafavourite SRL* ha fornito un file CAD di una cappetta con superficie sferica (vedi Fig. 2.1), che è stato modificato in base al caso in esame in modo che il centro di carico fosse sempre situato a 11 mm dal livello di supporto dell'impianto, come prescritto dalla norma.



Figura 2.1: file CAD di una cappetta con superficie sferica fornita da "3P Implafavourite"

Dal momento che l'impianto CONO-IN in studio viene posto a filo cresta ossea se i tessuti molli (gengiva) presentano uno spessore di almeno 2,5 mm, si è scelto di calcolare 3 mm dalla sommità dell'impianto per trovare il livello di supporto dell'impianto (come sancito dalla normativa).

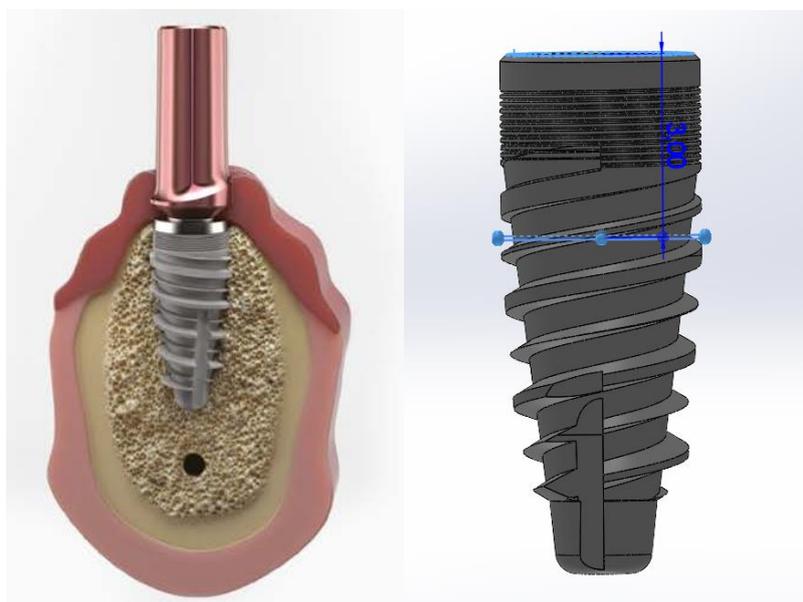


Figura 2.2: calcolo del livello di supporto dell'impianto a partire dal livello osseo nominale.

A partire dal livello di supporto dell'impianto si sono considerati 11 mm per trovare l'altezza del piano su cui dovesse giacere il centro di carico, al fine di dimensionare correttamente la cappetta.

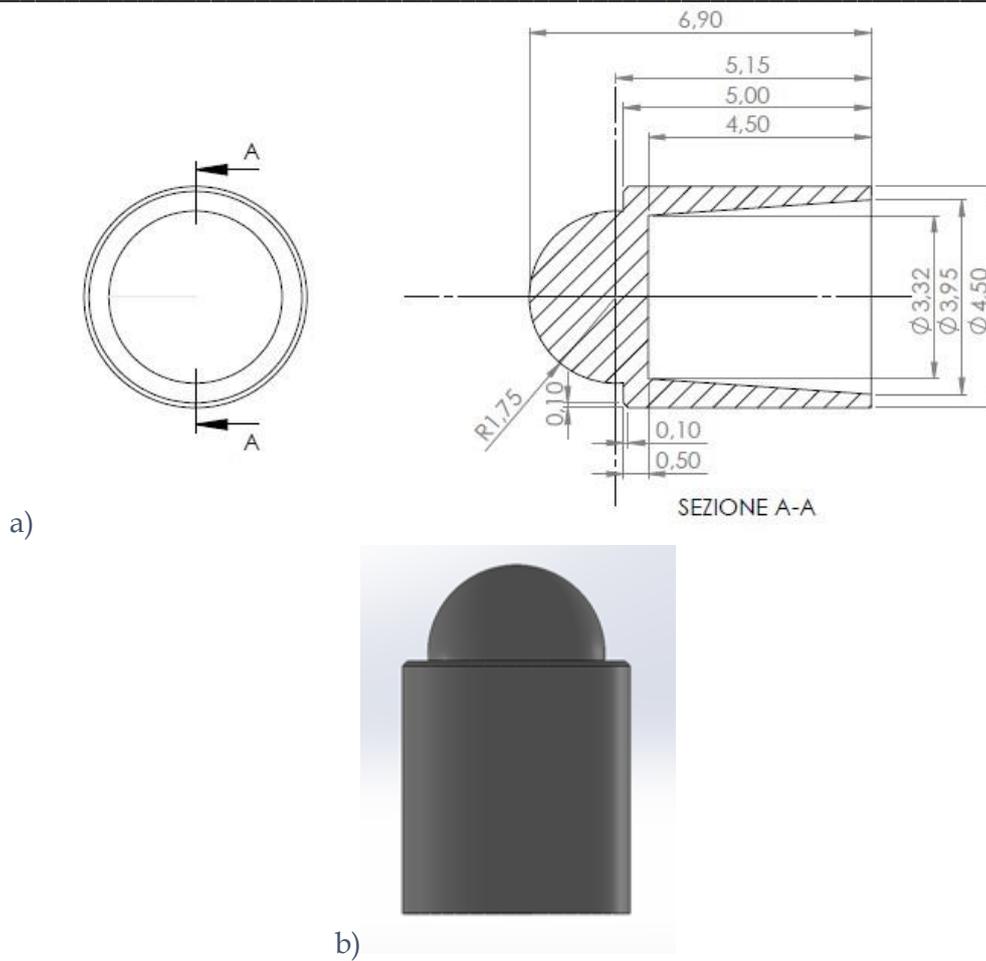


Figura 2.5: cappetta sferica dimensionata considerando un'inclinazione pari a 15°.

Le cappetta sferiche sono state realizzate in *titanio grado 5*.

Per quanto riguarda il supporto si è tenuta in considerazione la direzione verticale del carico applicato, e si è progettato il componente in modo che in entrambi i casi di angolazione studiati venisse mantenuto l'angolo pari a 10° tra l'asse longitudinale della vite sferica e la direzione di carico.

Vengono riportate le immagini di progetto finali dei supporti, considerando le inclinazioni pari a 30° e a 15°:

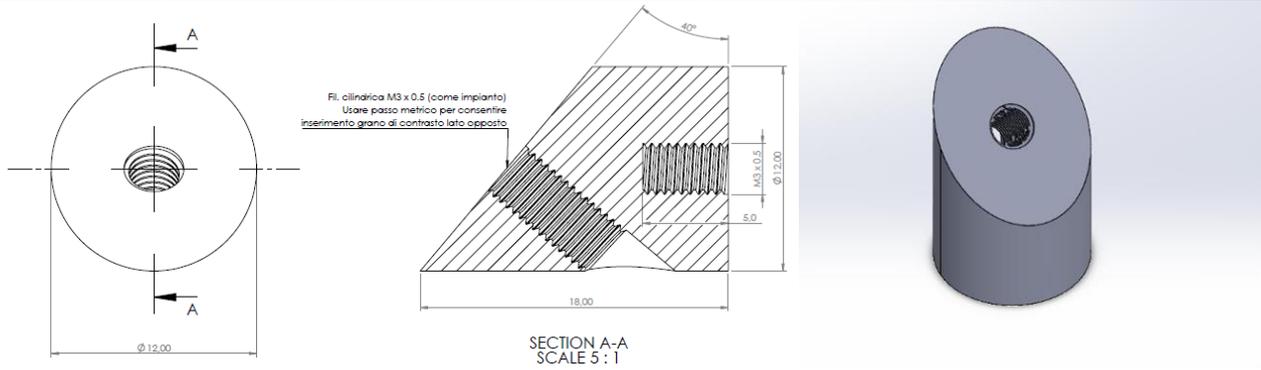


Figura 2.6: supporto per campione dimensionato considerando un'inclinazione pari a 30°.

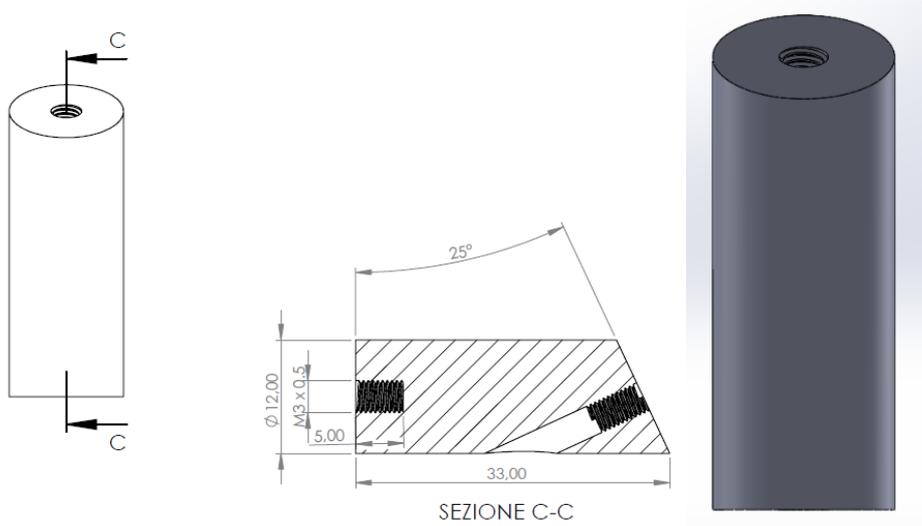


Figura 1: supporto per campione dimensionato considerando un'inclinazione pari a 15°.

Anche il supporto è stato realizzato in titanio grado 5.

Capitolo 3

Modellazione preliminare

3.1. Importazione dei file CAD sul software Solidworks

I file CAD dei diversi componenti costituenti la protesi (forniti dall'azienda "3P Implafavourite") sono stati importati sul software Solidworks. In prima analisi la cappetta funzionale alla connessione con la corona artificiale è stata modificata rimuovendo la porzione adibita alla connessione (vedi Figura 8), in modo da ricreare delle condizioni più simili alle condizioni di prova (dove invece verrà utilizzata la cappetta emisferica).

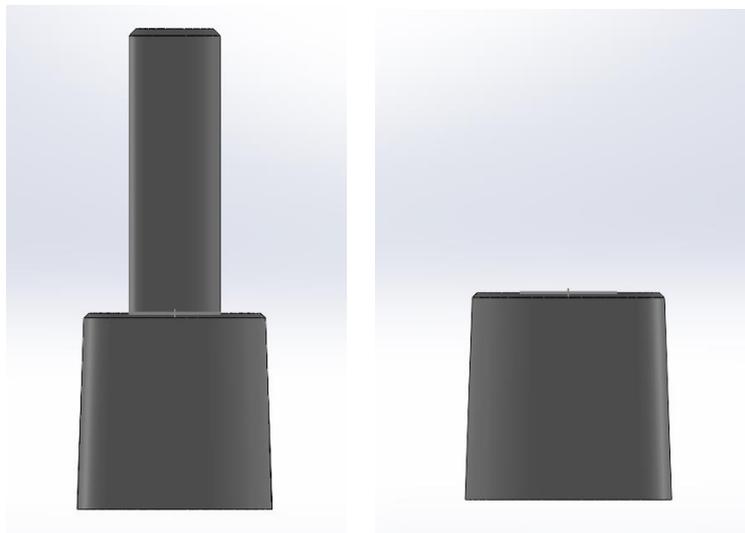


Figura 1.3: cappetta prima (sinistra) e dopo la modifica (destra).

I componenti sono stati poi assemblati come da indicazioni dell'azienda costruttrice, e in prima istanza non è stata considerata alcuna inclinazione tra asse dell'impianto e asse della vite sferica (0°).

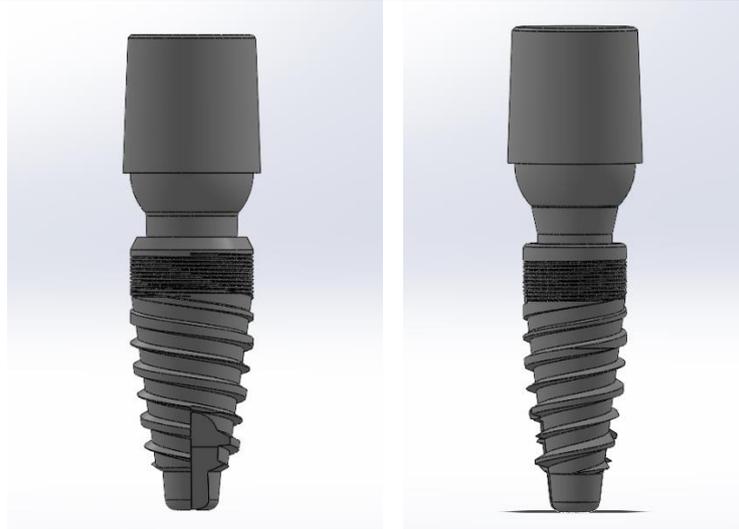


Figura 2.3: modelli 3,8x10 mm (sinistra) e 3,2x8 mm (destra) assemblati considerando un'inclinazione pari a 0°.

3.2. Importazione della struttura assemblata sul software Ansys

Workbench

Le strutture assemblate sono state importate sul software Workbench.

3.2.1. Scelta dei materiali

L'azienda costruttrice ha indicato come materiali costituenti la protesi il *titanio grado 4* e il *titanio grado 5*. Di seguito vengono riportate le proprietà dei due materiali che verranno utilizzate durante le simulazioni:

Material	Young Modulus (MPa)	Poisson Ratio	σ_{yield} (MPa)	Max. of Deformation (%)	σ_{max} (MPa)	Reference
Titanium grade 4	104 500	0.37	650	16	798	42
Titanium grade 5 (Ti 6AL 4V ELI)	114 000	0.33	940	17	1054	43

Figura 3.3: proprietà meccaniche del Ti grado 4 e 5 (3).

I materiali sono stati considerati isotropici e omogenei.

3.2.2. Modello 3,8x10 mm, simulazioni preliminari

Coma da indicazione dell'azienda costruttrice, si è assegnato il titanio grado 4 come materiale costitutivo per ciascun componente.

Dopo aver importato la struttura assemblata si è verificato l'avvenuto riconoscimento da parte del software dei cinque componenti distinti (cappetta per prove, cappetta sferica, vite sferica, moncone sferico e impianto).

Una volta appurato ciò, si è scelto di mantenere in prima analisi le impostazioni relative ai contatti tra i diversi componenti generate automaticamente dal software. Con una tolleranza di circa 0,04 mm sono state rilevate cinque regioni di contatto:

- 1) Moncone sferico - impianto;
- 2) Moncone sferico - vite sferica;
- 3) Moncone sferico - cappetta sferica;
- 4) Vite sferica - cappetta per prove;
- 5) Cappetta sferica - cappetta per prove.

Si è generata una *mesh tetraedrica* di lato massimo pari a 0,5 mm (massimo perché si è mantenuta attiva l'opzione "dimensionamento adattivo", *adaptive sizing*, tramite il quale il software rileva automaticamente e perfeziona le zone in base alla curvatura e alla vicinanza). Sapendo (dalla letteratura e dalle indicazioni dell'azienda costruttrice) che il moncone risulta generalmente il componente più sollecitato, si è utilizzato il comando *Refinement* al fine di dimezzare il lato della mesh presso la porzione cilindrica del suddetto componente (Fig. 3.4).



Figura 3.4: mesh tetraedrica di lato massimo pari a 0,5 mm. A destra, perfezionamento della mesh applicato alla porzione cilindrica del moncone.

La struttura è stata vincolata tramite dei vincoli ad incastro (comando “Fixed Support”) applicati alla base dell’impianto e a file di nodi lungo la direzione longitudinale dello stesso (3) (Fig. 3.5).

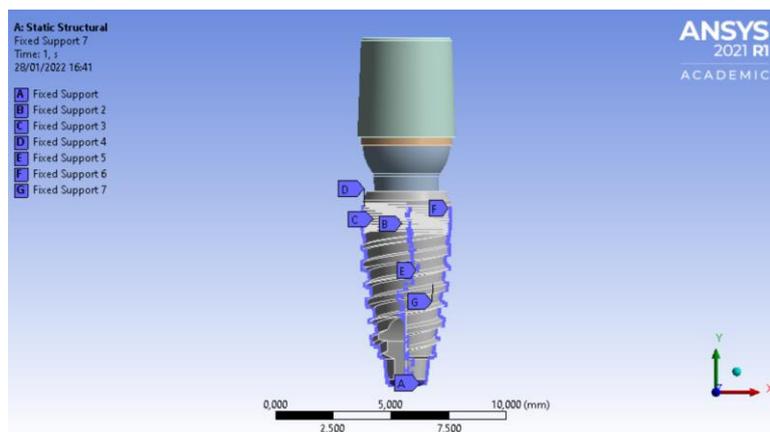


Figura 3.5: vincoli ad incastro applicati a file di nodi lungo la direzione longitudinale dell’impianto.

Di seguito verranno riportate più condizioni di carico simulate, al fine di ottenere un’idea preliminare del comportamento della struttura. Si analizzeranno i risultati solo in termini tensionali:

- 1) Carico verticale di modulo pari a 190 N applicato alla superficie superiore della cappetta per prove:

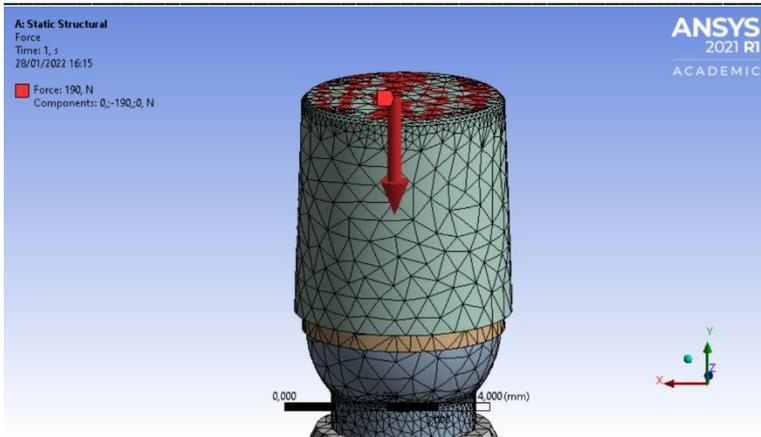


Figura 3.6: carico verticale di modulo pari a 190 N.

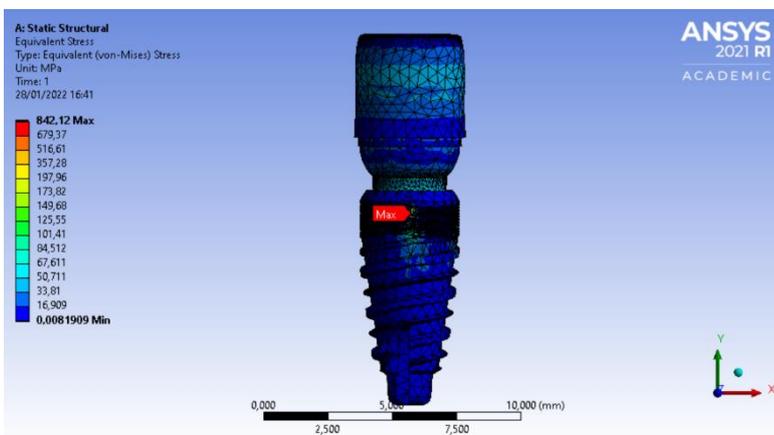


Figura 3.7: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo l'intera struttura nel caso di carico verticale.

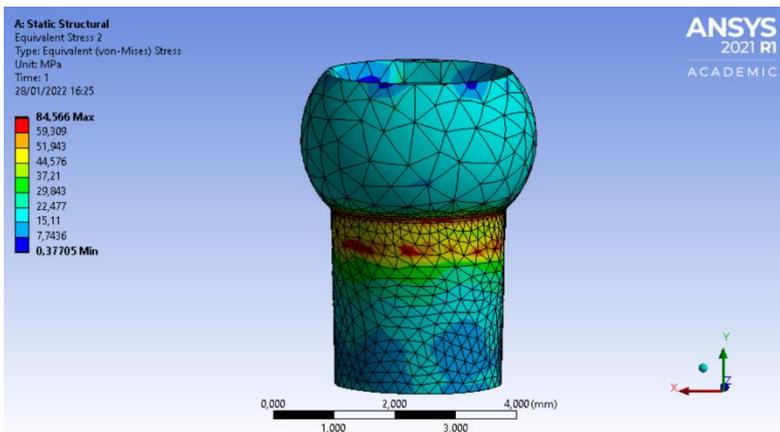


Figura 3.8: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo il moncone sferico nel caso di carico verticale.

Viene riportata la distribuzione della tensione equivalente di Von-Mises. Il picco tensionale si colloca presso gli incastraggi, ma si può reputare “fittizio” e dovuto proprio alla definizione puntuale degli stessi, non ottenibile nella realtà. Analizzando la distribuzione degli sforzi del solo moncone, si nota come si mantengano di gran lunga al di sotto del limite di snervamento del materiale (pari a 650 MPa), e si concentrino principalmente sulla sommità della porzione cilindrica.

- 2) *Carico di modulo pari a 190 N inclinato di 30° rispetto al piano occlusale (piano XZ) applicato alla superficie superiore della cappetta per prove:*

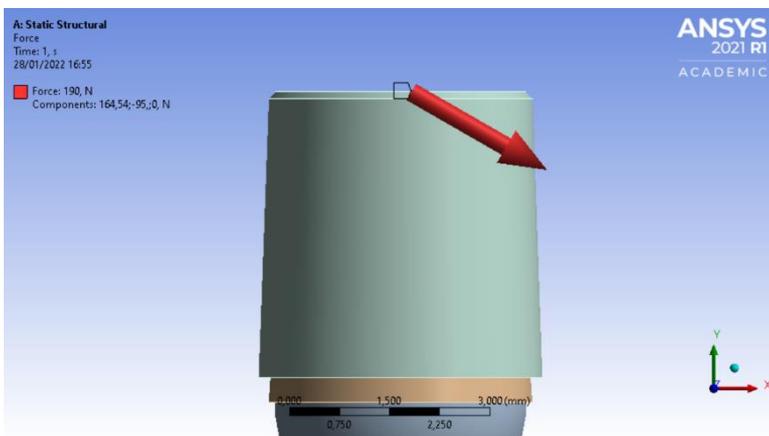


Figura 3.9: carico di modulo pari a 190 N con inclinazione di 30° rispetto al piano occlusale.

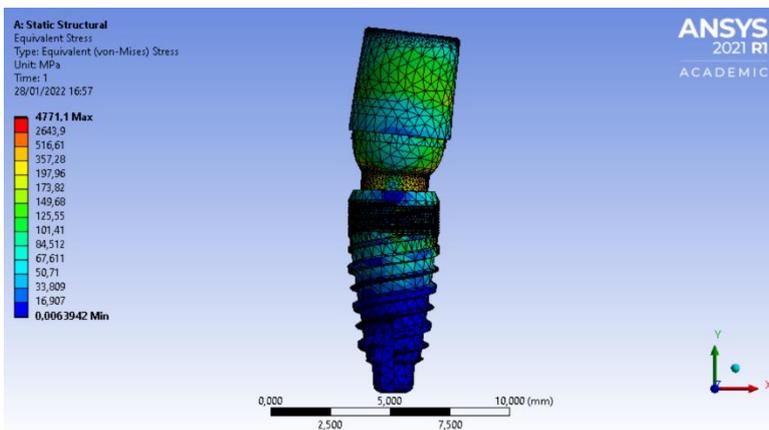


Figura 3.10: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo l'intera struttura nel caso di carico obliquo.

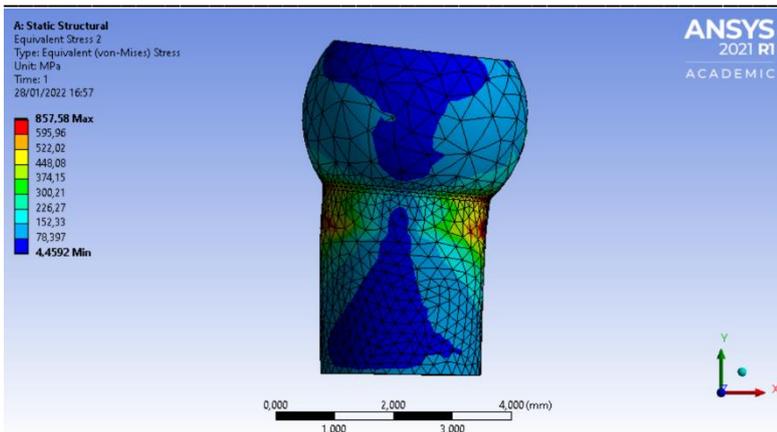


Figura 3.11: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo il moncone sferico nel caso di carico obliquo

Come si può notare dalle figure 3.10 e 3.11, l'applicazione di un carico obliquo determina un netto aumento delle tensioni. Trascurando il picco dovuto alla modalità di vincolo nodale si osserva come gli sforzi registrati lungo il moncone superino il limite di rottura del materiale costitutivo (pari a 798 MPa). La struttura, quindi, è molto più suscettibile a carichi trasversali piuttosto che assiali. Questo rispecchia quanto atteso, dal momento che una protesi dentale è soggetta principalmente a carichi di compressione.

3) Carico nodale obliquo tridimensionale

Si vuole simulare una tipica condizione di masticazione fisiologica. La forza di masticazione possiede componenti verticali e orizzontali, a differenza della forza del morso prettamente verticale.

Il carico utilizzato è rappresentato in Fig. 3.12:

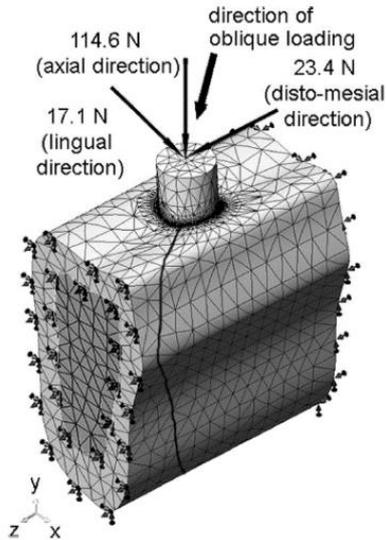


Figura 3.12: carico obliquo tridimensionale utilizzato per simulare una tipica forza di masticazione (“Ultimate Masticatory Force as a criterion in implant selection”, V. Demenko, I.Linetskiy, K.Nesvit)

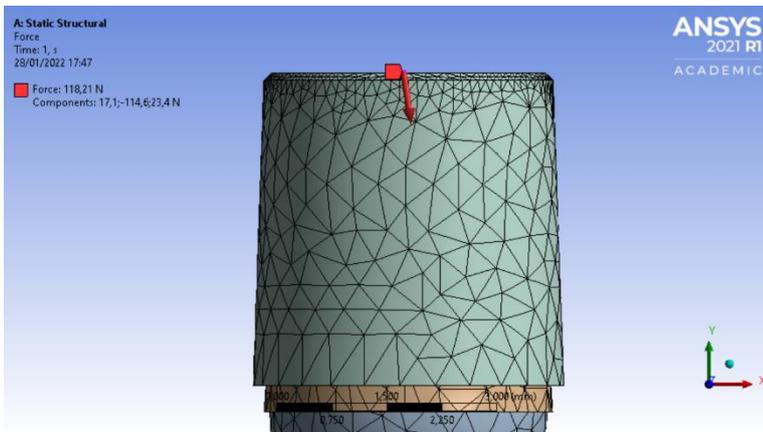


Figura 3.13: carico nodale obliquo tridimensionale. Asse X: direzione linguale; asse Y: direzione assiale; asse Z: direzione disto-mesiale.

In riferimento alla Fig. 3.12, si è scelta l’asse X come direzione *linguale*, l’asse Y come direzione *assiale* e l’asse Z come direzione *disto-mesiale*. Il carico è stato applicato ad un nodo centrale della superficie superiore della cappetta per prove.

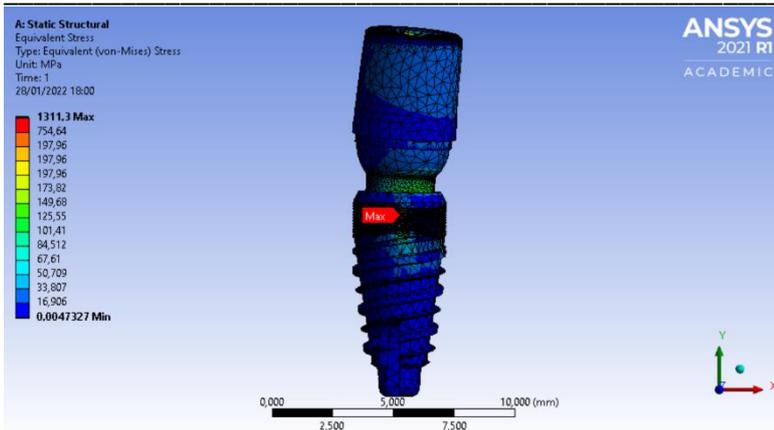


Figura 3.14: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo l'intera struttura nel caso di carico obliquo tridimensionale.

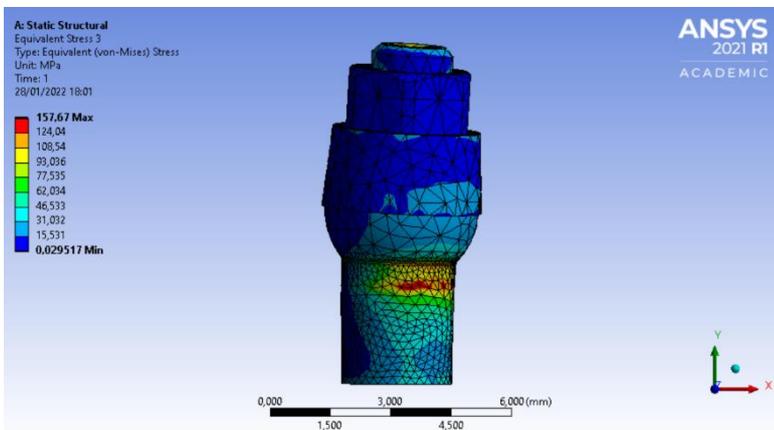


Figura 3.15: visualizzazione della tensione equivalente di Von-Mises lungo la struttura privata di impianto e cappetta per prove nel caso di carico obliquo tridimensionale.

Si può osservare una netta diminuzione delle tensioni rispetto al caso precedente. Considerando il picco di tensione come situato sul moncone sferico (visto che i valori registrati sul punto di applicazione della forza e in prossimità degli incastri sono fittizi e dovuti alla definizione puntuale), si nota come non venga raggiunto il limite di snervamento del materiale costitutivo. Questo conferma quanto affermato precedentemente, visto che in questo caso il carico presenta un'elevata componente assiale e componenti trasversali minori.

Capitolo 4

Modello semplificato con unico volume

Di seguito si tratterà il modello strutturale della struttura assemblata, comprensiva di impianto 3,2x8 mm, in cui i diversi componenti sono stati considerati solidali. Non si è tenuto conto, quindi, dello scambio di forze sulle superfici di contatto.

4.1: Modello semplificato dell'impianto (cilindrico)

Di seguito si tratterà il modello comprensivo di impianto 3,2x8 mm. L'impianto conico filettato è stato sostituito con un impianto di stesse dimensioni nominali, ma morfologia cilindrica e privo di filettatura. L'azienda costruttrice ha preferito una morfologia cilindrica in quanto facilmente realizzabile per quanto riguarda i componenti necessari alle prove sperimentali (l'impianto CONO-IN era comunque già stato testato in conformità con la norma di riferimento). Si è rimossa la filettatura al fine di ridurre il carico computazionale del modello agli elementi finiti (carico non necessario, essendo il moncone sferico il vero obiettivo dell'analisi).

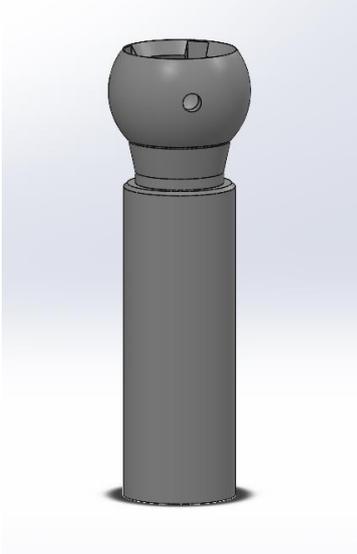


Figura 4.1: accoppiamento moncone sferico - impianto 3,2x8mm con morfologia cilindrica privato della filettatura.

4.2: Analisi FEM preliminare con inclinazione moncone-vite pari a 30°

La struttura assemblata è stata importata sul software Ansys Workbench. I diversi componenti sono stati uniti in uno unico (comando "Form a New Part"). In questo modo, si vuole condurre le prime analisi interagendo con la struttura come con un volume unico, trascurando quindi gli scambi di forze tra le superfici di contatto.

Di seguito, verrà descritta l'analisi condotta considerando un'inclinazione tra asse longitudinale dell'impianto e asse longitudinale della vite sferica α pari a 30°: in questo modo viene considerata la situazione più critica.

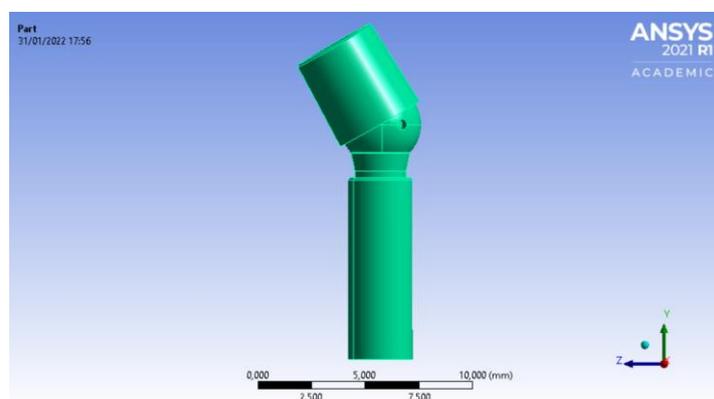


Figura 4.2: modello 3,2x8 mm semplificato con unico volume, considerando $\alpha = 30^\circ$.

Inizialmente, come da indicazioni dell'azienda costruttrice, a ciascun componente è stato assegnato il *titanio grado 5* come materiale costituente (vedi proprietà a pag.27, Fig.3.3).

Si è generata una mesh tetraedrica di lato massimo pari 0,5 mm, andando poi a dimezzare ulteriormente la dimensione massima consentita (comando "Refinement") presso la porzione cilindrica del moncone sferico.

L'impianto cilindrico è stato vincolato tramite dei vincoli ad incastro applicati alla base e a file di nodi lungo la direzione longitudinale dello stesso (3). Come si può notare in Fig. 4.3, si è scelto di vincolare l'impianto ad una distanza pari a 3 mm dalla sommità: in questo modo si vuole ricreare una condizione simile a quella descritta dalla norma di riferimento BS EN ISO 14801:2016, dove si richiede che il livello di supporto dell'impianto si trovi ad una distanza pari a 3 mm dal livello osseo nominale.

