

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Politecnico
di Torino**

ANALISI DINAMICA DI ROTORI CON DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

Relatori

Prof. Daniele BOTTO

Prof. Christian Maria FIRRONE

Candidato

Alessandra CESARETTI

Luglio 2024

Sommario

L'analisi delle strutture rotanti può essere impegnativa a causa del cablaggio richiesto dai sensori tradizionali, che in genere necessitano di alimentazione e trasmissione dei dati. I sensori tradizionali possono fornire solo misure puntuali e solitamente inducono una massa e rigidità aggiuntiva, che influenzano il vero moto dinamico del sistema spostando le frequenze naturali e introducendo uno smorzamento esterno. Inoltre, per caratterizzare l'intera dinamica del sistema è necessario un numero significativo di sensori, con un conseguente aumento dei costi e della difficoltà nel posizionamento corretto dei sensori stessi. Pertanto, un approccio di misura non a contatto come la Digital Image Correlation può mostrare potenziali vantaggi. La Digital Image Correlation è una tecnica ottica in grado di fornire l'intero campo di spostamenti e deformazioni di una struttura, sfruttando immagini digitali acquisite da telecamere. Le fotocamere più economiche hanno solitamente un'alta risoluzione ed un basso frame rate. Pertanto, per studiare e caratterizzare i fenomeni ad alta frequenza, è necessario implementare una tecnica di down-sampling. In questa tesi è stato sviluppato un approccio per la misura delle deformazioni a tutto campo di un disco palettato (blisk) utilizzando la 3D Digital Image Correlation. Questo lavoro è suddiviso in tre sezioni principali: la progettazione del sistema di eccitazione, l'analisi modale sperimentale e numerica del blisk non rotante e l'analisi modale del disco rotante. Tutte le misure sono state eseguite impiegando un disco semplificato con dodici pale, realizzato in lega di alluminio.

Abstract

The analysis of rotating structures can be challenging due to the wiring required by traditional sensors, that generally need power supply and data transmission. Traditional sensors can only provide measurements at a few discrete locations and they usually induce mass loading and stiffness, affecting the true dynamic motion of the system by shifting natural frequencies and introducing external damping. In addition, a significant number of sensors is needed to characterize the full dynamic of the system, resulting in increasing cost and difficulty to place the sensors properly. Therefore, a non-contacting measurement approach such as Digital Image Correlation can show potential benefits. Digital Image Correlation is an optical technique that can provide full-field displacements and strains based on digital images acquired by cameras. Affordable cameras usually possess high resolution and low frame rate. Therefore, to study and characterize high frequencies phenomena, a down-sampling technique has to be implemented. In this thesis, an approach for full-field deformation measurements of a bladed disk (blisk) using 3-Dimensional Digital Image Correlation has been developed. This work is divided into three sections: the design of the excitation system, the experimental and the numerical modal analysis of the non-rotating blisk and the modal analysis of the rotating disk. All the measurements are performed on an aluminum dummy blisk with twelve blades.

Indice

Elenco delle tabelle	VII
Elenco delle figure	VIII
1 Introduzione	1
2 Digital Image Correlation	3
2.1 Concetti fondamentali	3
2.2 Funzione di correlazione	7
2.3 Principi di funzionamento	8
3 Analisi modale sperimentale	11
3.1 Descrizione della prova sperimentale	11
3.2 Elaborazione dei risultati sperimentali	13
4 Analisi modale numerica	15
4.1 Analisi numerica preliminare del disco libero	16
4.2 Analisi numerica del disco libero	19
4.3 Analisi numerica del disco vincolato	20
5 Eccitazione del disco in rotazione	22
5.1 Pianificazione delle prove sperimentali	22
6 Progettazione del sistema di eccitazione del disco	27
6.1 Disco inferiore	29
6.2 Disco superiore	30
6.3 Supporti portamagnete	31
6.4 Distanziale	32
6.5 Collegamenti filettati	33

7 Problemi legati al disco in rotazione	34
7.1 Determinazione dell'altezza minima	35
7.2 Sfocatura dovuta alla rotazione del disco	37
7.3 Acquisizione ad istanti di tempo noti	41
7.4 Problema del moto rigido	42
8 Conclusioni	43
A Tavole dei componenti	45
B Viste 3D del sistema di eccitazione completo	55
C Tavole della flangia	59
D Luci stroboscopiche	62
E Celle di carico	67
Bibliografia	71

Elenco delle tabelle

3.1	Frequenze naturali ricavate con l'hammer test	14
4.1	Risultati dell'analisi numerica preliminare del disco libero	18
4.2	Risultati dell'analisi numerica del disco libero	19
4.3	Risultati dell'analisi numerica del disco vincolato	20
5.1	Relazione tra EO e ND a seconda della velocità di rotazione	26
7.1	Dati della telecamera	35
7.2	Confronto tra diverse tipologie di lenti	36

Elenco delle figure

2.1	Confronto tra 2-DIC e 3-DIC	5
2.2	Speckle pattern	6
2.3	Processo di triangolazione	8
2.4	Processo di stereo-matching	9
2.5	Processo di calibrazione	10
3.1	Schema rappresentativo della prova condotta	12
3.2	Risultati dell'hammer test (Prova 1)	13
3.3	Risultati dell'hammer test (Prova 2)	13
3.4	Confronto dei risultati dell'hammer test	14
4.1	Modello FE del singolo settore del disco	17
4.2	Modello FE del disco completo	17
4.3	Diagramma Fre-ND del disco libero	19
4.4	Diagramma Fre-ND del disco vincolato	20
4.5	Analisi modale numerica della prima famiglia	21
5.1	Diagramma di Campbell del disco in rotazione	24
5.2	Diagramma Zig-Zag del disco	25
6.1	Modello CAD del sistema di eccitazione del disco	28
6.2	Modello CAD del disco	28
6.3	Modello CAD del disco inferiore	29
6.4	Modello CAD del disco superiore	30
6.5	Modello CAD del supporto portamagnete	31
6.6	Modello CAD del distanziale	32
6.7	Assieme CAD del supporto portamagnete	33
7.1	Schema rappresentativo della singola telecamera	36
7.2	Spazio percorso in funzione della velocità di rotazione	39
7.3	Tempo di esposizione in funzione della velocità di rotazione	40
7.4	Modello CAD della flangia superiore cilindrica e con scanalatura	41

Capitolo 1

Introduzione

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica di misura non a contatto che consente di ricavare il campo di deformazione e spostamento di un oggetto sfruttando le informazioni relative ad immagini digitali, correlando un'immagine di riferimento nella condizione indeformata con quelle acquisite durante la deformazione.

Tale tecnica è ormai largamente impiegata per l'analisi di strutture non rotanti, in cui intercorrono piccoli spostamenti tra l'immagine di riferimento e quella deformata. Tuttavia, in presenza di grandi spostamenti, come quelli che si hanno nel caso di un disco posto in rotazione, la DIC fallisce in quanto non contempla la rotazione del reference subset. La risoluzione di questo problema può comportare notevoli vantaggi, in quanto permette di abbandonare l'impiego di sensori tradizionali, come estensimetri e celle di carico, per lo studio di strutture rotanti.

L'utilizzo di sensori tradizionali, infatti, comporta una massa aggiuntiva che condiziona la dinamica reale del sistema, modificando le frequenze naturali degli oggetti in esame ed introducendo uno smorzamento esterno. Inoltre, per caratterizzare forme modali più complesse, è necessario un grande numero di sensori, che determina un aumento dei costi e la difficoltà di posizionamento degli stessi, a causa del cablaggio di cui necessitano per il loro funzionamento e per la trasmissione dei dati.

L'obiettivo di questa tesi è quello di illustrare un possibile approccio per l'applicazione della 3-Dimensional Digital Image Correlation (3-DIC) su dischi posti in rotazione. Per mezzo di tale tecnica è possibile misurare il campo di deformazione e spostamento di un oggetto nelle tre dimensioni dello spazio, impiegando due telecamere sincronizzate tra loro.

Si rende quindi necessaria una fase di calibrazione e di stereo-matching, in modo tale da far corrispondere le immagini provenienti dalle due telecamere e realizzare una visione stereoscopica dell'oggetto in esame. Questa fase è seguita dal processo di triangolazione, che permette invece di ricavare le coordinate tridimensionali di ogni punto in un sistema di riferimento globale. La descrizione dei concetti fondamentali e dei principi di funzionamento della tecnica DIC è presentata nel Capitolo 2.

Il disco in esame è in realtà un modello semplificato, costituito da 12 pale a sezione rettangolare e realizzato in lega di alluminio. Dopo aver individuato sperimentalmente e numericamente le sue frequenze naturali, rispettivamente nel Capitolo 3 e 4, viene descritta l'eccitazione del disco nel Capitolo 5, che avviene mediante forze di natura magnetica generate da magneti permanenti. Per questo scopo, è stato progettato un sistema di eccitazione, i cui componenti sono illustrati ampiamente nel Capitolo 6. La trattazione si conclude con la descrizione, nel Capitolo 7, delle principali problematiche che accompagnano l'analisi del campo di deformazione e di spostamento mediante tecnica DIC, per ciascuna delle quali è stata discussa una possibile soluzione.

Capitolo 2

Digital Image Correlation

Nel presente capitolo viene descritta brevemente la tecnica di misura delle deformazioni e degli spostamenti nota come Digital Image Correlation (DIC), illustrandone i concetti fondamentali del metodo e descrivendone i principi di funzionamento.

2.1 Concetti fondamentali

La DIC è una tecnica di misura non a contatto che consente di effettuare un'analisi a tutto campo del campo di deformazione e spostamento di un oggetto, in cui agisce un certo carico, sfruttando l'elaborazione numerica di immagini digitali. I sensori tradizionali, come ad esempio gli estensimetri e le celle di carico, permettono misure esclusivamente monodimensionali e puntuali. Al contrario, la DIC consente di effettuare analisi tridimensionali e a tutto campo, ovvero di più punti in contemporanea.

Introdotta a partire dagli anni '80 da un gruppo di ricercatori della "University of South Carolina", ad oggi la DIC è una tecnica largamente accettata e utilizzata, specialmente per le applicazioni che richiedono una misura densa dei campi di deformazione e di spostamento. Difatti, le tecniche di misura a contatto e puntuali presentano i seguenti limiti:

- Influenza della massa del sensore nel fenomeno studiato, in quanto si ha una massa aggiuntiva che condiziona la dinamica reale del sistema, risultando in una variazione delle frequenze naturali e nell'introduzione di uno smorzamento;
- Difficoltà nella trasmissione di dati nel caso di campioni rotanti, dovuta al cablaggio di cui necessitano i sensori tradizionali per funzionare correttamente;
- Necessità di molti sensori per descrivere forme modali complesse, che si traduce in un aumento dei costi e nella difficoltà di posizionarli in modo adeguato.

Di conseguenza, la DIC mostra importanti benefici nell'analisi dinamica dei rotori, i quali durante il loro funzionamento sono soggetti alla combinazione di diversi carichi statici e dinamici, che influenzano le loro prestazioni, nonché la loro efficienza ed affidabilità. Durante la fase di progetto, la stima dei carichi agenti è in generale differente dalle sollecitazioni che agiscono effettivamente sui rotori: per tenere conto di questa differenza, sono spesso sovradimensionati mediante l'impiego di eccessivi fattori di sicurezza. È fondamentale, quindi, monitorare lo stato di sollecitazione di questi componenti, assicurando l'integrità delle pale che sono spesso soggette a frattura a causa di fenomeni di fatica. Per realizzarlo, l'impiego dei sensori tradizionali può diventare molto impegnativo, mentre sono evidenti i benefici offerti dalla DIC [1].

Questa tecnica è nata in origine come 2-Dimensional Digital Image Correlation (2-DIC), in cui è impiegata una singola telecamera per l'analisi dello stato di sollecitazione di un oggetto. La 2-DIC consente, però, di misurare soltanto deformazioni e spostamenti in un piano calibrato parallelo al sensore della telecamera. Bisogna quindi assumere che l'oggetto sia planare e disposto parallelamente al piano dell'immagine. Inoltre, durante la prova sperimentale, la distanza tra l'oggetto stesso ed il sensore della telecamera non deve variare. Queste assunzioni impongono quindi una visione non stereoscopica, ovvero monoculare, che non è in grado di determinare la dimensione reale dell'oggetto e la sua distanza effettiva, in quanto manca l'informazione relativa alla profondità. Infatti, i movimenti dell'oggetto fuori dal piano dell'immagine comportano degli importanti errori di misura, poichè sono interpretati come deformazioni che in realtà non sussistono.

I principali errori di misura possono essere dovuti a:

- Un movimento della telecamera durante la prova;
- Un non corretto posizionamento della telecamera rispetto all'oggetto;
- Una deformazione fuori dal piano di calibrazione della telecamera.

Per questi motivi, spesso viene impiegata la 3-Dimensional Digital Image Correlation (3-DIC) anche per prove statiche, oltre che per quelle dinamiche per cui è stata inizialmente formalizzata. Questa tecnica prevede l'utilizzo di due telecamere, sincronizzate tra loro, in modo tale da misurare anche le deformazioni e gli spostamenti dell'oggetto fuori dal piano dell'immagine. Di conseguenza si ha una visione stereoscopica, ovvero binoculare, che è in grado invece di determinare la dimensione reale dell'oggetto e la sua distanza effettiva, grazie alla sovrapposizione delle immagini percepite dalle due diverse prospettive. Uno schema rappresentativo delle due tecniche è presentato in figura 2.1.

I principali vantaggi della 3-DIC sono:

- È possibile tracciare lo spostamento 3D della superficie dell'oggetto;
- Il provino non deve essere necessariamente perfettamente planare;
- Si ha una maggiore facilità di posizionamento delle telecamere.

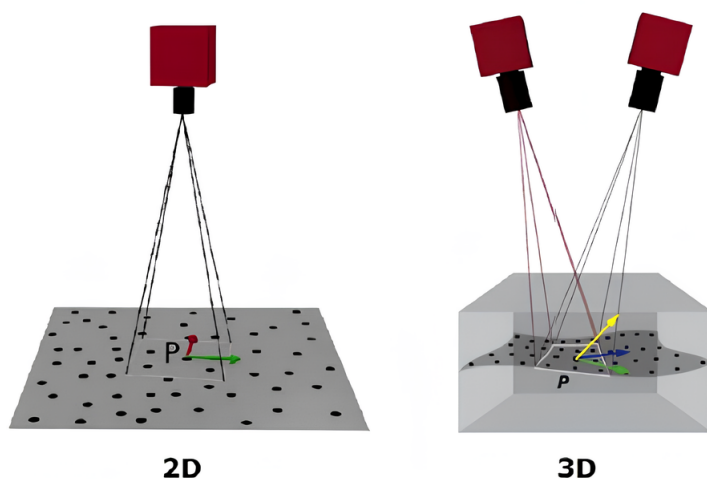


Figura 2.1: Confronto tra 2-DIC e 3-DIC

Impiegando la 3-DIC, si devono acquisire per mezzo delle due telecamere un numero arbitrario di immagini dell'oggetto, almeno una coppia per ogni condizione deformata che deve essere analizzata, che consentono di ricavare le coordinate 3D di ogni punto di misura in un sistema di riferimento globale. A queste si aggiunge un'immagine iniziale che ritrae l'oggetto nella condizione indeformata, chiamata immagine di riferimento. Durante l'analisi DIC quindi si confronta l'immagine di riferimento con quelle relative alla condizione deformata, con lo scopo di ricavare il campo di deformazione e di spostamento dell'oggetto.

Ciascun immagine è definita da un certo numero di pixel, comune in tutte le acquisizioni in quanto dipende strettamente dalle specifiche delle telecamere impiegate. Ogni pixel è rappresentato da un valore numerico, compreso tra 0 ed 1, che indica in generale la quantità di luce presente in quel punto nell'immagine.

Il principio alla base della tecnica DIC è proprio quello di far corrispondere gli stessi punti tra l'immagine di riferimento e quelle acquisite in seguito alla deformazione dell'oggetto. È evidente che questa corrispondenza non è garantita impiegando un singolo pixel, in quanto lo stesso livello di grigio, espresso da un valore numerico, può essere ritrovato più volte all'interno della stessa immagine per cui l'univocità del punto non è assicurata. Inoltre, tale valore può subire delle variazioni anche a causa del processo stesso di acquisizione [2].