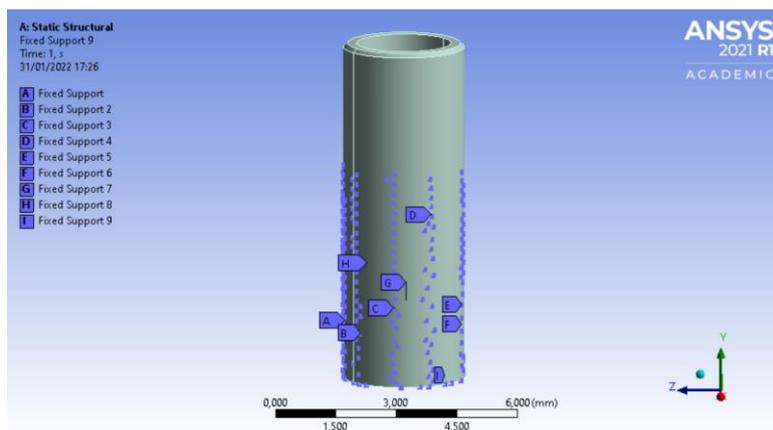


Figura 4.3: impianto cilindrico 3,2x8 mm vincolato a partire dal livello di supporto dell'impianto.

Sempre con lo scopo di replicare le condizioni di prova descritte dalla normativa, si è scelto un carico nodale applicato ad un nodo centrale della superficie superiore della cappetta per prove, avente modulo pari a 200 N e angolazione di 40° rispetto all'asse verticale dell'impianto (e quindi 10° rispetto all'asse longitudinale della vite sferica). Le componenti del suddetto carico giacciono sul piano YZ (sistema di riferimento globale).

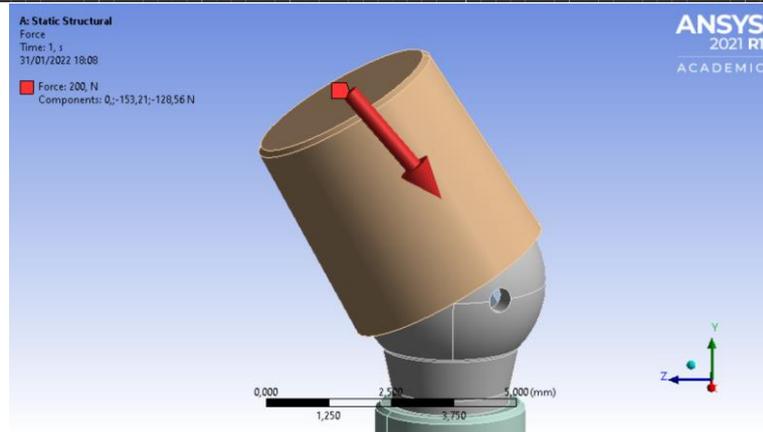


Figura 4.4: carico nodale di modulo pari a 200 N con inclinazione pari a 40° rispetto all'asse verticale dell'impianto.

Si osserva che l'applicazione del carico genera due zone principali di concentrazione degli sforzi: il punto di applicazione della forza (picco tensionale “fittizio”) e la superficie interna della porzione sferica del moncone, in prossimità di uno dei punti di contatto con la vite sferica.

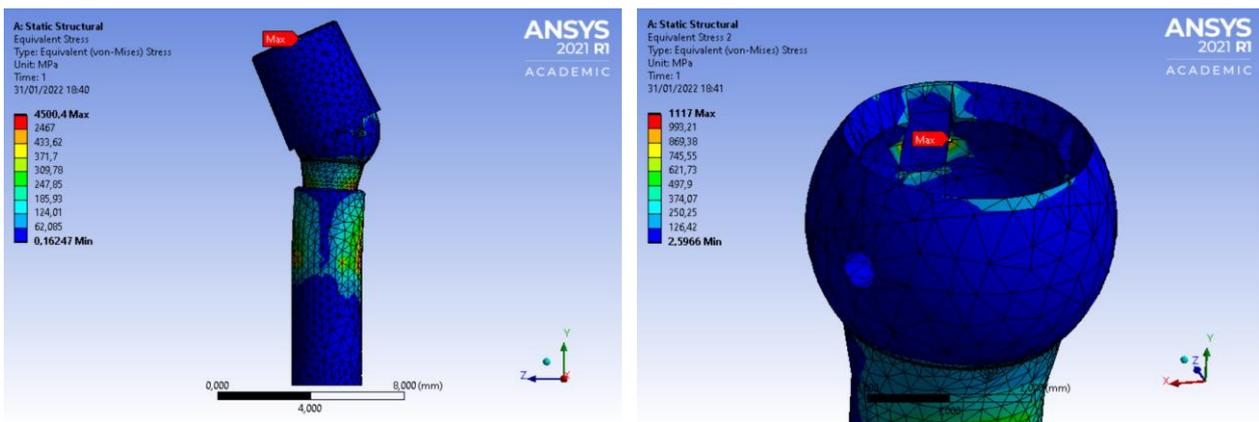


Figura 4.5: valori massimi di tensione registrati presso il punto di applicazione del carico (a sinistra) e sulla superficie interna della porzione sferica del moncone (a destra).

Sulla superficie interna della porzione sferica del moncone, quindi, la tensione supera localmente il limite di snervamento del materiale (picco massimo registrato pari a 1117 MPa). Se ciò si verificasse nel caso reale, si potrebbe avere mobilitazione dei componenti e quindi perdita della tenuta della connessione sferica.

Per il momento, si è ritenuto plausibile che un picco di tensione così localizzato e inatteso potesse essere dovuto o alla scelta di una mesh non idonea per il caso o per il fatto che, analizzando la struttura come un volume unico, si va a sovrastimare la rigidità della stessa rispetto alla situazione realistica.

4.3: Affinamento della mesh e risultati del modello a volume unico

Nel tentativo di ottenere una maggior convergenza della soluzione, si è modificata la mesh come segue:

- 1) Nella porzione dell’impianto al di sotto dei 3 mm nominali si è impostata una mesh tetraedrica di lato massimo pari a 2 mm (tramite il comando “Vertex sizing”, scegliendo un raggio opportuno per la sfera di interesse);
- 2) Per la superficie esterna cilindrica della cappetta per prove si è scelto un lato massimo degli elementi pari a 0,5 mm;
- 3) Il resto della struttura è stato discretizzato tramite elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,2 mm;
- 4) La dimensione massima della mesh generata è stata ulteriormente dimezzata per quanto riguarda la superficie superiore della cappetta e la superficie di contatto tra l’impianto e la porzione cilindrica del moncone, in modo da ottenere più continuità tra gli elementi adiacenti (vedi figura).

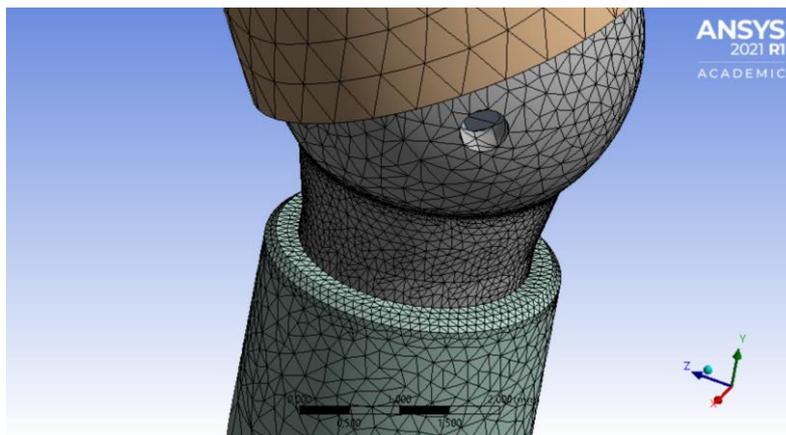


Figura 4.6: modifica della mesh presso la superficie di contatto tra impianto cilindrico e moncone sferico.

Si è quindi ripetuta la simulazione precedente (vincoli ad incastro e carico inclinato di 40° rispetto all’asse verticale dell’impianto e modulo pari a 200 N), in modo da mettere in luce i cambiamenti dovuti alla modifica della mesh.

L'aumento del numero dei nodi utilizzati comporta:

- Un aumento del valore di tensione nel punto di applicazione della forza. Questo valore può comunque essere ritenuto fittizio (si è verificato come l'errore percentuale in questo punto sia pari a circa il 131%, mentre prossimo allo zero nel resto della struttura).
- Il picco di tensione manifestatosi sulla superficie interna della porzione sferica del moncone non si verifica. La massima tensione si registra, invece, sulla porzione cilindrica (dove comunque non viene superato il limite di snervamento del materiale).
- Vi è un aumento di tensione notevole, ma comunque estremamente localizzato, sulla sommità della vite sferica.

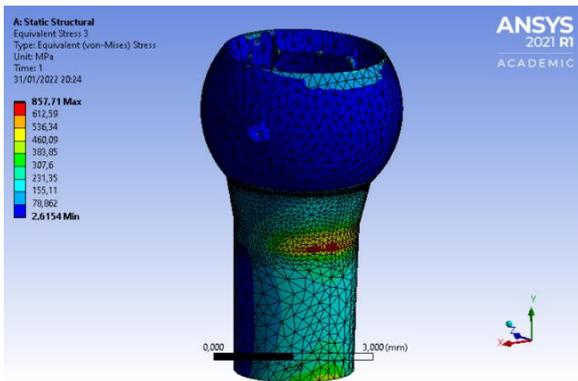


Figura 4.7: picco di tensione registrato sul moncone sferico.

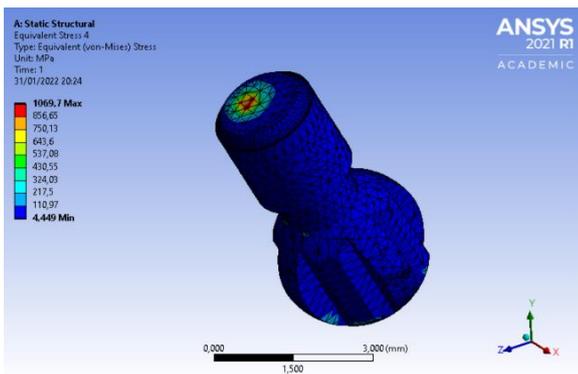


Figura 4.8: picco di tensione registrato sulla vite sferica.

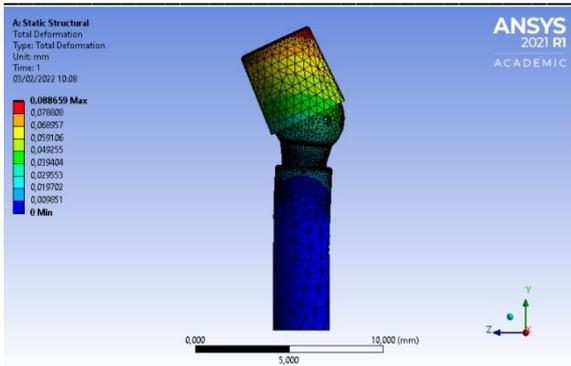


Figura 4.9: spostamento dell'intera struttura a fronte del carico nodale.

Di seguito si propone un confronto dei risultati al variare dell'angolo compreso tra la direzione del carico e l'asse verticale dell'impianto, per valori compresi tra 40° e 90°. Il carico utilizzato è il medesimo del caso precedentemente analizzato, quindi di modulo pari a 200 N con componenti sul piano YZ. Vengono riportati i risultati in termini di spostamento massimo della struttura e tensioni registrate nei punti A e B (vedi Fig. 4.10), avendo notato che gli sforzi si concentrano in prossimità di essi.

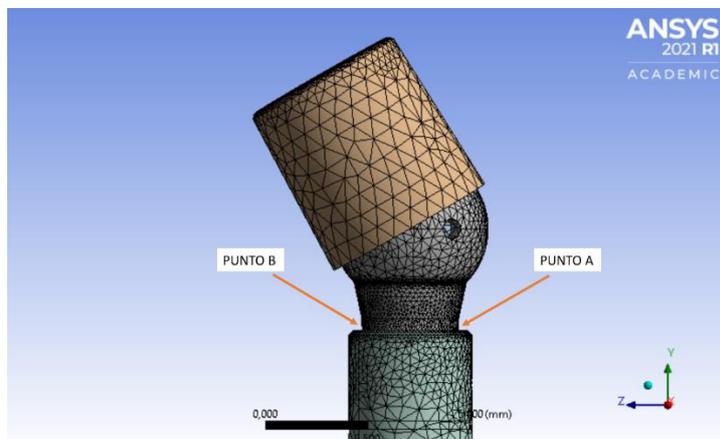
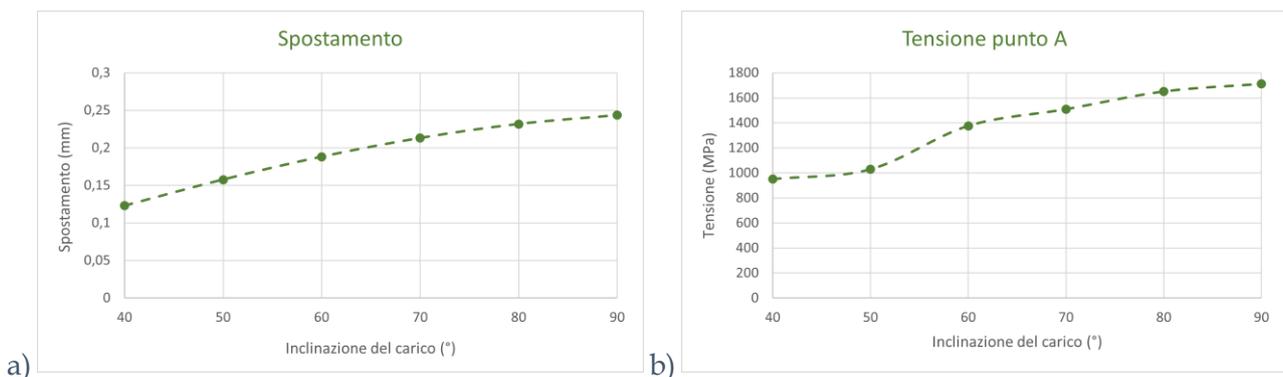
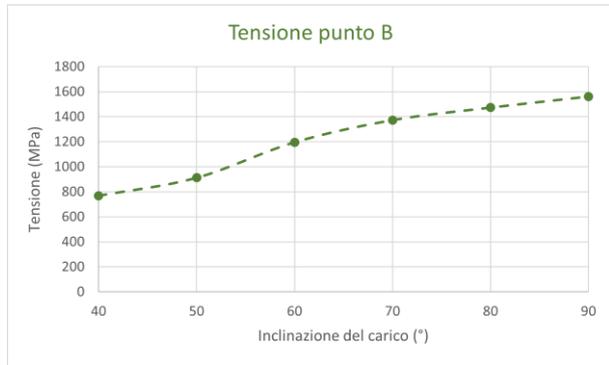


Figura 4.10: punti A e B identificati sulla porzione cilindrica del moncone sferico.





c)

Figura 4.11: spostamento massimo della struttura (a), tensione registrata in prossimità del punto A (b), tensione registrata in prossimità del punto B (c), in funzione dell'inclinazione del carico nodale rispetto all'asse verticale dell'impianto.

I risultati mostrano che la struttura, nella configurazione analizzata ($\alpha = 30^\circ$), a fronte di un carico bidimensionale di modulo pari a 200 N subisca un aumento delle tensioni e dello spostamento all'aumentare dell'inclinazione del carico. Come atteso, le tensioni aumentano all'aumentare della componente trasversale del carico applicato. In riferimento alla Fig. 4.11b, si può osservare come in prossimità del punto A le tensioni superino il limite di snervamento del materiale già per un'inclinazione del carico pari a 50° , mentre per 60° si ha snervamento anche in prossimità del punto B. L'inclinazione richiesta dalla norma BS EN ISO 14801:2016 (40°), quindi, sembrerebbe essere l'inclinazione limite per non avere snervamento a fronte del carico in questione.

Si vuole ora studiare gli effetti un carico analogo al caso precedente per quanto riguarda il modulo e l'inclinazione rispetto all'asse verticale dell'impianto, ma applicato uniformemente all'intera superficie superiore della cappetta per prove ($\alpha = 10,987 \text{ mm}^2$). Il carico, quindi, verrà espresso in termini di una pressione.

Si ottengono quindi le seguenti componenti:

$$P_y = 13,94 \text{ MPa};$$

$$P_z = 11,70 \text{ MPa}.$$

L'applicazione del carico distribuito, come atteso, comporta la diminuzione della tensione registrata nel punto di applicazione della forza (scegliendo una superficie piuttosto che un nodo le

sollecitazioni si “distribuiscono”), ma si ha un aumento del picco di tensione registrato sul moncone sferico (pari a 915 MPa), che oltretutto si sposta all’interno della porzione sferica, in prossimità di uno dei punti di contatto con la vite sferica. Lo spostamento non subisce cambiamenti rilevanti.

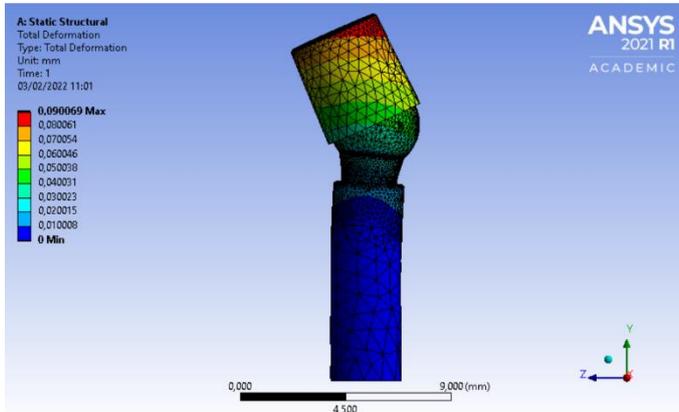


Figura 4.12: spostamento dell’intera struttura a fronte del carico distribuito.

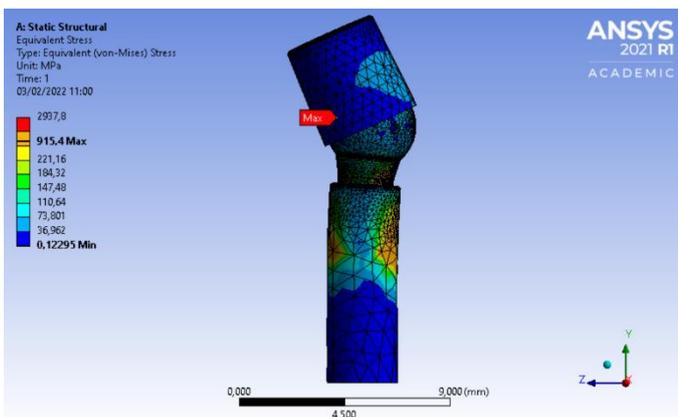


Figura 4.13: tensione equivalente di Von-Mises a fronte del carico distribuito.

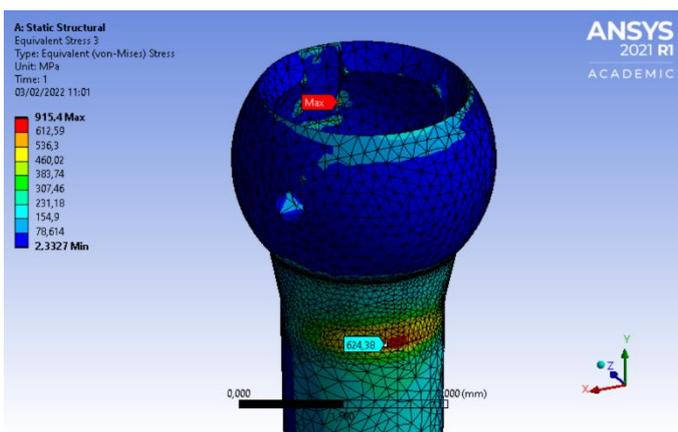
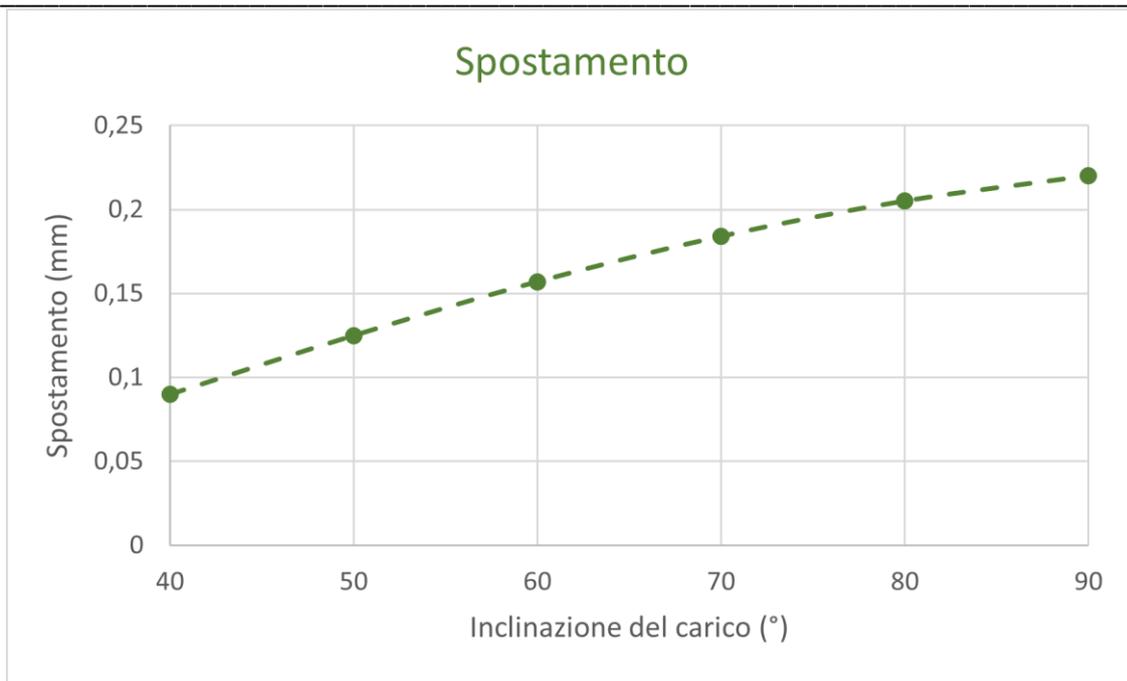
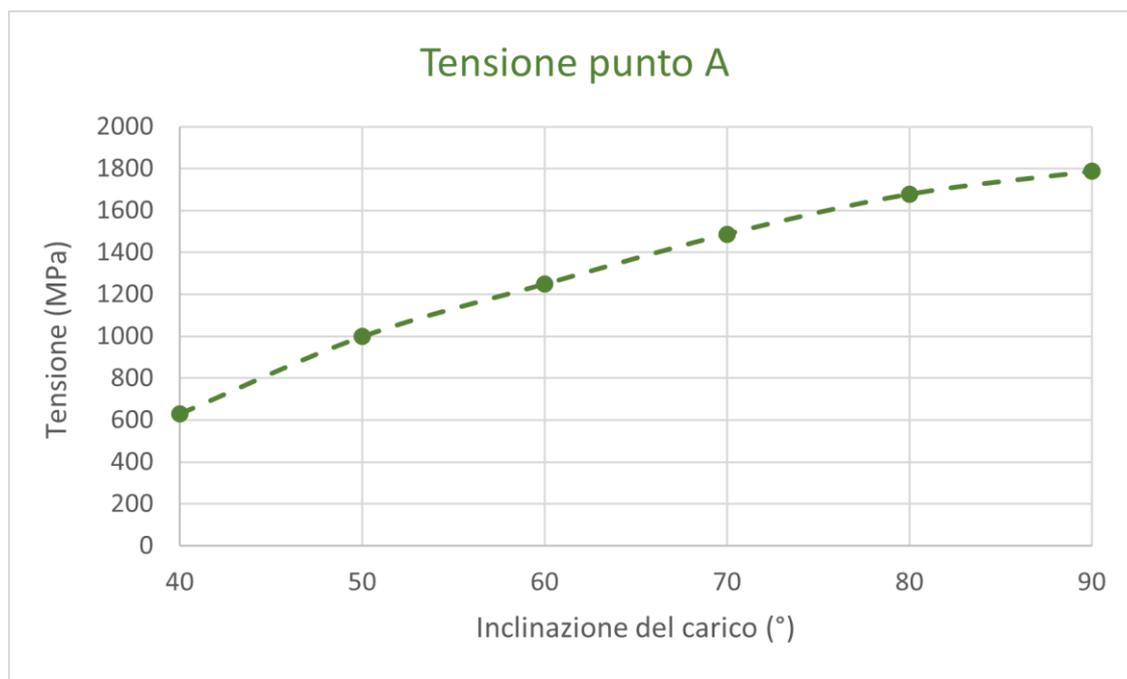


Figura 4.14: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico.

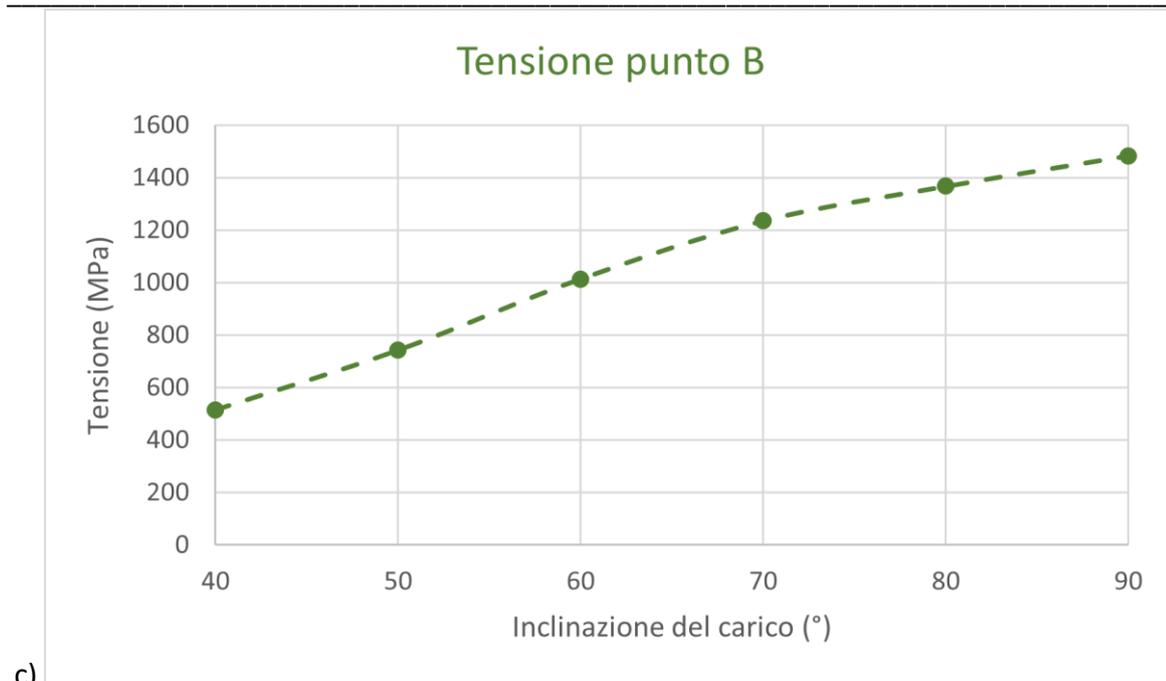
Nella zona identificata precedentemente come punto A si ha una diminuzione degli sforzi (Fig. 4.14, tensioni pari a circa 600-700 MPa).



a)



b)



c) *Figura 4.15: spostamento massimo della struttura (a), tensione registrata in prossimità del punto A (b), tensione registrata in prossimità del punto B (c), in funzione dell'inclinazione del carico rispetto all'asse verticale dell'impianto.*

Dai risultati ottenuti si può concludere che la struttura, analogamente al caso di applicazione del carico puntuale, sia estremamente più resistente di fronte a eccitazioni verticali piuttosto che trasversali. Il carico utilizzato comporta snervamento del materiale in tutti i casi, ad eccezione dell'inclinazione pari a 40° rispetto all'asse longitudinale dell'impianto, nonostante lo sforzo registrato nella porzione sferica del moncone vi sia prossimo.

Non potendo confrontare i picchi massimi di tensione (dal momento che applicando un carico nodale il valore di picco è ritenuto "fittizio"), si può concludere che entrambe le situazioni comportano tensioni nei punti A e B tendenti a valori simili all'aumentare dell'inclinazione del carico, mantenendosi in generali inferiori nel caso di carico distribuito.

Analogamente lo spostamento risulta per ogni punto minore nel caso di carico distribuito.

La differente modalità di applicazione del carico, però, ha messo in luce due zone soggette a sforzi elevati:

- Nel caso di forza nodale, la sommità della vite sferica immediatamente sottostante al nodo scelto è soggetta ad uno sforzo superiore al limite di snervamento del materiale (considerando un'inclinazione del carico pari a 40°);
- Nel caso di forza distribuita, il punto di massimo sforzo per qualsiasi inclinazione considerata si trova sulla superficie interna del moncone sferico, nella zona opposta alla direzione del carico e in prossimità della zona di inserimento della vite sferica. Questo potrebbe portare a snervamento del materiale e conseguente mobilizzazione della vite sferica.

Bisogna considerare però che in una condizione fisiologica non dovrebbero verificarsi carichi impulsivi inclinati di modulo pari a 200 N: dalla letteratura si evince che carichi di tale intensità si verificano generalmente solo in direzione verticale (parallela quindi all'asse longitudinale della vite sferica) durante il morso (5).

A tal fine le simulazioni effettuate sono state modificate, andando a considerare lo stesso carico privo di inclinazione rispetto all'asse longitudinale della vite sferica. L'angolo tra la direzione del carico e l'asse verticale dell'impianto sarà quindi pari a 30° .

1) *Carico nodale:*

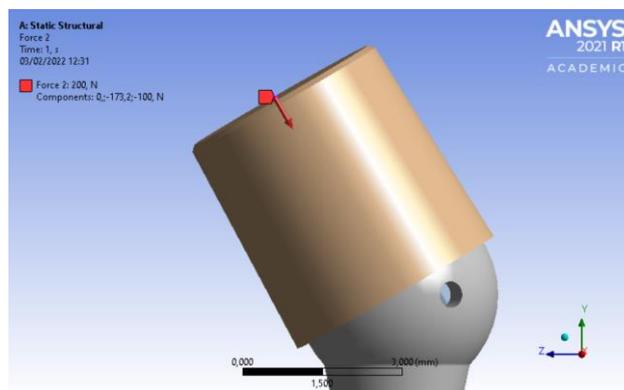
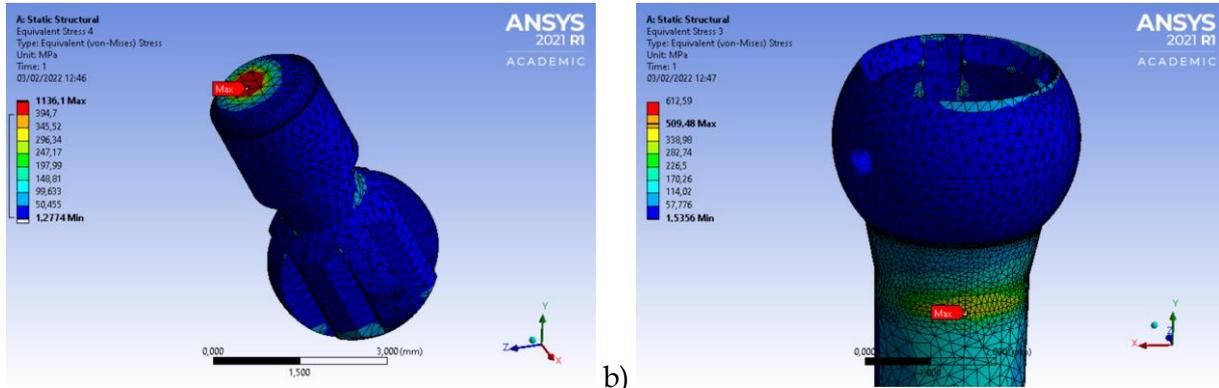


Figura 4.16: carico nodale di modulo pari a 200 N parallelo all'asse longitudinale della vite sferica.

L'applicazione del carico ad un nodo centrale della cappetta genera un picco di tensione sulla sommità della vite sferica superiore al limite di snervamento, come osservato precedentemente. Il

moncone sferico, invece, presenta sollecitazioni estremamente più moderate, con un picco massimo pari a 509,48 MPa. Si è registrato uno spostamento massimo della struttura pari a 0,06 mm, inferiore in confronto a quello generato dall’applicazione del carico di pari modulo con inclinazione di 40°.



a) b)
 Figura 4.17: tensione equivalente di Von-Mises sulla vite sferica (a) e sul moncone sferico (b).

2) Carico distribuito:

La pressione corrispondente al carico nodale utilizzato ha componenti pari a:

$$P_y = 15,76 \text{ MPa};$$

$$P_z = 9,10 \text{ MPa}.$$

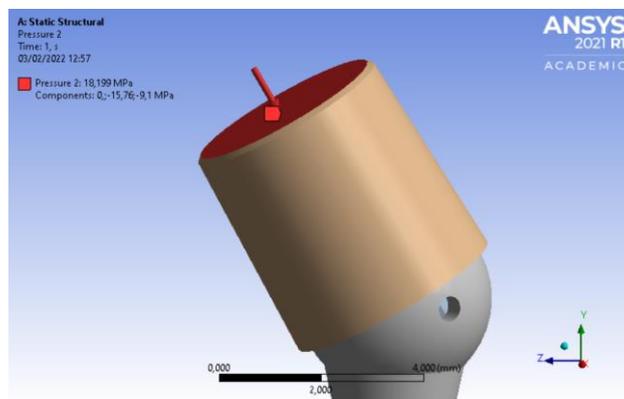


Figura 4.18: carico distribuito applicato alla superficie della cappetta in direzione parallela all'asse longitudinale della vite sferica.

L’applicazione del carico distribuito alla superficie superiore della cappetta genera un picco di tensione presso la porzione cilindrica del moncone sferico (punto A, vedi pag.41 Fig. 4.10). La tensione però si mantiene considerevolmente inferiore al limite di snervamento del materiale. La superficie interna della porzione sferica del moncone, quindi, non risulta più una zona critica.

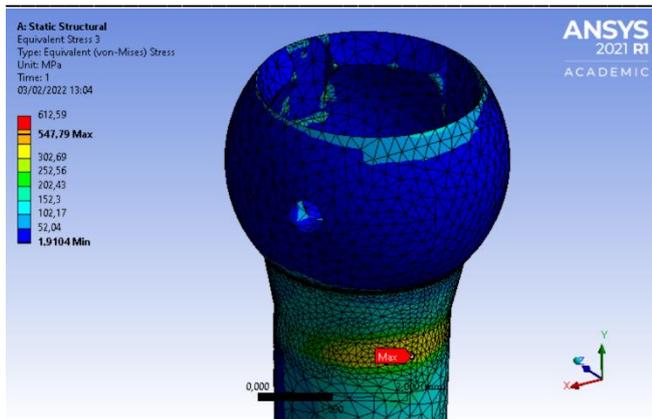


Figura 4.19: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico.