Si introduce quindi una suddivisione virtuale dell'immagine di riferimento in piccole aree di forma quadrata, denominate subset. Ogni subset contiene al suo interno diversi pixel, dunque sono caratterizzati da un maggior numero di informazioni. Per ognuno di questi viene calcolato lo spostamento riferito al suo punto centrale, dopo aver trovato la corrispondenza del subset nelle diverse immagini.

È fondamentale quindi che ogni subset abbia delle caratteristiche uniche, per renderlo chiaramente distinguibile dagli altri senza ambiguità. Se l'oggetto non è in possesso di caratteristiche superficiali idonee all'applicazione della DIC, la quale necessita che ogni punto sia diverso dall'altro, lo si deve trattare appositamente per crearle. Per questo motivo, spesso si applica un pattern randomico sulla superficie esterna dell'oggetto per mezzo di bombolette spray, denominato speckle pattern. Questo possiede molteplici macchioline, generalmente nere su sfondo bianco per massimizzare il contrasto, ciascuna con dimensioni che vanno dai 3 ai 7 pixels [3]. Ogni subset quindi è descritto da un valore unico e distinguibile di intensità luminosa ed ha un'area compresa tra i 15 ed i 30 pixels² [3].

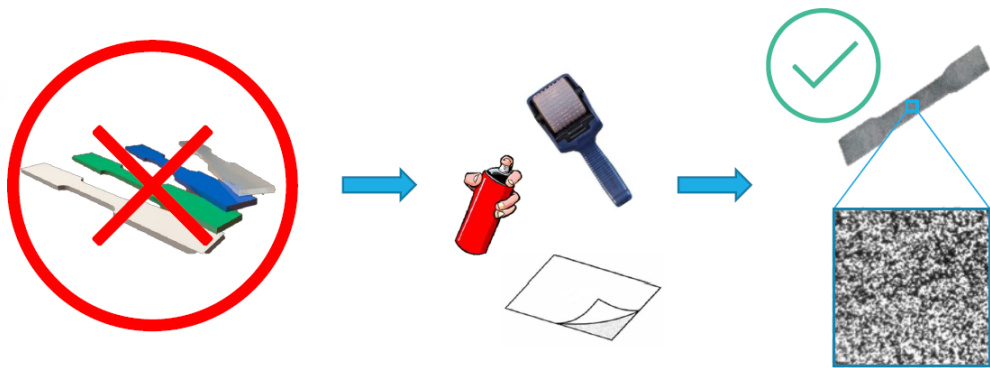


Figura 2.2: Speckle pattern

2.2 Funzione di correlazione

Per ricercare la corrispondenza tra ogni singolo subset nell'immagine di riferimento, chiamato reference subset, e la corrispondente porzione di immagine acquisita durante una condizione deformata dell'oggetto, chiamato invece target subset, si deve implementare un'operazione di cross-correlazione che ricerca il punto di massima somiglianza tra i due. Si sfrutta quindi la funzione di correlazione, impiegata per definire la somiglianza tra due segnali, facendo scorrere il subset all'interno dell'immagine in direzione i e j e ricercando il minimo della differenza quadratica tra i due segnali, in corrispondenza del quale la correlazione è massima.

Considerando quindi la funzione dell'immagine $f(x, y)$ e quella del subset $g(x, y)$, di dimensioni $m \times n$, si può scrivere che:

$$E(i, j) = \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n (f(x+i, y+j) - g(x, y))^2$$

Svolgendo il quadrato dell'argomento si può notare che il minimo della funzione $E(i, j)$ si ottiene quando il prodotto tra i due segnali è massimo. Si ha infatti che:

$$E(i, j) = \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n (f(x+i, y+j)^2 + g(x, y)^2 - 2f(x+i, y+j)g(x, y))$$

Si definiscono quindi rispettivamente i coefficienti di cross-correlazione e dei minimi quadrati (least square) normalizzati, riportati come segue.

$$C_{CC} = \frac{\sum_{x,y \in S} (f(x+i, y+j) - f_m)(g(x, y) - g_m)}{\sqrt{\sum_{x,y \in S} (f(x+i, y+j) - f_m)^2 \sum_{x,y \in S} (g(x, y) - g_m)^2}}$$

$$C_{LS} = \sum_{i,j \in S} \left[\frac{f(x+i, y+j) - f_m}{\sqrt{\sum_{i,j \in S} (f(x+i, y+j) - f_m)^2}} - \frac{g(x, y) - g_m}{\sqrt{\sum_{i,j \in S} (g(x, y) - g_m)^2}} \right]$$

Secondo questi criteri, si ha una buona corrispondenza tra le immagini quando il coefficiente di cross-correlazione C_{CC} è prossimo all'unità ed il coefficiente dei minimi quadrati C_{LS} è prossimo invece a zero.

2.3 Principi di funzionamento

A seguito delle deformazioni subite dall'oggetto, il reference subset non può più essere ricercato nella configurazione indeformata all'interno delle immagini acquisite. Si devono quindi implementare delle funzioni di forma, che contemplano il moto rigido, le dilatazioni e gli scorrimenti del reference subset, il quale viene virtualmente modificato in modo tale da ricercare la miglior corrispondenza con il target subset.

La 3-DIC affianca i principi della stereoscopia con quelli tradizionali della 2-DIC, per cui occorre integrare e modificare l'algoritmo iniziale con i seguenti passaggi:

- Calibrazione del sistema 3-DIC;
- Stereo-matching;
- Triangolazione dei punti di misura.

Dopo aver acquisito coppie di immagini dalle due telecamere si applica inizialmente l'algoritmo 2-DIC per ottenere le coordinate 2D dei punti di misura nel sistema di riferimento del sensore di ciascuna telecamera nei vari istanti di tempo. Definendo il modello di ciascuna telecamera attraverso la calibrazione e la corrispondenza tra le due immagini stereo mediante lo stereo-matching, è possibile effettuare la triangolazione dei punti di misura, in quanto si conoscono le posizioni di ogni punto visto da due sistemi di riferimento differenti. In questo modo si possono ottenere le coordinate 3D di ogni punto nel sistema di riferimento globale.

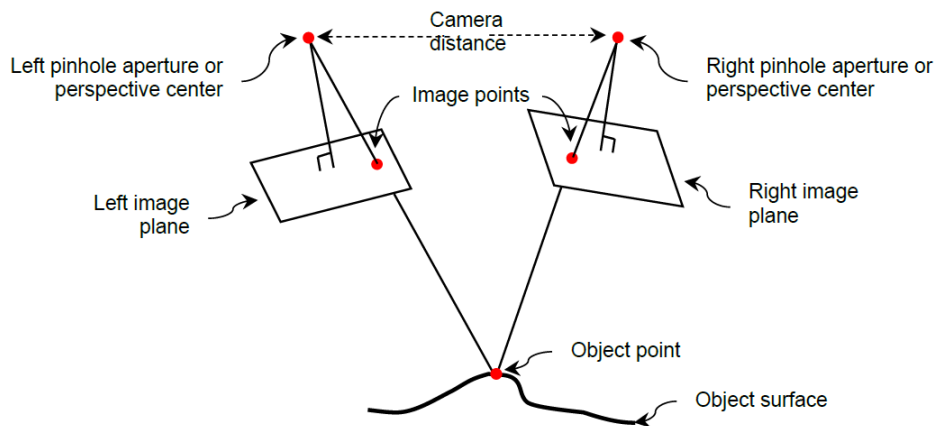


Figura 2.3: Processo di triangolazione

Lo stereo-matching tra le immagini provenienti dalle due diverse telecamere è un passaggio fondamentale, necessario per poter triangolare la posizione di ogni punto nella scena tridimensionale. Consente infatti di definire la corrispondenza tra due punti corrispettivi nelle due immagini stereo acquisite da ciascuna telecamera, ovvero permette di identificare i punti di misura che sono visti dalle due diverse prospettive sfruttando l'algoritmo 2-DIC. Un esempio è rappresentato in figura 2.4.

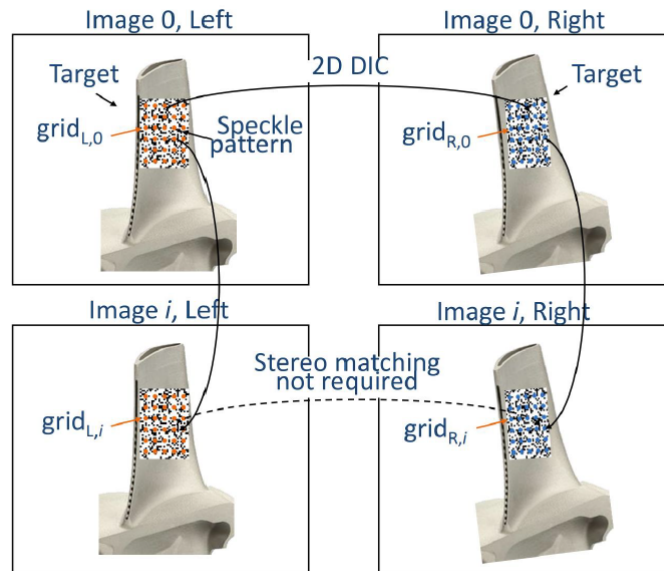


Figura 2.4: Processo di stereo-matching

Per ogni telecamera impiegata si devono inoltre definire dei parametri intrinseci, che non dipendono dalla posizione della telecamera stessa nello spazio, e dei parametri estrinseci, che dipendono invece dal modo in cui la telecamera è posizionata nell'ambiente esterno e che devono quindi essere ricalcolati ad ogni prova sperimentale.

In generale, i parametri intrinseci sono:

- Lunghezza focale;
- Centro ottico;
- Coefficiente di distorsione (skew);
- Distorsione della lente.

Mentre i parametri estrinseci sono:

- Matrice di rotazione;
- Matrice di traslazione.

Attraverso i parametri intrinseci è possibile passare dalle coordinate 2D dell'immagine (x, y) a quelle locali della telecamera (X_c, Y_c, Z_c) . Per ottenere invece le coordinate globali del punto (X, Y, Z) si devono impiegare i parametri estrinseci.

Per effettuare la calibrazione delle due telecamere nella DIC si sfruttano i calibratori, ovvero degli oggetti planari dotati di caratteristiche note con una certa accuratezza. Sulla loro superficie superiore, infatti, è rappresentato un pattern regolare, come ad esempio una ripetizione di forme quadrate o circolari. L'algoritmo di calibrazione prende quindi in input i dati che riguardano le caratteristiche del calibratore impiegato e due immagini di questo scattate contemporaneamente dalle due telecamere, muovendo il calibratore stesso nel campo di misura. L'algoritmo riconosce quindi le caratteristiche del pattern, come gli spigoli oppure i centri dei cerchi, e trova i parametri del modello che minimizzano l'errore di riproiezione, definito come la differenza tra le coordinate calcolate del punto proiettato e quelle reali del punto dell'immagine [4]. Un esempio del processo è riportato in figura 2.5.

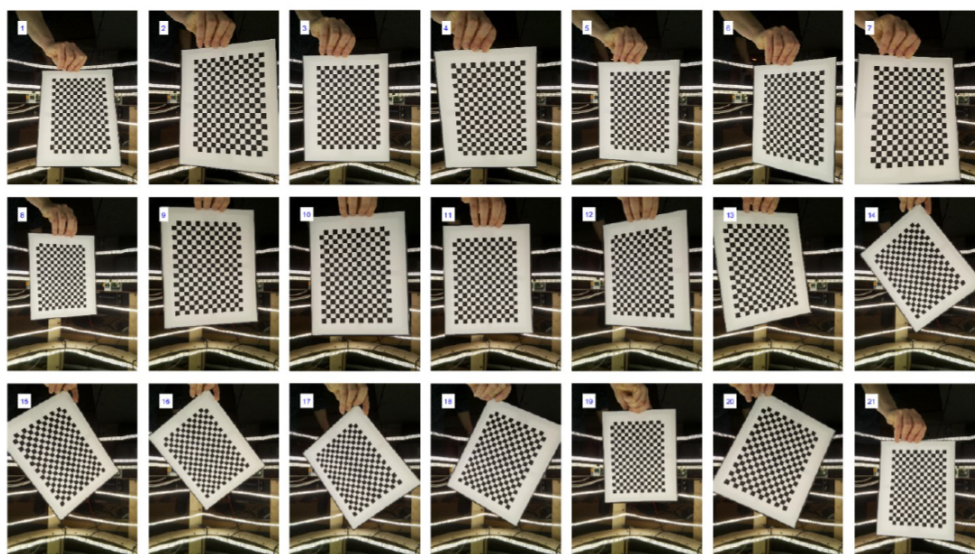


Figura 2.5: Processo di calibrazione

Capitolo 3

Analisi modale sperimentale

Nel presente capitolo viene descritta l'analisi modale sperimentale condotta sul disco, che rappresenta in realtà un modello semplificato (dummy blisk) ed è costituito da 12 pale a sezione rettangolare. Per la prova è stato impiegato il software Testlab Impact Testing, mentre i risultati sono stati elaborati mediante il software Matlab.

3.1 Descrizione della prova sperimentale

Con lo scopo di ricavare le frequenze naturali sperimentali del disco è stato condotto un hammer test, impiegando un martello strumentato dotato di una cella di carico per registrare l'informazione relativa alla forza agente sul disco. Questa tipologia di prove rientra nella categoria dei test ad impatto, in quanto si sfrutta una forza idealmente impulsiva nel dominio del tempo che segue l'andamento della funzione delta di Dirac. Una volta calcolato lo spettro nel dominio delle frequenze, si può notare che tutte le frequenze sono eccitate con ampiezza costante, ovvero si ottiene la configurazione di spettro piatto. Nel caso reale, però, questa condizione è impossibile da realizzare: di conseguenza, la risposta nel dominio della frequenza non può più essere costante, bensì tende ad essere massima in corrispondenza di bassi numeri armonici per poi decrescere all'aumentare di questi. Per conoscere quindi il contenuto armonico del segnale nel dominio del tempo si devono impiegare le trasformate di Fourier, che permettono di passare dal dominio del tempo a quello delle frequenze e viceversa.

Per realizzare questa prova è stato necessario l'impiego di un accelerometro, che è stato posizionato in corrispondenza di un punto ad alta mobilità del disco. Si è scelto quindi di porre l'accelerometro all'estremità di una pala (A), mentre l'impatto è stato realizzato in un punto a bassa mobilità, localizzato alla radice della pala.

Sono state condotte complessivamente due prove, mantenendo l'accelerometro fisso e variando il punto di applicazione dell'impulso (1) e (2).

Uno schema rappresentativo della prova condotta è riportato in figura 3.1, in cui viene mostrata la posizione fissa dell'accelerometro e quella dei due punti di applicazione dell'impulso tramite impatto. Per rispettare la condizione di assenza di vincoli esterni, il disco è stato mantenuto in posizione verticale durante la prova, mediante cavi connessi all'estremità opposta rispetto all'accelerometro.

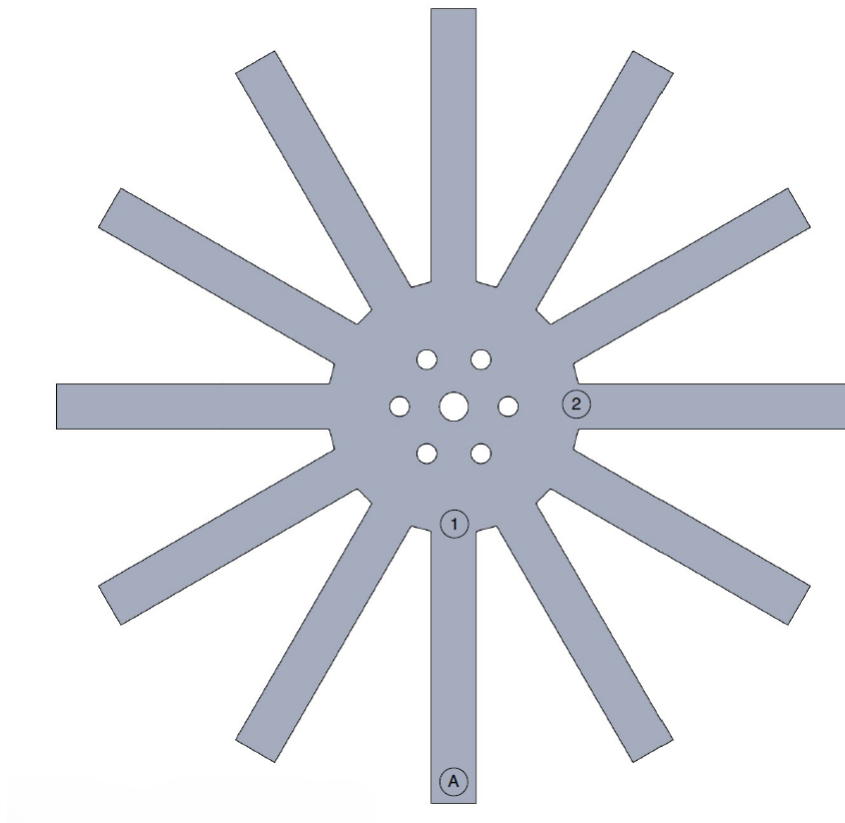


Figura 3.1: Schema rappresentativo della prova condotta

3.2 Elaborazione dei risultati sperimentali

I dati raccolti durante la prova sono stati esportati in formato .mat in modo da poter essere elaborati mediante il software Matlab. In figura 3.2 e 3.3 è mostrato l'andamento della risposta in frequenza (FRF) rispettivamente per la prima e per la seconda prova. Sono stati evidenziati i principali picchi, che in generale rappresentano le frequenze naturali del disco libero.