In generale, si può concludere che la struttura risulti maggiormente performante di fronte a carichi distribuiti piuttosto che puntuali (i confronti effettuati mettono in luce come in ogni caso si ottengano valori di sforzi e spostamento più o meno inferiori) e nei confronti di carichi di compressione piuttosto che di taglio, condizione in cui si verifica la comparsa di punti cedevoli all'interno dell'accoppiamento sferico.

Nello specifico, di fronte a un carico impulsivo verticale di modulo pari a 200 N la struttura non presenta particolari punti di criticità.

Mantenendo un'eccitazione analoga alla precedente (modulo pari a 200 N con inclinazione di 40° rispetto all'asse longitudinale dell'impianto), si vuole ora studiare come vari la risposta meccanica della struttura al variare della direzione di carico. A tal proposito le componenti del carico giaceranno sul piano XY piuttosto che YZ. Anche se fisiologicamente, come detto in precedenza, non dovrebbero verificarsi carichi inclinati di tale intensità, si ritiene che in questo modo si possano evidenziare le zone della struttura maggiormente a rischio.

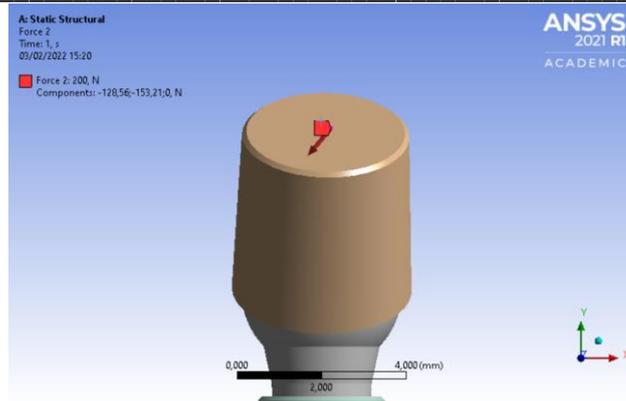


Figura 4.20: applicazione del carico sul piano XY.

La struttura giunge a snervamento sulla porzione cilindrica del moncone sferico (vedi Fig. 4.22, punto C) e nella zona dell’impianto a contatto. Nel resto della struttura le sollecitazioni non superano la soglia di criticità.

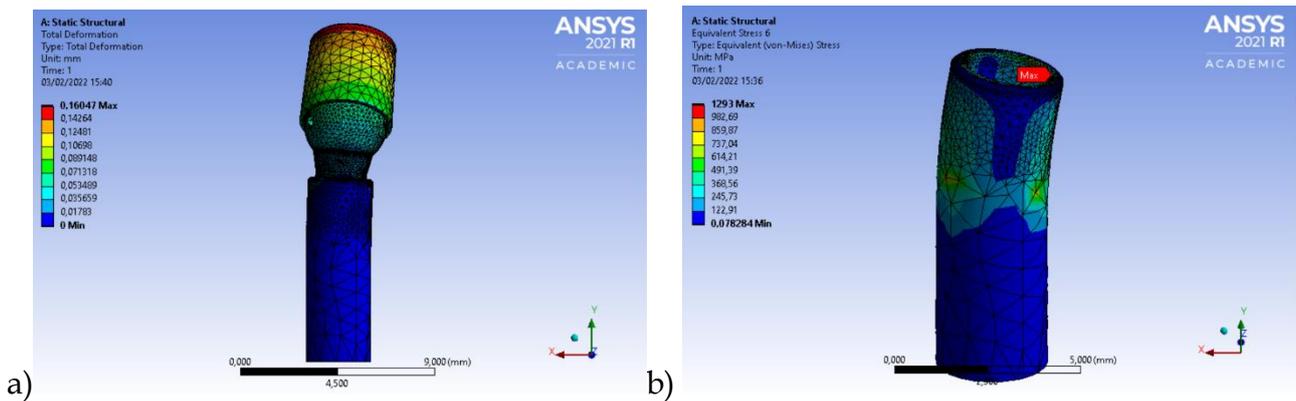


Figura 4.21: spostamento della struttura (a) e tensione equivalente di Von-Mises sull’impianto (b) a fronte del carico nodale con componenti sul piano XY.

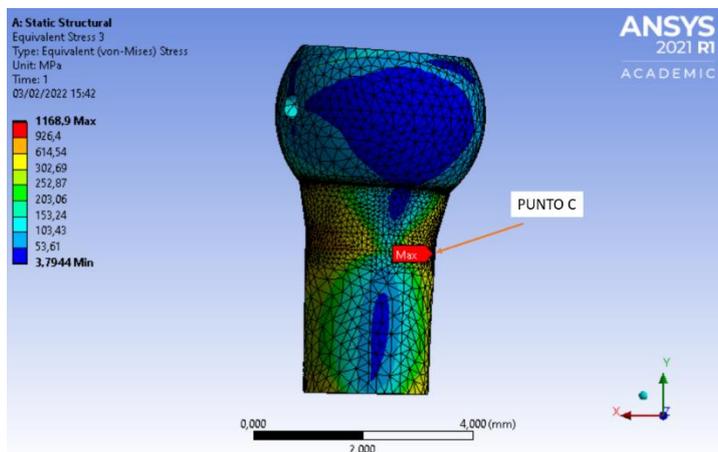


Figura 4.22: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico e identificazione del punto C.

Viene riportato un confronto con il caso in cui lo stesso carico era stato applicato nel piano YZ,

confronto che prende in considerazione il valore di tensione massima riscontrato nel punto più sollecitato del moncone sferico (nel caso attuale situato nel punto C, mentre in precedenza nel punto A) e lo spostamento complessivo della struttura.

Piano di giacenza del carico	Spostamento (mm)	Massima sollecitazione sul moncone (MPa)
YZ	0,09	857,71
XY	0,16	1168,9

Tabella 4.1: confronto in termini di spostamento e picchi di tensione sul moncone tra il caso di applicazione del carico sul piano YZ e sul piano XY.

Dalla Tabella 4.1 si osserva come la struttura si dimostri più suscettibile di fronte all'applicazione di un carico sul piano XY piuttosto che sul piano YZ. Si hanno quindi migliori prestazioni dell'insieme sul piano parallelo a quello di inclinazione della vite sferica piuttosto che su piano ortogonale.

Si giunge alle stesse conclusioni prendendo in esame lo stesso carico applicato però all'intera superficie superiore della cappetta ($\alpha = 10,987 \text{ mm}^2$), espresso nei termini di una pressione ($P_x = 11,7 \text{ MPa}$; $P_y = 13,93 \text{ MPa}$).

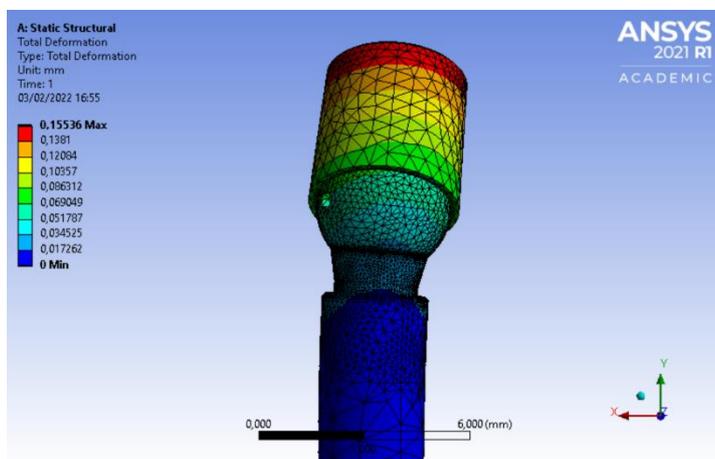


Figura 4.23: spostamento della struttura a fronte della pressione applicata sul piano XY.

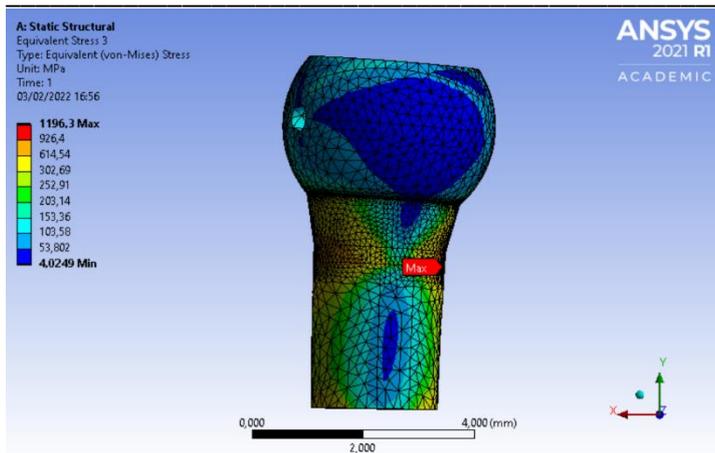


Figura 4.24: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico a fronte del carico applicato sul piano XY.

Mentre l'applicazione del carico sul piano YZ comportava la comparsa di un picco di tensione di poco inferiore al limite di snervamento del materiale sulla superficie interna della porzione sferica del moncone, la struttura giunge ora a snervamento ($\sigma = 1196,3$ MPa) presso la porzione cilindrica dello stesso. La superficie interna del moncone, invece, non presenta zone critiche. Lo spostamento, nel primo caso pari a 0,09 mm, è ora pari a 0,15 mm.

Avendo analizzato il comportamento della protesi di fronte a due tipologie di carico bidimensionali, ci si propone ora di studiarne la risposta all'applicazione di un carico inclinato tridimensionale. A tal proposito, verrà utilizzato lo stesso carico riportato a pag. 33 in merito al modello 3,8x10 mm (vedi Fig. 3.12).

Le tre componenti riportate in Fig. 3.12 descrivono una forza di modulo pari a 118,2 N inclinata di 75° rispetto al piano occlusale, coincidente nel caso studiato con la superficie superiore della cappetta. Si è considerata l'asse X come direzione *distale-mediale*, l'asse Y come direzione *assiale* e l'asse Z come direzione *linguale*.

Dal momento che, a differenza della situazione rappresentata in Fig. 3.12, la protesi in studio presenta un'angolazione tra gli assi longitudinali dell'impianto e della vite sferica, è stato necessario riferire le componenti del carico al sistema di riferimento globale tramite una matrice di rotazione

R_x :

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1)$$

con $\alpha = 30^\circ$. Le componenti del carico risultano quindi pari a:

$$F_x = 23,4 \text{ N};$$

$$F_y = -107,79 \text{ N};$$

$$F_z = -42,49 \text{ N}.$$

Come atteso, il picco degli sforzi è situato nel punto di applicazione del carico. Sulla sommità della vite sferica sottostante al nodo caricato si registra un aumento delle tensioni, comunque inferiori al limite di snervamento del materiale ($\sigma_{\max} = 777,52 \text{ MPa}$). Sul moncone sferico non si osservano zone critiche ($\sigma_{\max} = 272,58 \text{ MPa}$).

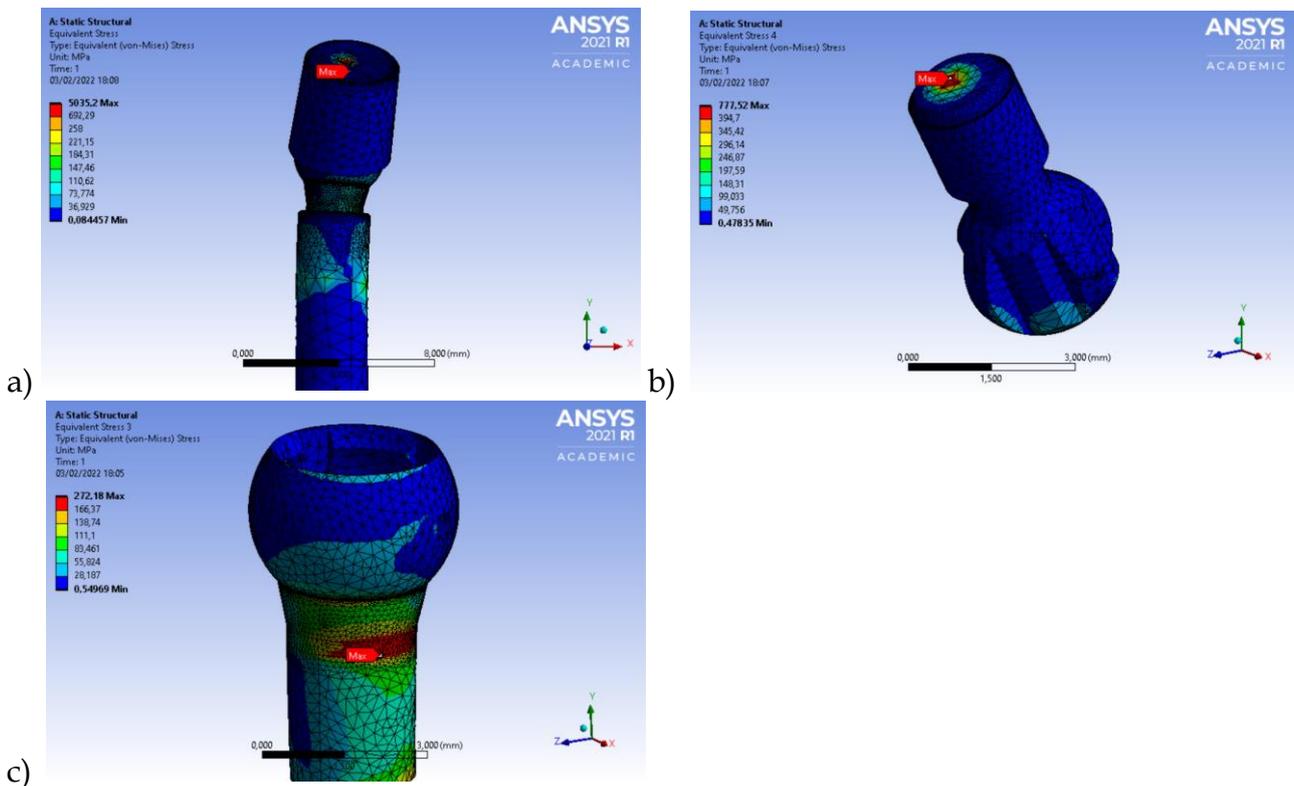


Figura 4.25: tensione equivalente di Von-Mises dell'intera struttura (a), della vite sferica (b) e del moncone (c) a fronte del carico inclinato tridimensionale.

La struttura, quindi, non incorre in snervamento ed eventuali mobilizzazioni di fronte al carico tridimensionale applicato.

Applicando lo stesso carico sottoforma di una pressione sulla superficie della cappetta si ottengono, come atteso, valori di tensione inferiori e la scomparsa del picco degli sforzi sulla sommità della vite sferica.

4.4: Aggiunta della cappetta semisferica sul punto di applicazione del carico

La cappetta per prove utilizzata fin ora è stata sostituita con la cappetta con terminale sferico, progettata (v. Capitolo 2) per l'esecuzione delle prove sperimentali. La cappetta semisferica dovrebbe comportare risultati più o meno differenti al caso precedente, dal momento che la differente morfologia introduce una variazione nei bracci delle forze.

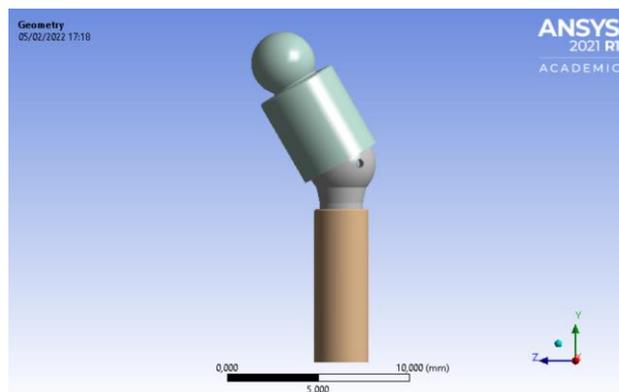


Figura 4,26: modello 3,2x8 mm comprensivo di cappetta semisferica.

L'impianto cilindrico è stato vincolato, analogamente al caso precedente, tramite dei vincoli ad incastro applicati alla base e lungo file di nodi a partire dal livello di supporto dell'impianto. In prima istanza, si è scelto di sollecitare la struttura tramite un carico inclinato di 40° rispetto all'asse longitudinale dell'impianto, di modulo pari a 200 N avente componenti sul piano YZ. Come punto di applicazione della forza è stato scelto un nodo centrale della porzione semisferica della cappetta, in modo da replicare quanto più possibile le condizioni di prova descritte dalla norma BS EN ISO 14801:2016.

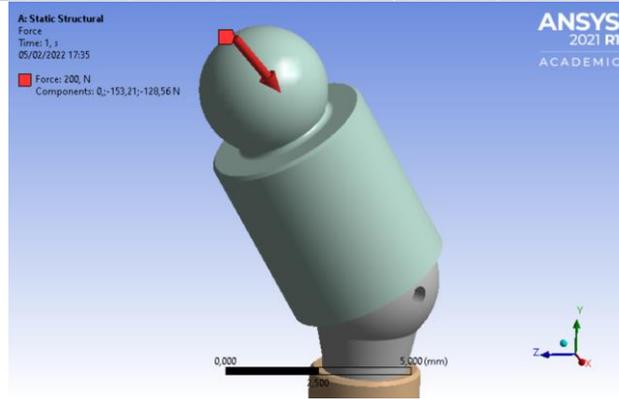


Figura 4.27: carico nodale applicato alla cappetta semisferica.

Si osserva l’insorgenza di un picco degli sforzi superiore al limite di snervamento del materiale sulla superficie interna della porzione sferica del moncone, in prossimità di una delle zone di contatto con la vite sferica. Nonostante tale criticità sia estremamente localizzata (definibile quasi puntuale. La tensione nella zona circostante risulta di gran lunga inferiore al limite), si sottolinea che questo picco non si era verificato utilizzando la cappetta per prove “piatta”.

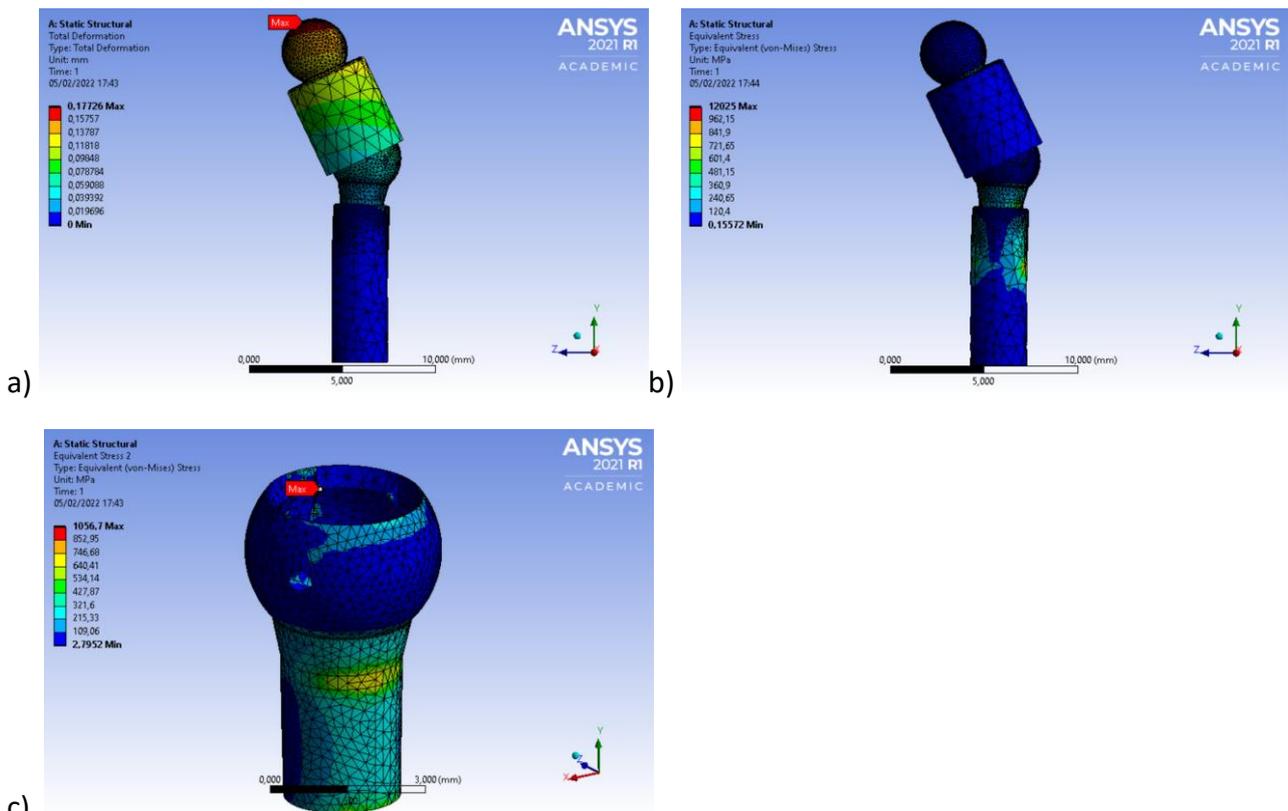


Figura 4.28: spostamento (a), tensione equivalente di Von-Mises dell'intera struttura (b) e del solo moncone (c).

Si propone un breve confronto con i risultati ottenuti utilizzando la cappetta per prove “piatta”, in termini di tensione massima registrata sul moncone, tensione nei punti A e B (vedi Fig. 4.10, pag. 41) e spostamento.

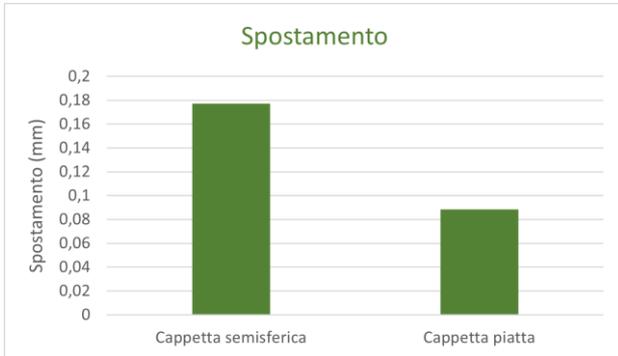


Tabella 4.2: spostamento della struttura al variare della cappetta utilizzata.

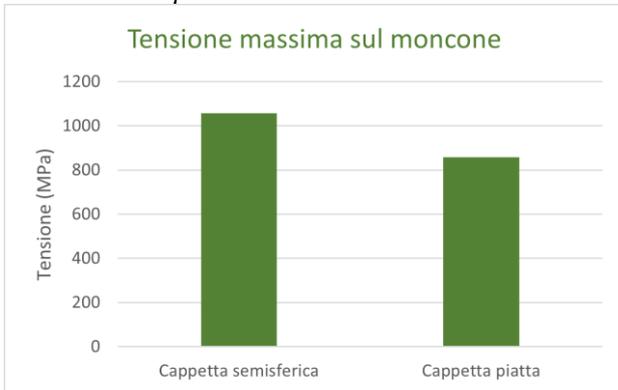


Tabella 4.3: tensione massima registrata sul moncone al variare della cappetta utilizzata.

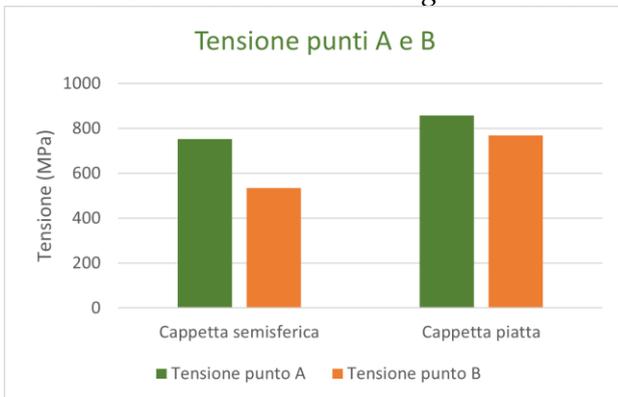


Tabella 4.4: tensione massima registrata in prossimità dei punti A e B al variare della cappetta utilizzata.

Dalle tabelle 4.2, 4.3, 4.4 si può osservare come l’introduzione della cappetta semisferica comporti una maggior mobilitazione della struttura e un picco di tensione di maggior intensità sul moncone sferico che, a differenza del caso d’uso della cappetta “piatta” (dove il picco si localizzava sulla porzione cilindrica) si trova sulla superficie interna della porzione sferica. In questo caso, quindi, si

avrebbe uno snervamento locale del materiale costitutivo, assente invece utilizzando la cappetta “piatta”.

Nei punti A e B si ha, invece, un miglioramento della risposta della struttura: l’utilizzo della cappetta emisferica comporta un aumento del braccio della forza rispetto alla porzione cilindrica del moncone, che determina una diminuzione delle sollecitazioni.

Da quanto analizzato fin ora, si può concludere che considerando la struttura come un volume unico, l’applicazione di un carico con inclinazione pari a 10° rispetto all’asse longitudinale della vite sferica comporterebbe prima lo snervamento dell’accoppiamento sferico (il picco massimo si registra sulla superficie interna della porzione sferica del moncone) e successivamente della superficie cilindrica del moncone.

Capitolo 5

Modello esplorativo del contatto

Al fine di comprendere la reale sollecitazione interna dei componenti, si vuole proseguire l'analisi tenendo conto del trasferimento dei carichi attraverso le superfici di contatto.

5.1. Modello di contatto fra componenti

Si è realizzato un modello esplorativo semplificato composto da due cubi a contatto. Tramite il software Solidworks sono state realizzate le geometrie e il contatto tra esse.

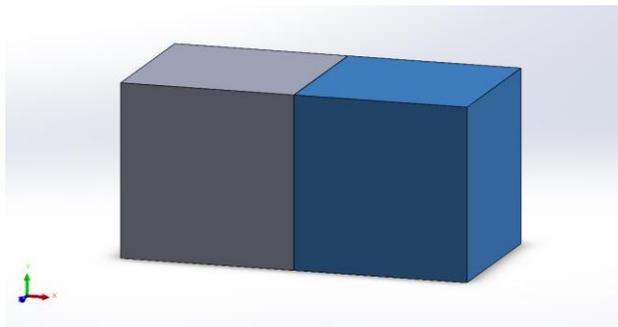


Figura 5.1: modello esplorativo semplificato.

L'assieme è stato poi importato in ambiente Ansys Workbench. Insieme alle geometrie viene importata automaticamente la connessione esistente tra le due superfici a contatto dei cubi, connessione del tipo "Contact". Da un'analisi delle tipologie di contatto realizzabili si sono identificate due opzioni che verranno studiate di seguito, il contatto "Contact" e il contatto "Joint". Si vuole ora comprendere in che cosa le due metodologie differiscano.

Il comando "Contact" corrisponde all'elemento CONTA174 in ambiente Ansys APDL. Il suo utilizzo esprime il contatto e lo scorrimento tra superfici tridimensionali e una superficie deformabile definita da questo elemento. Esso ha le caratteristiche geometriche dell'elemento solido a cui è

connesso. Sono consentiti l'attrito coulombiano, l'attrito di taglio e la separazione degli elementi, al fine di simulare la delaminazione all'interfaccia (1).

Il comando “Joint” corrisponde invece all'elemento MPC184 in ambiente Ansys APDL, elemento che descrive un vincolo multiplo. Tra due nodi adiacenti vengono posti dei vincoli cinematici su specifiche quantità che definiscono il movimento relativo tra essi. L'elemento di vincolo ha sei gradi di libertà per ciascun nodo, che definiscono le sei componenti di movimento relativo (tre traslazioni e tre rotazioni). A seconda del caso le varie componenti possono essere rese libere o vincolate (1).

Approfondendo la ricerca per quanto riguarda nello specifico i comandi utilizzati in ambiente Workbench risulta che considerando due superfici a contatto le due metodologie di connessione differiscano per la modalità di trasferimento dei carichi (2):

- 1) *Contact*: vengono posti degli elementi tra i singoli nodi e si realizzano delle connessioni estremamente localizzate. Le sollecitazioni sono trasmesse localmente su tutta la superficie. Il contatto è di tipo nodo-a-nodo. A seconda della formulazione, si può avere penetrazione dei nodi all'interno della superficie target.
- 2) *Joint*: viene creato un punto sul centroide della superficie considerata per il contatto, e viene costruito un “ragno” di elementi verso tutti i nodi di ciascuna superficie coinvolta. Tutte le forze e i momenti passano attraverso il centroide. Non vi è, quindi, trasferimento di forze di tipo nodo-a-nodo.

Volendo visualizzare il differente comportamento delle due modalità di connessione, si sono svolte delle simulazioni che le concepissero entrambe separatamente.

Dopo aver importato il modello esplorativo semplificato in ambiente Ansys Workbench, si è scelto di mantenere in prima analisi il contatto importato automaticamente da Solidworks, quindi del tipo “Contact- Fixed” (*fixed*: non sono permessi gradi di libertà all'interfaccia). A entrambi i cubi è stato assegnato l'*acciaio strutturale* come materiale costitutivo.

Si è realizzata una mesh quadrata di lato massimo pari a 5 mm. La struttura è stata vincolata tramite un incastro applicato ad una delle due superfici laterali, mentre il carico, di modulo pari a 300 N diretto lungo il verso negativo dell'asse Y, è stato applicato alla superficie superiore del cubo non vincolato. Si vuole simulare, quindi, una sollecitazione a flessione.

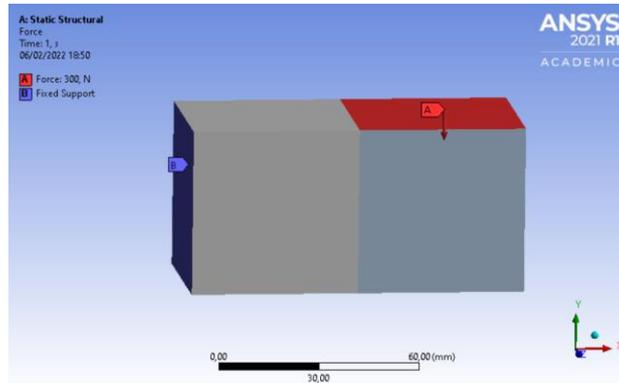


Figura 5.2: sistema di vincolo (blu) e carico (rosso).

La distribuzione delle tensioni, come atteso dalla teoria, risulta variabile lungo l'asse X (assiale) e Y (trasversale), costante invece lungo Z (ad eccezione della zona immediatamente prossima al vincolo).

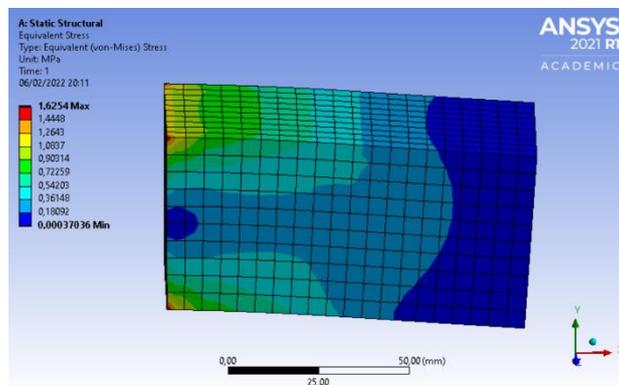


Figura 5.3: tensione equivalente di Von-Mises utilizzando un contatto di tipo "Contact".

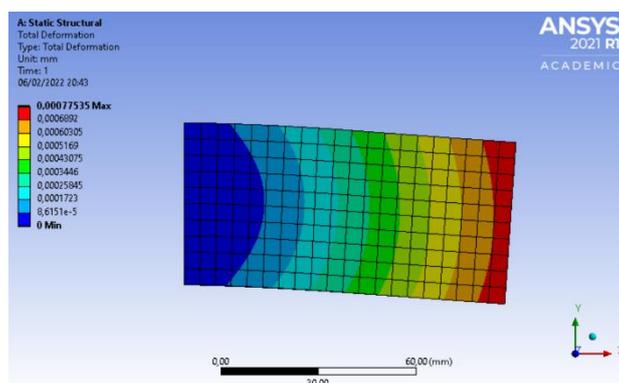


Figura 5.4: spostamento risultante utilizzando un contatto di tipo "Contact".

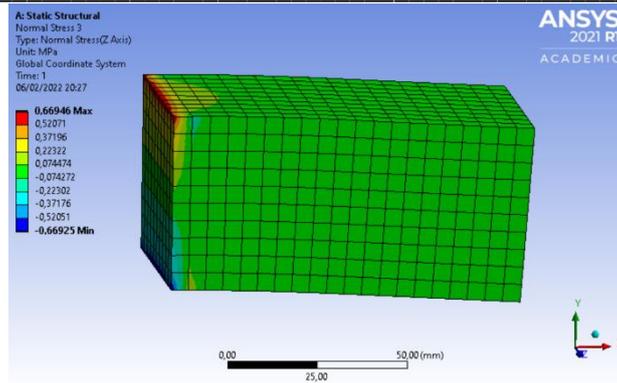


Figura 5.5: distribuzione della tensione lungo l'asse Z utilizzando un contatto di tipo "Contact".

Il trasferimento dei carichi tra i due componenti appare continuo. La stessa simulazione è stata ripetuta rimuovendo il contatto importato automaticamente con la geometria e generando manualmente il contatto, sempre tramite l'opzione "Contact" e rimuovendo ogni grado di libertà all'interfaccia. Si vuole osservare se questo comporta dei cambiamenti.

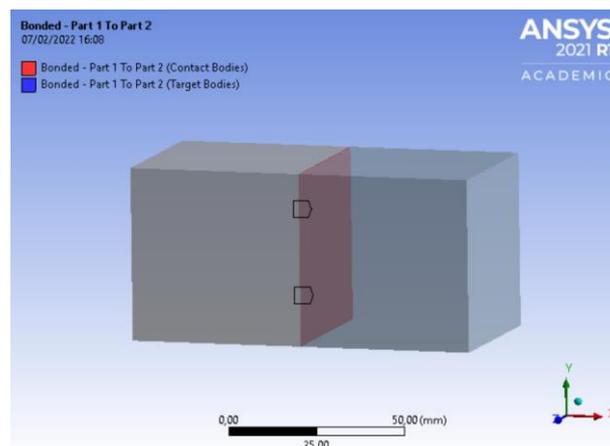


Figura 5.6: selezione della superficie di contatto.

Non verranno riportati i risultati ottenuti, in quanto analoghi a quelli precedenti.

A questo punto si è modificata la tipologia di contatto utilizzando il vincolo multiplo "Joint", sempre eliminando i gradi di libertà all'interfaccia. Al fine di avere un confronto visivo dei risultati, è stato replicato il sistema di vincolo e carico utilizzato nel caso precedente.

Ciò che si osserva differisce da quanto osservato in merito all'utilizzo dell'opzione "Contact": l'utilizzo del vincolo multiplo introduce una discontinuità nella distribuzione degli sforzi nelle tre direzioni.