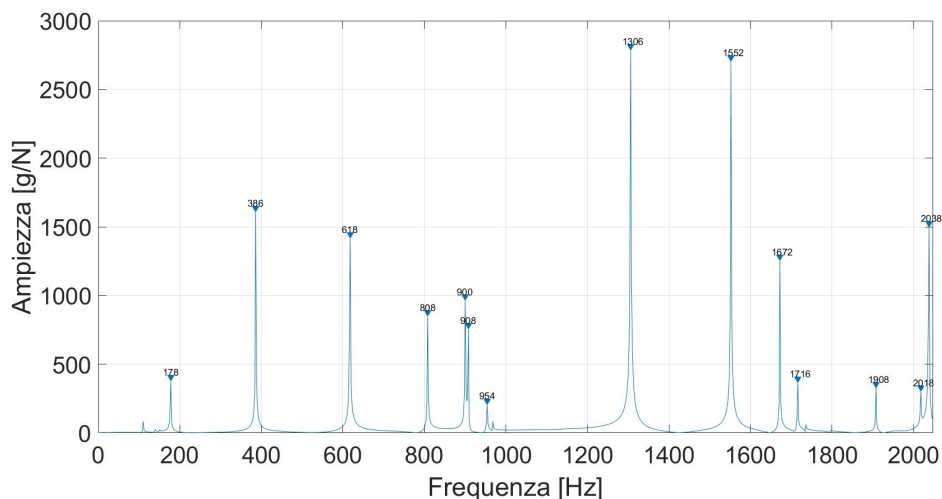


Figura 3.2: Risultati dell'hammer test (Prova 1)

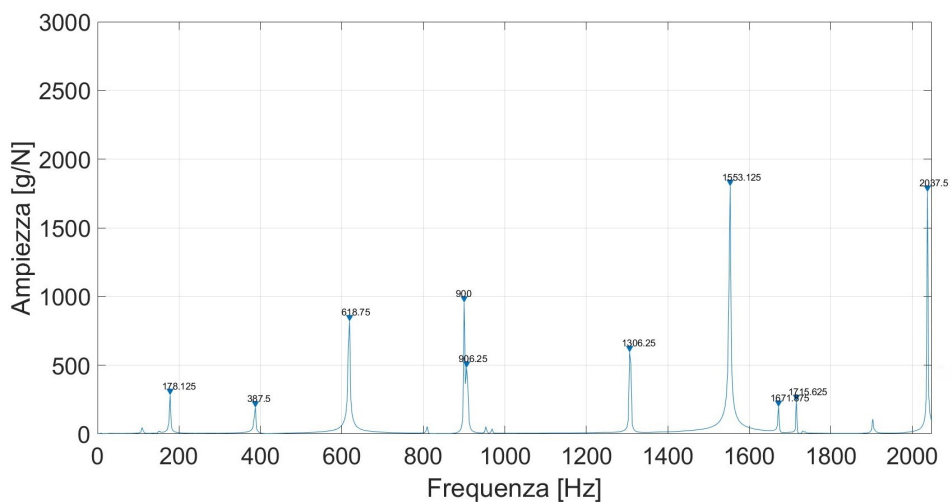


Figura 3.3: Risultati dell'hammer test (Prova 2)

I risultati sperimentali ottenuti dalle due prove sono stati quindi confrontati impiegando la scala logaritmica. Come riportato in figura 3.4, questi mostrano una buona corrispondenza in relazione ai principali picchi. Si possono individuare facilmente le prime tre frequenze naturali, che sono state oggetto di confronto con i risultati ottenuti mediante analisi modale numerica.

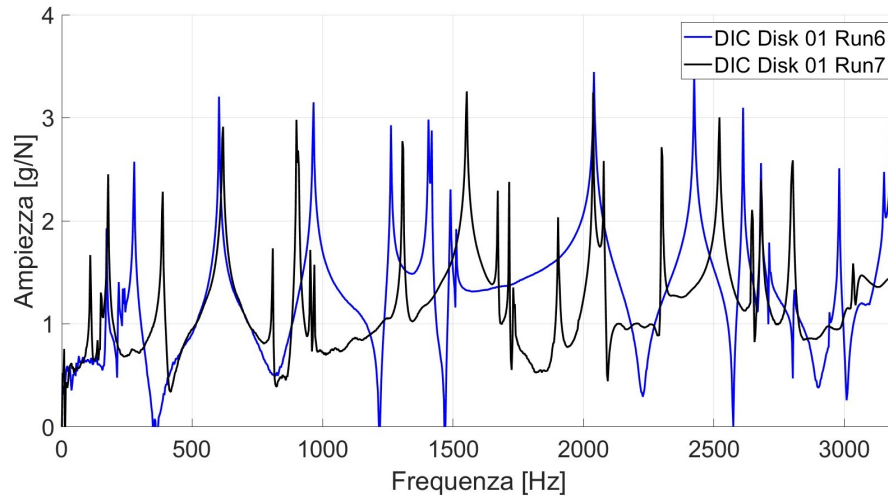


Figura 3.4: Confronto dei risultati dell'hammer test

Le frequenze naturali individuate sono riassunte in tabella 3.1.

Prova 1 [Hz]	178	386	618	908	1306	1552	1672	1716	2038
Prova 2 [Hz]	178.1	387.5	618.8	906.3	1306.3	1553	1671.8	1715.6	2037.5

Tabella 3.1: Frequenze naturali ricavate con l'hammer test

Capitolo 4

Analisi modale numerica

Nel presente capitolo viene descritta l'analisi modale numerica condotta sul dummy blisk, impiegando il software ANSYS ed elaborando i risultati con il software Matlab.

I risultati delle analisi sono riportati in forma tabulare, ordinati nelle colonne secondo il diametro nodale (ND), mentre nelle righe in base alle famiglie modali. Il diametro nodale è la linea passante per l'asse di rotazione del disco in cui si registra uno spostamento nullo. La famiglia modale, invece, raccoglie tutte le configurazioni dei diametri nodali caratterizzati dallo stesso modo di vibrare. Sulla base del valore del diametro nodale ND e del numero di pale Z , inoltre, si possono identificare modi singoli stazionari o modi doppi rotanti. I primi sono caratterizzati da $ND = 0$ e $ND = Z/2$ nel caso di Z pari, mentre i secondi rappresentano, in realtà, lo stesso modo ma vibrante secondo due piani diversi ortogonali tra loro. Nelle tabelle 4.1, 4.2 e 4.3, ciascuna relativa ad una particolare analisi modale, i modi doppi sono stati riportati una sola volta per semplicità.

Per il disco in esame, caratterizzato da 12 pale, i diametri nodali sono rappresentati dal vettore $ND = [0 : 1 : 6]$. Di conseguenza, i modi singoli sono ottenuti in corrispondenza di $ND = 0$ e $ND = 6$, mentre i restanti modi sono modi doppi che vibrano per definizione lungo direzioni ortogonali tra loro.

Dalle informazioni delle frequenze relative ad ogni diametro nodale, raccolte per ogni famiglia modale, è stato possibile costruire il diagramma Fre-ND, che mette in relazione le frequenze naturali del disco con i suoi diametri nodali. Per il disco in configurazione libera e vincolata sono mostrati rispettivamente in figura 4.3 e 4.4.

4.1 Analisi numerica preliminare del disco libero

Dovendo effettuare delle simulazioni numeriche, è stato inizialmente realizzato il modello CAD relativo ad un singolo settore del disco mediante il software Solid-Works, trascurando la presenza dei fori posizionati sul mozzo del disco in quanto non ne influenzano significativamente la rigidità. Tale modello è stato importato in ANSYS, con cui è stato possibile generare il rispettivo modello FE.

Sono state quindi assegnate le proprietà strutturali e di massa del materiale nella sezione Material Prop, in termini di modulo elastico E , modulo di Poisson ν e densità ρ . Trattandosi di un disco in alluminio, in questa prima fase sono stati assegnati al modello dei valori di tentativo in accordo con il materiale impiegato. Si è stimato che:

$$\begin{cases} E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \\ \nu = 0.3 \\ \rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

Si è scelto il tipo di elemento con cui costruire la mesh del settore del disco nella sezione Element Type. È stata quindi realizzata un'analisi di convergenza per definire la dimensione del singolo elemento, che deve essere impostata nella sezione Meshing.

È stato studiato un singolo settore del disco espandendo i risultati sfruttando la simmetria ciclica del corpo, imposta nella sezione Modeling, in modo tale da limitare il costo computazionale dell'analisi, agevolandola dal punto di vista dei tempi di calcolo. Tale tecnica consente di occuparsi dell'analisi di un singolo settore e di imporre, in corrispondenza dell'interfaccia destra e sinistra dello stesso, dei vincoli di natura cinematica che permettono la ripetizione del settore fino alla realizzazione di un'intera circonferenza. Si definisce quindi l'Inter Sector Phase Angle (ISPA) Ψ , che rappresenta l'angolo di fase tra un settore e l'altro.

$$\Psi = \frac{2\pi}{Z} ND$$

Si ricavano quindi i vincoli cinematici tra le due interfacce del singolo settore:

$$\{X_R\} = \{X_L\}e^{-i\Psi}$$

Per simulare la presenza dei magneti permanenti, posti all'estremità di ogni pala del disco, si è aggiunto un elemento Mass21 in corrispondenza dei nodi interessati, in modo da rendere il modello quanto più vicino al caso reale. In figura 4.1 e 4.2 sono rappresentati rispettivamente i modelli FE del singolo settore del disco e del disco completo, costruito sfruttando la simmetria ciclica del corpo.

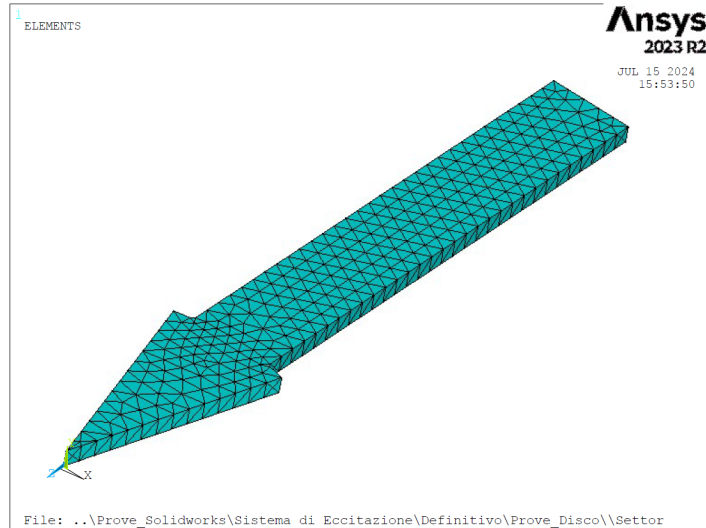


Figura 4.1: Modello FE del singolo settore del disco

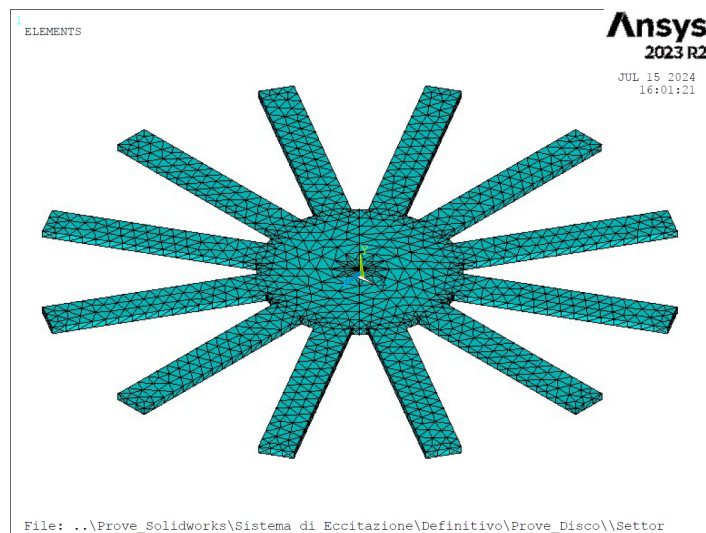


Figura 4.2: Modello FE del disco completo

Sono riportati, in tabella 4.1, i risultati relativi all'analisi modale numerica preliminare del disco libero, trascurando quindi la presenza dei vincoli esterni. Tali valori sono stati ordinati sulla base del diametro nodale e delle rispettive famiglie modali.

HRM-INDEX	0	1	2	3	4	5	6
	186.02	403.38	118.12	145.53	156.46	161.21	162.58
	952.04	890.26	660.83	772.06	768.38	766.08	765.3
TIME/FREQ [Hz]	1967.8	1365.5	776.67	855.25	957.07	1003.7	1017.2
	1985.2	2007.2	1632.6	1757.1	1804.2	1823.9	1829.5
	2202.3	2945.4	2149.3	2424.7	2657.1	2781.6	2819.2

Tabella 4.1: Risultati dell'analisi numerica preliminare del disco libero

Questi risultati sono stati quindi confrontati con quelli relativi all'analisi modale sperimentale, riportati in tabella 3.1. Si può notare che, per le prime tre frequenze ottenute sperimentalmente, si ha una buona corrispondenza con quelle appena calcolate. In particolare, si possono individuare delle coppie di frequenze numericamente molto prossime tra loro. È possibile dunque scalare il modulo elastico E dell'alluminio, che era stato imposto come un valore di primo tentativo, sfruttando la corrispondenza tra le frequenze naturali. È stata calcolata, inoltre, la densità ρ reale del disco in alluminio, tenendo conto della presenza dei magneti permanenti alle estremità delle pale.

Per mezzo di queste considerazioni sono state aggiornate le proprietà strutturali e di massa del materiale all'interno della sezione Material Prop, che permettono di definire un modello teorico che approssima più fedelmente quello reale. In particolare, è stato posto che:

$$\begin{cases} E = 6.55 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \\ \nu = 0.3 \\ \rho = 2726.13 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

Seguono quindi le analisi modali numeriche relative al disco libero ed alla configurazione vincolata, impiegando i valori descritti in precedenza.

4.2 Analisi numerica del disco libero

I risultati relativi all'analisi numerica del disco libero, in cui sono stati considerati gli aggiornamenti delle proprietà strutturali e di massa del disco, sono riportati in tabella 4.2, ordinati sulla base del diametro nodale e delle rispettive famiglie modali. Sulla base di quanto ottenuto è stato tracciato il diagramma Fre-ND, rappresentato in figura 4.3 per le prime tre famiglie modali.