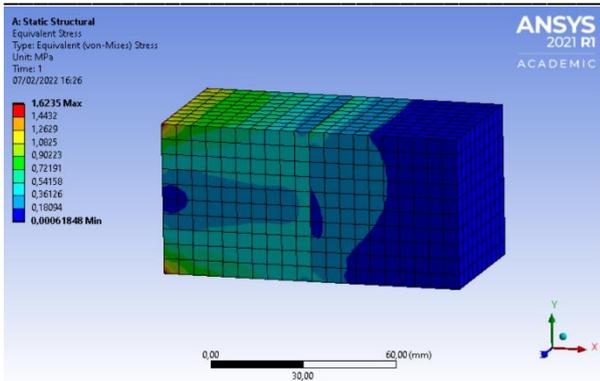


Figura 5.7: tensione equivalente di Von-Mises utilizzando un contatto di tipo "Joint".

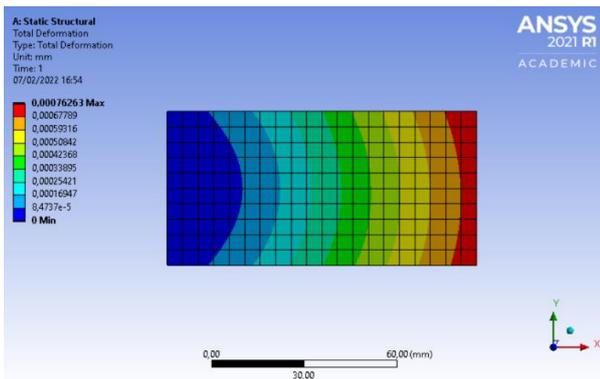
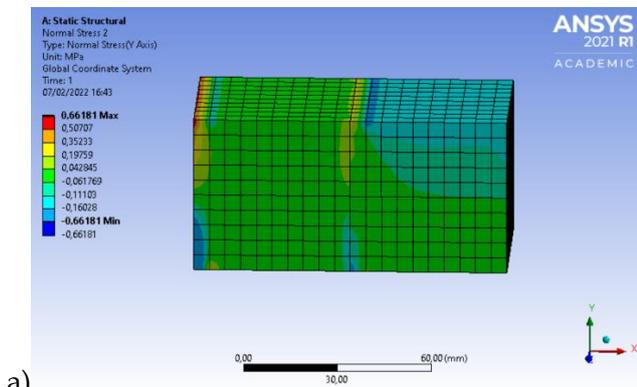
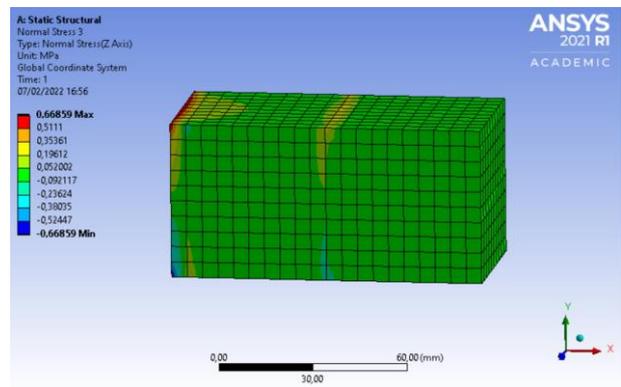


Figura 5.8: spostamento risultante utilizzando un contatto di tipo "Joint".



a)



b)

Figura 5.9: tensione risultanti lungo l'asse Z (a) e lungo l'asse Y (b) utilizzando un contatto di tipo "Joint".

Dalle figure 5.7 e 5.9 si può notare la discontinuità tensionale introdotta dal vincolo multiplo. In figura 62.b, in cui è rappresentata la distribuzione della tensione lungo l'asse Y (direzione di applicazione del carico), si osserva come all'interfaccia si generi una zona di trazione (giallo-arancione) sulla superficie superiore della struttura, a cui corrisponde una zona di compressione (blu) sulla superficie inferiore (la zona di compressione sulla superficie superiore del cubo di destra è dovuta all'applicazione del carico, e si manifesta anche nel caso di utilizzo di un contatto di tipo "Contact").

Già da questa prima simulazione si nota il differente comportamento circa le due metodologie di contatto, specialmente per quanto riguarda la distribuzione di tensione all'interfaccia. Mentre nel caso di un contatto di tipo "Contact" la distribuzione della tensione assiale (asse X) sulla superficie di contatto del cubo di sinistra non differisce da quella sul cubo di destra (andamento *a farfalla*), nel caso del contatto di tipo "Joint" esse manifestano sia una distribuzione sia valori numerici diversi.

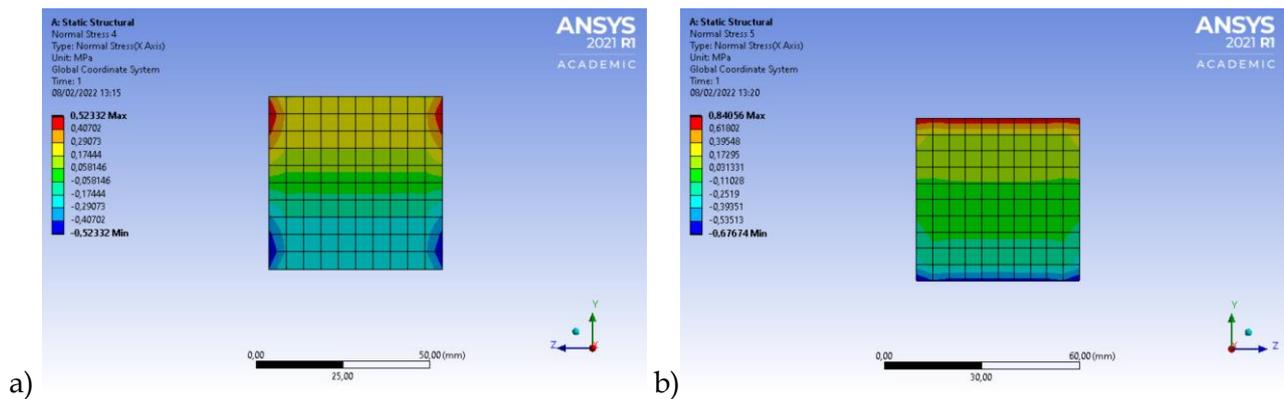


Figura 5.10: tensione normale (lungo l'asse X) all'interfaccia, considerando un contatto di tipo "Joint". A) cubo vincolato. B) cubo caricato.

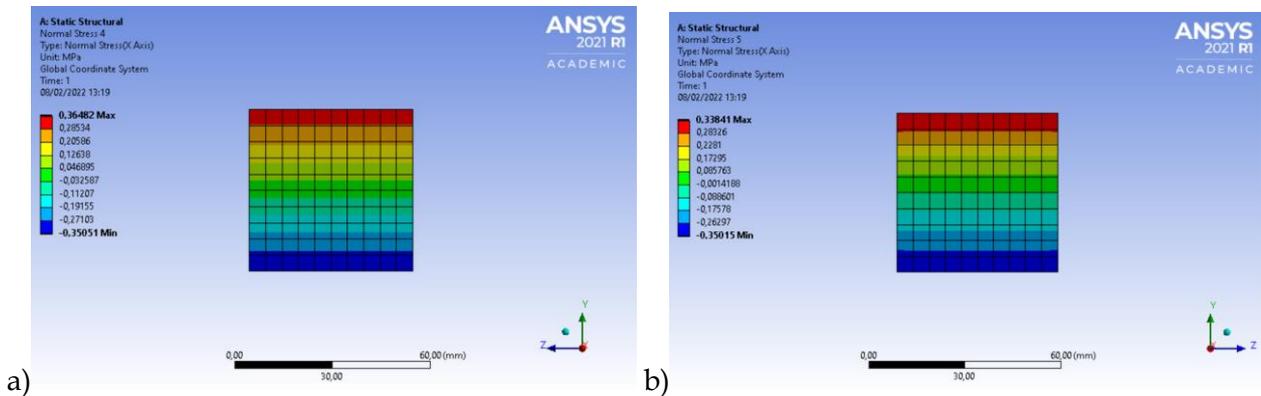


Figura 5.11: tensione normale (lungo l'asse X) all'interfaccia, considerando un contatto di tipo "Contact". A) cubo vincolato. B) cubo caricato.

Preliminarmente sembrerebbe che l'opzione "Contact" produca l'effetto di unire i due cubi in un unico volume. Considerare l'interfaccia, quindi, mostrerebbe gli stessi risultati che si avrebbero analizzando un solido unico (di lunghezza $2L$, con L pari al lato del cubo) a metà della sua lunghezza.

L'utilizzo di "Joint", invece, produce una forte discontinuità tra i due. Mentre il cubo caricato (cubo di destra) mostra una distribuzione della tensione normale simile a quanto osservato con

l’opzione “Contact” (una zona di trazione sulla porzione superiore e una zona di compressione sulla porzione inferiore), l’interfaccia del componente vincolato è sempre suddivisibile in una regione soggetta a trazione e una a compressione, con una particolare concentrazione degli sforzi verso i vertici della superficie.

Si è voluto osservare il comportamento delle due tipologie di contatto anche rispetto all’applicazione di un carico di compressione. Si è quindi applicata una forza di modulo pari a 300 N diretta lungo il verso negativo dell’asse X.

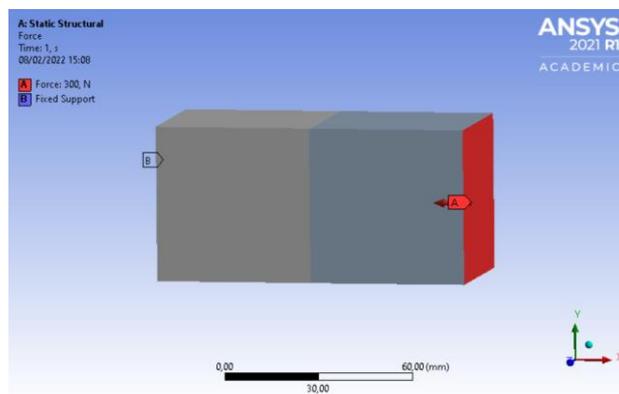


Figura 5.12: sistema di vincolo e carico di compressione.

Anche in questo caso il contatto di tipo “Contact” fa sì che l’applicazione del carico di compressioni comporti una risposta che si attenderebbe da un volume unico, mentre il contatto di tipo “Joint” mette in luce una chiara interfaccia tra i due componenti.

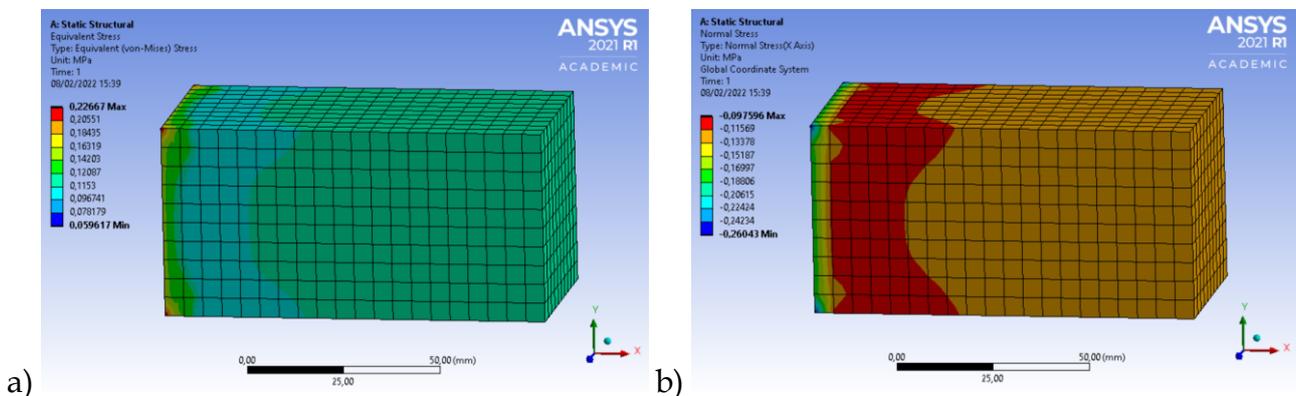


Figura 5.13: tensione equivalente di Von-Mises (a) e tensione lungo l'asse X (b) considerando un contatto di tipo "Contact".

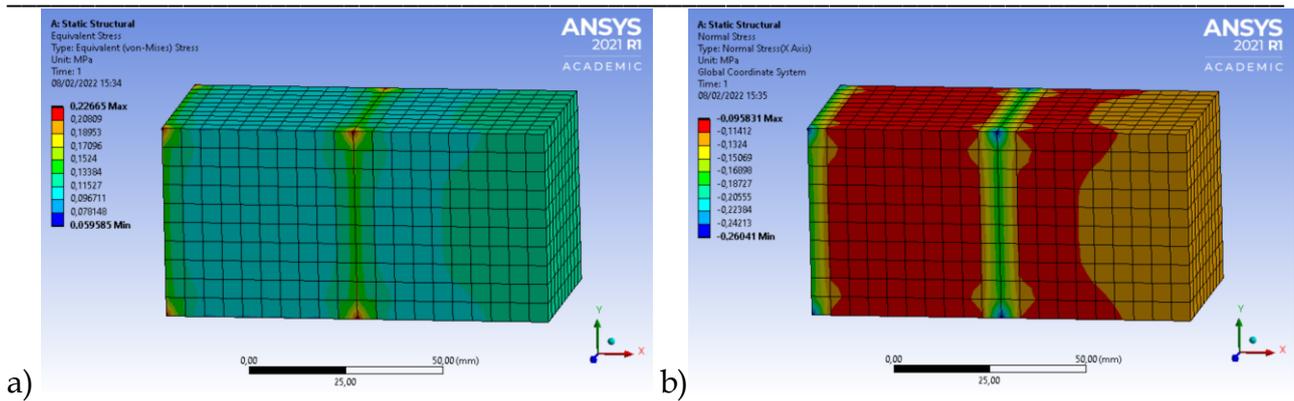


Figura 5.14: tensione equivalente di Von-Mises (a) e tensione lungo l'asse X (b) considerando un contatto di tipo "Joint".

In definitiva entrambe le metodologie di contatto dimostrano l'effettivo trasferimento dei carichi, e non si può ancora concludere quale delle due possa essere definita più corretta dell'altra. Il fatto che nel caso del contatto di tipo "Contact" si osservi una risposta assimilabile a quella che si osserverebbe nel caso di un volume unico, però, potrebbe a pensare di prediligere un contatto di tipo "Joint".

5.2: Modello di contatto fra materiali differenti

Il modello esplorativo semplificato è stato modificato impostando un materiale differente per ciascun componente: al cubo vincolato è stato assegnato l'*acciaio strutturale* (modulo di Young pari a 200 MPa), mentre al cubo caricato è stato assegnato il *polietilene* (modulo di Young pari a 1,1 MPa). Il contatto tra i due componenti è stato realizzato per mezzo di un vincolo multiplo "Joint", sempre sopprimendo ogni grado di libertà all'interfaccia.

Si è scelto di utilizzare un carico di flessione di modulo pari a 300 N, applicato alla superficie superiore del cubo di destra.

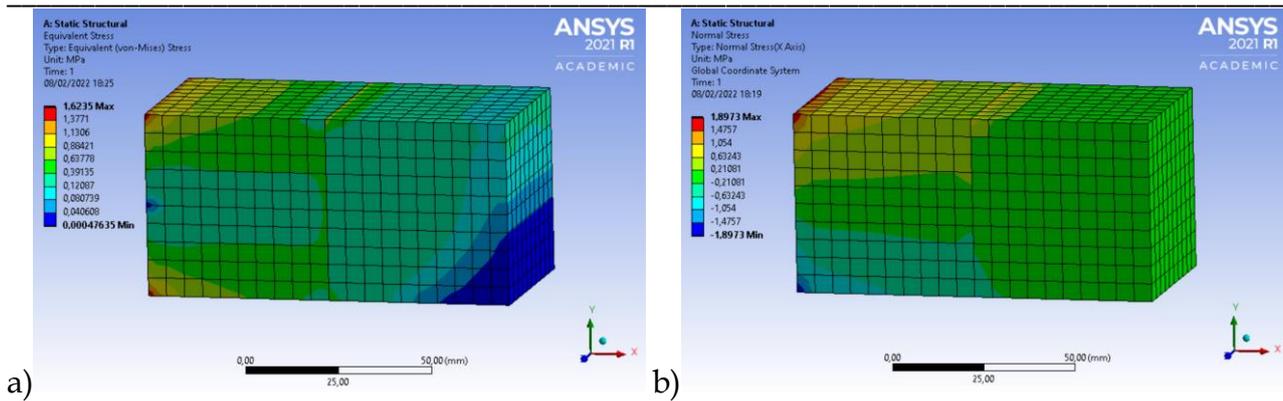


Figura 5.15: tensione equivalente di Von-Mises (sinistra) e tensione lungo l'asse X (destra), con componente di sinistra in acciaio strutturale e componente di destra in polietilene.

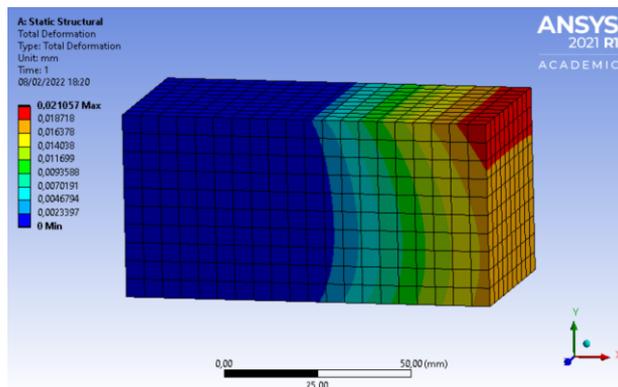


Figura 5.16: spostamento risultante, con componente di sinistra in acciaio strutturale e componente di destra in polietilene.

Gli sforzi si trasferiscono all'interno della struttura e si concentrano sul componente più rigido, in prossimità dei punti di vincolo. La deformazione riguarda, invece, solo il componente in polietilene, più deformabile rispetto all'acciaio strutturale. Nonostante, quindi, la deformazione riguardi solo la porzione sollecitata, gli sforzi vengono correttamente trasferiti all'altro componente, che sviluppa dei picchi di tensione in prossimità del vincolo ad incastro.

Vengono riportati i risultati ottenuti nelle stesse condizioni (componente sollecitato in polietilene, componente vincolato in acciaio strutturale), applicando un carico di compressione (lungo il verso negativo dell'asse X) invece che di flessione.

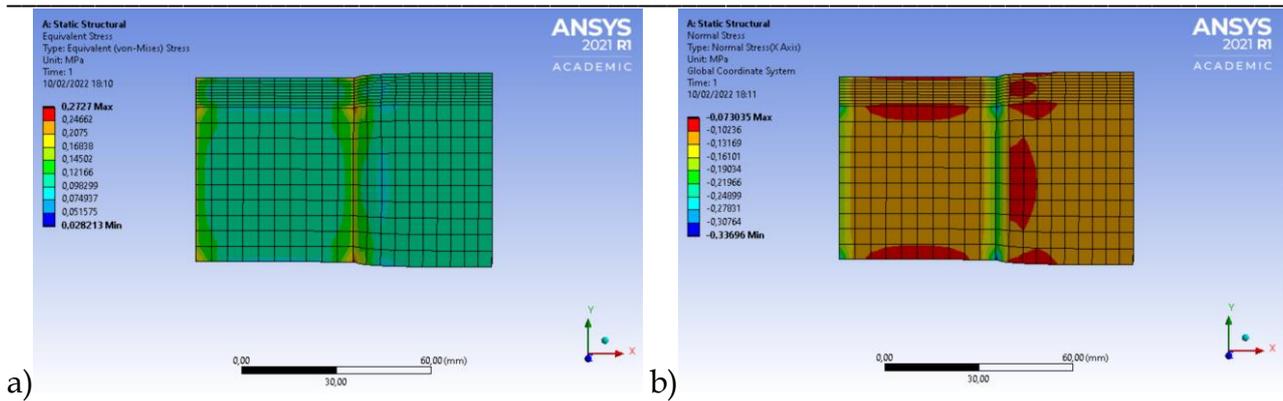


Figura 5.17: tensione equivalente di Von-Mises (sinistra) e tensione lungo l'asse X risultanti dall'applicazione del carico di compressione.

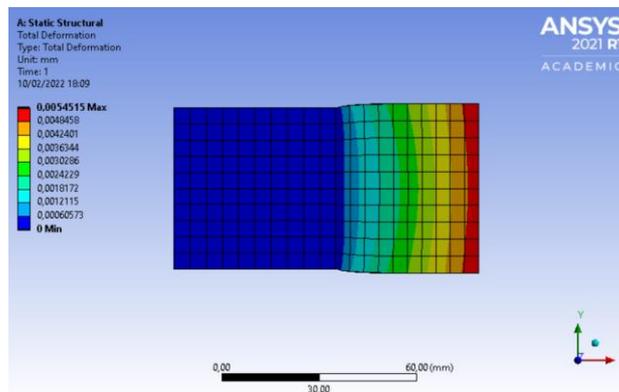


Figura 5.18: spostamento risultante dall'applicazione del carico di compressione.

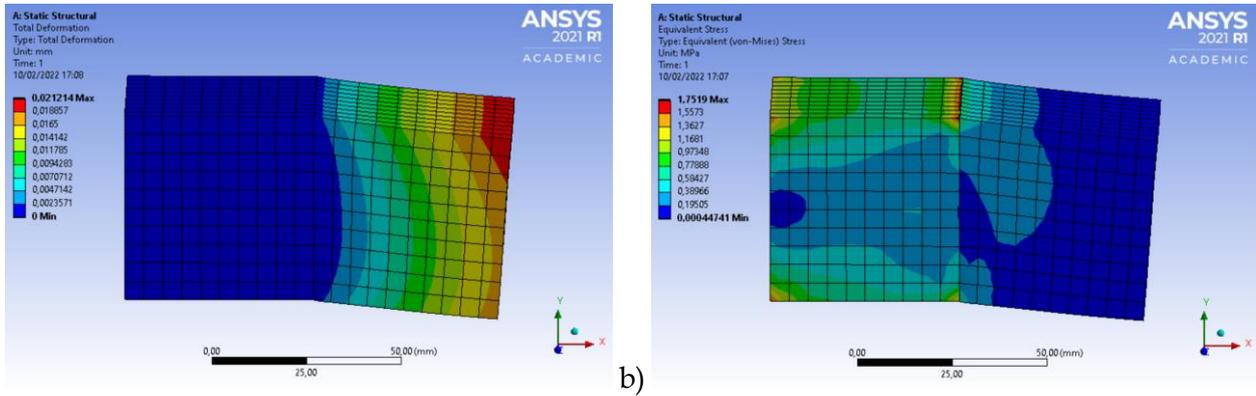
Al fine di testare il corretto funzionamento del vincolo multiplo anche nel caso in cui si ammettano dei gradi di libertà all'interfaccia, si è modificato il contatto ammettendo la rotazione lungo la direzione assiale (ROTX). La simulazione è stata svolta utilizzando le stesse condizioni di materiali, vincolo e carico utilizzate nell'esempio precedente.

Non verranno riportate le immagini relative ai risultati ottenuti, in quanto pressochè analoghe alle precedenti. Si dimostra esclusivamente la corretta insorgenza di rotazioni lungo l'asse X:

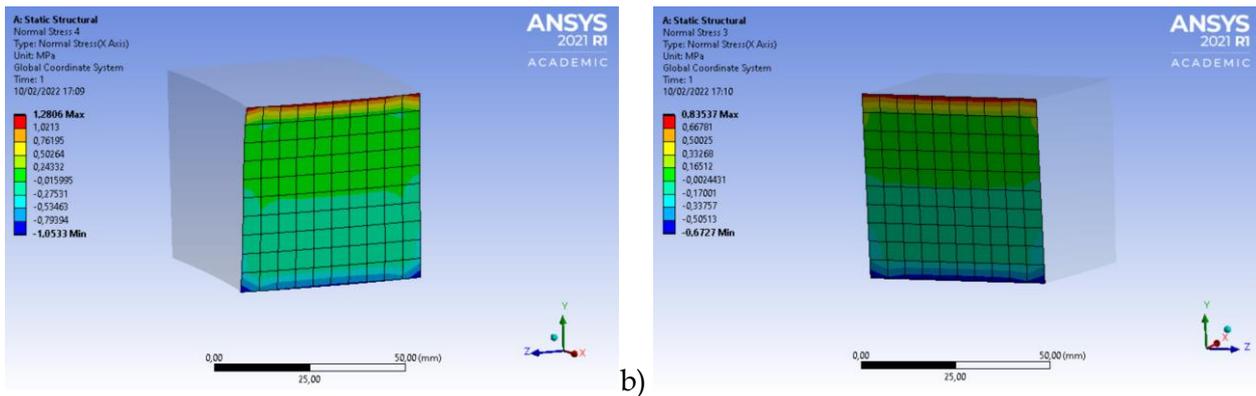
Time [s]	Relative Rotation (Relative Rotation X) [°]
2,45E-02	1,87E-05
4,90E-02	-1,77E-08
8,58E-02	-3,50E-07
0,14087	-2,12E-07
0,22356	-2,08E-07
0,34759	-2,09E-07
0,53364	-2,09E-07
0,81271	-2,09E-07
1	-2,09E-07

Tabella 5.1: rotazioni all'interfaccia lungo l'asse X, a seguito della modifica del contatto.

La stessa simulazione è stata svolta considerando un contatto di tipo “Contact”. La superficie laterale di uno dei due cubi è stata vincolata tramite un vincolo ad incastro, mentre il cubo non vincolato è stato sollecitato a flessione tramite una forza diretta lungo il verso negative dell’asse Y applicata alla superficie superiore dello stesso.



a) b)
 Figura 5.19: spostamento risultante (a) e tensione equivalente di Von-Mises (b) risultanti dall’applicazione del carico a flessione, considerando un contatto di tipo “Contact”.

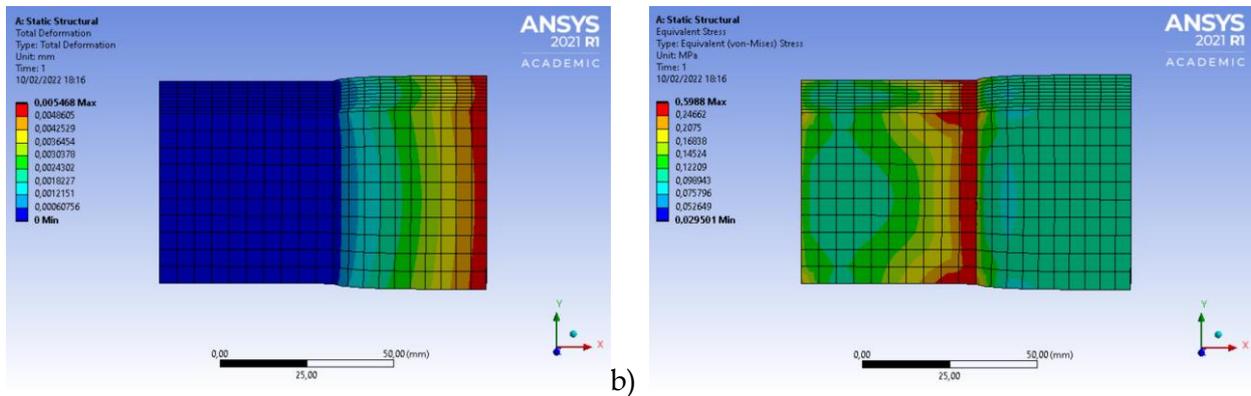


a) b)
 Figura 5.20: tensione normale all’interfaccia risultante dall’applicazione del carico a flessione, considerando un contatto di tipo “Contact”.

Come nel caso di utilizzo di un contatto di tipo “Joint”, gli sforzi si concentrano principalmente sul componente più rigido in acciaio strutturale, mentre la deformazione coinvolge in maggior misura il componente in polietilene. Le interfacce di entrambi i componenti presentano la stessa distribuzione di tensione assiale “a farfalla”, descritta da una zona di trazione nella porzione superiore e una di compressione nella porzione inferiore.

Si propongono anche i risultati ottenuti dall’applicazione di un carico di compressione di pari modulo, in cui si osserva, allo stesso modo, una concentrazione degli sforzi sul componente più

rigido, in particolar modo in prossimità dell’interfaccia. Nuovamente la deformazione coinvolge in modo principale il componente meno rigido.



a) b) *Figura 5.21: spostamento (sinistra) e tensione equivalente di Von-Mises (destra) risultanti dall'applicazione del carico di compressione, considerando un contatto di tipo “Contact”.*

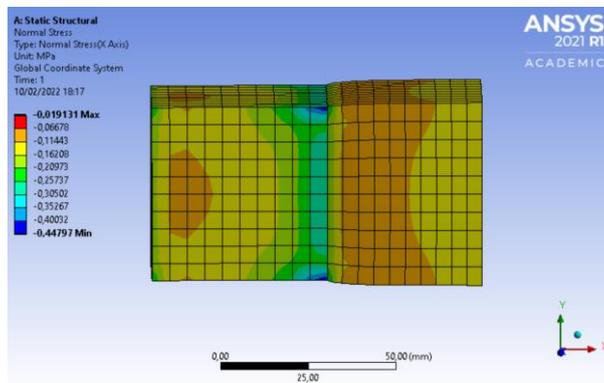


Figura 5.22: tensione assiale risultante dall'applicazione del carico di compressione, considerando un contatto di tipo “Contact”.

5.3: Modello di contatto impianto-moncone

I risultati ottenuti confermano l’effettivo funzionamento delle due modalità di contatto circa il trasferimento dei carichi tra i componenti. Si vuole testarne il comportamento considerando un assieme composto da impianto cilindrico non filettato e moncone sferico, in modo da assicurarsi che effettivamente non si possa avere separazione tra i componenti.

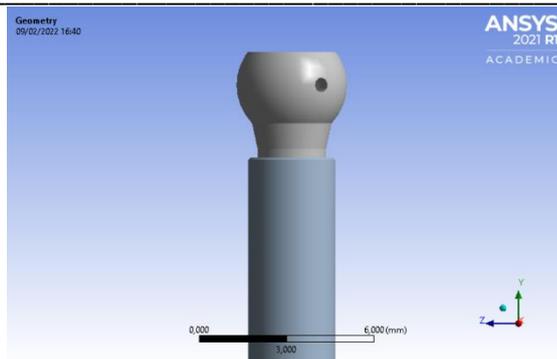


Figura 5.23: assieme composto da impianto cilindrico e moncone.

Si è assegnato il *titanio grado 5* come materiale costitutivo (proprietà a pag.27, Fig. 3.3). Il contatto è stato realizzato, in prima analisi, tramite un vincolo multiplo fisso (non sono concessi gradi di libertà all'interfaccia).

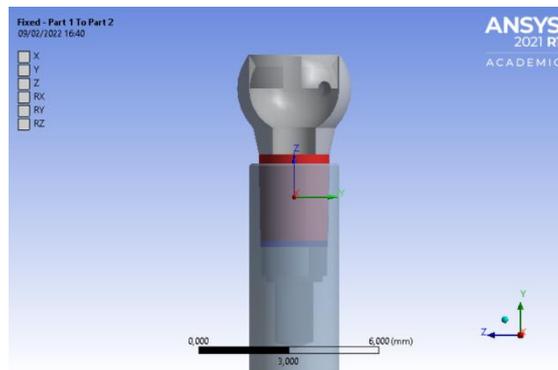


Figura 5.24: vincolo multiplo tra moncone sferico e impianto cilindrico.

È stata impostata una mesh tetraedrica di lato massimo pari a 0,5 mm. L'impianto è stato vincolato presso la base tramite un vincolo ad incastro. Si vuole simulare una prova di trazione, in modo da osservare se la tipologia di contatto scelta garantisce il corretto trasferimento dei carichi e prevenga la separazione dei componenti. Si è quindi applicato un carico di modulo pari a 300 N alla superficie sferica esterna del moncone.

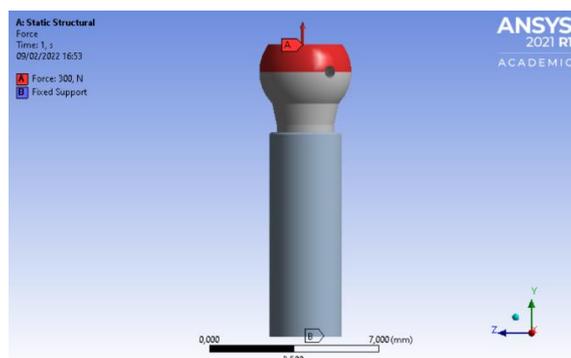


Figura 5.25: sistema di vincolo e carico di trazione.

Il moncone non si separa dall’impianto. Se si osserva la Fig. 5.26, si può notare come la zona di contatto tra i due componenti risulti estremamente meno sollecitata rispetto al resto della struttura. Bisogna considerare che la struttura raggiunga, proprio in questa zona, il suo massimo spessore, il che comporta il trasferimento delle sollecitazioni al di sotto del moncone sferico (Fig. 5.26b).

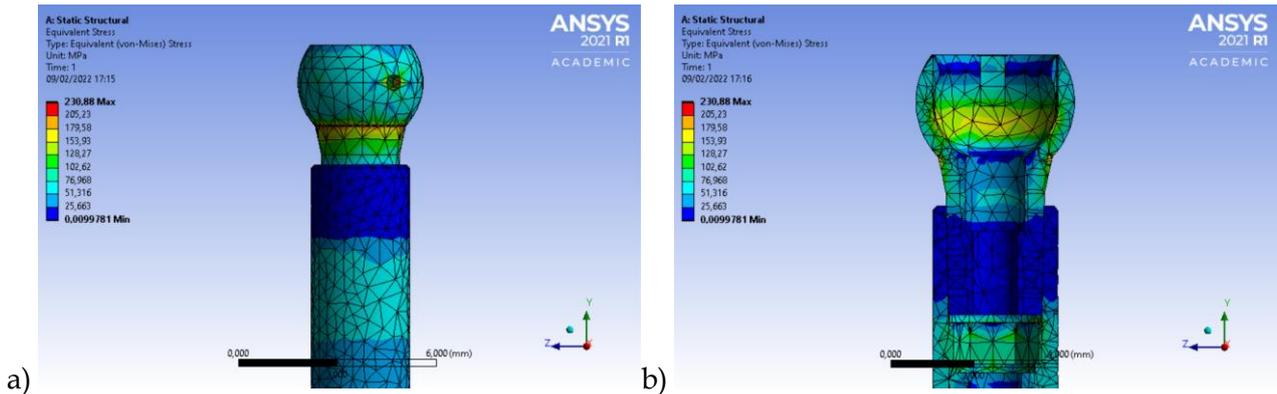


Figura 5.26: tensione equivalente di Von-Mises dell'intera struttura (a) e della sezione (b).