HRM-INDEX	0	1	2	3	4	5	6
	180.01	390.33	114.29	140.82	151.4	155.99	157.32
	921.23	861.45	639.45	747.07	743.52	741.29	740.53
TIME/FREQ [Hz]	1904.1	1321.3	751.53	827.57	926.1	971.24	984.31
	1920.9	1942.3	1579.8	1700.2	1745.8	1764.8	1770.3
	2131	2850.1	2079.8	2346.3	2571.1	2691.6	2728

Tabella 4.2: Risultati dell'analisi numerica del disco libero

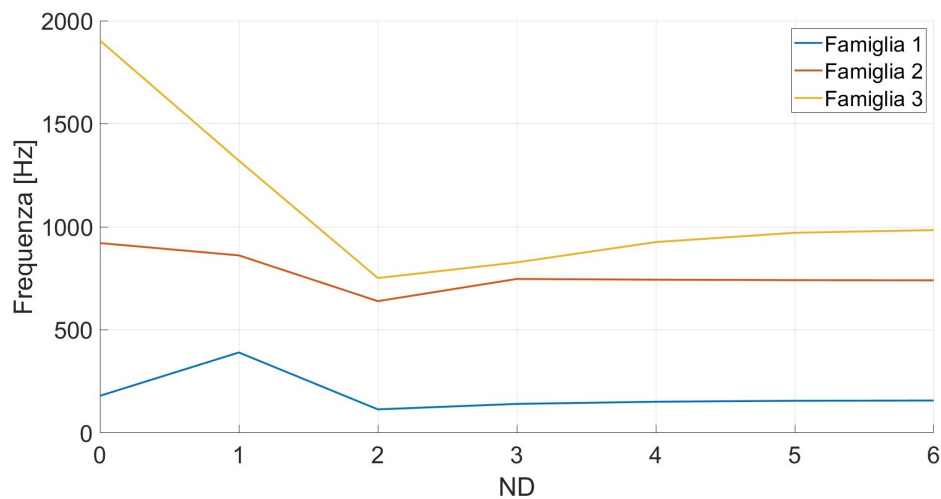


Figura 4.3: Diagramma Fre-ND del disco libero

4.3 Analisi numerica del disco vincolato

È stata condotta l'analisi modale numerica del disco vincolato, prendendo in considerazione i vincoli esterni imposti in fase di progettazione del sistema di eccitazione. Il disco, infatti, poggia sulla superficie superiore del distanziale. Di conseguenza, i vincoli strutturali da imporre devono prevedere di bloccare tutti i gradi di libertà dei nodi che appartengono alla superficie di contatto. I risultati relativi all'analisi numerica del disco vincolato sono riportati in tabella 4.3, ordinati sulla base del diametro nodale e delle rispettive famiglie modali, mentre il diagramma Fre-ND per le prime tre famiglie modali è mostrato in figura 4.4.

HRM-INDEX	0	1	2	3	4	5	6
TIME/FREQ [Hz]	148.33	148.74	150.05	152.29	154.93	157.01	157.78
	757.35	759.87	762.32	761.12	757.77	754.62	753.37
	916.64	919.41	928.57	944.88	965.38	982.6	989.27
	1919.4	1909.5	1883.8	1852.1	1825	1808.3	1802.9
	2519.9	2532.5	2569	2623.8	2684.2	2731.5	2749.3

Tabella 4.3: Risultati dell'analisi numerica del disco vincolato

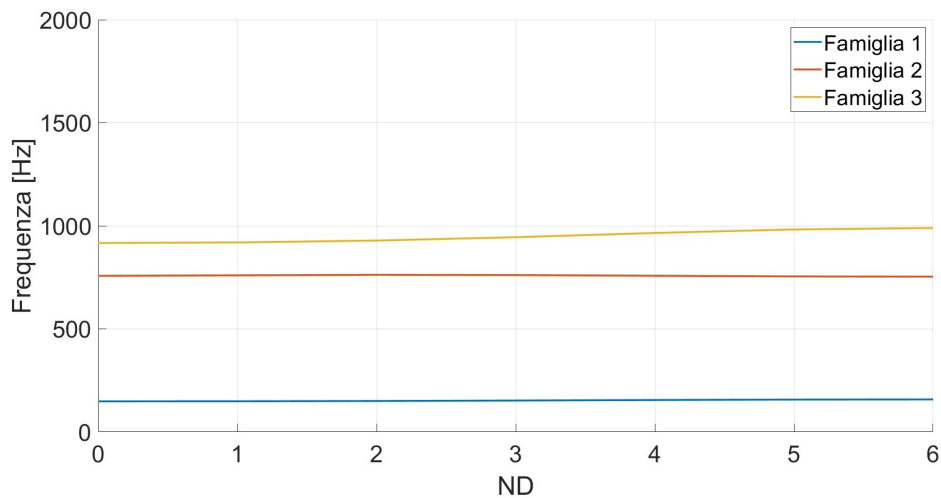


Figura 4.4: Diagramma Fre-ND del disco vincolato

Sono rappresentati invece, in figura 4.5, i modi di vibrare relativi alla prima famiglia modale, sulla base degli spostamenti subiti dal disco.

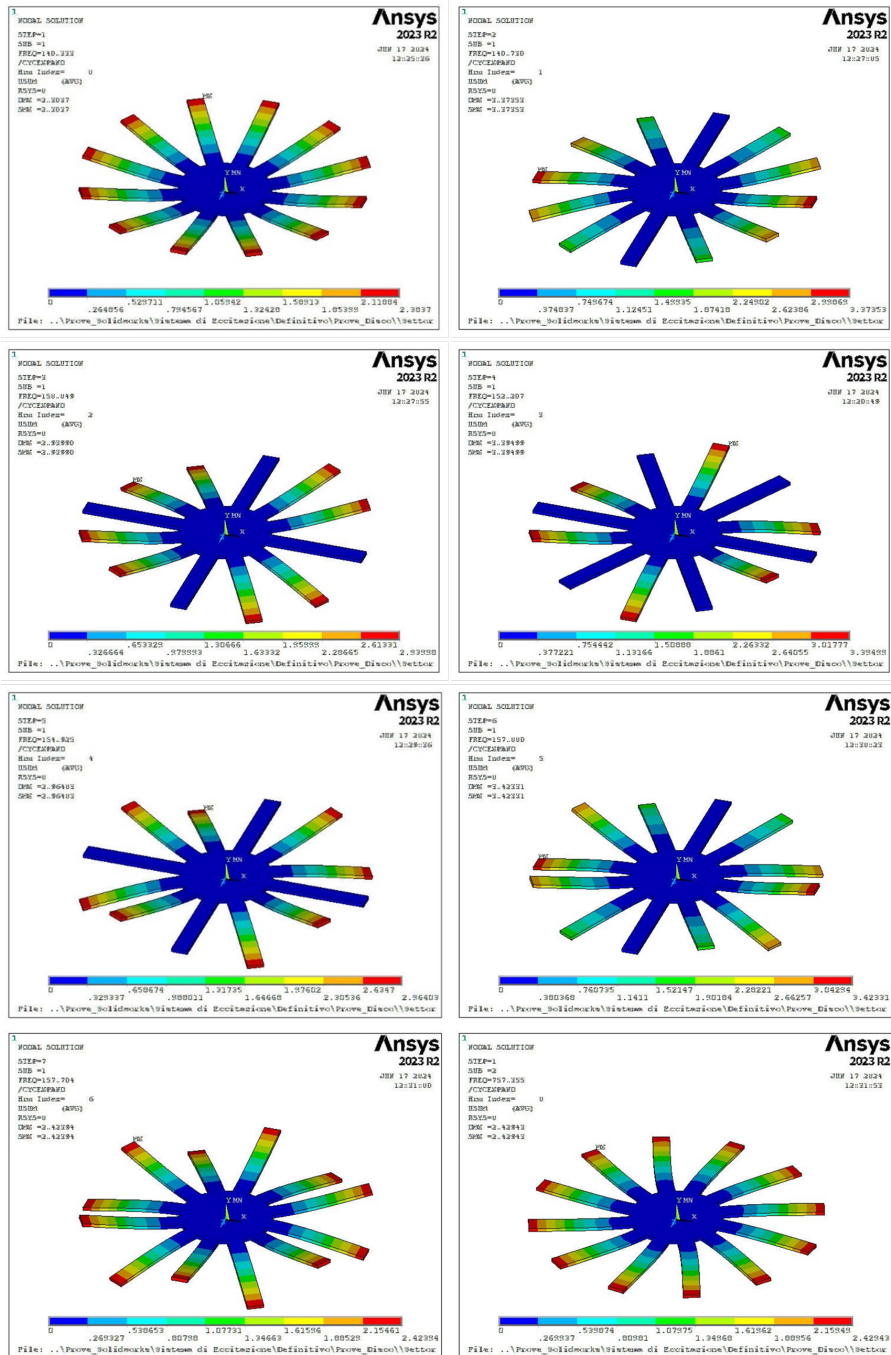


Figura 4.5: Analisi modale numerica della prima famiglia

Capitolo 5

Eccitazione del disco in rotazione

Nel presente capitolo viene descritta l'eccitazione del disco in rotazione, per la quale è necessario generare su di questo forze non a contatto. Si è scelto di eccitare il disco mediante forze di natura magnetica, sfruttando magneti permanenti. La progettazione del sistema di eccitazione viene discussa e descritta nel Capitolo 6.

5.1 Pianificazione delle prove sperimentali

Si consideri un sistema di riferimento fisso nello spazio xy , su cui agisce una forzante armonica $f_\theta(t)$, che eccita il disco in corrispondenza di un certo punto nello spazio θ^* rispetto ad un osservatore fisso. La forzante può essere scomposta nello spazio, durante una rotazione completa, con una serie di Fourier. Si ha quindi che:

$$f_\theta(t) = \frac{F_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \cos(n(\theta - \theta^*)) \cos(\omega t)$$

La forzante è quindi impulsiva nello spazio ed armonica nel tempo, come segue.

$$\begin{cases} f_{\theta^*}(t) = F_0 \cos(\omega t) = F_0 \cos(Z\Omega t) \\ f_{\theta \neq \theta^*}(t) = 0 \end{cases}$$

Dove:

- Z è il numero di pale;
- Ω è la velocità angolare del disco [rad/s].

Nel caso reale, però, la forzante esterna non può avere carattere puramente impulsivo, bensì si distribuisce sulla pala del disco in un tempo finito. Di conseguenza, la scomposizione di Fourier durante una rotazione completa del disco produce delle armoniche di ampiezza diversa. Al contrario, nel caso ideale, l'impulso viene visto come un delta di Dirac, perciò è capace di eccitare tutte le frequenze con la stessa ampiezza, producendo uno spettro di frequenze piatto.

Si può passare dal sistema di riferimento fisso ad un sistema di riferimento rotante attraverso un cambio di variabile. In questo modo si ottiene la stessa forzante esterna vista da un sistema di riferimento rotante. Si ha quindi che:

$$f_{\theta,R}(t) = \frac{F_0}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \cos [(\omega - n\Omega)t] \cos (n\theta_R) + \sin [(\omega - n\Omega)t] \sin (n\theta_R) + \\ + \cos [(\omega + n\Omega)t] \cos (n\theta_R) - \sin [(\omega + n\Omega)t] \sin (n\theta_R)$$

Si ottengono quindi due onde, modulate secondo il numero di lobi n , che si muovono nel sistema di riferimento rotante solidale con il disco con una certa velocità angolare, pari alla somma algebrica $\omega \pm n\Omega$. Questa quantità è anche pari alla frequenza della forzante esterna, che si distingue in:

$$\begin{cases} \omega - n\Omega & (\textit{forward}) \\ \omega + n\Omega & (\textit{backward}) \end{cases}$$

Si ottiene quindi:

$$\begin{cases} \omega_f = \omega - n\Omega = \Omega(Z - n) = \Omega EO_f \\ \omega_b = \omega + n\Omega = \Omega(Z + n) = \Omega EO_b \end{cases}$$

In termini di frequenze diventano:

$$\begin{cases} f_f = \Omega EO_f / 2\pi \\ f_b = \Omega EO_b / 2\pi \end{cases}$$

È stato introdotto dunque il concetto di Engine Order (EO).

Si possono mettere in relazione le frequenze naturali del disco con la velocità di rotazione del banco, realizzando quindi il diagramma di Campbell. Per il disco in esame è riportato in figura 5.1.

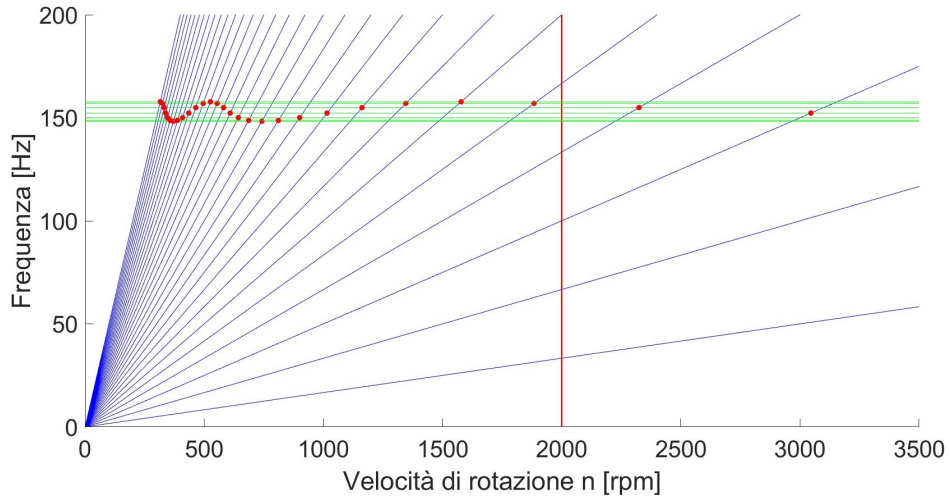


Figura 5.1: Diagramma di Campbell del disco in rotazione

Sull'asse delle ascisse, che rappresenta la velocità di rotazione del banco, è stato posto un limite superiore in corrispondenza di 2000 rpm. In questo modo si aumenta la sicurezza degli operatori durante le prove, in quanto il Pozzo Spinning è costretto a ruotare senza alcuna protezione per permettere alle telecamere di avere una adeguata visione del disco. Si possono distinguere chiaramente gli Engine Order, rappresentati dalle rette blu inclinate, e le frequenze naturali del disco, rappresentate invece dalle rette verdi orizzontali. Attraverso l'analisi modale del disco, si possono associare le frequenze naturali al numero di diametri nodali. Tuttavia, non tutti gli incroci che si realizzano tra le rette degli Engine Order e quelle delle frequenze naturali sono punti in cui i modi sono eccitati in risonanza. Per fare in modo che questo accada, deve essere verificata la seguente condizione:

$$EO = mZ \pm ND$$

Dove:

- Z è il numero di pale;
- ND è il diametro nodale;
- m è un parametro arbitrario positivo, maggiore o uguale a zero.

La ragione fisica per cui, quando $EO = ND$, il modo a diametro nodale ND è eccitato in risonanza in modo critico dalla forzante rotante di dato Engine Order EO è piuttosto intuitivo. Difatti, in questa condizione la forma della forzante rotante mima esattamente la deformata modale: di conseguenza, si ha la massima amplificazione della risposta quando la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale del modo. Si ha quindi una condizione di eccitazione in risonanza.

Quando invece $EO = mZ \pm ND$, il modo a diametro nodale ND è eccitato in risonanza in modo critico dalla forzante rotante di dato Engine Order EO a causa del fenomeno dell'aliasing. Dal momento che la forma della forzante è discretizzata dal numero di pale Z , questa viene vista esattamente come se l'Engine Order fosse uguale al diametro nodale.

Per identificare quali sono effettivamente gli incroci critici in cui i modi vengono eccitati in risonanza, si adotta il diagramma SAFE (Singh's Advanced Frequency Evaluation). Questo è dato dalla sovrapposizione di due diagrammi: il diagramma Fre-ND, che mette in relazione le frequenze naturali del disco con i diametri nodali, ed il diagramma Zig-Zag, che mette invece in relazione il diametro nodale eccitato in modo critico con l'Engine Order che lo realizza. Il diagramma Fre-ND del disco è rappresentato in figura 4.4, mentre il diagramma Zig-Zag è mostrato in figura 5.2.

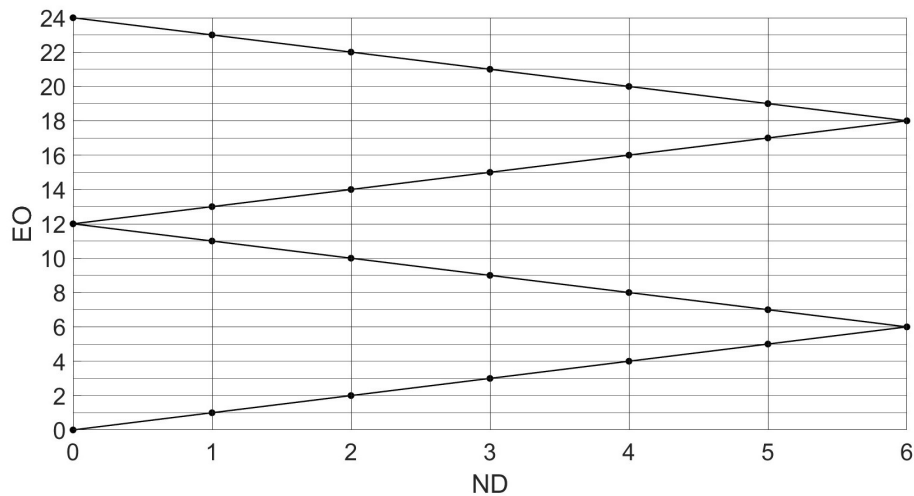


Figura 5.2: Diagramma Zig-Zag del disco

A questo punto, è possibile individuare quale Engine Order eccita un determinato diametro nodale, ricavando anche le rispettive velocità di rotazione che devono essere sostenute dal banco di misura. Si esclude il modo caratterizzato da $ND = 0$ in quanto, essendo piuttosto rigido, non possiede deformazioni apprezzabili.