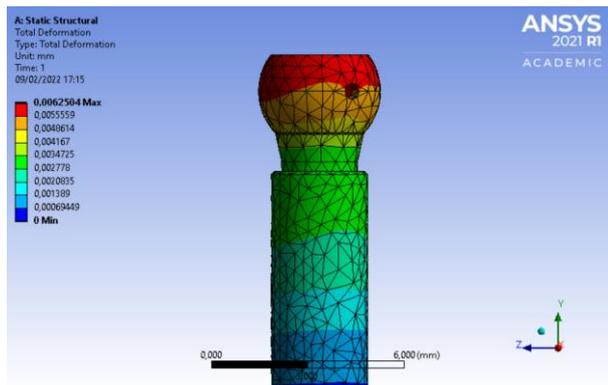


Figura 5.27: spostamento della struttura.

Al fine di verificare quanto ipotizzato (cioè che lo spessore della zona di contatto tra moncone e impianto determini il trasferimento degli sforzi al di sotto di tale regione), la struttura è stata sollecitata con un carico di taglio, applicando una forza di modulo pari a 3000 N (si è scelto di aumentare il modulo al fine di accentuarne gli effetti).

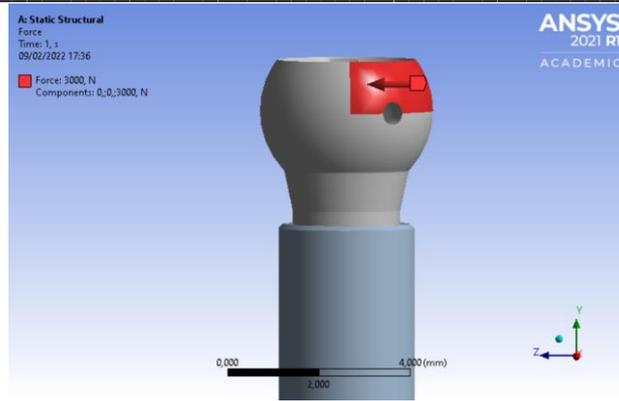


Figura 5.28: sollecitazione a taglio applicata al moncone.

Osservando la distribuzione della tensione equivalente di Von-Mises, si può confermare quanto detto precedentemente. Le porzioni di moncone sferico e impianto cilindrico a contatto risultano poco sollecitate ($\sigma \approx 1$ MPa). Si nota una zona di concentrazione degli sforzi sulla superficie interna dell'impianto sottostante alla base del moncone.

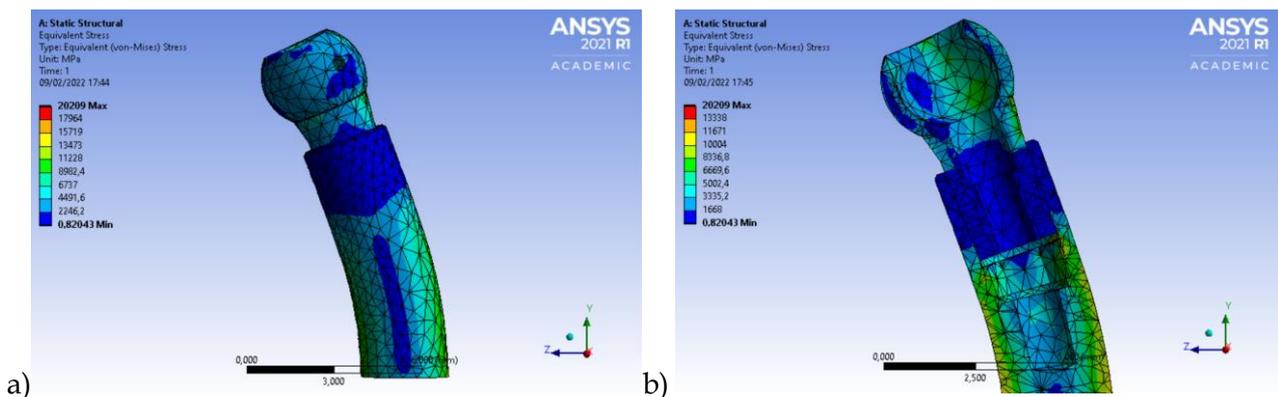


Figura 5.29: tensione equivalente di Von-Mises dell'intera struttura (a) e della sezione (b).

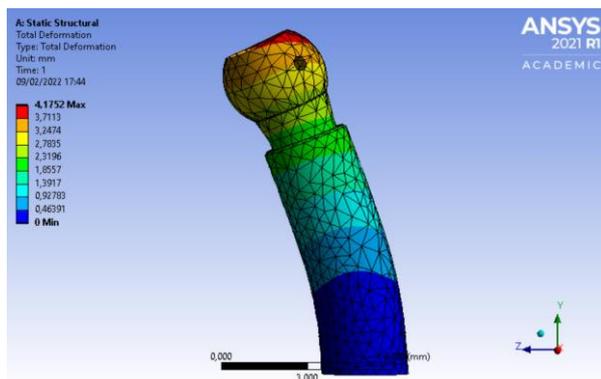


Figura 5.30: spostamento della struttura.

I casi di carico di trazione e di taglio sono stati replicati considerando un contatto di tipo “Contact”. Il carico di trazione (modulo pari a 300 N) non comporta la separazione dei due componenti, e determina una distribuzione della tensione equivalente di Von-Mises simile a quella

ottenuta tramite il contatto di tipo "Joint" (vedi figura 5.29b), con la differenza di presentare una distribuzione delle tensioni meno uniforme nella regione di contatto tra moncone sferico e impianto. Allo stesso modo, però, tale regione risulta estremamente meno sollecitata rispetto al resto della struttura, e comporta una zona di concentrazione degli sforzi in prossimità della base del moncone. La maggiore uniformità osservata nel caso del contatto di tipo "Joint" potrebbe essere dovuta, semplicemente, al picco di tensione maggiore, che comporta una saturazione del risultato complessivo. Di fronte all'applicazione di un carico di trazione, quindi, le due metodologie di contatto possono essere paragonabili.

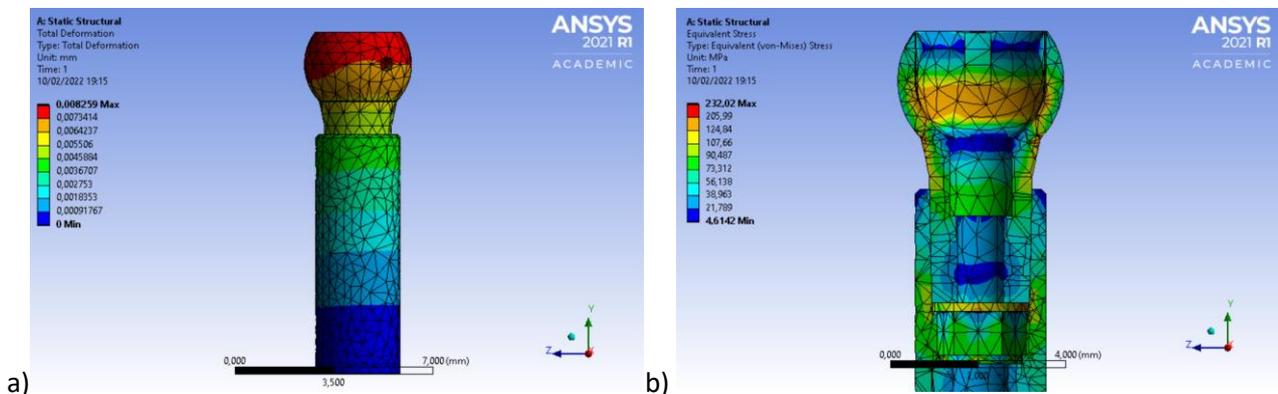


Figura 5.31: spostamento (a) e tensione equivalente di Von-Mises sulla sezione (b) risultanti dall'applicazione del carico a trazione, considerando un contatto di tipo "Contact".

Anche il caso di applicazione di un carico di taglio conduce alle stesse conclusioni discusse precedentemente: la struttura trasferisce effettivamente le sollecitazioni e la deformazione attraverso i suoi componenti, e si verifica anche in questo caso l'effetto di "scarico" dovuto allo spessore della zona di contatto tra moncone e impianto.

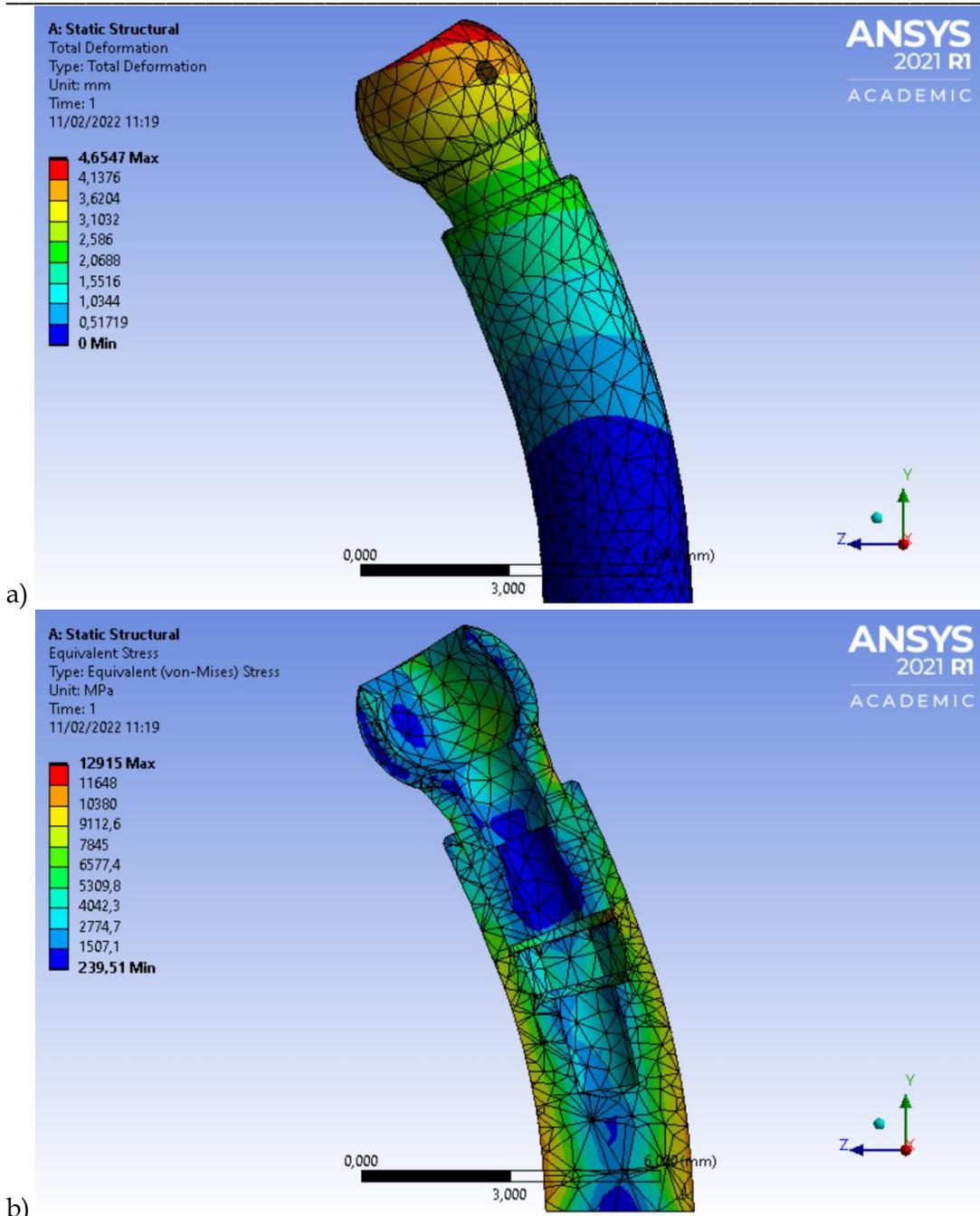


Figura 5.32: spostamento (a) e tensione equivalente di Von-Mises sulla sezione (b) risultanti dall'applicazione del carico di taglio, considerando un contatto di tipo "Contact".

I risultati appena ottenuti permettono di affermare che entrambe le metodologie di contatto prevengono la separazione dei componenti e garantiscono il trasferimento delle sollecitazioni e della deformazione attraverso di essi. Non è ancora chiaro, però, quale delle due modalità sia da preferire per il caso in esame. Si è quindi scelto di proseguire lo studio in merito al contatto considerando l'intera struttura della protesi.

5.4: Modello esplorativo dell'intera struttura

Il modello precedente è stato sostituito con l'intera struttura, costituita da impianto cilindrico 3,2x8 mm, moncone sferico, vite sferica, cappetta sferica e cappetta semisferica, nella configurazione che prevede un'angolazione di 30° tra asse longitudinale della vite sferica e asse longitudinale dell'impianto.

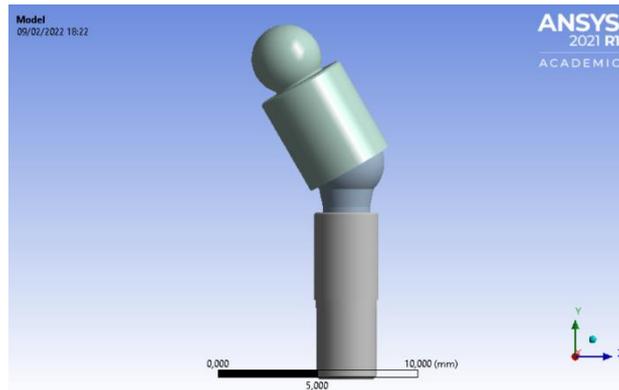


Figura 5.33: intera struttura con angolazione di 30° tra asse longitudinale della vite sferica e asse longitudinale dell'impianto.

Si è assegnato il *titanio grado 5* come materiale costitutivo. Il contatto tra i componenti è stato realizzato tramite vincoli multipli, a cui è stato rimosso ogni grado di libertà.

Si è realizzata una mesh tetraedrica di lato massimo pari 0,5 mm per quanto riguarda l'impianto cilindrico, la cappetta sferica e la cappetta per prove. Il moncone sferico e la vite sferica sono stati discretizzati tramite elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,3 mm, ulteriormente dimezzato per quanto riguarda la porzione cilindrica del moncone e la porzione sferica della vite.

La struttura è stata vincolata presso la base dell'impianto cilindrico e lungo la superficie cilindrica dello stesso, fino al livello di supporto dell'impianto (3 mm dalla sommità). È stata poi sollecitata tramite una forza nodale di modulo pari a 500 N inclinata di 10° rispetto all'asse longitudinale della vite sferica, applicata ad un nodo sulla sommità della cappetta per prove.

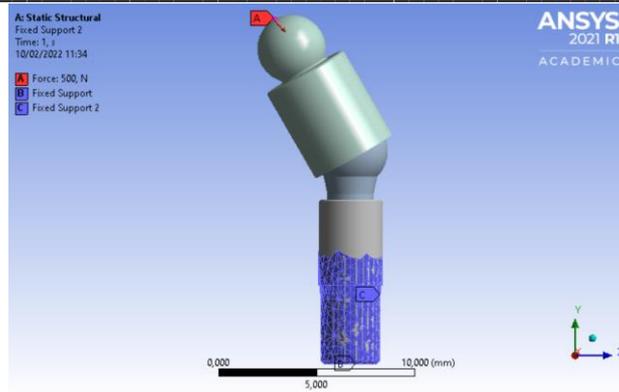


Figura 5.34: sistema di vincolo e carico inclinato.

Vengono riportati i risultati in termini di spostamento e tensione equivalente di Von-Mises dei componenti maggiormente sollecitati.

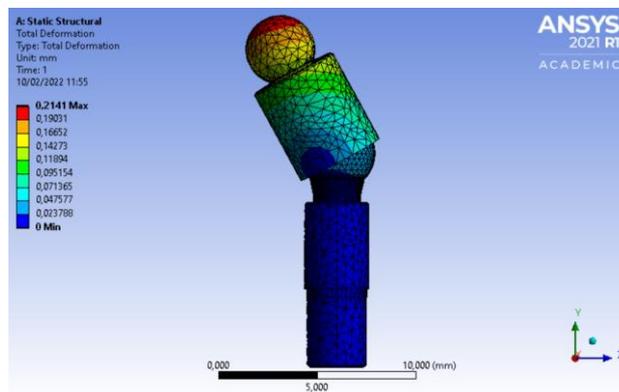


Figura 5.35: spostamento della struttura, considerando un contatto di tipo “Joint”.

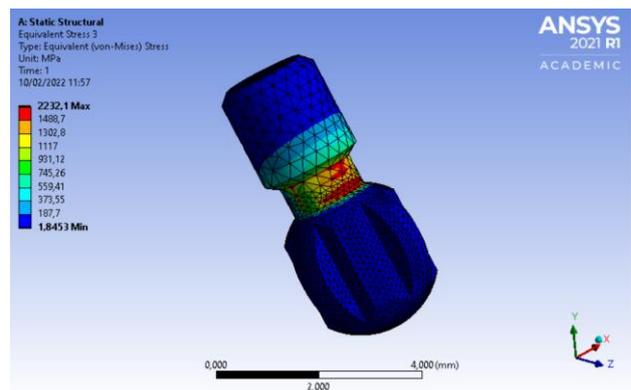
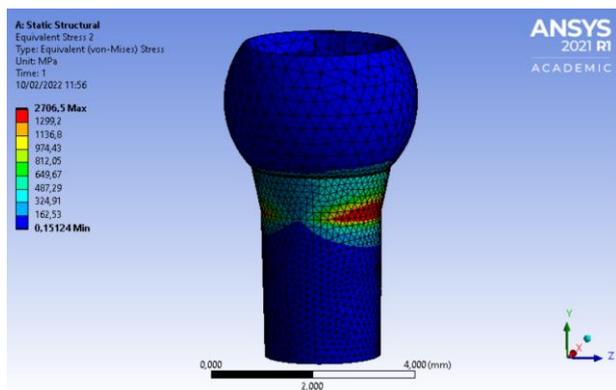


Figura 5.36: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (sinistra) e sulla vite sferica (destra), considerando un contatto di tipo “Joint”.

Come atteso, la struttura giunge a rottura presso la porzione cilindrica del moncone sferico (punti A e B, pag. 41 Fig. 4.10). È interessante notare, però, la presenza di altra zona dove gli sforzi risultano superiori al limite di snervamento del materiale costitutivo: sulla porzione cilindrica non filettata della vite sferica si registra un picco di tensione del valore massimo pari a 2232,1 MPa.

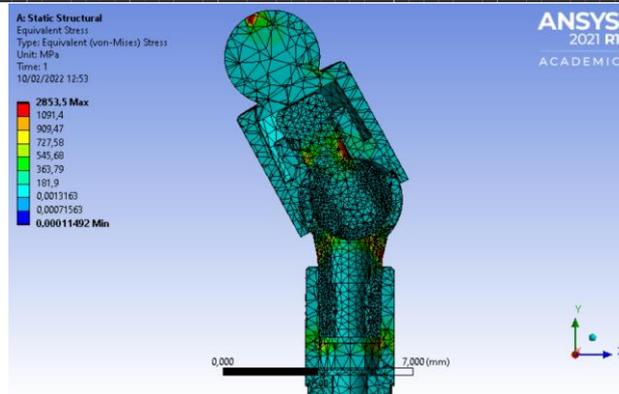


Figura 5.37: distribuzione della tensione equivalente di Von-Mises sulla sezione, , considerando un contatto di tipo "Joint".

Il picco di tensione che viene a generarsi sulla vite sferica viene ritenuto anomalo. Esso, infatti, presenta valori estremamente elevati, mentre il resto del componente risulta poco sollecitato (≈ 1 MPa). Ci si aspetterebbe, invece, di osservare l'effetto della compressione che la vite subisce, e quindi delle sollecitazioni maggiori in prossimità del contatto con il moncone.

Scegliendo il contatto di tipo "Contact", si ottiene quanto segue:

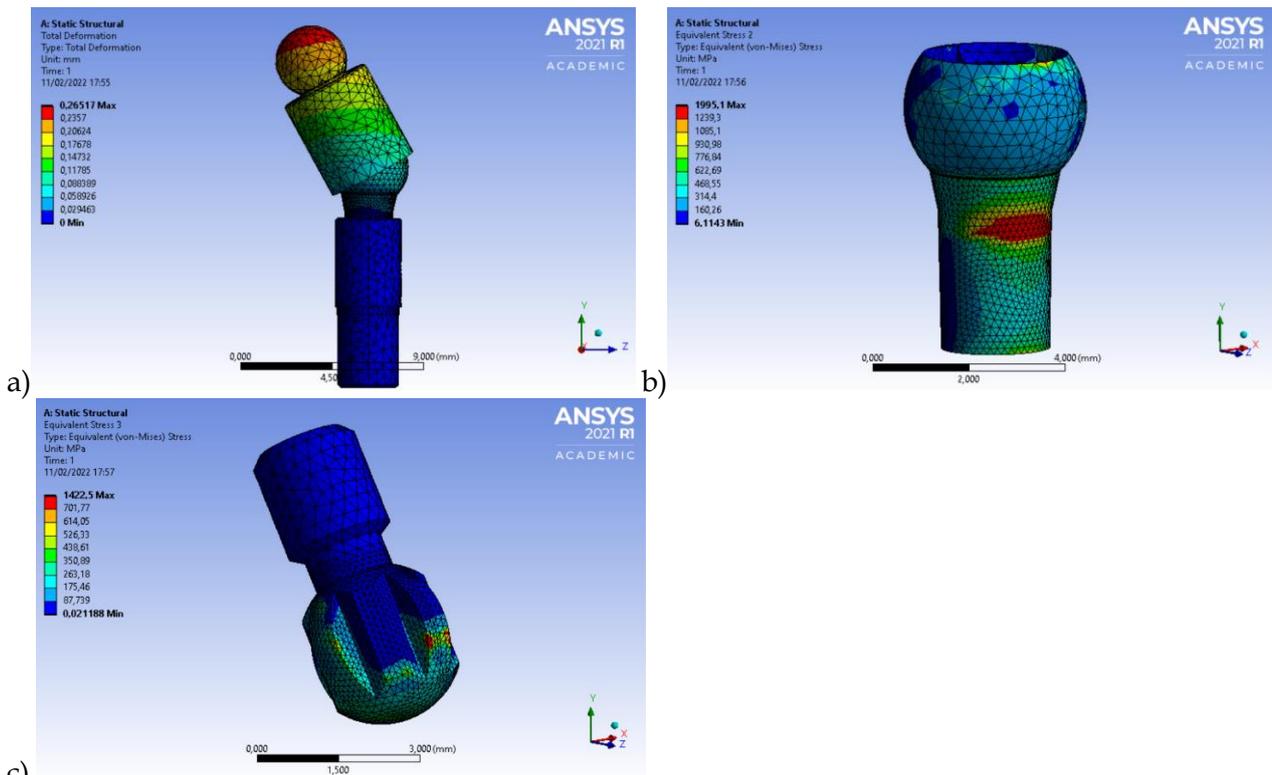


Figura 5.38: spostamento (a), tensione equivalente di Von-Mises sul moncone (b) e sulla vite sferica (c), considerando un contatto di tipo "Contact".

Il contatto di tipo "Contact" permette di ottenere dei risultati prossimi a quanto atteso.

Il moncone sferico rimane il componente maggiormente sollecitato, e subisce snervamento del

materiale costitutivo presso i punti A e B (Fig. 4.10, pag. 41). La vite sferica subisce anch'essa snervamento del materiale, ma a differenza del caso precedente questo coinvolge in modo estremamente localizzato la porzione sferica a contatto con il moncone, in particolar modo in prossimità delle convessità.

Lo studio circa le due metodologie di contatto, quindi, ha portato a concludere che entrambe garantiscano il trasferimento delle sollecitazioni attraverso le superfici di contatto e prevengano la separazione dei componenti. I risultati ottenuti, però, indicano che per il caso in esame sia da preferire un contatto di tipo “Contact”. Si ipotizza, infatti, che l'insorgenza del picco di tensione sulla vite sferica potrebbe essere dovuta al fatto che la struttura della protesi comprende superfici complesse e caratterizzate da curvature: il fatto che il contatto di tipo “Joint” preveda l'identificazione automatica di un centroide rispetto al quale calcolare le sollecitazioni in ogni punto della superficie in considerazione potrebbe causare, nel caso di superfici complesse, un'amplificazione nel calcolo dei momenti.

Capitolo 6 : **Modello comprensivo di contatti tra i componenti**

Di seguito verranno descritte le simulazioni svolte, in cui si è considerato il modello 3,2x8 mm nelle due varianti previste. Di qui in avanti ci si riferirà ai casi in cui sia previsto il moncone a sezione "normale" o il moncone a sezione "ridotta". Ciò che differisce tra le due strutture, infatti, è proprio la dimensione del moncone, ridotta nel secondo caso sia in termini di altezza sia in termini di diametro. Conseguentemente si ha la riduzione dei componenti vite, cappetta sferica e cappetta semisferica. L'impianto non subisce variazioni. La riduzione della dimensione della struttura comporta dei vantaggi in termini di funzionalità, praticità e ingombro, soprattutto per quanto riguarda l'eventuale utilizzo della stessa in un sistema complesso quale un *ponte*.

L'inclinazione massima raggiungibile α_{max} per quanto riguarda la struttura comprensiva di moncone a sezione ridotta è pari a 25°.

In ordine, verranno discussi i seguenti casi analizzati:

- Moncone a sezione normale: α pari a 30°;
- Moncone a sezione normale: α pari a 15°;
- Moncone a sezione ridotta: α pari a 25°;
- Moncone a sezione ridotta: α pari a 15°.

6.1. Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$

La struttura è stata assemblata nella configurazione voluta tramite software Solidworks, poi importata sul software Ansys Workbench.

Ad ogni componente è stato assegnato il *titanio grado 5* come materiale costitutivo. Si sono mantenuti i contatti importati insieme alla geometria, di tipo "Contact". Non sono stati consentiti gradi di libertà all'interfaccia tra i componenti, con l'intenzione di replicare il comportamento della protesi una volta applicata la coppia di serraggio nominale.

Si è realizzata una mesh tetraedrica di lato massimo pari a 0,5 mm. Dal momento che le simulazioni svolte in precedenza hanno indicato, generalmente, il moncone sferico e la vite sferica come i componenti maggiormente sollecitati, ad essi è stato imposto un ridimensionamento del lato massimo della mesh da 0,5 mm a 0,3 mm, ulteriormente dimezzato per quando riguarda la porzione cilindrica del moncone e la porzione sferica della vite.

La struttura è stata vincolata, analogamente ai casi precedenti, tramite dei vincoli ad incastro applicati alla base dell'impianto e lungo la superficie cilindrica dello stesso, al di sotto del livello di supporto dell'impianto (3 mm dalla sommità). Si è poi applicata una forza nodale alla sommità della cappetta emisferica, avente modulo pari a 500 N e inclinazione pari a 10° rispetto all'asse longitudinale della vite sferica.

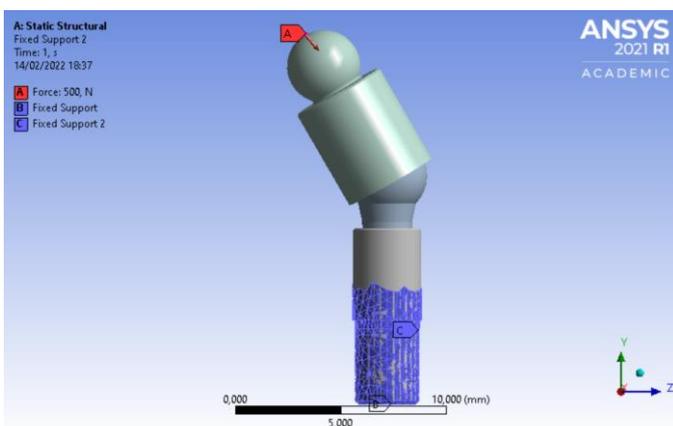


Figura 6.1. sistema di vincoli e carico applicato.

La zona più sollecitata dell'intera struttura (trascurando il picco dovuto all'applicazione della forza nodale) risulta essere la porzione cilindrica del moncone sferico in prossimità dei punti A e B, dove

la tensione supera il limite di snervamento del materiale. Confrontando tali zone, si osserva una maggior concentrazione degli sforzi in prossimità del punto A (maggiori di circa 500 MPa). Anche la vite sferica presenta delle regioni in cui le tensioni eccedono il limite massimo consentito dal materiale costitutivo, regioni che, però, si mantengono estremamente limitate: dal momento che gli elementi limitrofi presentano sollecitazioni inferiori (dell'ordine di 400-500 MPa) si ritiene che nel caso realistico il picco di tensione verrebbe “distribuito” attraverso il materiale circostante.

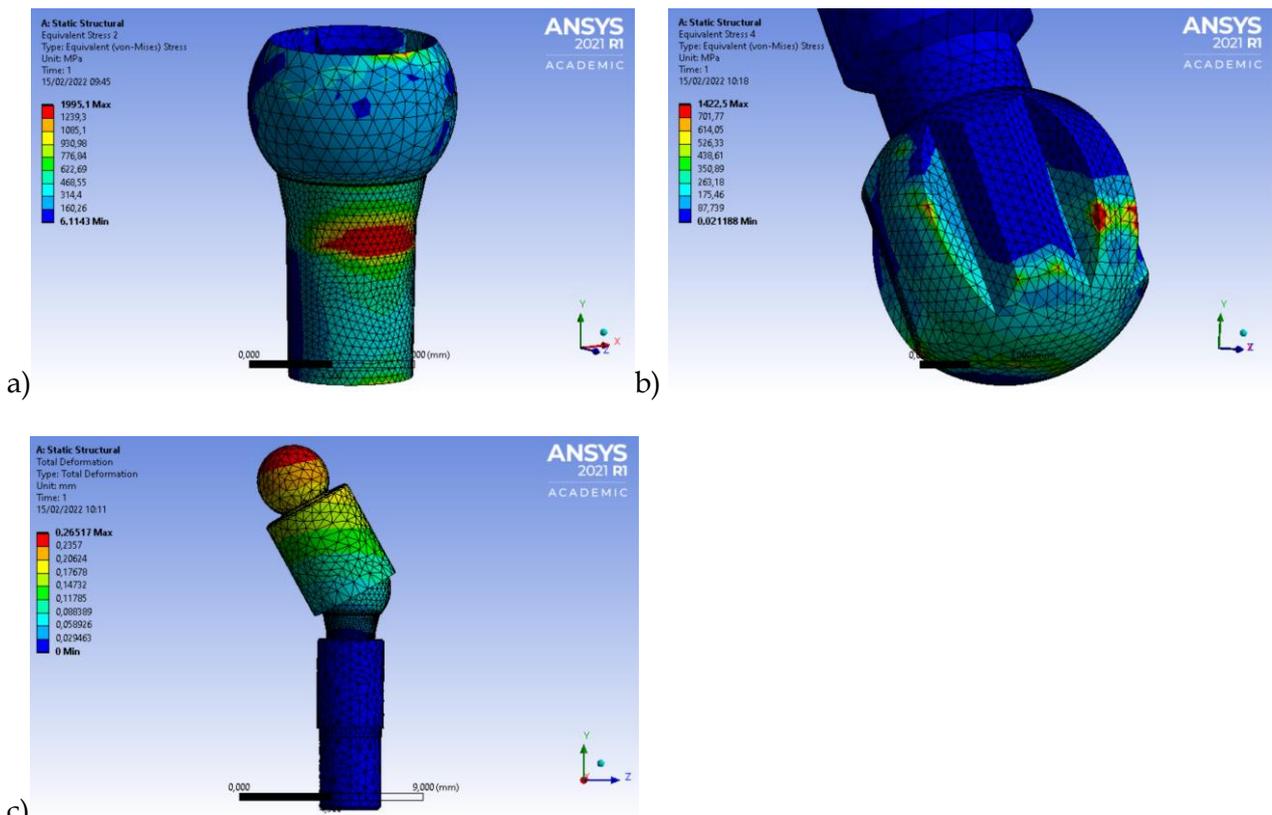


Figura 6.2: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (a), sulla porzione sferica della vite (b) e spostamento dell'intera struttura (c).

6.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$

Si è realizzato l'assieme dei componenti tramite software Solidworks, considerando la capretta emisferica dimensionata per un $\alpha=15^\circ$ (Capitolo 2, Fig. 2.5). L'assieme è stato poi importato sul software Ansys Workbench.

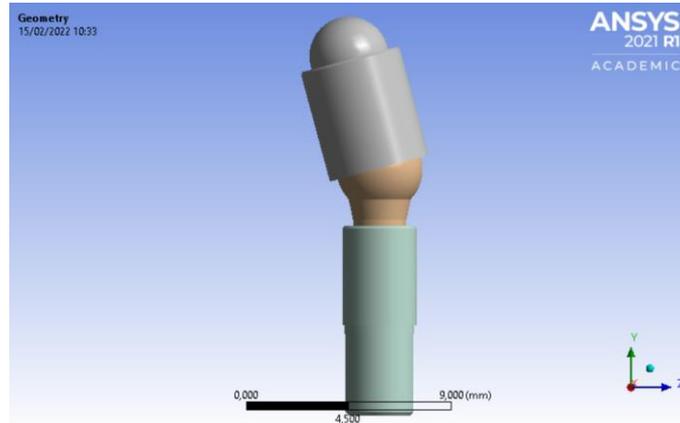


Figura 6.3: modello 3,2x8 mm con moncone a sezione normale, $\alpha=15^\circ$.

Al fine di verificare se la variazione dell'angolo α comporti una modifica nella coppia esercitata dal carico applicato all'altezza dell'accoppiamento sferico, si è realizzato uno schema di forze. Si consideri:

$$\gamma = \alpha + \beta , \quad (2)$$

in cui β rappresenta l'inclinazione del carico rispetto all'asse longitudinale della vite sferica.