Per questa analisi è stata considerata la prima famiglia modale di frequenze del disco vincolato, riportata in tabella 4.3, che appartengono al modo flessionale. Di conseguenza, essendo valori molto prossimi tra loro, si è scelto di adottare un valore comune pari a $f = 150$ Hz. I risultati sono mostrati in tabella 5.1.

Impiegando quindi le seguenti relazioni:

$$EO = mZ \pm ND$$

$$n = \frac{f \cdot 60}{EO}$$

Si sono ottenuti i valori mostrati in tabella 5.1.

	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$
$ND = 1$	$EO = 1$ $n = 9000$ rpm	$EO = 13$ $n = 692.31$ rpm	$EO = 25$ $n = 360$ rpm
$ND = 2$	$EO = 2$ $n = 4500$ rpm	$EO = 14$ $n = 642.86$ rpm	$EO = 26$ $n = 346.15$ rpm
$ND = 3$	$EO = 3$ $n = 3000$ rpm	$EO = 15$ $n = 600$ rpm	$EO = 27$ $n = 333.33$ rpm
$ND = 4$	$EO = 4$ $n = 2250$ rpm	$EO = 16$ $n = 562.50$ rpm	$EO = 28$ $n = 321.43$ rpm
$ND = 5$	$EO = 5$ $n = 1800$ rpm	$EO = 17$ $n = 529.41$ rpm	$EO = 29$ $n = 310.34$ rpm
$ND = 6$	$EO = 6$ $n = 1500$ rpm	$EO = 18$ $n = 500$ rpm	$EO = 30$ $n = 300$ rpm

Tabella 5.1: Relazione tra EO e ND a seconda della velocità di rotazione

L'Engine Order deve essere pari al numero di magneti permanenti con cui si eccita il disco, montati ciascuno su di un supporto portamagnete. In riferimento alla tabella 5.1, quindi, si può notare che per rispettare la condizione di sicurezza imposta dal banco in rotazione non tutte le combinazioni sono possibili.

Difatti, dovendo lavorare con una velocità di rotazione inferiore ai 2000 rpm e volendo idealmente analizzare tutte le forme modali associate ai diametri nodali, sono necessari 16 magneti.

Capitolo 6

Progettazione del sistema di eccitazione del disco

Nel presente capitolo è descritto il processo di progettazione del sistema di eccitazione del disco, per il quale è stato impiegato il software SolidWorks. Le tavole dei singoli componenti realizzati sono riportate in Appendice A, mentre le viste 3D del sistema di eccitazione completo si trovano in Appendice B.

Il disco in esame è in realtà un modello semplificato (dummy blisk), costituito da dodici pale a sezione rettangolare e realizzato in lega di alluminio. Per permettere l'analisi del disco in rotazione è necessario generare su di questo forze non a contatto. Per questo scopo è dotato di dodici magneti permanenti aventi forma cilindrica, disposti in corrispondenza dell'estremità di ogni pala. Attraverso questi è possibile eccitare il disco con una forza repulsiva di natura magnetica, prevedendo magneti permanenti in repulsione sul sistema di eccitazione. Risulta fondamentale quindi la corrispondenza tra i centri di ciascuna coppia di magneti, in modo tale che, durante ogni rotazione del disco, venga generata una forzante impulsiva al passaggio di ogni pala sui magneti fissi del sistema. Per regolare la forza a cui è soggetta ogni pala si è progettato il sistema di eccitazione in modo da realizzare uno spazio millimetrico tra il magnete montato sul disco e quello del sistema stesso. Variando la distanza fra i due magneti si può regolare il modulo della forza magnetica, registrata dalle celle di carico, che dipende strettamente dalla distanza dei due corpi.

Il sistema è stato realizzato in modo tale da adattarlo alla struttura del Test Rig Pozzo Spinning, in dotazione al Laboratorio AERMEC del Politecnico di Torino. Partendo dalle quote geometriche e dalle tavole riportate in [5], è stata possibile la progettazione e la successiva realizzazione del sistema di eccitazione del disco.

Il sistema comprende un disco inferiore (1), un disco superiore graduato (2), i supporti portamagnete (3) ed una flangia distanziale (4). Tutti i componenti sono stati realizzati in lega di alluminio, in modo da non interferire con le forze magnetiche repulsive generate dai magneti permanenti. Sono stati inoltre previsti dei collegamenti filettati che permettono la collocazione dei magneti e delle celle di carico. L'intero sistema così descritto è rappresentato in figura 6.1.

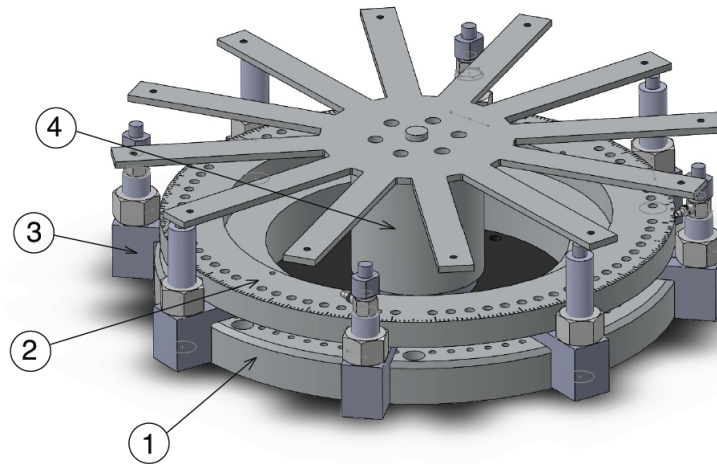


Figura 6.1: Modello CAD del sistema di eccitazione del disco

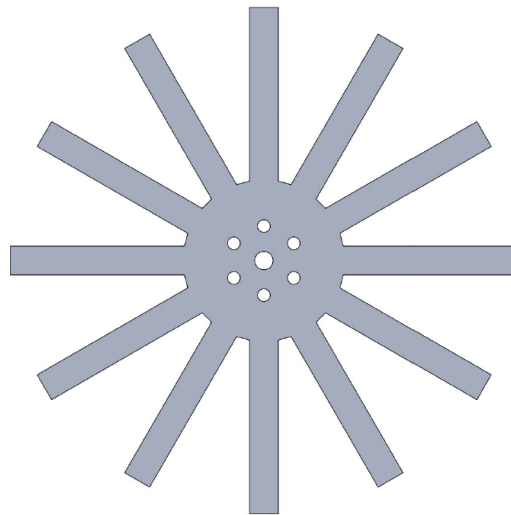


Figura 6.2: Modello CAD del disco

6.1 Disco inferiore

Il disco inferiore è stato progettato come un anello circolare dotato di un certo spessore, in cui è stata ricavata una scanalatura per permettere l'alloggiamento dei supporti portamagnete in corrispondenza di diverse posizioni angolari, le quali possono essere scelte arbitrariamente in base all'applicazione.

Il vincolo progettuale che è stato fondamentale da rispettare è stato il centraggio con il Bottom Plate [5], ovvero il coperchio del motore del Pozzo Spinning, che svolge funzioni strutturali. Il disco inferiore, infatti, deve necessariamente essere centrato e fissato al Bottom Plate già presente nella struttura del Pozzo Spinning, per assicurare il corretto funzionamento del meccanismo di rotazione del banco. Per questo scopo sono stati previsti otto fori passanti, che riflettono quelli presenti sul coperchio del motore e ne permettono il fissaggio con il disco inferiore.

Immaginando di dividere il disco inferiore in otto settori, ciascuno di 45° , si può notare che in ognuno di questi è presente un foro lamato M8, destinato al fissaggio del disco inferiore con il Bottom Plate, e nove fori filettati M6. Questi hanno lo scopo di serrare i supporti portamagnete tra il disco inferiore ed il disco superiore, in modo tale da bloccare ogni loro grado di libertà. Per realizzare questo meccanismo di fissaggio si sono dovuti prevedere gli stessi fori passanti sul disco superiore. Inoltre, per permettere il corretto alloggiamento dei supporti portamagnete in direzione orizzontale, è stato previsto uno smusso a 45° sulla circonferenza esterna.

Il modello CAD del componente così descritto è rappresentato in figura 6.3.

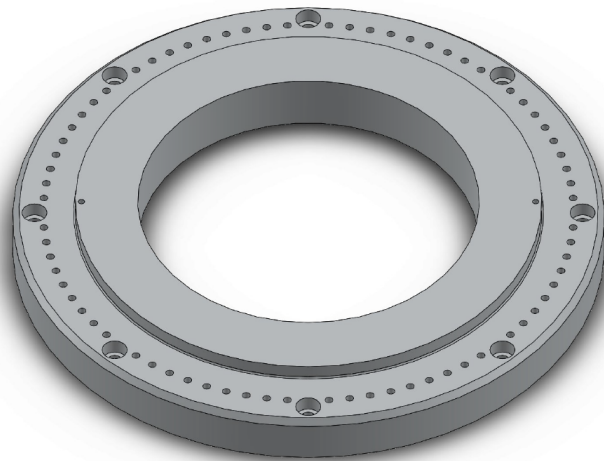


Figura 6.3: Modello CAD del disco inferiore

6.2 Disco superiore

Il disco superiore consiste invece in un anello graduato di spessore ridotto rispetto al disco inferiore, in quanto deve permettere soltanto il bloccaggio dei supporti portamagnete, i quali devono risultare serrati tra i due dischi. Per questo motivo, sono presenti nove fori passanti M6 equispaziati per ogni settore di 45° del disco, che devono riflettere quelli presenti sul disco inferiore.

Si è scelto di predisporre una graduazione sul disco per agevolare il posizionamento dei supporti portamagnete in corrispondenza di fissate posizioni angolari, che possono essere scelte in modo arbitrario in base all'applicazione di forza magnetica desiderata. Per far risaltare la graduazione rispetto allo sfondo si è lavorato il disco con ossidazione anodica nera, mentre le incisioni sono rimaste chiare.

Inoltre, durante il montaggio del banco, è opportuno fare in modo che ogni supporto portamagnete sia sempre bloccato da entrambe le direzioni per mezzo di collegamenti filettati, in modo da essere fissato adeguatamente.

In aggiunta, entrambi i dischi prevedono due fori alesati per l'alloggiamento di una coppia di spine, le quali devono assicurare il centraggio tra il disco inferiore e quello superiore e la relativa corrispondenza dei fori.

Il modello CAD del componente così descritto è rappresentato in figura 6.4.

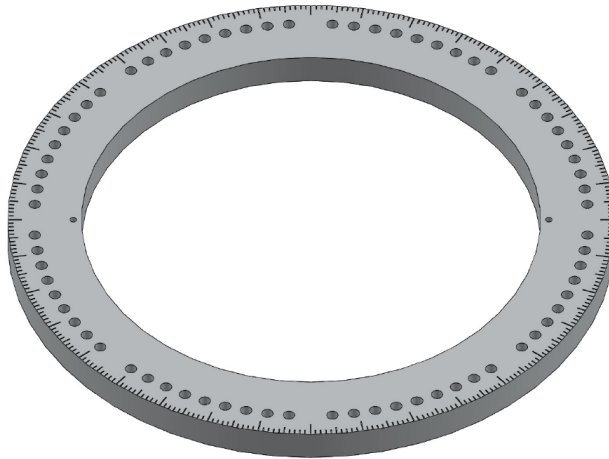


Figura 6.4: Modello CAD del disco superiore

6.3 Supporti portamagnete

I supporti portamagnete sono stati realizzati con geometria ad L, in modo tale da bloccare l'estremità più lunga tra i due dischi per mezzo dei collegamenti filettati. Sul supporto è stato inoltre previsto un foro filettato M20, che deve ospitare una vite delle stesse dimensioni. Sull'estremità superiore della vite è stata ricavata una sede che consente la collocazione dei magneti permanenti, i quali devono essere centrati con la vite stessa. Alcuni supporti portamagnete prevedono, oltre alla presenza del magnete necessario per la generazione della forza magnetica repulsiva, l'aggiunta di una cella di carico che ne permette la registrazione e la monitoraggio, utile per le successive analisi. Per mezzo del collegamento filettato è possibile variare la distanza tra i magneti permanenti presenti sul sistema di eccitazione e quelli disposti invece sul disco. In questo modo si rende possibile la regolazione della forza magnetica agente tra i due corpi, registrata dal sistema di celle di carico.

La faccia del supporto portamagnete a contatto con la scalanatura del disco inferiore è stata progettata ad arco di cerchio secondo il diametro interno del disco inferiore stesso. Questo accorgimento garantisce una maggiore superficie di contatto tra i due corpi, che si traduce anche in una maggior tenuta.

Inoltre, ogni supporto portamagnete prevede un'incisione nella mezzeria che permette il suo posizionamento ad una fissata posizione angolare, facendo riferimento a quelle presenti sulla superficie del disco superiore. In aggiunta, è stato realizzato un raccordo sullo spigolo di contatto con il disco inferiore, in modo tale da evitare fenomeni legati agli effetti di intaglio, presenti in generale nelle parti più sollecitate.

Il modello CAD del componente così descritto è rappresentato in figura 6.5.

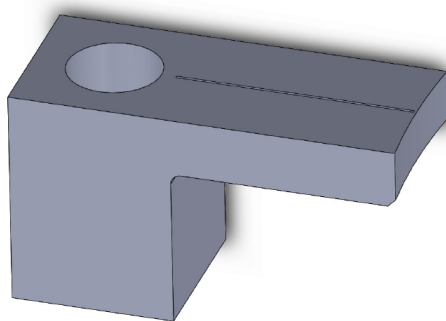


Figura 6.5: Modello CAD del supporto portamagnete

6.4 Distanziale

Il distanziale è stato progettato come un cilindro avente altezza tale da permettere il corretto distanziamento tra i magneti permanenti disposti all'estremità delle pale del disco e quelli del sistema di eccitazione.

Il disco poggia sulla superficie superiore del distanziale, dove è presente un perno destinato al centraggio. La superficie inferiore, invece, deve essere centrata con la flangia già presente nella struttura del Pozzo Spinning, con cui è connessa mediante collegamenti filettati. Il distanziale, infatti, presenta sei fori passanti equispaziati, che riflettono quelli presenti nella flangia sottostante. Il distanziale ha quindi anche il compito di trasmettere il moto rotazionale del banco di misura al disco, essendo solidale con la flangia che viene messa in movimento dal motore del Pozzo Spinning.

La superficie di contatto tra il disco ed il distanziale su cui poggia costituisce anche il vincolo strutturale del disco, in quanto blocca tutti i gradi di libertà.

Il modello CAD del componente così descritto è rappresentato in figura 6.6.



Figura 6.6: Modello CAD del distanziale

6.5 Collegamenti filettati

Sono rappresentati, in figura 6.7, i supporti portamagnete nelle due configurazioni descritte. Nel primo caso l'altezza del magnete permanente è regolata direttamente mediante il collegamento filettato, mentre nel secondo caso è stato previsto un ulteriore supporto, che permette di avvitare la cella di carico e di ospitare il magnete permanente, avendo ricavato la sede sulla superficie superiore.

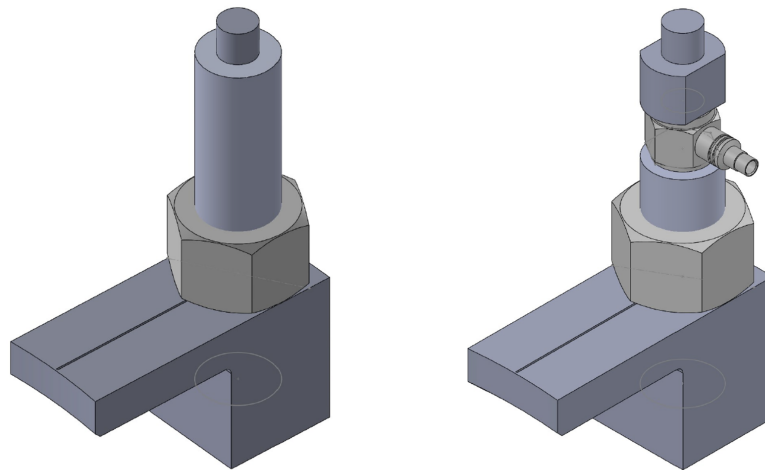


Figura 6.7: Assieme CAD del supporto portamagnete

Capitolo 7

Problemi legati al disco in rotazione

Nel presente capitolo sono descritte le principali problematiche legate all'analisi del campo di deformazione e spostamento di un disco in rotazione mediante 3-DIC. In particolare, sono state analizzate le questioni legate alla determinazione dell'altezza minima delle telecamere, alla sfocatura (blur) dovuta alla rotazione del disco, all'acquisizione delle immagini ad istanti di tempo noti ed al problema del moto rigido, per ciascuno dei quali sono state riportate delle possibili soluzioni.

Si considera ora il disco in rotazione, sfruttando il sistema di eccitazione progettato che consente l'applicazione di forze impulsive di natura magnetica. Il disco deve essere montato sulla superficie superiore del distanziale e deve essere centrato con questo, in modo che il centro del magnete permanente disposto in corrispondenza dell'estremità di ogni pala del disco sia allineato con quello dei magneti sorretti da ogni supporto portamagnete. Attraverso il motore del Pozzo Spinning è quindi possibile mettere in rotazione il disco, che ruota in maniera solidale con il complesso di flangia e distanziale, mentre i supporti portamagnete sono fissati tra il disco inferiore e quello superiore in corrispondenza di determinate posizioni angolari.

Si vuole determinare il campo di deformazione del disco durante la sua rotazione con la 3-DIC, che consente di registrare gli spostamenti fuori dal piano. A questo scopo si devono impiegare due telecamere, sincronizzate tra loro, che devono essere montate su di un supporto in modo tale da avere la visione completa del disco.

Il supporto deve essere in grado di regolare l'altezza a cui sono fissate le due telecamere, in modo da poter essere adattato a diverse condizioni sperimentali.

7.1 Determinazione dell'altezza minima

Si deve determinare l'altezza minima h_{min} a cui devono essere poste le due telecamere per permettere di visualizzare correttamente il disco completo, che dipende strettamente dalla lunghezza focale f delle lenti impiegate. Con riferimento allo schema rappresentativo della singola telecamera mostrato in figura 7.1, si ha che:

$$\frac{d}{2} = f \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\frac{FOV}{2} = h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Da cui si ottiene:

$$h_{min} = \frac{FOV}{d} \cdot f$$

Dove:

- h_{min} è l'altezza minima della telecamera;
- FOV è il Field of View;
- f è la lunghezza focale;
- d è la dimensione del sensore della telecamera.

Il FOV è definito dal diametro esterno del disco, in quanto lo si vuole inquadrare interamente.. La dimensione del sensore è invece un parametro intrinseco della telecamera, definito in fase di elaborazione dall'azienda costruttrice, che dipende dalla risoluzione della telecamera stessa e dalla dimensione di un singolo pixel. Le specifiche di ciascuna telecamera impiegata sono riportate nella tabella 7.1.

Risoluzione <i>ris</i>		Field of View <i>FOV</i>	Dimensione pixel	Exposure Time <i>ET</i>
3216	2208	440 <i>mm</i>	4.5 μm	4 μs

Tabella 7.1: Dati della telecamera

La lunghezza focale f dipende invece dal tipo di lenti utilizzate. Un confronto tra le possibili tipologie di lenti è riportato nella tabella 7.2. Per queste applicazioni si è scelto di equipaggiare le telecamere con lenti da 12 mm, in modo da ottenere un'altezza minima ragionevole che consente di posizionare agevolmente le telecamere su di un supporto e di regolarne l'altezza. Impiegando lenti da 35 mm o da 25 mm, infatti, si ottiene un'altezza minima h_{min} molto più elevata, che non facilita la disposizione delle telecamere stesse sul supporto.

Lunghezza focale f	Altezza minima h_{min}
12 mm	530 mm
25 mm	1110 mm
35 mm	1550 mm

Tabella 7.2: Confronto tra diverse tipologie di lenti

Quindi le due telecamere devono necessariamente essere poste ad un'altezza minima di 530 mm dal disco che si vuole analizzare per visualizzarlo nella sua interezza.

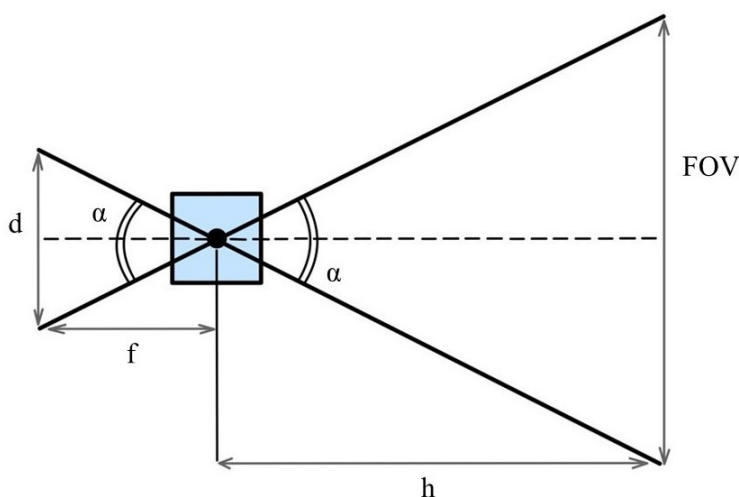


Figura 7.1: Schema rappresentativo della singola telecamera

7.2 Sfocatura dovuta alla rotazione del disco

Nell'applicazione della 3-DIC è fondamentale, inoltre, evitare l'acquisizione di immagini sfocate (blurred) durante la rotazione del disco. Mentre si acquisiscono le immagini, infatti, si deve fare in modo che ciascun punto resti all'interno dello stesso pixel. Se questo non accade, ad esempio nel caso in cui un punto sia comune a più pixel, si ottiene un'immagine sfocata.

Questo fenomeno è tanto più importante quanto si aumenta la velocità di rotazione del disco ω . Considerando un tempo di esposizione ET fissato, si può calcolare lo spazio δ percorso da un punto posto sull'estremità di una pala del disco durante tale intervallo di tempo. Si ha quindi che:

$$\delta = r\omega \cdot ET$$

Dove:

- r è il raggio del disco;
- ω è la velocità angolare del disco;
- ET è il tempo di esposizione.

Un singolo pixel inquadra invece uno spazio s pari a:

$$s = \frac{FOV}{ris}$$

Dove:

- FOV è il Field of View;
- ris è la risoluzione della telecamera.

Per questa applicazione, richiamando i dati della telecamera mostrati nella tabella 7.1, lo spazio inquadrato da un pixel s è pari a:

$$s = \frac{FOV}{ris} \simeq 200\mu m$$

Il limite di applicazione è rappresentato quindi dalla condizione in cui:

$$\delta = s$$

In questo caso, difatti, il punto posto sull'estremità di una pala del disco ha uno spostamento δ , dovuto al moto circolare, che risulta pari allo spazio inquadrato da un singolo pixel. Quindi la velocità di rotazione del disco che determina la sfocatura dell'immagine ω_b è pari a:

$$\omega_b = 2 \frac{FOV}{ris} \cdot \frac{1}{D\Delta t}$$

Per il disco in esame si ha che $D = FOV$, per cui l'espressione si può semplificare come segue. Impiegando ancora una volta i dati della telecamera presentati nella tabella 7.1, si ricava che:

$$\omega_b = \frac{2}{ris \cdot \Delta t} \simeq 2160 \text{ rpm}$$

Risulta opportuno considerare un fattore di sicurezza SF che garantisce il rispetto di tale condizione limite. Difatti, se si supera la velocità di rotazione ω_b si ha la sfocatura dell'immagine, in quanto il punto all'estremità della pala del disco non resta all'interno di un singolo pixel durante il tempo di esposizione ET , ma ne attraversa diversi. Ponendo $SF = 4$, si ottiene una velocità di rotazione ω_{lim} di:

$$\omega_{lim} = \frac{\omega_b}{4} \simeq 500 \text{ rpm}$$

Difatti, per le applicazioni in esame la velocità di rotazione del disco si aggira attorno ai 500 rpm. Questa velocità aumenta la sicurezza degli operatori durante le prove, in quanto il Pozzo Spinning è usato senza protezioni. Allo stato attuale, infatti, non è possibile installare le telecamere con le protezioni attivate. Tale velocità è inoltre coerente con quelle discusse nel Capitolo 5 e riportate nella tabella 5.1. In aggiunta, tale valore garantisce l'assenza di questi fenomeni, legati alla sfocatura delle immagini di acquisizione.

La velocità di rotazione del disco è quindi inversamente proporzionale alla risoluzione della telecamera e al tempo di esposizione. Infatti, aumentando la risoluzione ciascun pixel inquadra uno spazio minore per cui si devono avere velocità di rotazione inferiori per permettere al punto del disco di restare all'interno di un singolo pixel. Allo stesso modo, aumentando il tempo di esposizione si ha una maggior durata dell'acquisizione, per cui lo spazio reale percorso dal punto del disco è maggiore a parità di velocità di rotazione e rischia di uscire dal pixel.

È stato tracciato l'andamento dello spazio δ percorso dal punto in funzione della velocità di rotazione del disco ω , riportato in figura 7.2, dove il limite orizzontale rappresenta lo spazio inquadrato da un singolo pixel s . Con la retta verticale tratteggiata, invece, viene indicata la velocità di rotazione del disco ω_b .

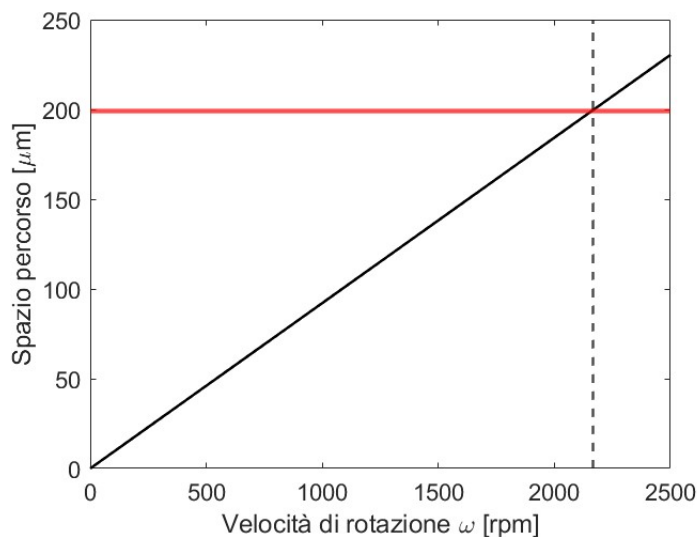


Figura 7.2: Spazio percorso in funzione della velocità di rotazione

Mentre lo spazio percorso da ciascun punto aumenta all'aumentare della velocità di rotazione del disco, il tempo di esposizione diminuisce asintoticamente tendendo a zero. Difatti, dato che il tempo di esposizione rappresenta il tempo durante il quale l'otturatore della telecamera rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere il sensore, questo deve essere ragionevolmente piccolo in presenza di velocità di rotazione elevate. Questo deve essere però accompagnato da un'intensa illuminazione esterna: per acquisire immagini nitide, quindi, è necessario che il tempo di esposizione sia il più basso possibile e che il disco sia fortemente illuminato.

Per questo motivo, in generale le analisi dinamiche condotte con tecniche DIC sono caratterizzate dalla presenza di luci molto intense, che permettono di congelare la configurazione del sistema nell'istante di tempo desiderato. Al contrario, per catturare immagini statiche come ad esempio l'immagine di riferimento nella configurazione indeformata, il tempo di esposizione è ininfluente perciò si può fare a meno dell'illuminazione esterna.

L'andamento del tempo di esposizione in funzione della velocità di rotazione del disco è mostrato in figura 7.3.

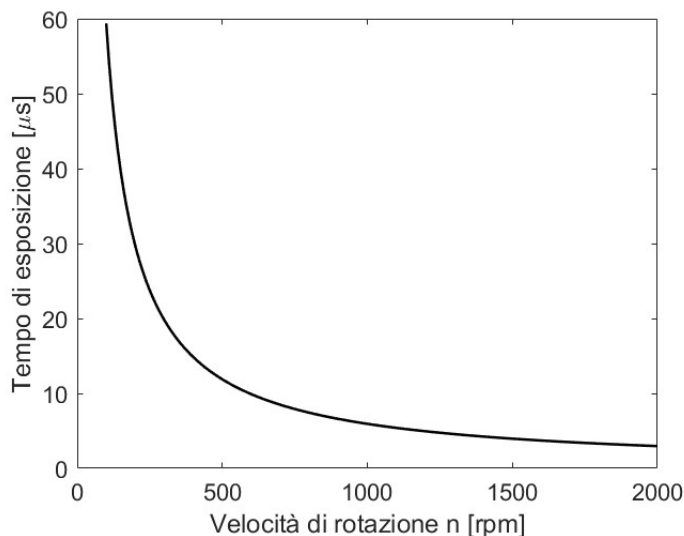


Figura 7.3: Tempo di esposizione in funzione della velocità di rotazione

Per ridurre il tempo di esposizione e permettere il raggiungimento di velocità di rotazione del disco ben più elevate è necessario l'impiego di luci stroboscopiche. Si tratta di luci intermittenti emesse ad alta frequenza, quindi ad intervalli di tempo molto ridotti che possono giungere fino ai 200 ns. In questo modo si può guidare l'acquisizione delle immagini, che avviene ad intervalli di tempo scanditi dalla luce intermittente.

Le schede tecniche delle luci stroboscopiche in dotazione al laboratorio AERMEC sono mostrate in Appendice D.

7.3 Acquisizione ad istanti di tempo noti

Sono stati quindi descritti i parametri fondamentali da tenere in considerazione per svolgere analisi dinamiche mediante DIC, insieme alle loro principali limitazioni. Volendo impiegare la tecnica 3-DIC, occorre considerare anche la sincronizzazione delle due telecamere, che devono registrare una coppia di immagini allo stesso istante di tempo. Per facilitare l'acquisizione delle immagini ad istanti di tempo noti, si è pensato di impiegare degli adesivi riflettenti posti sulla superficie laterale di una flangia, che viene montata al di sopra del disco.

La flangia non possiede compiti strutturali in quanto non deve sostenere alcun carico. Tuttavia, deve essere centrata con il disco e di conseguenza con il complesso del distanziale, quindi deve rispettare soltanto vincoli di natura geometrica.

Sono state progettate e realizzate due diverse configurazioni: la prima è caratterizzata da una geometria cilindrica semplice, mentre la seconda prevede delle scanalature, con 36 denti e lo stesso numero di incavi, che aiutano a disporre gli adesivi uniformemente spaziatati. Di conseguenza, se la velocità di rotazione del disco è costante, questo accorgimento permette di catturare immagini in corrispondenza di archi di circonferenza regolari, perciò ad istanti di tempo noti.

Entrambi i componenti sono stati trattati con ossidazione anodica nera, in modo tale da far risaltare il contrasto e non interferire con gli adesivi riflettenti posti sulla superficie laterale della flangia. In figura 7.4 sono mostrate le due versioni della flangia, mentre le rispettive tavole sono riportate in Appendice C.

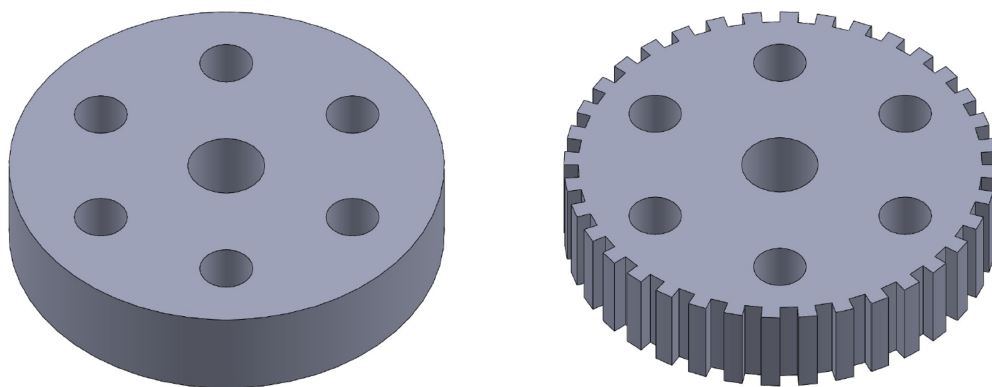


Figura 7.4: Modello CAD della flangia superiore cilindrica e con scanalatura

7.4 Problema del moto rigido

L'algoritmo 3-DIC si basa sulla correlazione dell'immagine di riferimento del disco, che corrisponde alla sua condizione indeformata, con quelle acquisite durante la deformazione dello stesso. Si ricerca quindi il reference subset all'interno delle immagini che rappresentano la condizione deformata, acquisendone una coppia per ciascuna configurazione. Per questo scopo viene implementata la funzione di correlazione, che ricerca la somiglianza tra due segnali facendo scorrere il subset all'interno di un'immagine. Dato che il disco è soggetto ad un campo di deformazione e spostamento, il reference subset non può più essere ricercato nella sua condizione indeformata all'interno delle immagini acquisite. Si sfruttano quindi le funzioni di forma, che contemplano il moto rigido, le dilatazioni e lo scorrimento del reference subset in modo tale da agevolare la corrispondenza dello stesso nelle immagini che rappresentano la condizione deformata del disco.