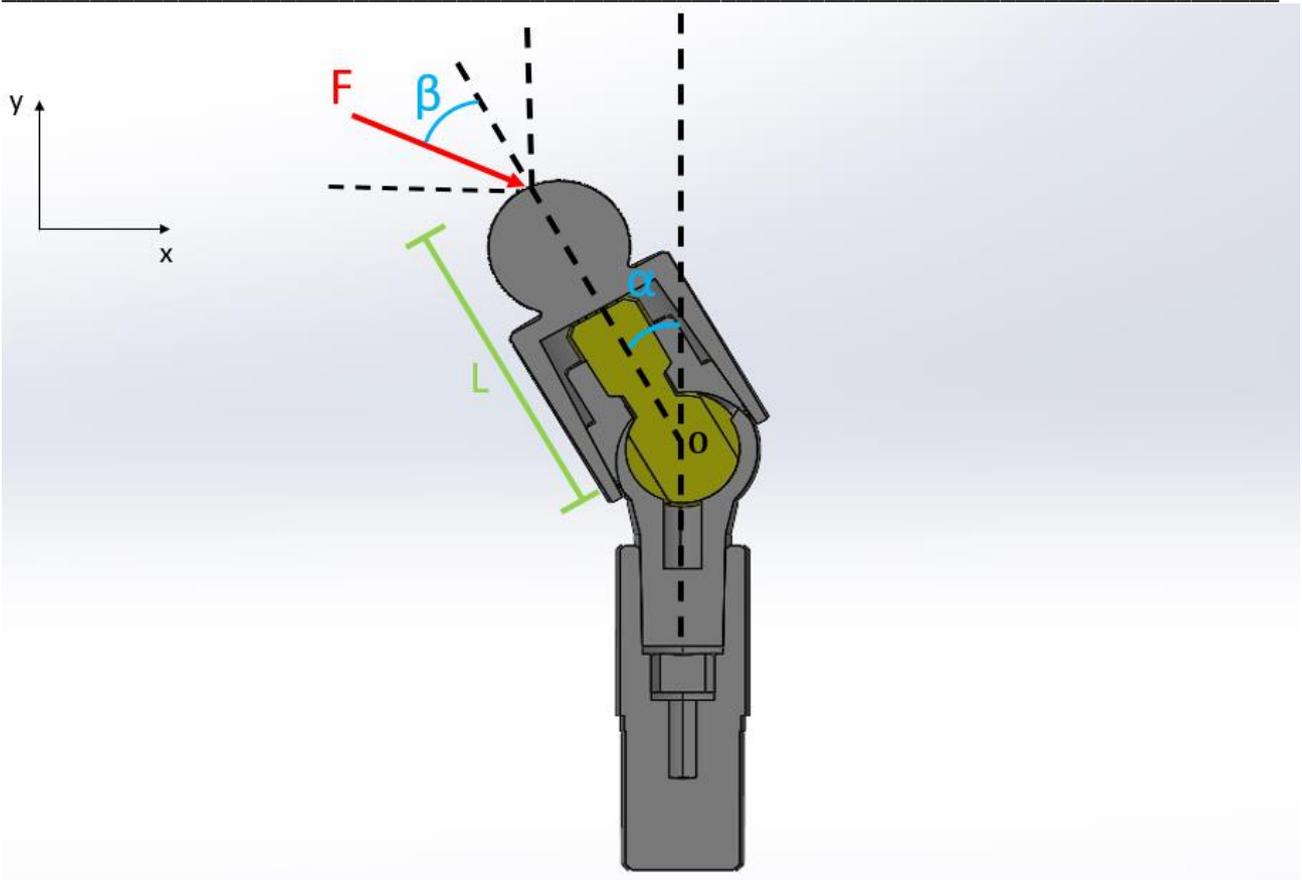


Figura 6.4: schema di forze.

Dalla Fig. 6.4 si ottiene che il momento nel punto O generato dall'applicazione del carico F è pari a:

$$M_O = -F \cos(\gamma) L \sin(\alpha) + F \sin(\gamma) L \cos(\alpha) = FL[-\cos(\gamma) \sin(\alpha) + \sin(\gamma) \cos(\alpha)] \quad (3)$$

da cui si ricava:

$$M_O = FL(\sin\beta) \quad (4)$$

Dall' Eq.ni (3,4) si può dedurre che la variazione dell'angolo α non comporti una modifica del momento esercitato sulla connessione sferica, momento che, invece, dipende dall'inclinazione del carico applicato rispetto all'asse longitudinale della vite sferica (β).

Dal momento che si sta considerando un angolo α inferiore al massimo ottenibile, si attendono valori di tensione a parità di carico applicato inferiori a quelli registrati precedentemente.

Si è nuovamente voluto ricreare il più possibile le condizioni di prova, vincolando la struttura presso la base dell'impianto e lungo la superficie cilindrica dello stesso, mantenendosi al di sotto del livello di supporto (3 mm dalla sommità). Si è applicato un carico nodale di modulo pari a 500 N, considerando $\beta = 10^\circ$ ($\gamma = 25^\circ$).

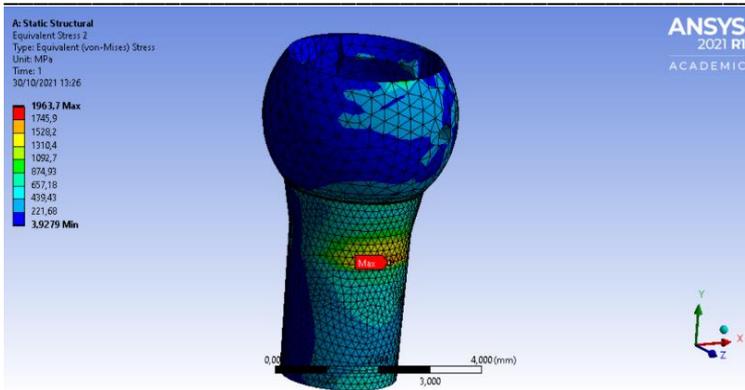


Figura 6.5: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico, $\alpha = 15^\circ$.

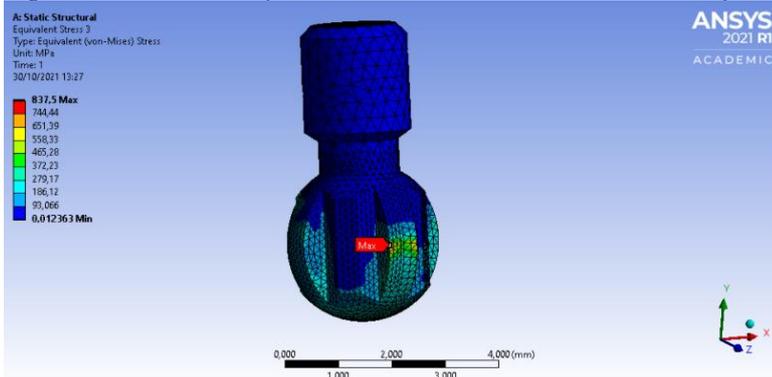


Figura 6.7: tensione equivalente di Von-Mises sulla vite sferica, $\alpha = 15^\circ$.

I risultati ottenuti confermano quanto atteso. Le zone maggiormente sollecitate si localizzano negli stessi punti osservati fino a questo momento. Sul moncone sferico si registra un picco di tensione massimo confrontabile con quello ottenuto considerando $\alpha = 30^\circ$, ma la zona in questione è estremamente limitata. Sulla vite sferica, invece, gli sforzi non eccedono il limite di snervamento del materiale.

6.3. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$

Si è realizzato l'insieme dei componenti tramite software Solidworks, considerando la cappetta emisferica tarata per un $\alpha = 30^\circ$ ridimensionata in base alla struttura ridotta. Valutando la collocazione del centro di carico si è ritenuta non necessaria la modifica della quota della porzione emisferica.

Il moncone sferico presenta un'ulteriore modifica (che di qui in poi sarà presente anche sui modelli comprensivi di moncone a sezione normale): la spina, introdotta per accertarsi del corretto serraggio,

viene rimossa e sostituita da una scanalatura realizzata sulla superficie interna. In questo modo si evita l'utilizzo di un componente aggiuntivo (Fig.6.8).

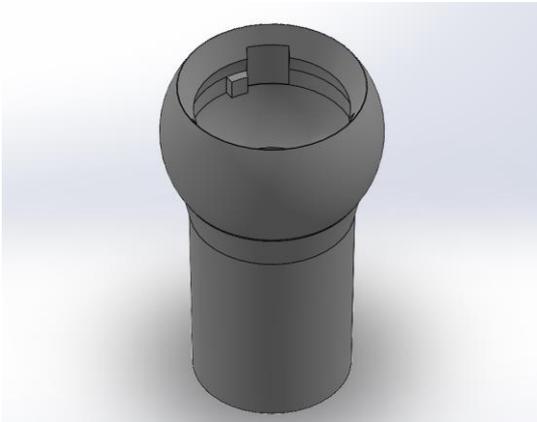


Figura 6.8: moncone sferico a sezione ridotta con scanalatura.

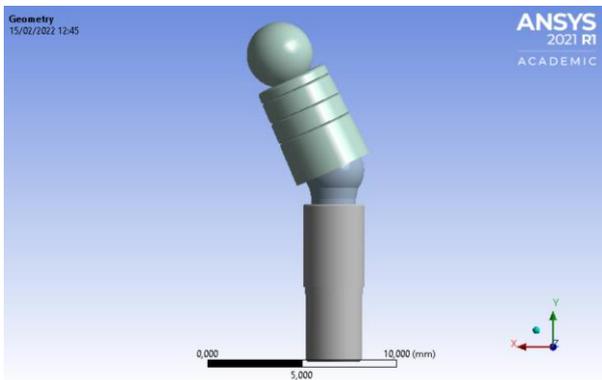


Figura 6.9: modello complessivo di moncone a sezione ridotta, $\alpha = 25^\circ$.

6.3.1 Affinamento della mesh

Si è generata una mesh tetraedrica di lato massimo pari a 0,5 mm, poi rifinita tramite le seguenti operazioni:

- Ridimensionamento applicato al moncone sferico e alla vite sferica, tramite il quale il lato massimo consentito è stato ridotto a 0,3 mm, ulteriormente dimezzato per quanto riguarda la porzione sferica della vite, la porzione cilindrica del moncone e la superficie sferica esterna dello stesso;

- Realizzazione di una *mesh mappata* per quanto riguarda l’impianto cilindrico e la porzione conica della cappetta emisferica. Tale opzione permette, specialmente nel caso di superfici regolari, di ottenere una discretizzazione più regolare.

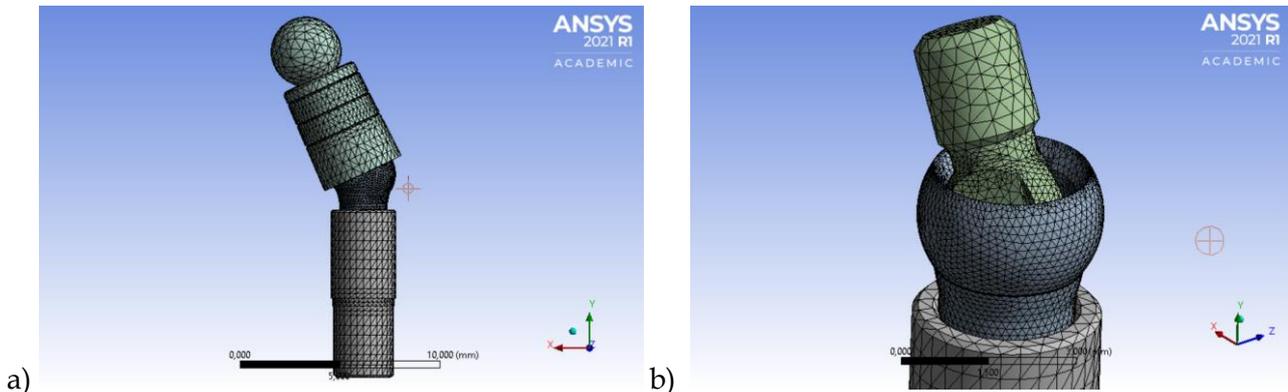


Figura 6.10: mesh del modello complessivo di moncone a sezione ridotta (a) e dell’accoppiamento sferico (b), $\alpha = 25^\circ$

Si è adottata la stessa metodologia di vincolo descritta precedentemente: dalla Fig. 6.11 si osserva che la mesh mappata sull’impianto ha permesso di rispettare con maggior precisione il livello di supporto indicato dalla norma durante l’applicazione dei vincoli ad incastro. Si è impostato un carico nodale applicato alla sommità della cappetta emisferica, di modulo pari a 500 N con $\beta=10^\circ$ ($\gamma = 35^\circ$).

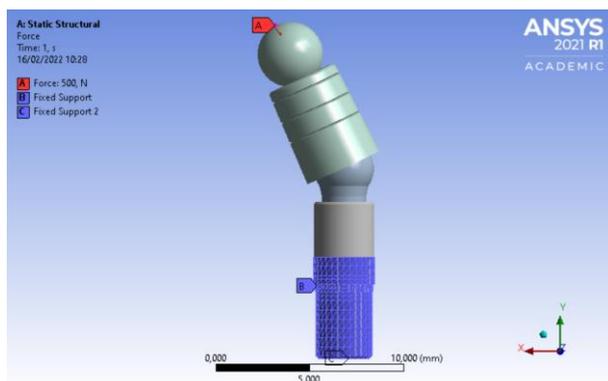


Figura 6.11: sistema di vincolo e carico applicato, $\alpha = 25^\circ$.

Le sollecitazioni maggiori si localizzano sempre sulla porzione cilindrica del moncone sferico, con una maggior concentrazione in prossimità del punto A (Fig. 6.12.a). Sulla vite sferica si osserva un picco pari a 1664,7 MPa, circondato però da elementi in cui non viene superato il limite di snervamento del materiale (Fig. 6.12.b). Tale picco, quindi, non viene considerato come critico.

Considerando i valori numerici di tensione registrati, si può notare come si ottengano valori confrontabili con quelli ottenuti trattando la struttura di dimensioni “normali” con $\alpha = 30^\circ$.

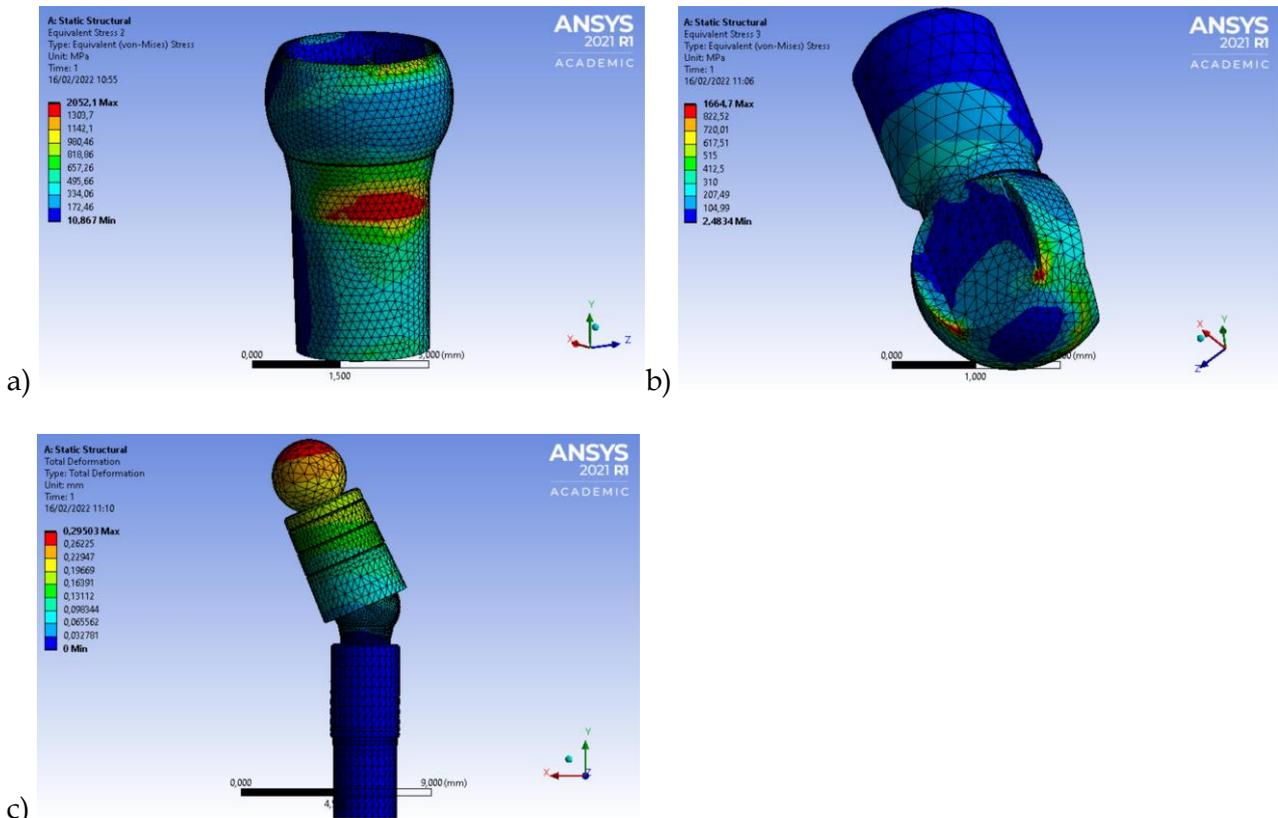


Figura 6.12: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (a), sulla vite sferica (b) e spostamento della struttura (c), $\alpha = 25^\circ$.

6.4. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 15^\circ$

Analogamente alla trattazione della struttura compressiva di moncone a sezione normale, anche in questo caso si è voluto analizzare il comportamento dell’assieme considerando un’angolazione α intermedia e pari a 15° .

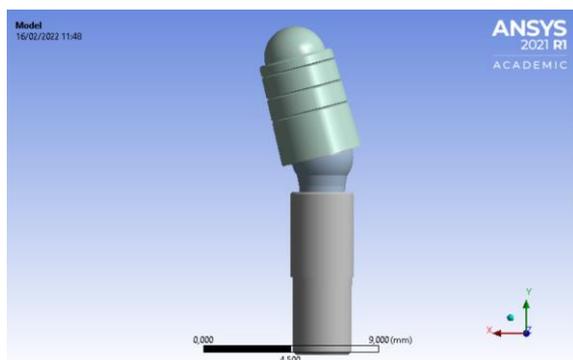


Figura 6.13: modello complessivo di moncone a sezione ridotta, $\alpha = 15^\circ$.

Il modello è stato discretizzato analogamente al caso di angolazione α pari a 25° , con elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,5 mm per l’impianto cilindrico, la cappetta sferica e la cappetta emisferica, mentre per il moncone sferico e la vite sferica si sono scelti elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,3 mm, ulteriormente dimezzato per le porzioni maggiormente sollecitate.

Si è mantenuto lo stesso sistema di vincolo e carico descritto nel paragrafo 6.3.1., considerando però un’angolazione $\gamma = 25^\circ$.

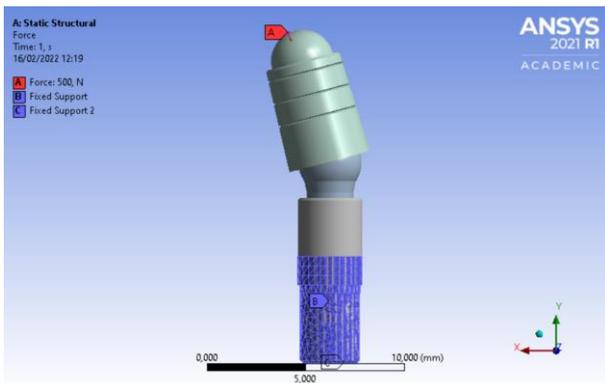


Figura 6.14: sistema di vincolo e carico applicato, $\alpha = 15^\circ$.

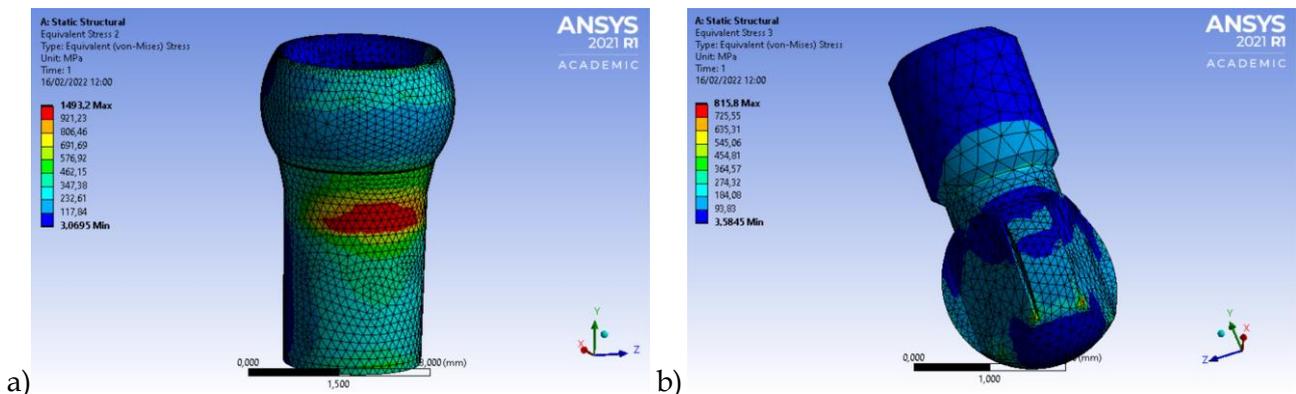


Figura 6.15: tensione equivalente sul moncone sferico (a) e sulla vite sferica (b), $\alpha = 15^\circ$.

I risultati confermano nuovamente che la zona di rottura della struttura si localizzi sulla porzione sferica del moncone, in prossimità dei punti A e B. I valori di tensione registrati sono effettivamente inferiori al caso in cui la struttura assuma la configurazione con angolazione $\alpha = 25^\circ$, a tal punto che la vite sferica non presenta zone in cui gli sforzi eccedono il limite di snervamento del materiale costitutivo.

6.5: Modifica del sistema di vincolo e della mesh

Quanto descritto nei Paragrafi 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 permette di concludere che il modello comprensivo di contatti tra i componenti fornisce dei risultati verosimili, con corretti rapporti reciproci tra i vari casi analizzati: le configurazioni intermedie ($\alpha = 15^\circ$) hanno mostrato, in entrambi i casi, valori di tensione inferiori rispetto a quelli ottenuti considerando le configurazioni critiche ($\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, rispettivamente), e inoltre comportano l'assenza di picchi di tensione superiori al limite di snervamento del materiale sulla vite sferica.

I valori numerici ottenuti, però, sono notevolmente più elevati rispetto a quanto atteso. Nonostante nella situazione fisiologica non dovrebbero verificarsi carichi impulsivi dell'ordine di 500 N, un carico tale ha portato alla rottura tutte le strutture testate, in un'ampia porzione della superficie cilindrica del moncone. Un'amplificazione degli sforzi generati può essere dovuta a molteplici fattori, come ad esempio:

- Imprecisioni dovute alla discretizzazione della struttura. Inoltre, si sono riscontrate delle difficoltà in fase di realizzazione della mesh, dovute alla licenza del software disponibile che non permette di generare una mesh più fine;
- Utilizzo di vincoli inadeguati, che rendono la struttura eccessivamente rigida di fronte all'applicazione del carico;
- Impostazione dei contatti tra i vari componenti, che contribuisce alla sovrastima della rigidità della struttura.

I modelli precedente, quindi, sono stati modificati come segue:

- I contatti sono stati riformulati, in modo che un singolo contatto coinvolgesse esclusivamente due superfici.
- I vincoli ad incastro applicati sulla base e sulla porzione cilindrica dell'impianto sono stati sostituiti con i seguenti: un vincolo del tipo "Remote Displacement", tramite il quale sono stati bloccati tutti i gradi di libertà ad eccezione della rotazione lungo l'asse trasversale Z,

applicato alla base dell'impianto; un vincolo cilindrico (“Cylindrical Support”), tramite il quale sono stati consentiti i gradi di libertà lungo le direzioni assiali e tangenziali ed è stato bloccato il grado di libertà lungo la direzione radiale, applicato lungo la superficie cilindrica dell'impianto al di sotto del livello di supporto.

- Si è impostata una mesh tetraedrica di lato massimo pari a 0,2 mm per quanto riguarda il moncone sferico, le porzioni di impianto e cappetta sferica a contatto con esso (Fig. 6.16b) e la porzione sferica della vite. Per tutti gli altri componenti, invece, si è generata una mesh di lato massimo pari a 0,9 mm.

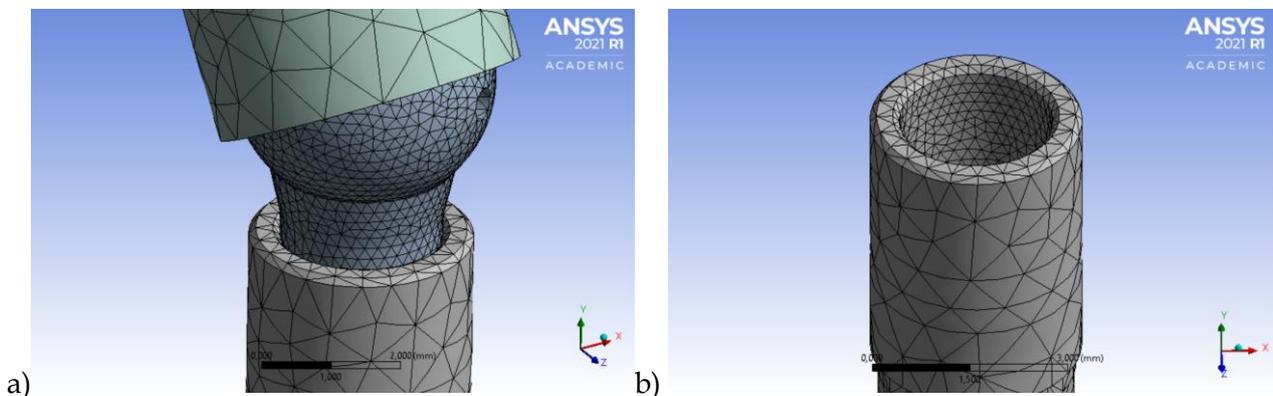


Figura 6.16: modifica della mesh (a) ridimensionata nella zone a contatto con il moncone (b).

Come da indicazioni dell'azienda costruttrice, inoltre, si è impostato il *titanio grado 4* (proprietà a pag. 27, Fig. 3.3) come materiale costitutivo per l'impianto cilindrico. Per tutti gli altri componenti si è mantenuto il *titanio grado 5*.

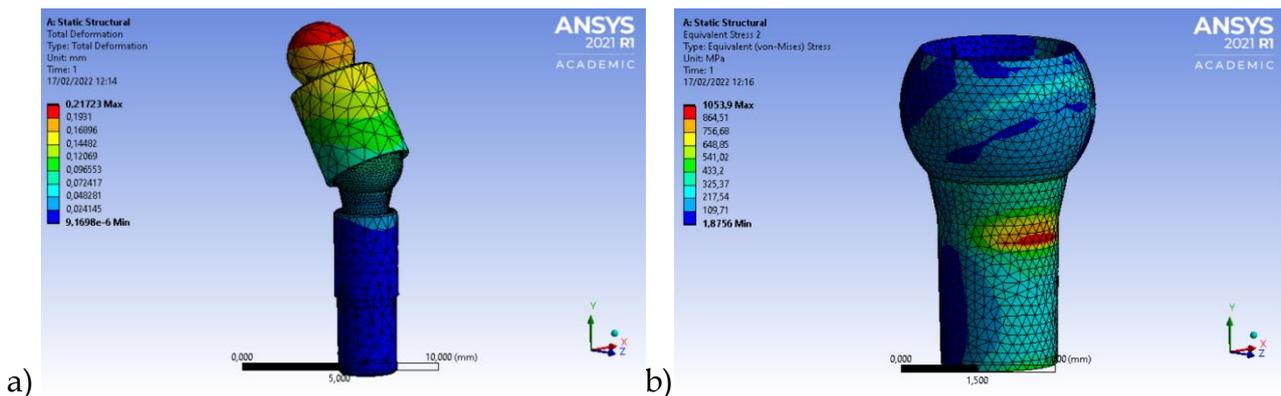
Capitolo 7

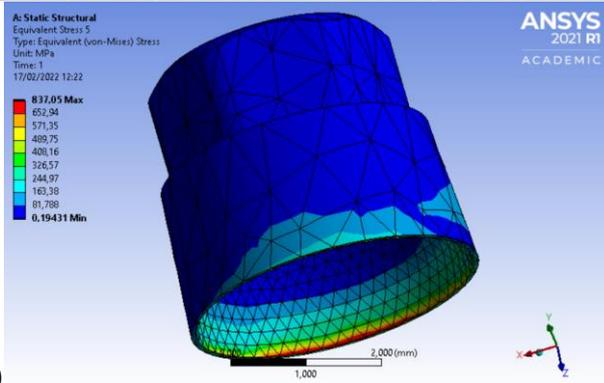
Modellazione delle condizioni di prova

Dal momento che le prove sperimentali permetteranno di conoscere il modulo del carico che comporta la rottura della struttura, ma non forniscono informazioni sulla reazione di primo snervamento del materiale (se non da lievi deflessioni della curva di carico), si è deciso di ridurre l'intensità della sollecitazione imposta. Utilizzare un carico elevato, oltretutto, fornisce informazioni in merito alla localizzazione delle zone critiche, ma comporta una "saturazione" dei risultati in termini numerici. Pertanto, le strutture saranno caricate tramite una forza nodale applicata alla cappetta emisferica, di modulo pari a 250 N considerando sempre $\beta=10^\circ$.

7.1. Simulazioni preliminari a seguito delle modifiche introdotte

7.1.1. Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$



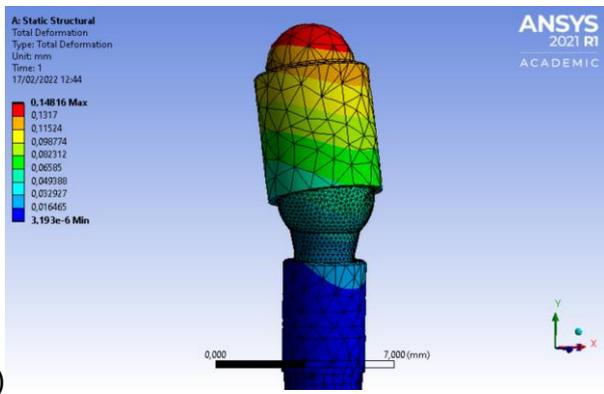


c)

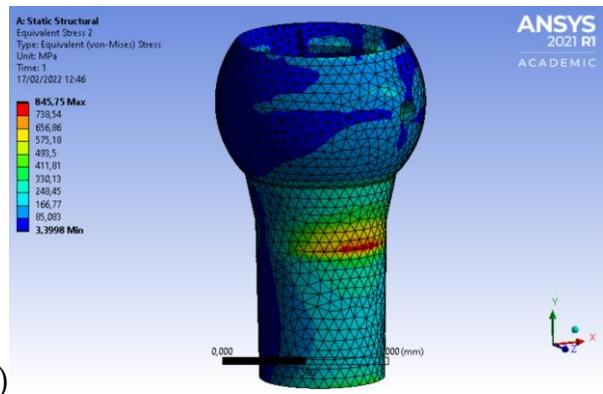
Figura 7.1: spostamento della struttura (a), tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (b) e sulla cappetta sferica (c).

In Fig. 7.1 sono stati riportati i risultati ottenuti in termini di spostamento della struttura e tensione equivalente di Von-Mises dei componenti maggiormente sollecitati. Si può osservare come un carico di modulo pari a 250 N e $\beta=10^\circ$ comporti il primo snervamento del moncone sferico. In realtà la sollecitazione massima risulta essere pari a 1054 MPa (corrispondente alla tensione di rottura del materiale costitutivo), ma dal momento che tale sollecitazione si registra in una zona estremamente limitata si ritiene che nella realtà subisca un iniziale snervamento invece che la rottura. La cappetta sferica (Fig. 7.1c) risulta essere il secondo componente maggiormente sollecitato, nonostante gli sforzi non raggiungano il limite di snervamento del materiale.

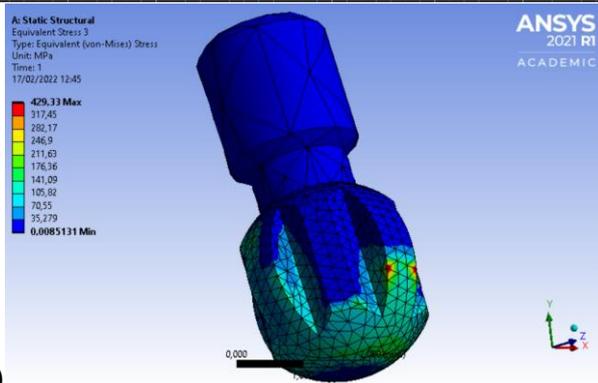
7.1.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$



a)



b)



c)

Figura 7.2: spostamento della struttura (a), tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (b) e sulla vite sferica (c).

Gli sforzi diminuiscono visibilmente al ridurre dell'angolo α . Nessuna zona della struttura incorre in snervamento (tensione massima registrata sul moncone sferico pari a 845,75 MPa).

Al fine di osservare ugualmente il primo snervamento della protesi con angolazione $\alpha = 15^\circ$, si è ripetuta la medesima simulazione all'aumentare del carico applicato. Si conclude che la struttura incorre in snervamento presso la porzione cilindrica del moncone di fronte ad una forza di intensità pari a circa 290-300 N.

7.1.3. Moncone a sezione ridotta: problematiche e modifiche

Lo studio della struttura comprensiva di moncone a sezione ridotta ha permesso di identificare delle problematiche circa la metodologia adottata fino ad ora. L'applicazione del carico, infatti, generava un picco tensionale anomalo sulla superficie cilindrica della vite sferica. Questo ha portato a pensare di modificare la mesh del componente, impostando un lato massimo per gli elementi pari a 0,2 mm per l'intero volume.

Dopo l'operazione di ridimensionamento non è stato più possibile procedere con il calcolo della soluzione. La stessa modifica, quindi, è stata apportata a tutti i modelli elaborati, ottenendo il medesimo effetto. Ciò ha portato a ponderare che la causa di una certa gamma di errori ottenuti durante la realizzazione del modello, imputati ad una configurazione erronea dei contatti tra i componenti, fosse invece legata alla mesh scelta.

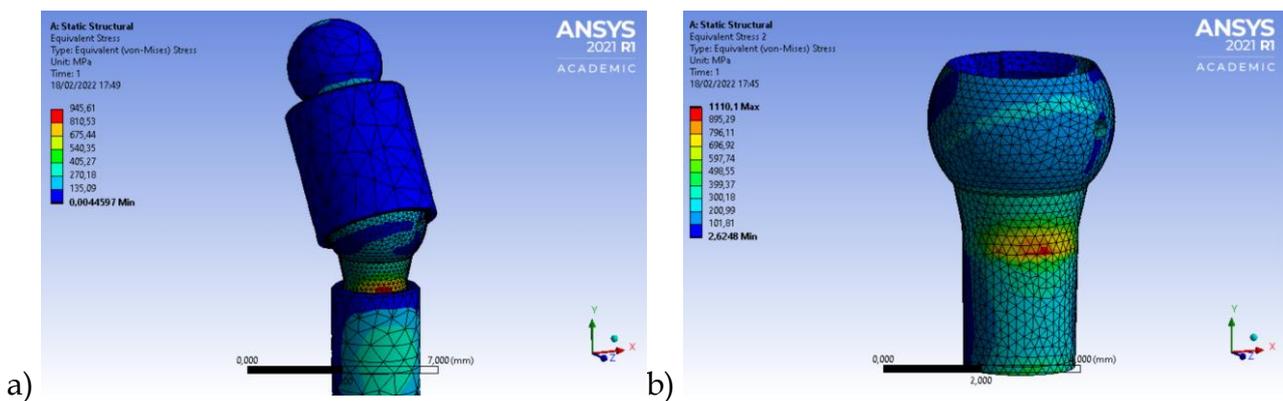
Dopo un'attenta ricerca in letteratura, si è modificata la mesh come segue:

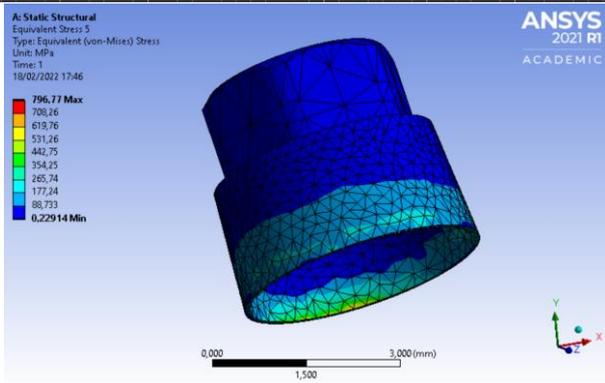
- Per i componenti impianto cilindrico, vite sferica, cappetta sferica e cappetta emisferica si sono scelti degli elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,9 mm;
- Per il moncone sferico si sono scelti degli elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,2 mm;
- Si è realizzato un ulteriore ridimensionamento presso le superfici di contatto (comando “Contact Sizing”), scegliendo elementi tetraedrici di lato massimo pari a 0,2 mm.