Tuttavia, l'applicazione di questo algoritmo ai dischi rotanti si rivela essere molto impegnativa proprio a causa del moto di rotazione. Difatti, molti algoritmi DIC commerciali ed open-source non contemplano la rotazione tra le funzioni di forma. Si rende necessario effettuare una correzione, nota in letteratura come Rigid Body Rotation (RBR), in modo da depurare l'analisi dalla rotazione rigida del disco ed ottenere una misura affidabile del campo di deformazione e spostamento.

Difatti, mentre la tecnica DIC è ormai consolidata per l'analisi di strutture non rotanti, caratterizzate da piccoli spostamenti, risulta invece fallace se tra l'immagine di riferimento e quella deformata intercorrono grandi spostamenti, come nel caso di una rotazione. Per risolvere la questione relativa alla rotazione rigida del disco ed ottenere risultati accurati è possibile modificare l'algoritmo DIC, considerando i gradi di libertà rotazionali nella formulazione degli spostamenti del subset. Pur trattandosi di una soluzione realistica [6][7], tuttavia risulta essere parecchio onerosa.

In alternativa, si può pensare di applicare la tecnica DIC acquisendo un numero significativo di immagini di riferimento, ciascuna in corrispondenza di piccoli spostamenti angolari, in modo da ricercare direttamente la correlazione con quelle ottenute nella configurazione deformata alle stesse posizioni angolari [8].

In questo modo, impostando le acquisizioni delle immagini di riferimento e di quelle relative alla condizione deformata ad ogni piccola rotazione del disco, l'algoritmo DIC è ancora piuttosto accurato e consente di ottenere il campo di deformazione in presenza di grandi spostamenti.

Capitolo 8

Conclusioni

In questa tesi è stato sviluppato un approccio per la misura del campo di deformazione e spostamento di un modello semplificato di disco, dotato di 12 pale a sezione rettangolare, usando la 3-Dimensional Digital Image Correlation (3-DIC).

Mediante l'analisi modale sperimentale sono state ricavate le frequenze naturali del disco, confermate dalla stessa analisi numerica. Sfruttando queste informazioni, è stato possibile realizzare un sistema di eccitazione del disco basato su forze di interazione di natura magnetica, poste in repulsione. Attraverso i magneti permanenti, difatti, è possibile eccitare il disco stesso generando su di questo forze non a contatto. Variando invece il numero dei magneti, e di conseguenza l'Engine Order, si possono osservare le forme modali di interesse in corrispondenza di diverse velocità di rotazione. Questo accorgimento consente di garantire la sicurezza del banco di misura, che è costretto a lavorare senza protezioni per permettere alle telecamere di avere una completa visione del disco.

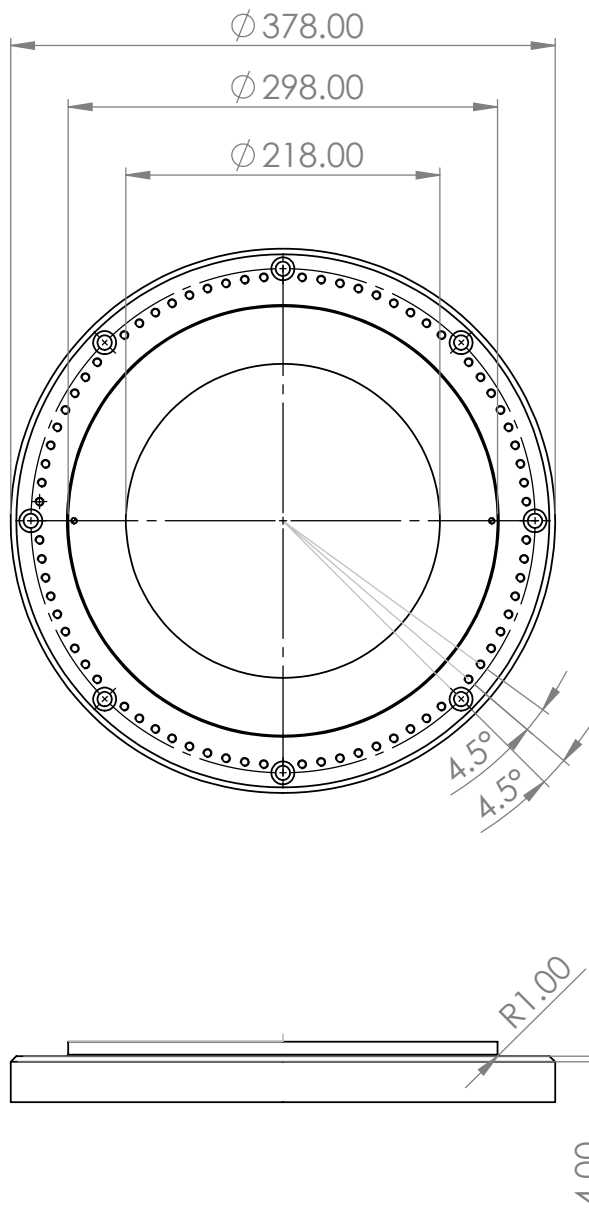
Sono stati elencati e descritti i principali problemi legati all'impiego della 3-DIC in presenza di dischi in rotazione, per ciascuno dei quali è stata proposta una possibile soluzione. In particolare, è stata calcolata l'altezza minima in corrispondenza della quale posizionare le telecamere, sfruttando un supporto, in modo tale da far coincidere il Field of View con il diametro esterno del disco. Inoltre, per evitare immagini sfocate, sono state espresse delle considerazioni in merito alla velocità massima di rotazione del disco, alla risoluzione delle telecamere e al tempo di esposizione. È stata proposta, in aggiunta, una soluzione per permettere l'acquisizione delle immagini ad istanti di tempo noti, impiegando una flangia per il posizionamento di adesivi riflettenti. In conclusione, è stato descritto un metodo che consente di depurare il moto di rotazione rigida del disco, che rappresenta la sfida più significativa della tecnica DIC.

Appendice A

Tavole dei componenti

Sono riportate di seguito le tavole dei componenti realizzati, che costituiscono il sistema di eccitazione del disco. Nell'ordine si hanno:

1. Disco inferiore
2. Disco superiore
3. Portamagnete
4. Distanziale
5. Vite con sede per magnete
6. Dado M20
7. Vite per cella di carico
8. Vite con sede per magnete per cella di carico



SE NON SPECIFICATO:
 QUOTE IN MILLIMETRI
 FINITURA SUPERFICIE:
 TOLLERANZE:
 LINEARE:
 ANGOLARE:

FINITURA:
 QUANTITA'
 1

NON SCALARE DISEGNO
 VERSIONE V02

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEG.					
VERIF.					
APPR.					
FABB.					
Quot.					

TITOLO:
Disco Inferiore

MATERIALE:
Alluminio

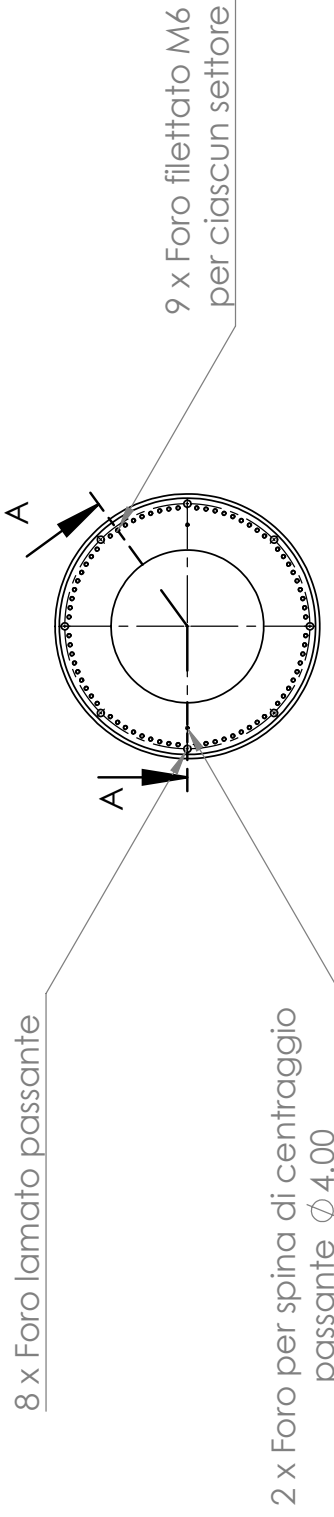
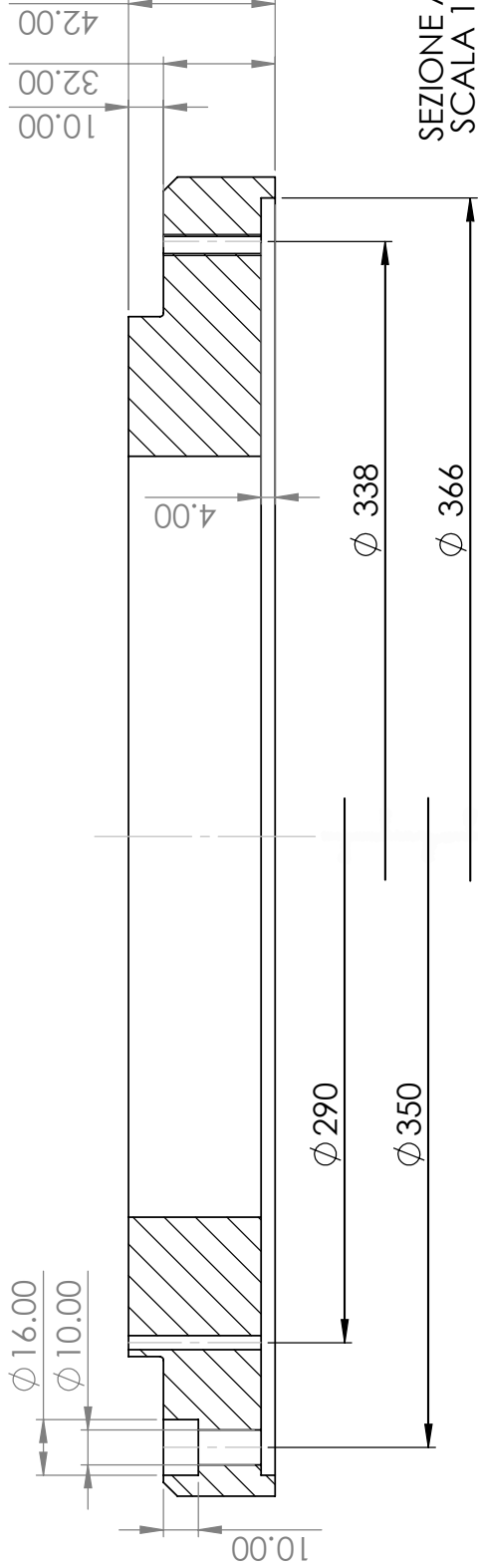
N. DISEGNO
 A4

PESO:

SCALA:1:10

FOGLIO 1 DI 2

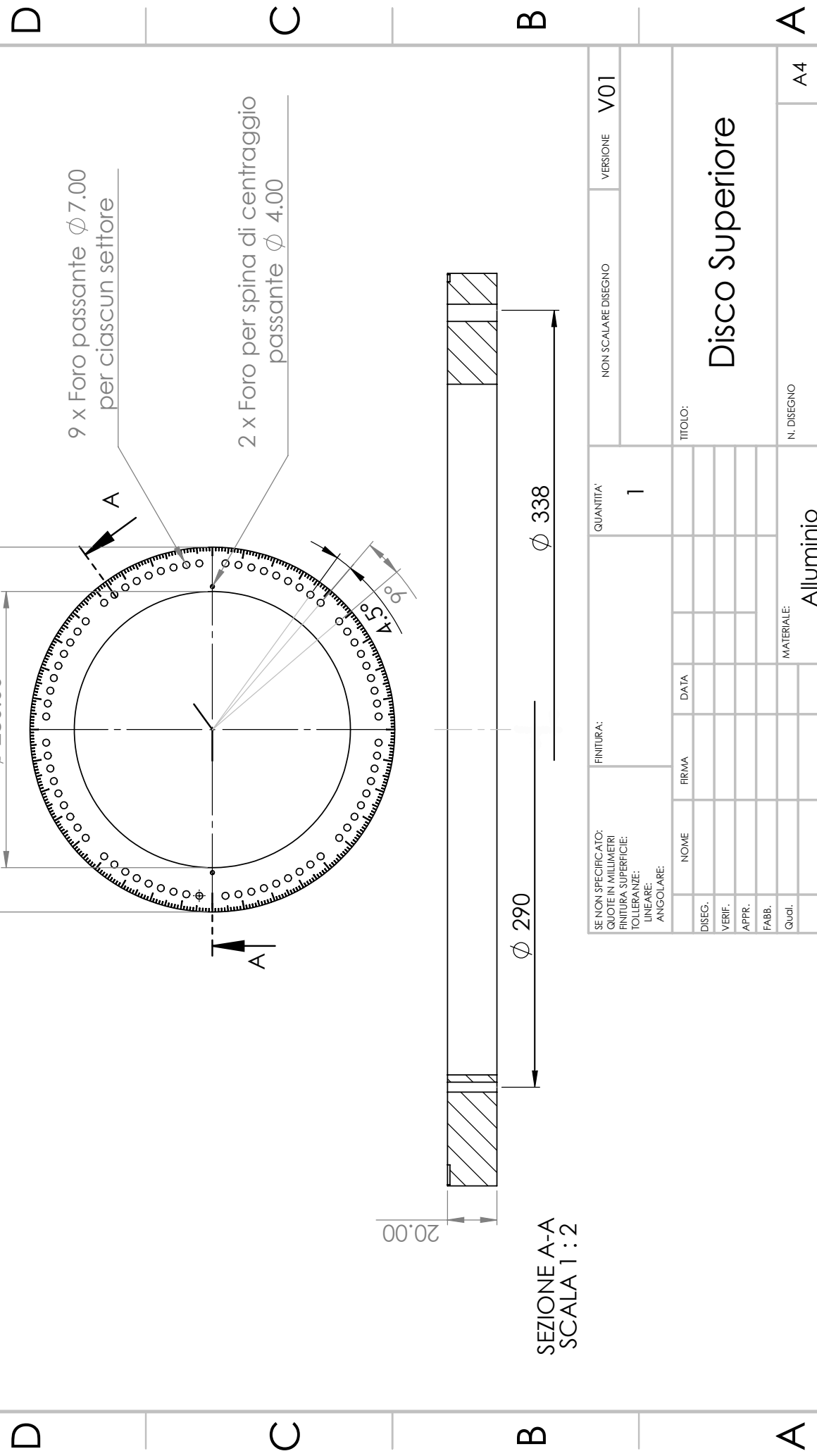
6 5 4 3 2 1



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI		FINITURA:		INTERRUZIONE BORDI NETTI		NON SCALARE DISEGNO		REVISIONE	
FINITURA SUPERFICIE:		NOME		FRMA		DATA		TITOLO:	
TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		DISEG.		VERIF.		APPR.		FABB.	
		Qual.		MATERIALE:		N. DISEGNO		A4	
		PESO:		SCALA: 1:0		FOGLIO 2 DI 2			

Disco Inferiore

6 5 4 3 2 1



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		QUANTITA'		NON SCALARE DISEGNO		VERSIONE	
				1		V01			
DISEG.	NOME	FIRMA	DATA	TITOLO:					
VERIF.				Disco Superiore					
APPR.				N. DISEGNO					
FABB.				A4					
Qual.				MATERIALE: Alluminio					
				PESO:		SCALA: 1:0			
				FOGLIO 1 DI 1					