7.2. Simulazioni con ridimensionamento della mesh al contatto tra le superfici

Di seguito verranno esposti i risultati ottenuti dall’applicazione di un carico nodale di modulo pari a 250 N con $\beta=10^\circ$. La mesh di ciascuna struttura è stata modificata come descritto nel Par.7.1.3.

7.2.1. Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$

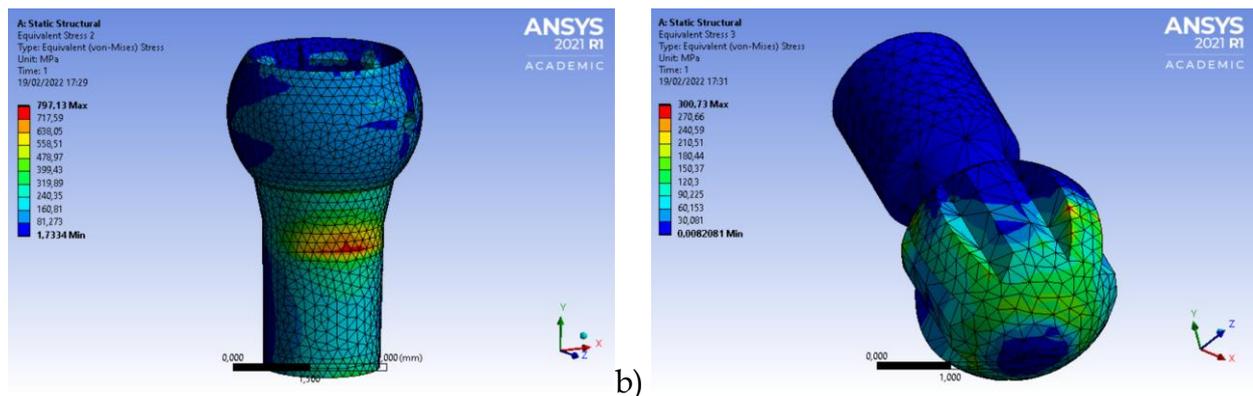




c) *Figura 7.3: tensione equivalente di Von-Mises dell’intera struttura (a), del moncone sferico (b) e della cappetta sferica (c), $\alpha = 30^\circ$.*

Confrontando la Fig. 7.3 con la Fig. 7.1 si nota come la zona in cui gli sforzi superano il limite di snervamento del materiale presenti una minore estensione. Il picco massimo registrato, pari a 1110,1 MPa, riguarda un numero di elementi estremamente limitato, il che porta a pensare che, nella realtà, il carico applicato non causi lo snervamento del materiale, pur sollecitandolo a valori di tensione prossimi ad esso. In generale, l’introduzione del ridimensionamento alle superfici di contatto comporta una diminuzione di tensione sugli altri componenti della struttura.

7.2.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$



a) *Figura 7.4: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (a) e sulla vite sferica (b), $\alpha = 15^\circ$*

Considerando la configurazione con angolazione $\alpha = 15^\circ$, è ancora più evidente l’effetto di diminuzione degli sforzi dovuto all’applicazione del ridimensionamento alle superfici di contatto. La struttura non giunge a snervamento, che si verifica invece per carichi dell’ordine dei 290-300 N.

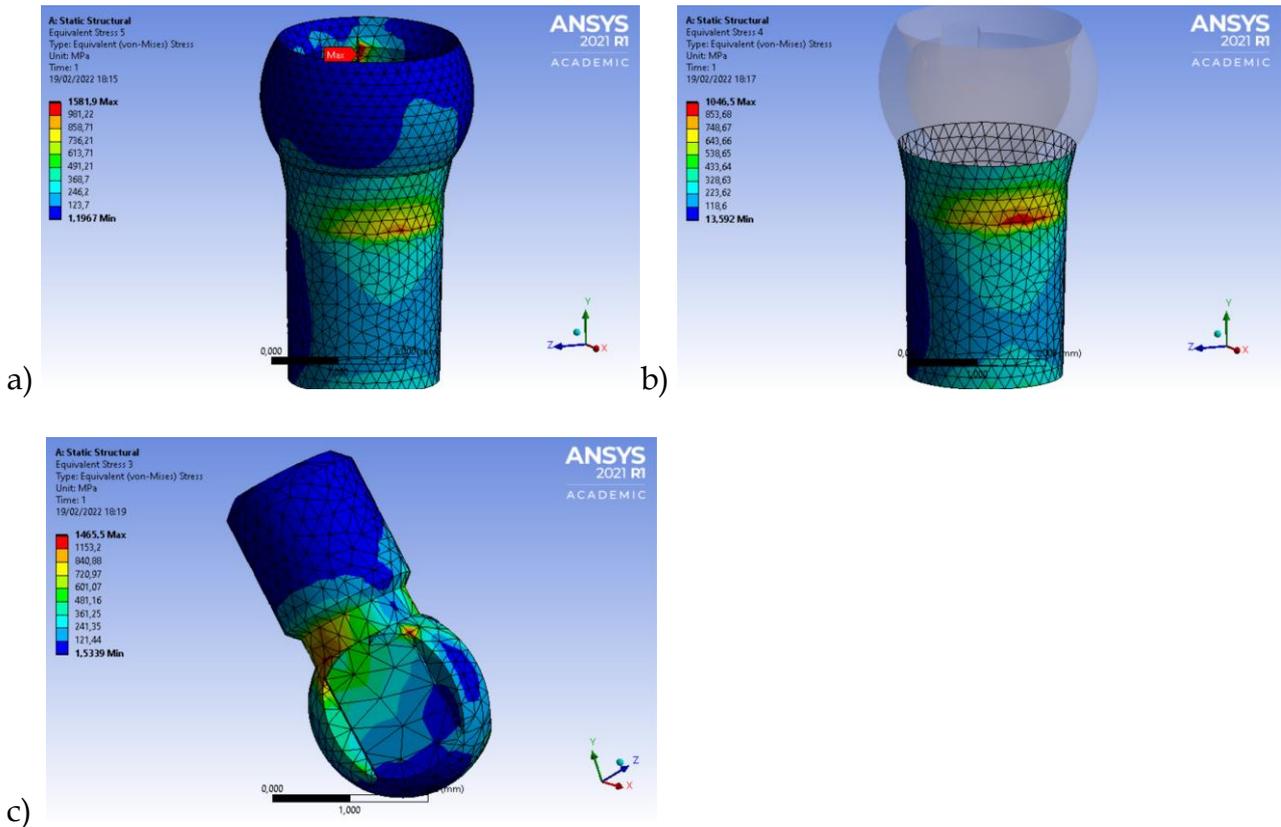
7.2.3. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$ 

Figura 7.5: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico (a), sulla porzione cilindrica del moncone sferico (b) e sulla vite sferica (c), $\alpha = 25^\circ$.

Il moncone sferico e la vite sferica vedono l’insorgenza di due zone non riscontrate precedentemente in cui gli sforzi presentano valori elevati, dell’ordine dei 1400-1500 MPa. Analizzando il file CAD della struttura assemblata, si è notato che tali picchi di tensione coincidono con dei punti in cui i due componenti interferiscono. Si è ugualmente ritenuto valido il modello, viste le difficoltà, riscontrate in fase di assemblaggio, nell’ottenere l’angolazione α desiderata senza produrre sovrapposizioni tra i volumi. Osservando la Fig. 7.5b si può affermare che il carico applicato, vista l’estensione limitata della regione in cui gli sforzi eccedono il limite consentito, non causi lo snervamento del materiale, pur sollecitandolo a valori di tensione prossimi ad esso.

7.2.4. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 15^\circ$

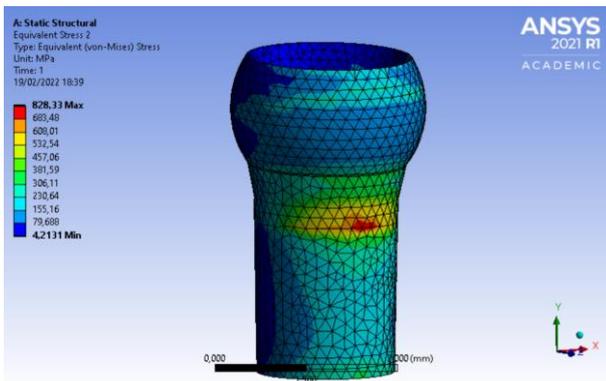


Figura 7.6: tensione equivalente di Von-Mises sul moncone sferico, $\alpha = 15^\circ$.

Il carico applicato non porta a snervamento il moncone sferico. Tutti gli altri componenti della struttura presentano sollecitazioni inferiori ai 600 MPa.

Capitolo 8

Prove sperimentali

La protesi, nelle due varianti comprensive di moncone a sezione normale e moncone a sezione ridotta, è stata sottoposta a dei test meccanici a rottura svolti tramite una macchina di prova universale presso il laboratorio DIMEAS del Politecnico di Torino.



Figura 8.1: macchina di prova universale, presso laboratorio DIMEAS del Politecnico di Torino.

In conformità con la normativa BS EN ISO 14801:2016 relativa a test di carico dinamici su impianti dentali endossei, si è scelto un componente di carico non vincolato nella direzione trasversale, in modo da non ridurre l'intensità del momento flettente applicato (Fig. 8.2).

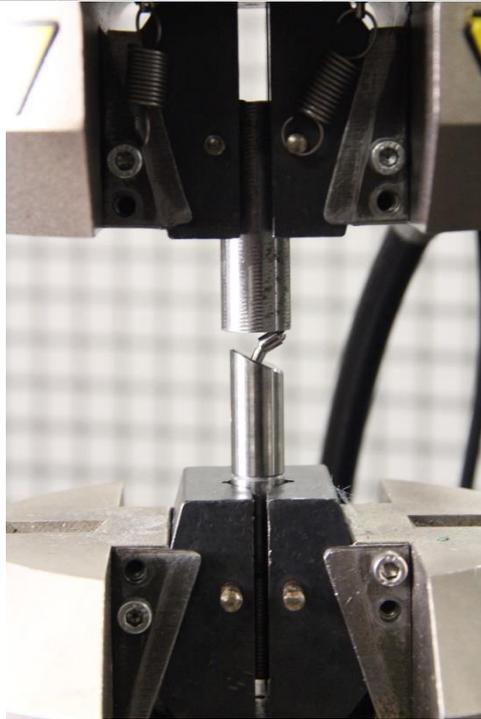


Figura 8.2: componente di carico.

L'azienda *3P Implafavourite SRL* ha fornito i supporti per i provini e le cappette emisferiche richiesti dalla normativa, i cui progetti sono riportati nel Cap. 2. Verranno riportati i risultati ottenuti dai test svolti sulla struttura nelle seguenti configurazioni:

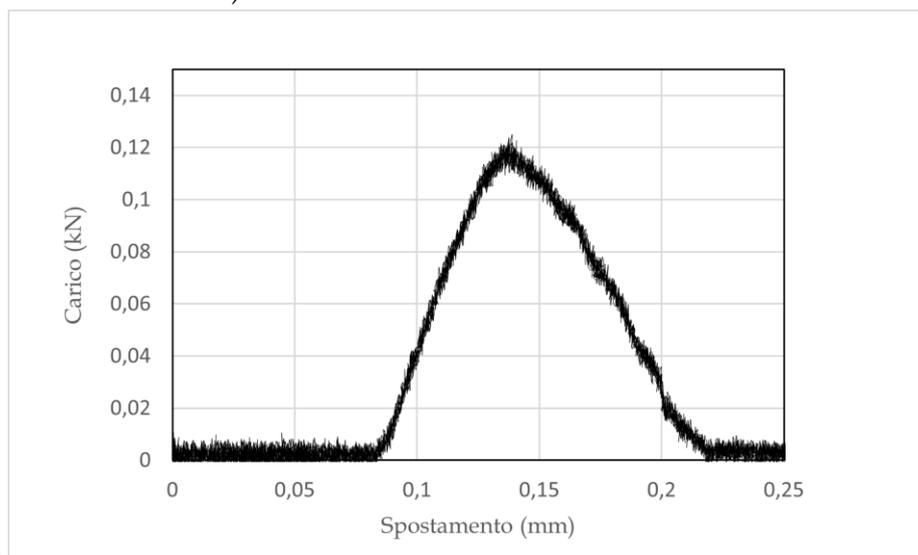
- Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$;
- Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$;
- Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$;
- Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 15^\circ$.

Le prove sono state svolte imponendo al dispositivo una velocità di somministrazione del carico pari a $0,2 \frac{mm}{min}$.

8.1: Moncone a sezione normale: $\alpha = 30^\circ$



a)



b)

Figura 8.3: set di prova per il primo provino con $\alpha = 30^\circ$ (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

In Fig. 8.3b si osserva come il carico presenti un picco pari a circa 120 N. Confrontando tale risultato con i valori attesi (si pensi ai carichi tipici che la struttura deve sopportare nella situazione fisiologica), il test sul primo campione è stato ritenuto poco veritiero.

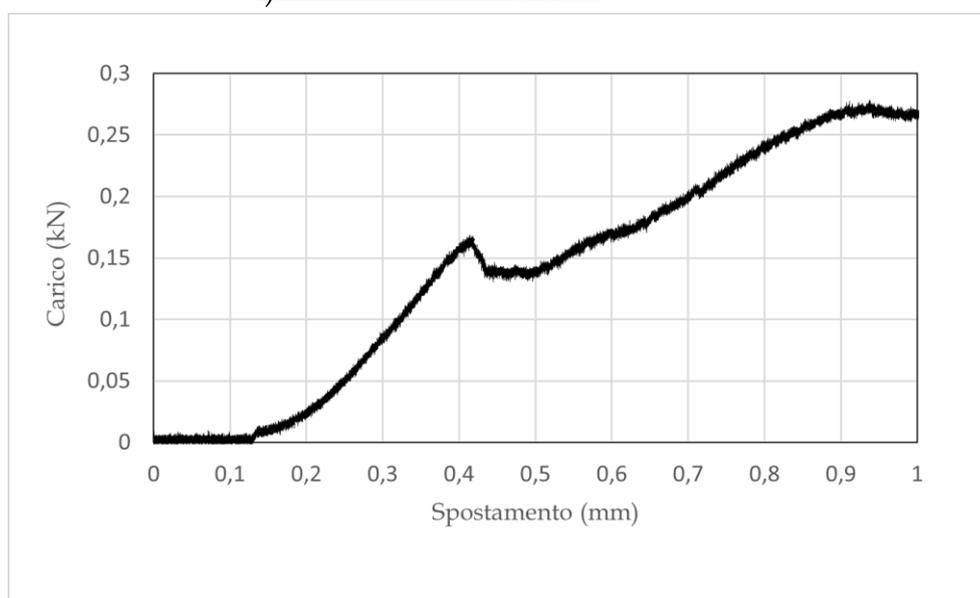
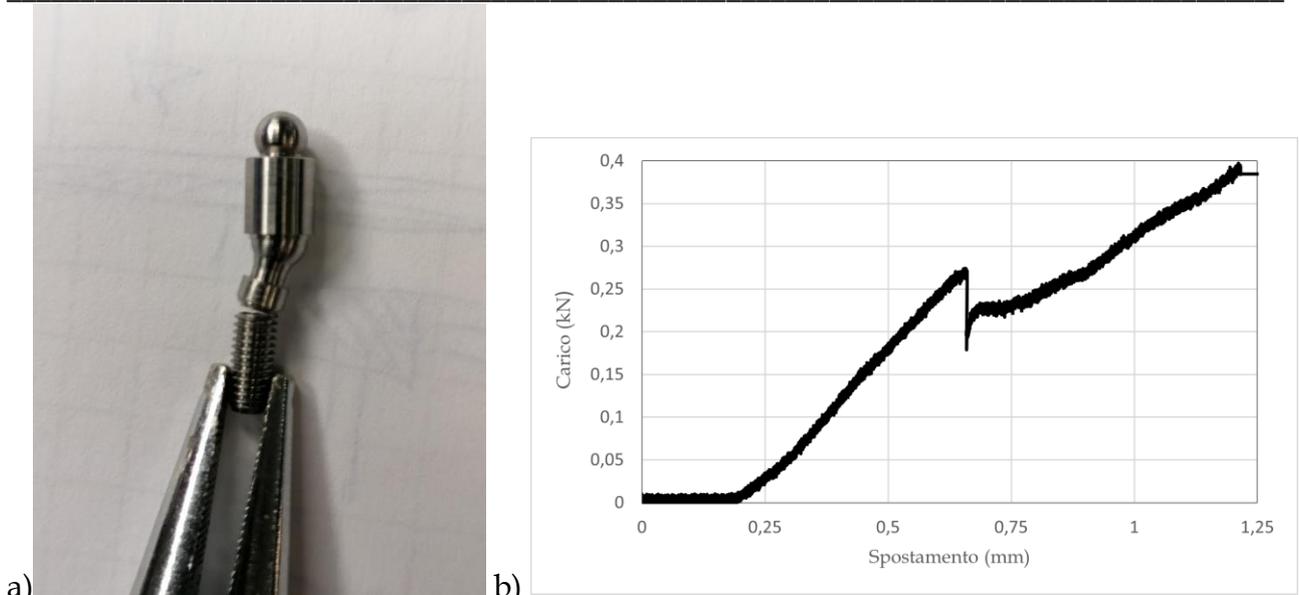


Figura 8.4: secondo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

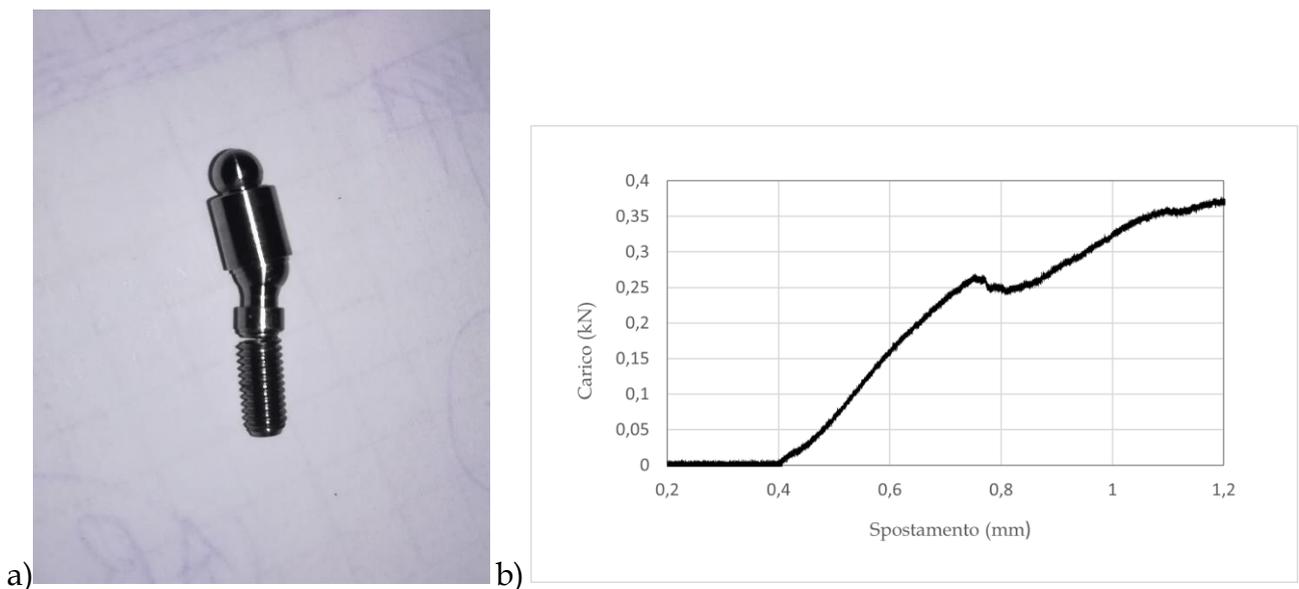
La Fig. 8.4b mostra come il secondo provino abbia subito un primo cedimento per un carico di modulo pari a circa 170 N, seguito da una breve recupero del carico fino a circa 270 N.

In Fig.8.4a si osserva come la struttura giunga a rottura presso l'impianto cilindrico, in prossimità del livello di supporto. Ciò ha posto in evidenza la necessità di modificare l'impianto cilindrico da utilizzare, in quanto apparentemente non adatto a sopportare i carichi utilizzati.

Si sono comunque svolti due ulteriori test utilizzando la medesima tipologia di impianto.



a) b)
Figura 8.5: terzo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).



a) b)
Figura 8.6: quarto provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

Entrambe le prove hanno confermato la cedevolezza dell'impianto di fronte ai carichi utilizzati.

Si è quindi modificato il componente, che presenta ora una minore porzione filettata e un maggior spessore della porzione non filettata (Fig. 8.7).



Figura 8.7: impianto cilindrico modificato.

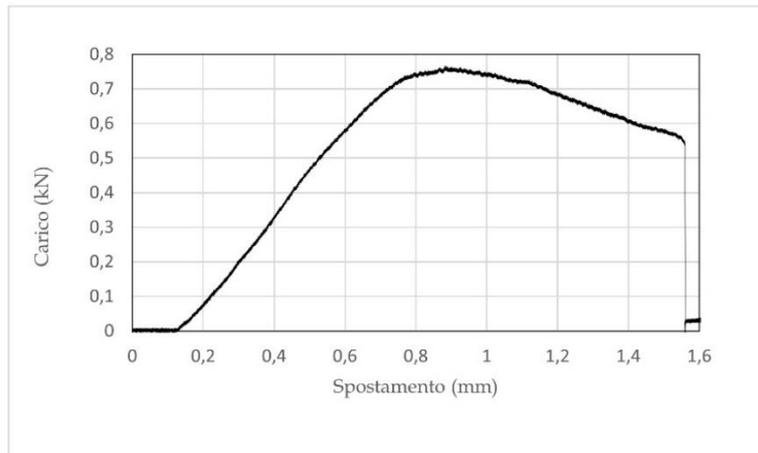
I test, quindi, sono stati ripetuti considerando nuovamente la configurazione con $\alpha = 30^\circ$. Durante la fase di assemblaggio si è applicata una lieve pressione al moncone durante l'inserimento all'interno dell'impianto, in modo da ricreare parzialmente la procedura di assemblaggio indicata dal costruttore (è previsto l'uso di un martelletto chirurgico).



a)



b)

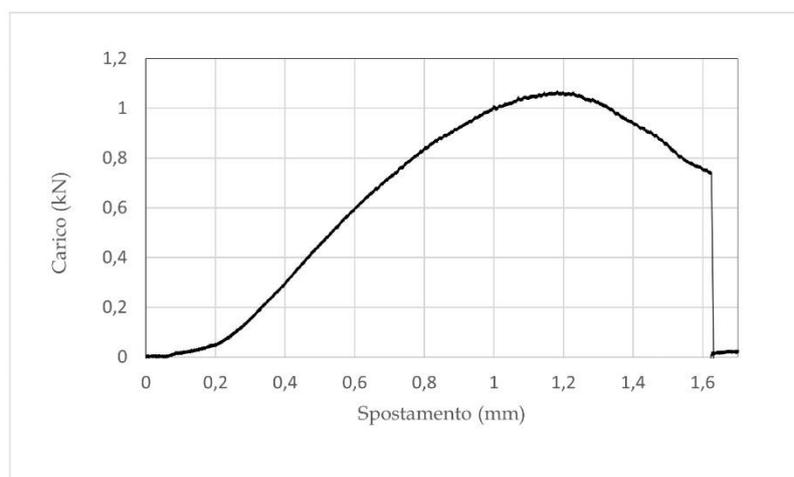


c)

Figura 8.8: quinto provino (a) e moncone sferico (b) a seguito del test e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

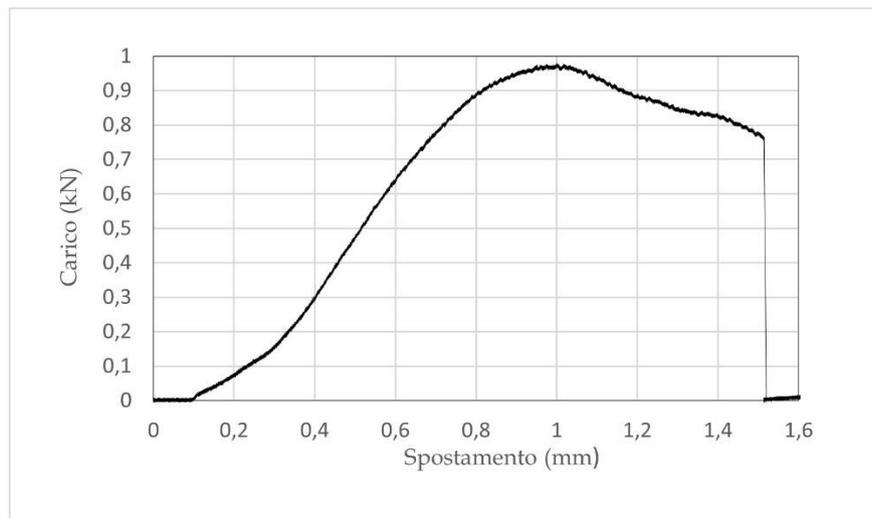


a)



b)

Figura 8.9: sesto provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).



b)

Figura 8.10: settimo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

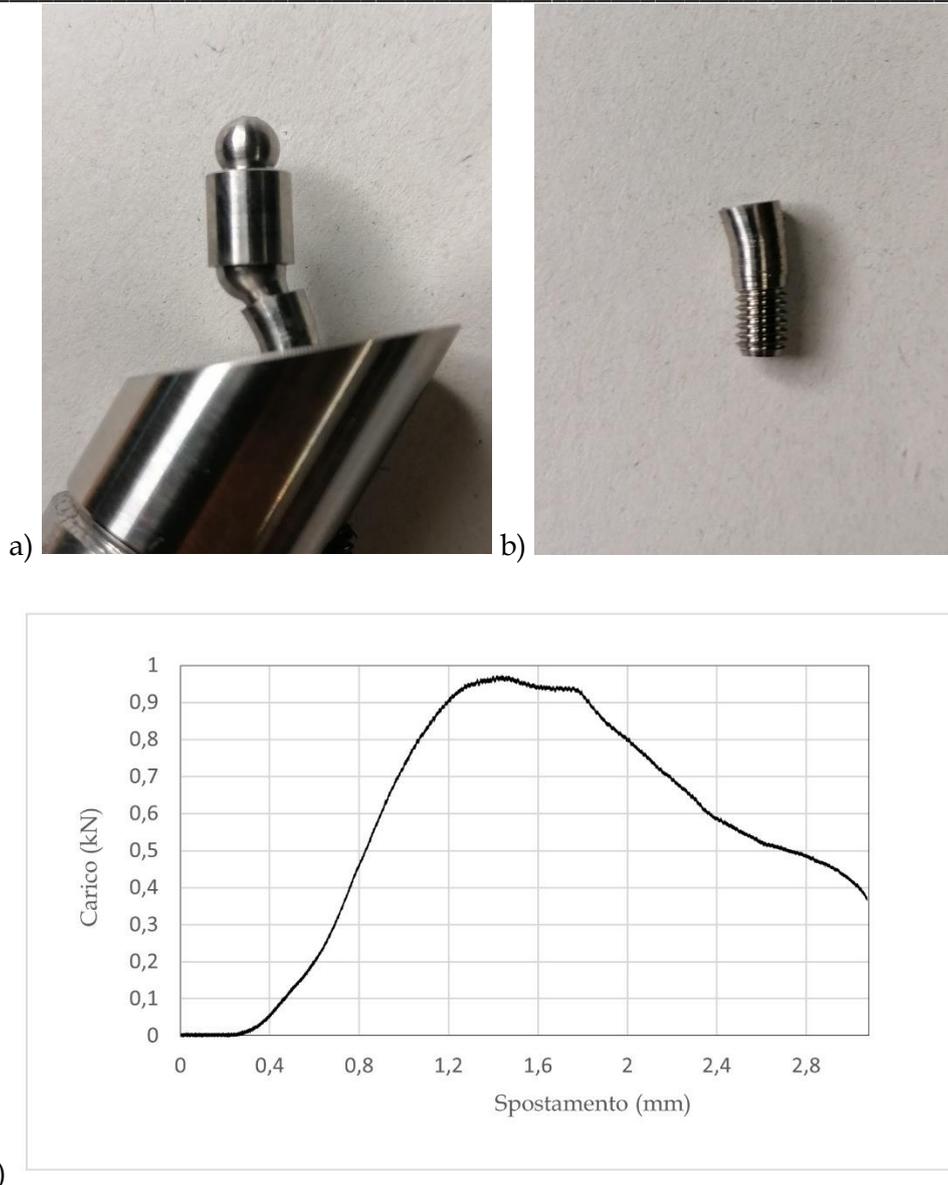


Figura 8.11: ottavo provino (a) e impianto cilindrico (b) a seguito del test e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (c).

I risultati ottenuti dimostrano con sufficiente omogeneità che la protesi, comprensiva di moncone a sezione normale nella configurazione con $\alpha = 30^\circ$, giunge a rottura per carichi applicati dell'ordine di circa 900-1000 N. Difatti, solo il quinto provino è incorso nel cedimento del moncone per un carico di modulo pari a circa 780 N, il che può essere dovuto a delle imprecisioni commesse durante la fase di assemblaggio. In generale, si può osservare come ciascun provino giunga a rottura presso la porzione cilindrica del moncone, e non dimostri ulteriori punti di cedimento antecedenti alla rottura.

8.2. Moncone a sezione normale: $\alpha = 15^\circ$

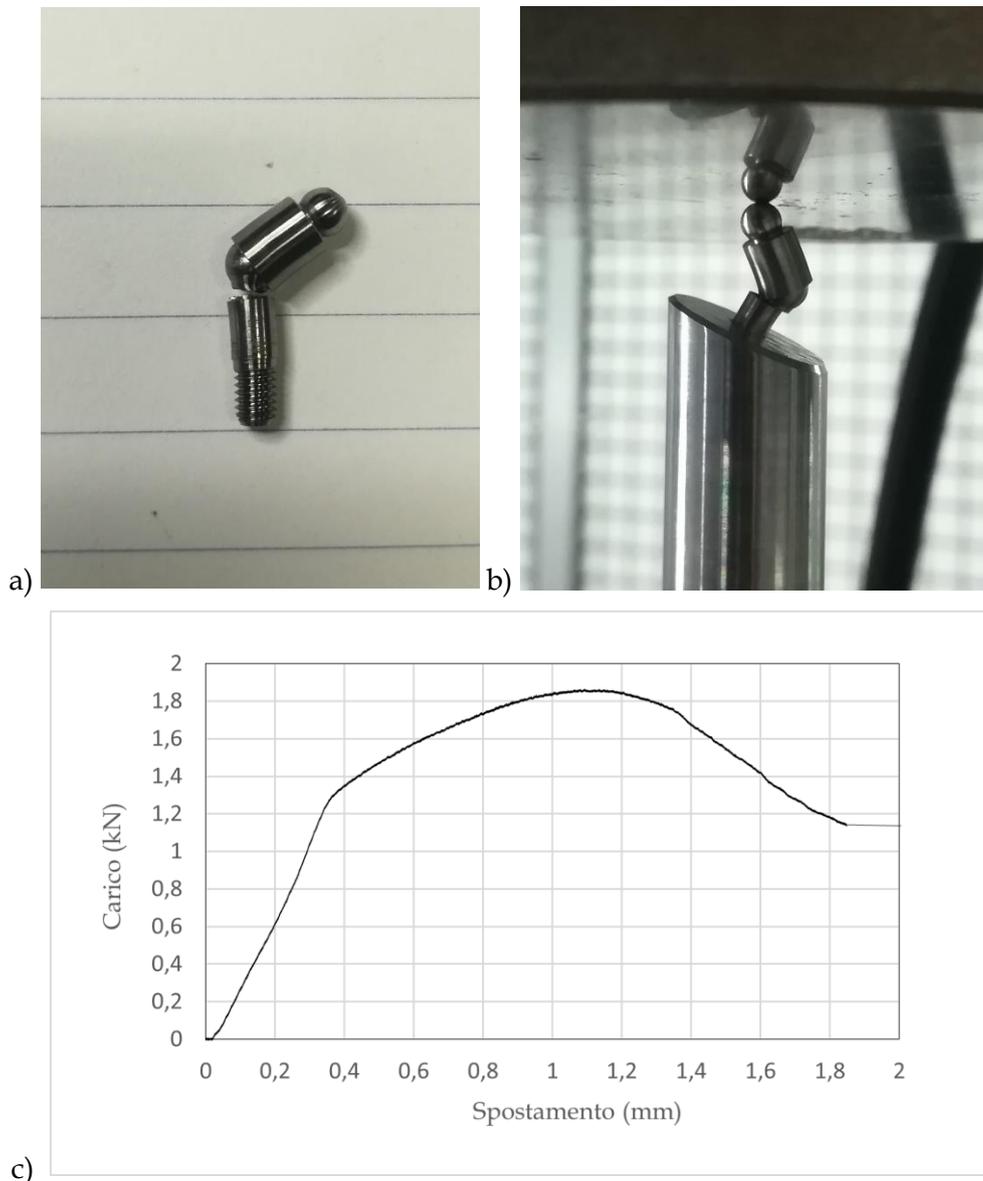


Figura 8.13: primo provino a seguito del test (a)(b) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (c).

Osservando la Fig. 8.13 si nota come la protesi, dal momento che si sta più considerando la configurazione critica con α_{max} , incorra in rottura per valori di carico applicato estremamente superiori. Un carico di modulo pari a circa 1300 N comporta uno snervamento preliminare del materiale costitutivo (Fig. 8,13c, lieve deflessione della curva), che incorre in frattura della porzione cilindrica del moncone per un carico di modulo pari a circa 1850 N.

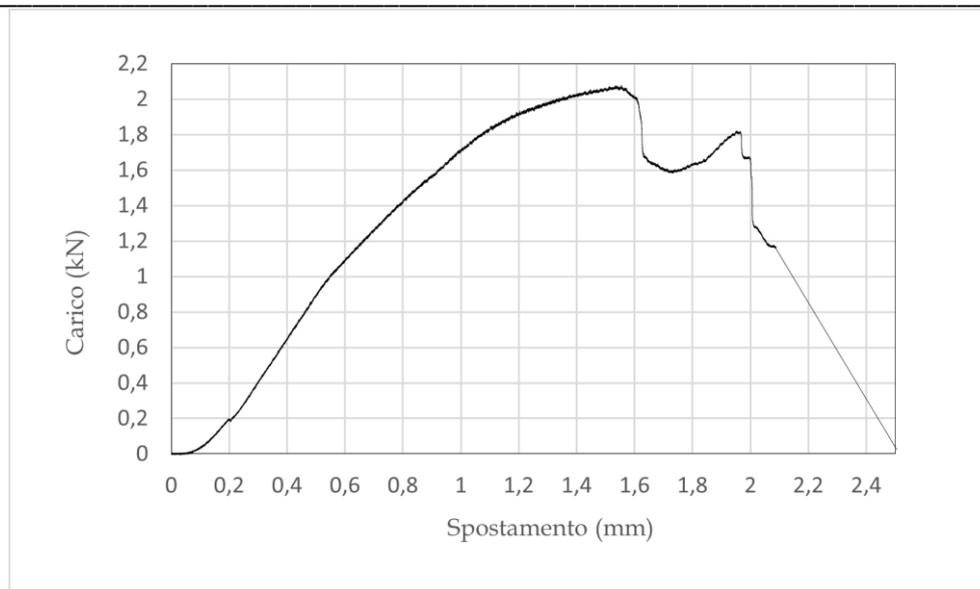
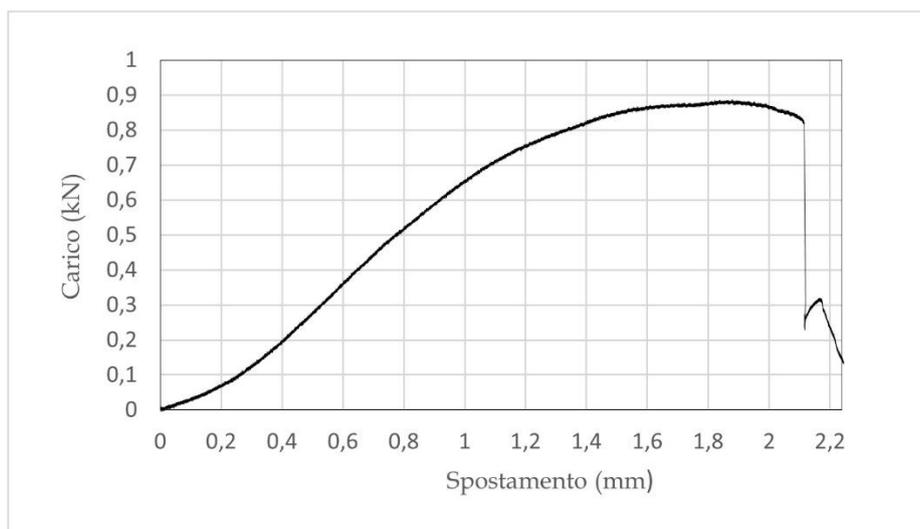


Figura 8.14: risultati ottenuti a seguito del test sul secondo provino, riportati in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico.

Il secondo provino ha riportato degli scorrimenti all’altezza del giunto sferico, dovuti probabilmente alle difficoltà riscontrate in fase di assemblaggio, che hanno reso il test eseguito non attendibile.





b)

Figura 8.15: terzo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (c).

Il terzo provino si deforma plasticamente e giunge a rottura all'applicazione di un carico di modulo pari a circa 850 N, il che potrebbe essere nuovamente correlato ad errori accidentali in fase di montaggio. Ad ogni modo non si sono osservati scorrimenti del giunto.

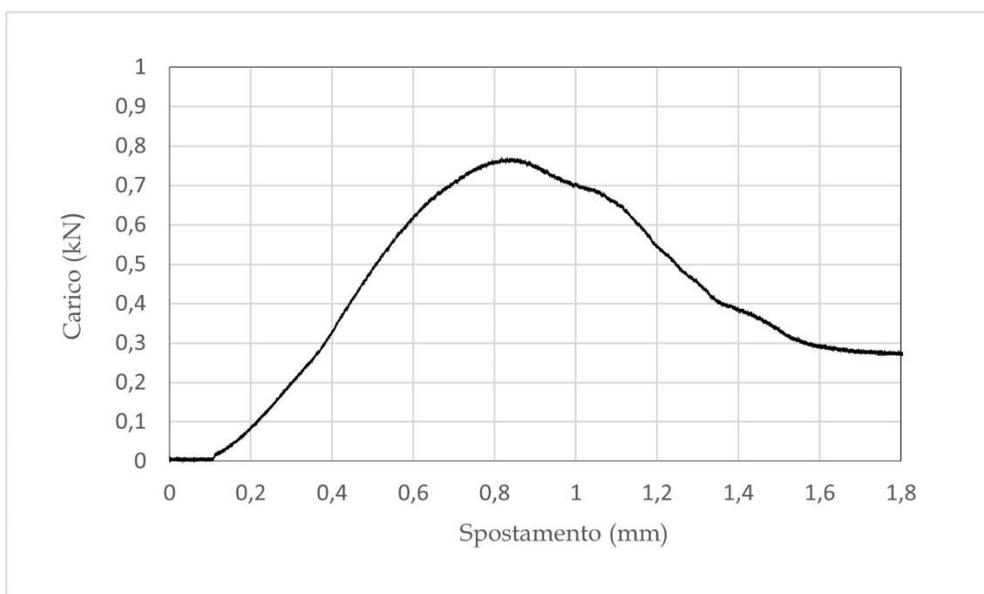
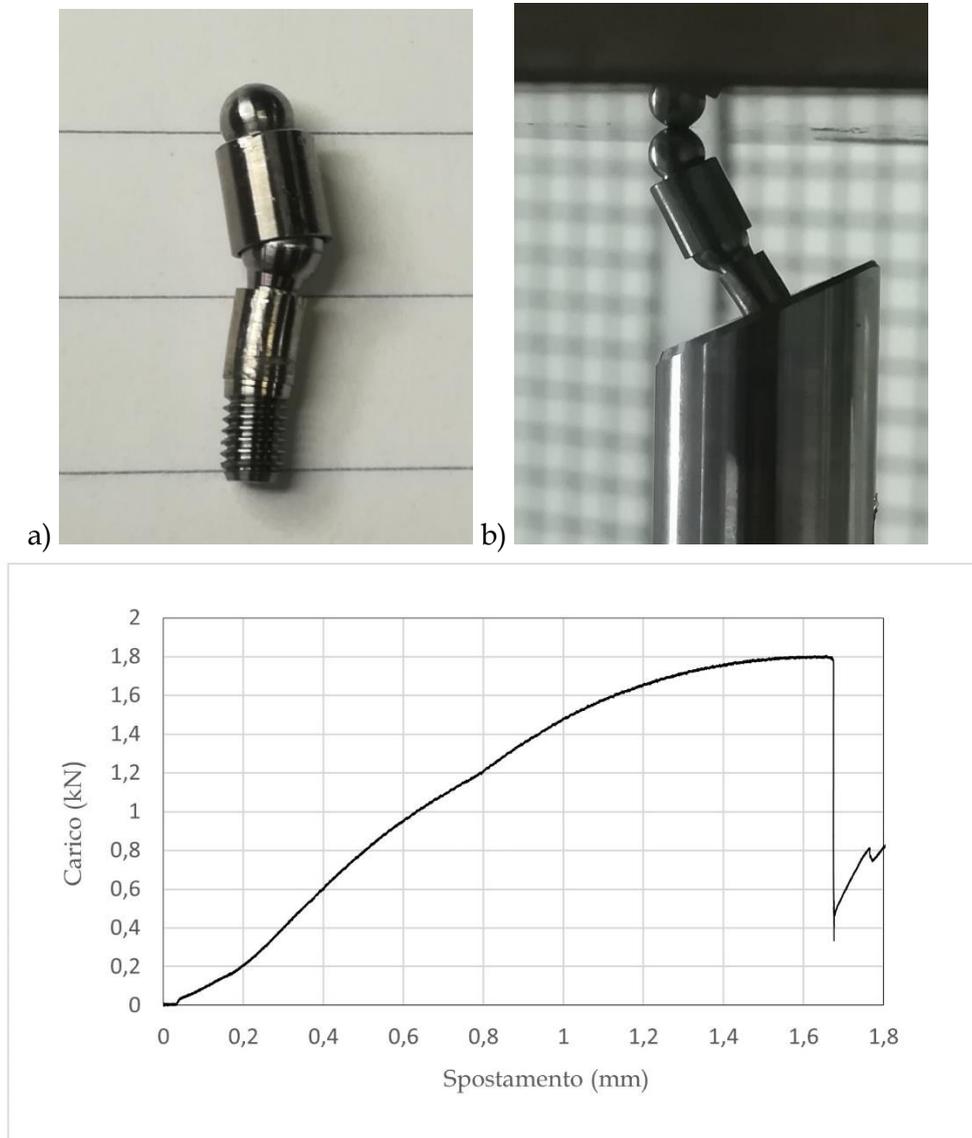


Figura 8.16: risultati ottenuti a seguito del test sul quarto provino, riportati in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico.

Anche in questo caso mobilitazioni dovute ad errori accidentali in fase di montaggio hanno determinato valori di carico a rottura decisamente inferiore (circa pari a 750 N) rispetto al valore stimato.



c)

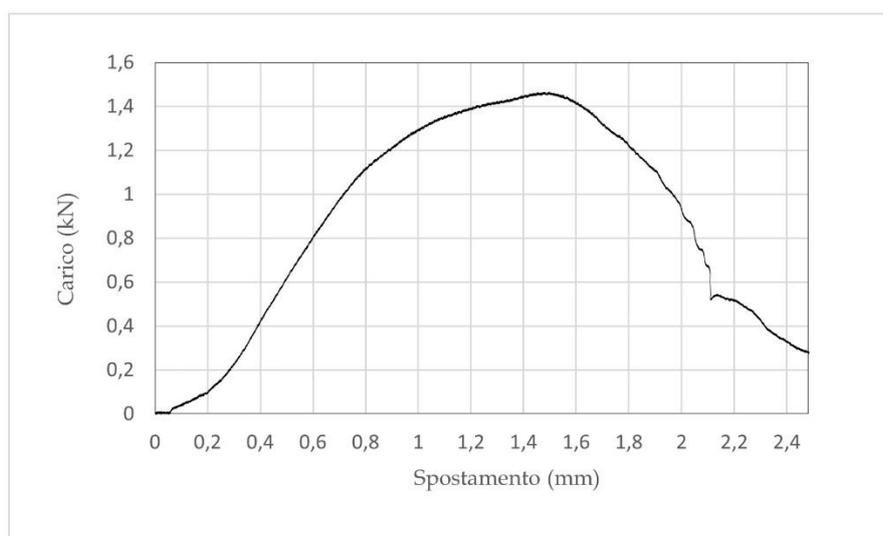
Figura 8.17: quinto provino a seguito del test (a)(b) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (c).

Il quinto provino è giunto a rottura quando sottoposto a un carico di modulo pari all'incirca a 1800 N, valore concorde con quanto riscontrato durante il test del primo provino.

In generale, considerando la protesi nella configurazione con $\alpha = 15^\circ$, sono stati osservati risultati maggiormente dispersi, a causa delle difficoltà riscontrate nel montare i provini

all'angolazione desiderata piuttosto che a fine corsa. Nonostante si possa ipotizzare che il primo (Fig. 8.13) e il quinto provino (Fig. 8.17) descrivano il comportamento effettivo della struttura, non si quindi definire con certezza un valore medio di carico di rottura.

8.3. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 25^\circ$



b)

Figura 8.18: impianto cilindrico a seguito del test (a) e risultati relativi al primo provino riportati in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

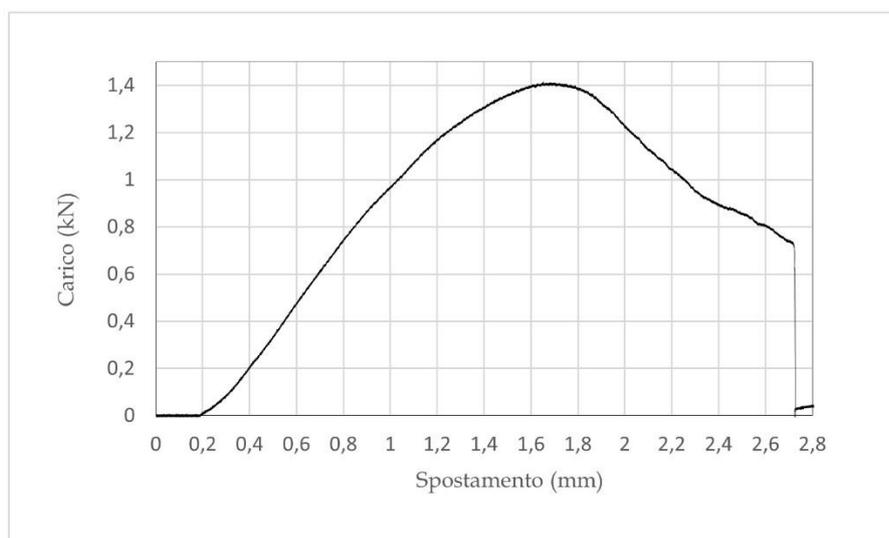


Figura 8.19: secondo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).



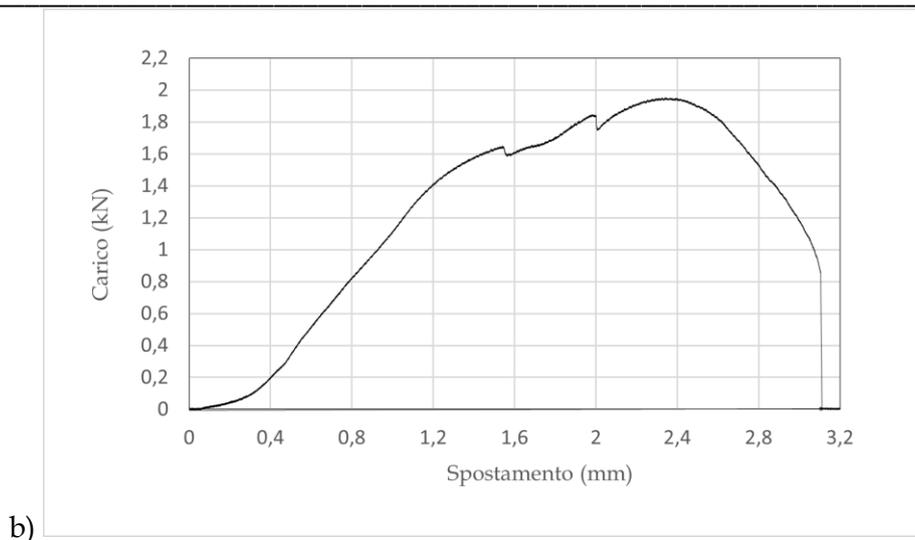


Figura 8.20: terzo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

La struttura ridotta nella configurazione con $\alpha = 25^\circ$ giunge a rottura per valori di carico applicato compresi tra 1400-1900 N. I risultati ottenuti permettono di affermare che la struttura ridotta comporti un miglioramento delle prestazioni: confrontando l'esito dei test svolti (Fig.re 8.18, 8.19 e 8,20) con i risultati ottenuti valutando la struttura normale nella configurazione con $\alpha = 30^\circ$ (Fig.re 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11), infatti, si osserva un aumento del carico di rottura considerevole.

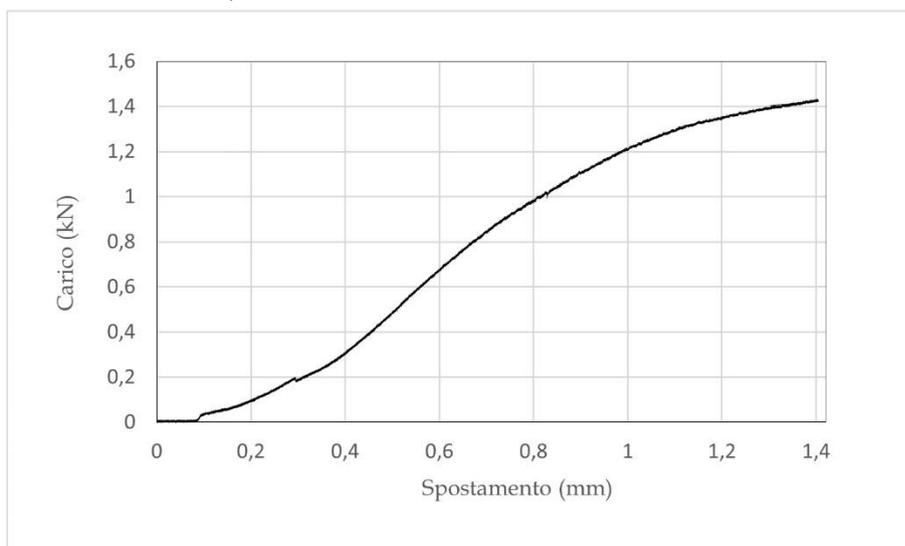
La struttura ridotta nella configurazione con $\alpha = 25^\circ$ giunge a rottura per valori di carico applicato compresi tra 1400-1900 N.

In generale si noti come considerare le strutture nella loro inclinazione massima α_{max} permetta di ottenere risultati più omogenei, il che può essere dovuto alla maggior facilità in fase di montaggio nel realizzare l'angolazione massima ottenibile (fine corsa) piuttosto che una intermedia.

8.4. Moncone a sezione ridotta: $\alpha = 15^\circ$

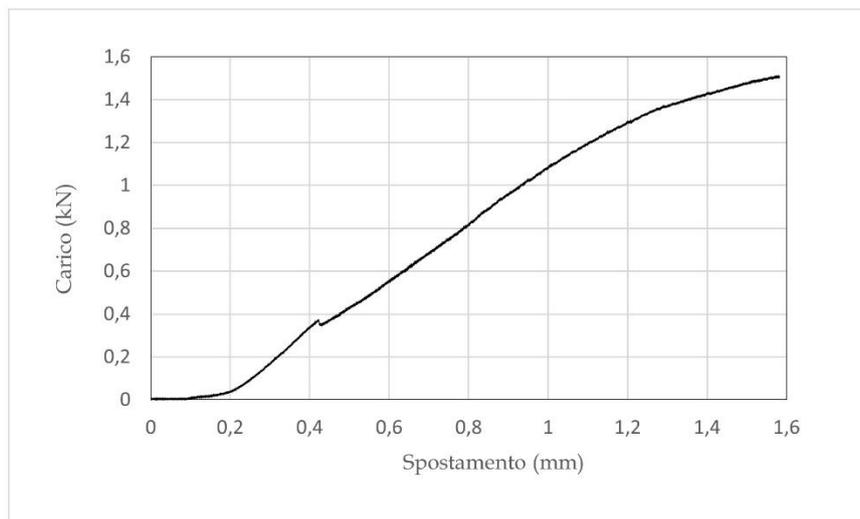


a)



b)

Figura 8.21: primo provino (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).



b)

Figura 8.22: secondo provino a seguito del test (a) e risultati ottenuti in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico (b).

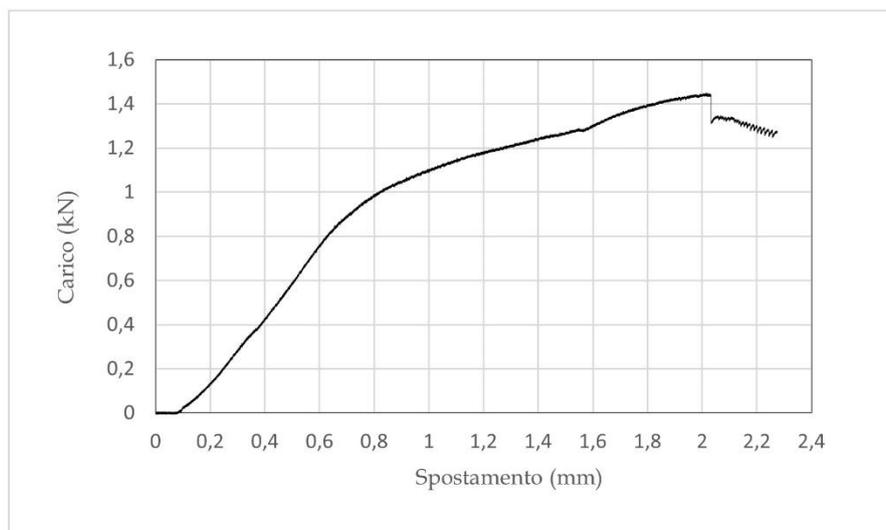


Figura 8.23: risultati ottenuti a seguito del test sul terzo provino, riportati in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico.

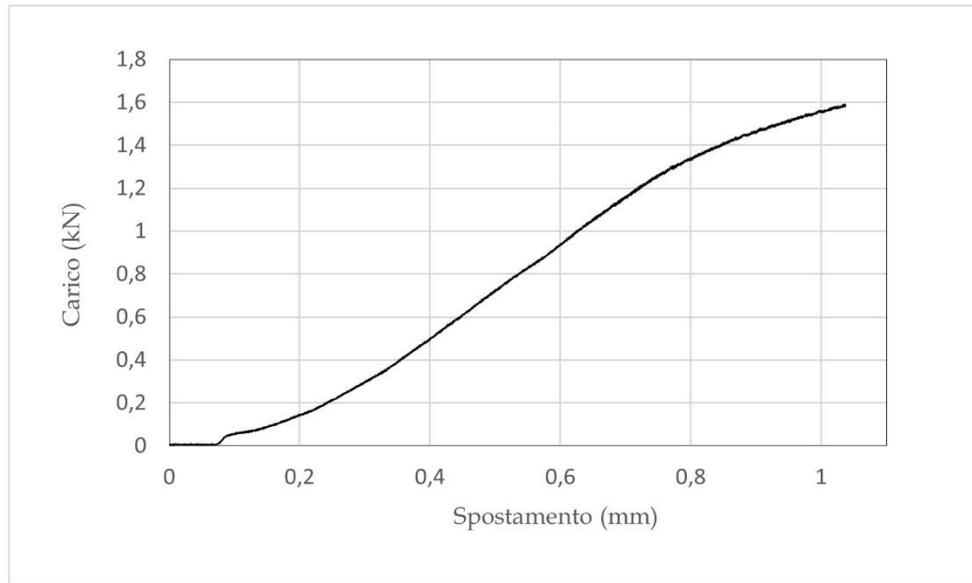


Figura 8.24: risultati ottenuti a seguito del test sul quarto provino, riportati in termini di carico applicato in funzione dello spostamento del componente di carico.

Nonostante si stia considerando un'inclinazione α intermedia, i risultati ottenuti mostrano con sufficiente omogeneità che la struttura giunge a rottura se sottoposta ad un carico compreso tra 1400 N e 1600 N. I carichi a rottura della struttura ridotta nelle configurazioni con $\alpha = 15^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, però, sono paragonabili, a tal punto che il maggior carico a rottura registrato si osserva considerando la struttura con $\alpha = 25^\circ$ (Fig. 8.20).

In conclusione, si può affermare che la protesi nelle configurazioni analizzate non mostri cedimenti a livello dell'accoppiamento sferico e giunga a rottura presso la porzione cilindrica del moncone, per i valori di carico riportati in Tab. 8.1:

Configurazione	Carico a rottura
Normale, $\alpha=30^\circ$	750 - 1000 N
Normale, $\alpha=15^\circ$	800 - 1800 N
Ridotta, $\alpha=25^\circ$	1400 - 1800 N
Ridotta, $\alpha=15^\circ$	1400 - 1600 N

Tabella 8.1: valori di carico a rottura registrati durante i test.

Conclusioni

La realizzazione del modello agli elementi finiti della protesi in studio, obiettivo principale di questo lavoro di tesi, ha previsto una prima fase in cui la struttura è stata trattata come un volume unico, trascurando quindi il trasferimento degli sforzi attraverso le superfici a contatto. Ciò ha permesso di sviluppare una valutazione preliminare del comportamento della protesi al variare dei vincoli e dei carichi applicati.

In secondo luogo, si è realizzato un modello esplorativo del contatto tra le superfici, tramite cui si sono analizzate due modalità di contatto attuabili, la prima di tipo “Joint” e la seconda di tipo “Contact”. Nonostante entrambe abbiano dimostrato l’effettivo trasferimento delle sollecitazioni attraverso le superfici, il contatto di tipo “Contact” è risultato come l’unico adatto all’applicazione su superfici complesse e definite da curvature.

Il modello completo della protesi, quindi, è stato rielaborato introducendo la modalità di contatto scelta, prediligendo un contatto rigido (nessun grado di libertà ammesso all’interfaccia). A seguito dell’introduzione di ulteriori affinamenti della mesh generata e dei vincoli imposti, si sono svolte diverse simulazioni al variare della struttura considerata (comprensiva di moncone a sezione normale o ridotta, nelle due rispettive configurazioni previste), con lo scopo di emulare il più possibile l’assetto descritto nella normativa di riferimento BS EN ISO 14801:2016. Questo ha permesso di ottenere un diretto confronto con quanto osservato successivamente grazie alle prove sperimentali.

Le prove sperimentali, svolte tramite una macchina di prova universale presso il laboratorio DIMEAS del Politecnico di Torino in conformità con l’assetto sancito dalla normativa di riferimento (si sono preventivamente ideati e fabbricati i componenti aggiuntivi richiesti), hanno permesso la

validazione del modello agli elementi finiti in termini di localizzazione delle zone di concentrazione degli sforzi: difatti, la somministrazione di un carico comparabile a quello applicato durante le prove sperimentali identifica la porzione cilindrica del moncone sferico come la zona maggiormente sollecitata della struttura. L'accoppiamento sferico non mostra particolari punti critici, il che è verificato anche dai risultati ottenuti dai test svolti, i quali, in caso contrario, mostrerebbero delle deflessioni nelle curve carico-spostamento antecedenti al momento di rottura del moncone.

Sviluppi futuri del modello strutturale elaborato potrebbero tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- l'attrito esistente tra le superfici;
- l'azione del precarico generato dall'accoppiamento filettato tra vite e cappetta sferica.

Sono state svolte delle simulazioni con il fine di tenere conto dell'attrito esistente tra le superfici, introducendo un coefficiente d'attrito ($\mu = 0,3$ (3)) nella definizione del contatto. Si è osservato un considerevole aumento delle tensioni nelle zone maggiormente sollecitate, ma a causa dell'elevato carico computazionale necessario per il calcolo della soluzione non si è proseguito lo studio comprensivo di attrito. Uno sviluppo futuro potrebbe quindi concentrarsi sull'introduzione di tale parametro nella tipologia di contatto tra i componenti.

L'azione del precarico, invece, è stata contemplata esclusivamente per via analitica. Avendo nota la coppia di serraggio nominale, si è pensato di calcolare le componenti della forza F_v e F_u attraverso il quale tale coppia agisce sulla filettatura, tramite le formule riportate di seguito:

$$M_T^* = \frac{F_v}{2} (d_m \cdot \tan \alpha_m + d_m \cdot \tan \varphi') = \frac{F_v}{2} \left(\frac{p}{\pi} + d_m \cdot \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha} \right) \quad (*)$$

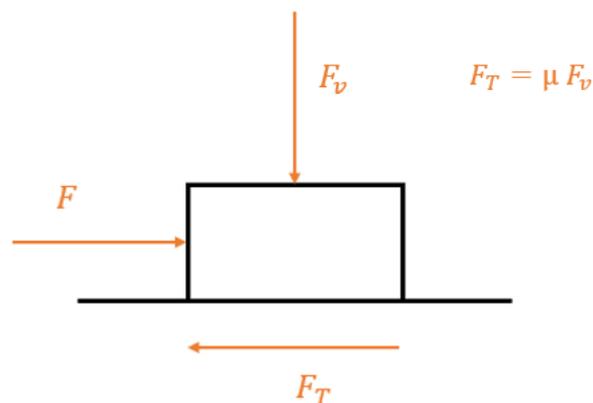
$$F_u = F_v \tan(\alpha_m + \varphi) \quad (**)$$

Dove:

- F_v : componente di forza assiale sopportata dalla vite, generata dall'applicazione della coppia di serraggio;
- F_u : componente di forza tangenziale;

- M_T^* : momento torcente sopportato dalla vite, dovuto all'attrito sui filetti;
- d_m : diametro medio del filetto;
- α_m : angolo dell'elica;
- $\tan \varphi = f$: coefficiente di attrito (vite-madrevite);
- $\tan \varphi'$: coefficiente di attrito apparente;
- α : angolo della filettatura, pari a 60° nel caso della protesi in studio;
- p : passo.

Dal momento che il serraggio (applicato direttamente alla cappetta sferica tramite un cricchetto dinamometrico) esercita un'azione di compressione sulla cappetta sferica e un'azione di trazione sulla vite, si ritiene che a partire da F_v si potrebbe risalire ad una pressione da applicare, con segno opposto, sia alla cappetta che alla vite; tale pressione, abbinata ad una corretta definizione del contatto tra i componenti, rappresenterebbe l'azione del precarico. Applicando quindi una forza laterale F (schema 1) dovrebbe essere consentito il calcolo della soluzione (statica) fintanto che F si mantiene inferiore alla forza di attrito F_T . Nel caso in cui F fosse maggiore di F_T non si avrebbe più convergenza, a causa della movimentazione della struttura.



Schema 1: rappresentazione delle forze agenti in presenza di attrito.

Lo studio del precarico generato dalla coppia di serraggio, però, non è stato proseguito a causa delle difficoltà legate principalmente al calcolo della quota parte di momento sopportato dalla vite: difatti, nel caso della protesi in studio il contatto non avviene esclusivamente tra la cappetta e

la vite sferica, ma coinvolge anche il moncone. Considerare la coppia di serraggio nominale, quindi, comporta una considerevole sovrastima nel calcolo di F_v .

Uno sviluppo futuro dello studio della protesi, quindi, potrebbe incentrarsi sul calcolo del momento d'attrito, pari al momento massimo applicabile per non avere cedimento dell'accoppiamento, e della forza laterale massima applicabile (legata anch'essa al momento d'attrito).

Bibliografia

1. *Tooth loss is a complex measure of oral disease: Determinants and methodological considerations.* Simon Haworth, Dmitry Shungin, So Young Kwak, Hae-Young Kim, Nicola X. West, Steven J. Thomas, Paul W. Franks, Nicholas J. Timpson, Min-Jeong Shin, Ingegerd Johansson. December 2018, *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, p. 555-562.
2. *Drynaria – Benefits of Unique Bone-Building Herb for Gingivitis and Osteoporosis.* English, Jim. s.l. : NutritionReview.org, July 2014.
3. Guillermo de la Rosa Castolo, Sonia V. Guevara Perez, Pierre-Jean Arnoux, Laurent Badih, Franck Bonnet, Michel Behr. *Mechanical strength and fracture point of a dental implant under certification conditions: A numerical approach by finite element analysis.* *The journal of Prosthetic Dentistry*. 2018, Vol. 119, 4.
4. D.N. Mancuso, M.C. Goiato, H.G. Filho, A.E', Gomes. *Bite force and masticatory efficiency in implant-retained dentures: Literature review.* *Dentistry Today*. 2008, Vol. 27, 8.
5. Sorin Mihai Croitoru, Ion Alexandru Popovici. *R&D on dental implants breakage.* *Applied Surface Science*. 417, 2017.
6. K. Tokmakidis, B. Wessing, K. Papoulia, H. Spiekermann. *Belastungsverteilung und Belastungskonzepte auf Zähnen und Implantaten.* *Z Zahnärztl Impl.* 25, 2009, Vol. 1.
7. *Dentists' Most Common Practices when Selecting an Implant System.* Ahed Al-Wahadni, Mohamed S. Barakat, Khladoon Abu Afifeh, Yusuf Khader BDS. Issue 3 p. 250-259, s.l. : *Journal of Prosthodontics*, 25 October 2017, Vol. Volume 27.

8. *Comparison of the Marginal Bone Loss in One-stage versus Two-stage Implant Surgery*. Rasoul Gheisari, Hesamuddin Eatemadi, Akram Alavian. 4, Shiraz : Journal of Dentistry , 2017, Vol.
9. *Dental Implant Procedure - One Stage*. Consult-PRO: The Dental Software Solution, https://www.youtube.com/watch?v=_BGbzO9DWDm.
10. *Dental Implant Procedure - Two Stage*. Consult-PRO: The Dental Software Solution, <https://www.youtube.com/watch?v=gMycqoQrlBs>.
11. Dario Spitaleri, Riccardo Franco, Lino Zamolo. *New Concept and a New Perspective in the use of One Piece Dental Implants*. Journal of Orthodontics and Craniofacial Research . 2020.
12. Yuya Sasada, David L.Cochran. *Implant-Abutment Connections: a Review of Biologic Consequences and Peri-implantitis Implications*. Quintessence Publishing Co Inc. 2017, Vol. 32,
13. M.Barry, D.Kennedy, K.Keating, Z.Schauperl. *Design of dynamic test equipment for the testing of dental implants*. Materials & Design. 2005, Vol. 26, 3.
14. Jorge Cortés-Bretón Brinkmann, Ignacio García-Gil, Patricia Pedregal, Jesús Peláez, Juan Carlos Prados-Frutos, María Jesús Suárez. *Long-Term Clinical Behavior and Complications of Intentionally Tilted Dental Implants Compared with Straight Implants Supporting Fixed Restorations: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Biology. 2021, Vol. 10.
15. Rohit Bahuguna, Bhargavi Anand, Dheeraj Kumar, Himanshu Aeran, Vishal Anand, Minkle Gulati. *Evaluation of stress patterns in bone around dental implant for different abutment angulations under axial and oblique loading: A finite element analysis*. National Journal of Maxillofacial Surgery . 2013, Vol. 4, 1.
16. Andrew S. Wiemeyer, John R. Agar, Reza B. Kazem. *Orientation of retentive matrices on spherical attachments independent of implant parallelism*. THE JOURNAL OF PROSTHETIC DENTISTRY. 2001, Vol. 86, 4.

17. Avinash S. Bidra, John R. Agar. *Management of misangulated implants for a maxillary overdenture with spherical abutments: A clinical report*. The Journal of Prosthetic Dentistry. 2011, Vol. 106, 4.
18. Julia-Gabriela Wittneben, Tim Joda, Hans-Peter Weber, Urs Bragger. *Screw retained vs. cement retained implant-supported fixed dental prosthesis*. Periodontology 2000. 2016, Vol. 73,
19. Muaiyed Mahmoud Buzayan, Norsiah Binti Yunus. *Passive Fit in Screw Retained Multi-unit Implant Prosthesis Understanding and Achieving: A Review of the Literature*. The journal of Indian Prosthodontic Society. 2013, Vol. 14, 1.
20. Mansour Rismanchian, DMD, MS, et al. *Effect of Implants on Maximum Bite Force in Edentulous Patients*. J Oral Implantol. 2009, Vol. 35, 4.