4 3 2 1

F

E

D

C

B

A

F

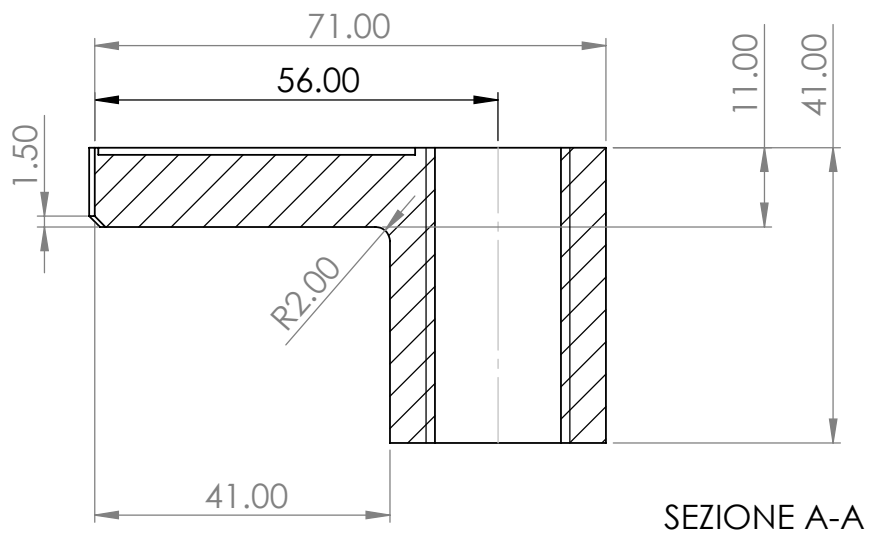
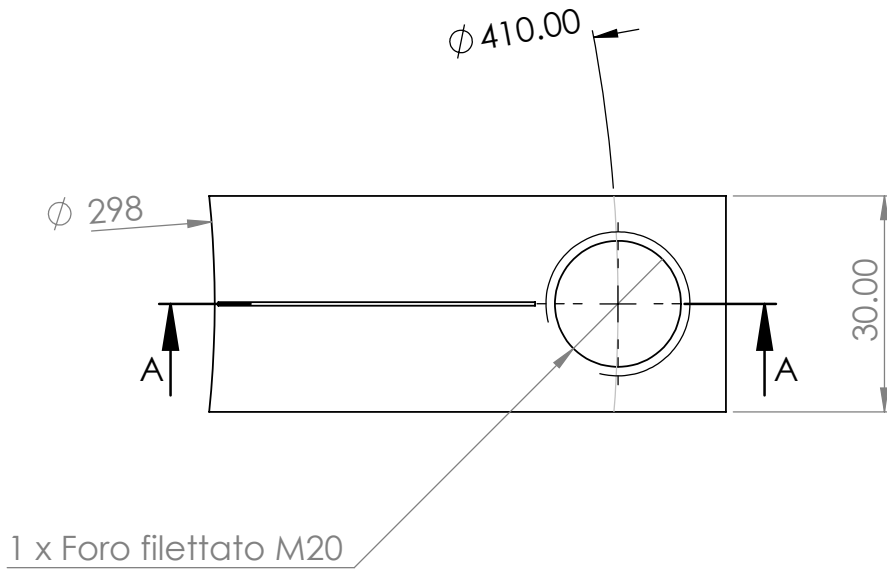
E

D

C

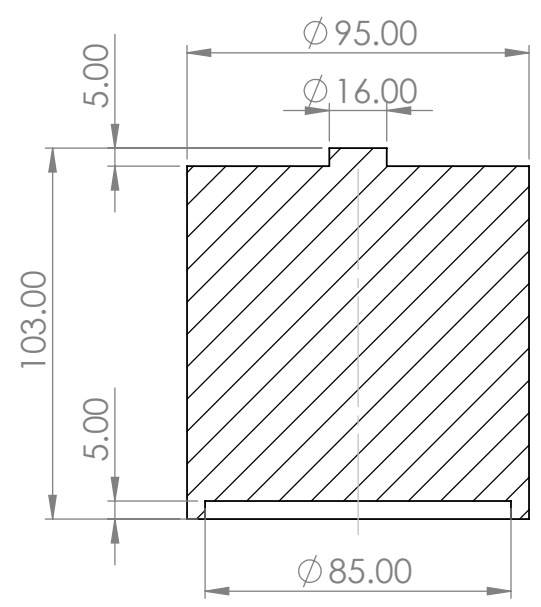
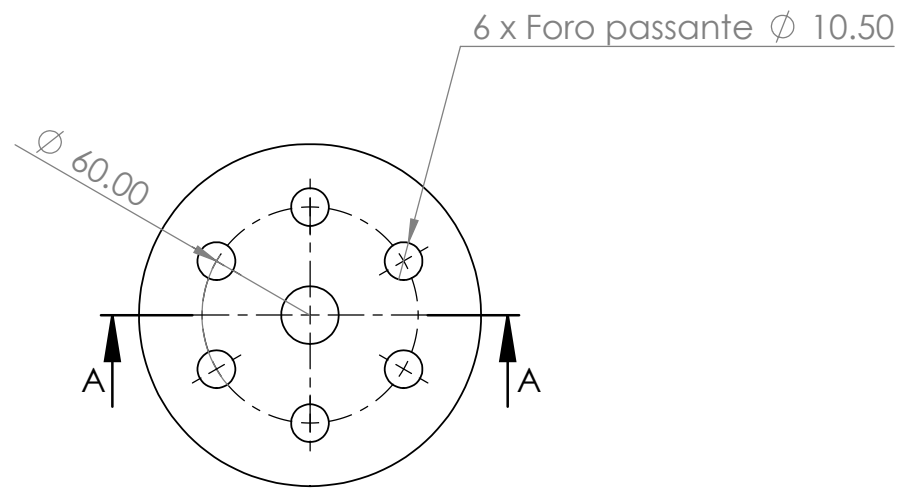
B

A



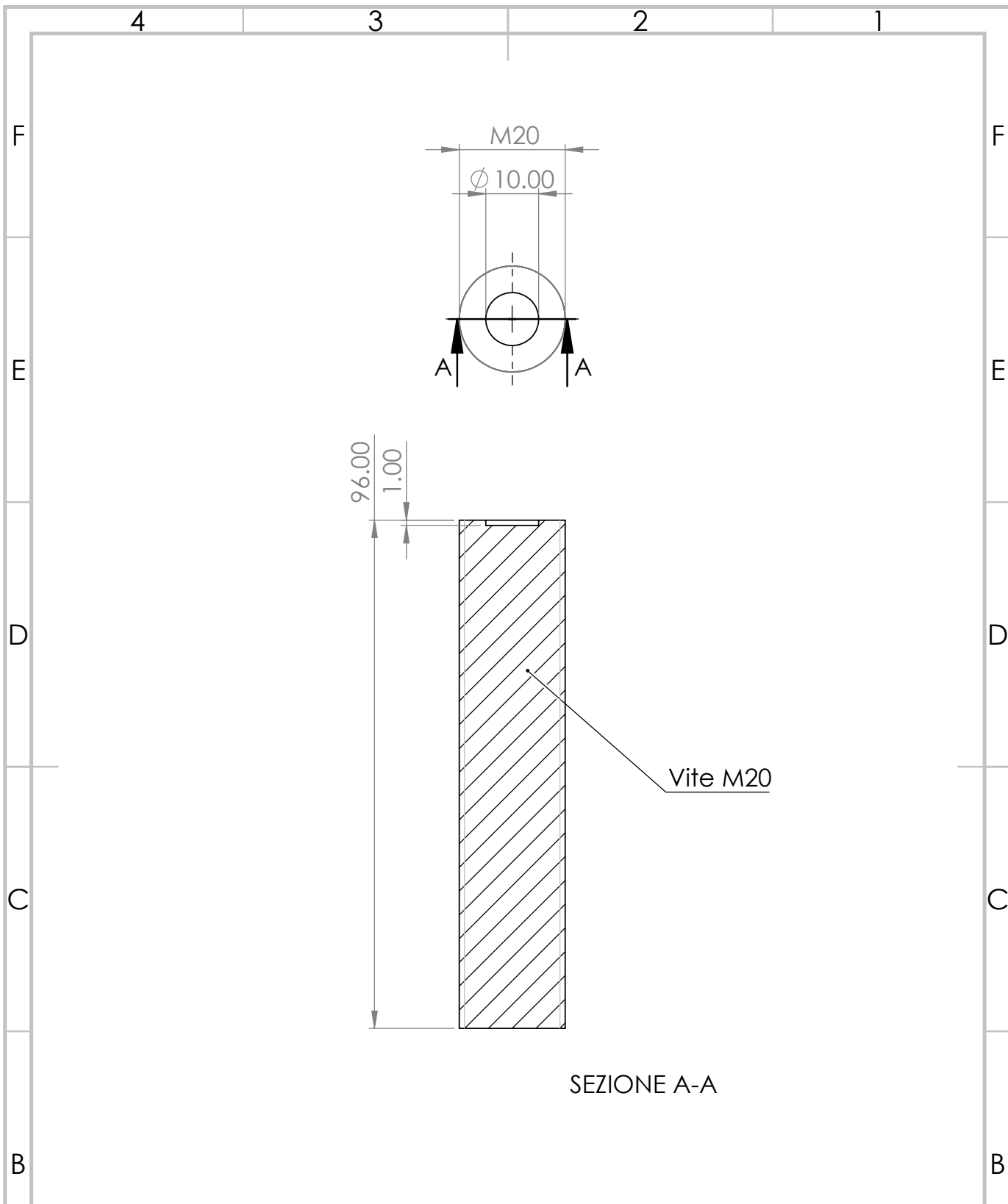
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:			FINITURA:	QUANTITA' 8	NON SCALARE DISEGNO	VERSIONE V02																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOME</th> <th>FIRMA</th> <th>DATA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DISEG.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Quod.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					NOME	FIRMA	DATA	DISEG.				VERIF.				APPR.				FABB.				Quod.				TITOLO: Portamagnete		
	NOME	FIRMA	DATA																											
DISEG.																														
VERIF.																														
APPR.																														
FABB.																														
Quod.																														
MATERIALE: Alluminio				N. DISEGNO		A4																								
PESO:				SCALA:1:1		FOGLIO 1 DI 1																								

4 3 2 1



SEZIONE A-A

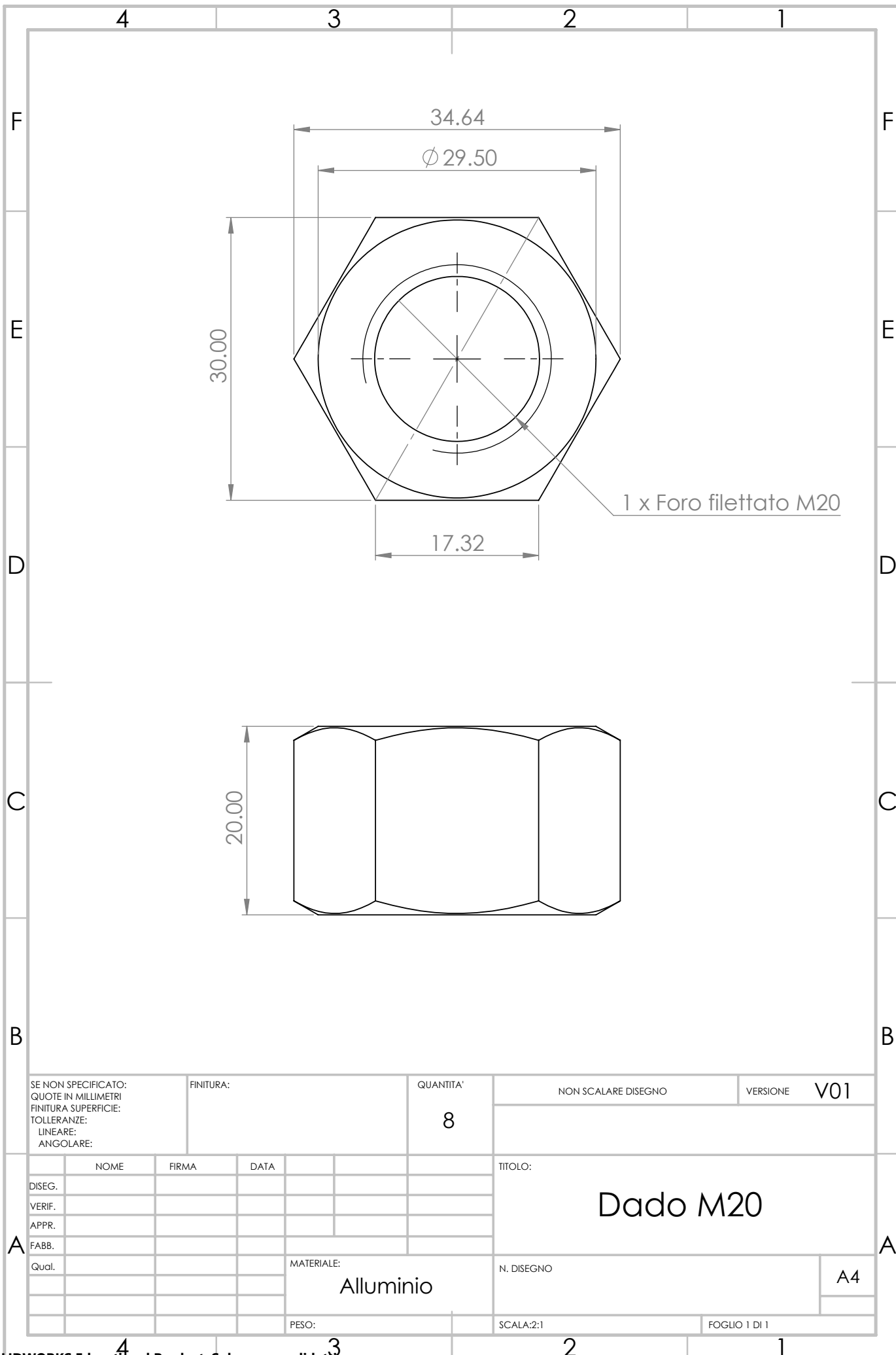
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:			FINITURA:		QUANTITA' 1		NON SCALARE DISEGNO		VERSIONE V02		
NOME			FIRMA		DATA		TITOLO: Distanziale				
DISEG.			VERIF.		APPR.		MATERIALE: Alluminio				
FABB.			Quod.								
PESO:			SCALA:1:2		FOGLIO 1 DI 1						



SEZIONE A-A

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:	QUANTITA' 4	NON SCALARE DISEGNO	VERSIONE V01
--	-----------	-----------------------	---------------------	---------------------

NOME				FIRMA		DATA		TITOLO: Vite con Sede per Magnete	
DISEG.								N. DISEGNO	
VERIF.								A4	
APPR.								MATERIALE: Alluminio	
FABB.								PESO:	
Quot.								SCALA:1:1	
								FOGLIO 1 DI 1	



4 3 2 1

F F

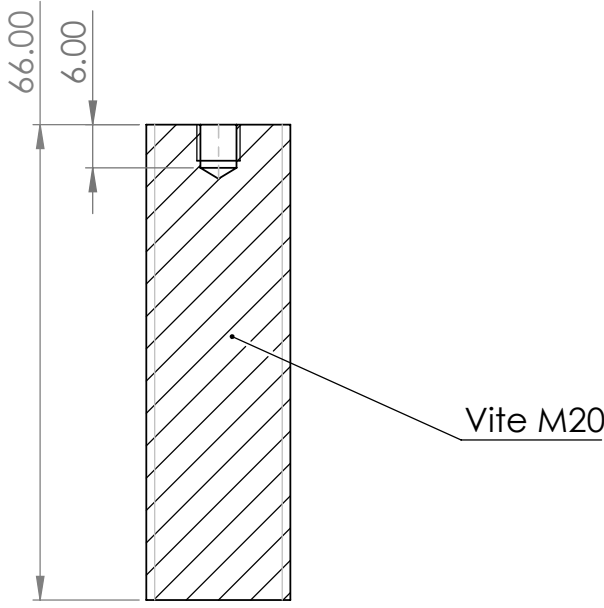
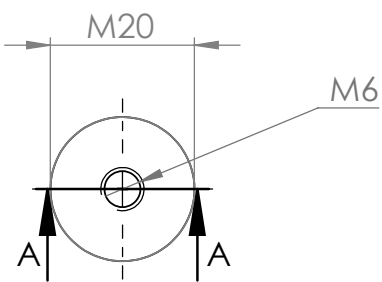
E E

D D

C C

B B

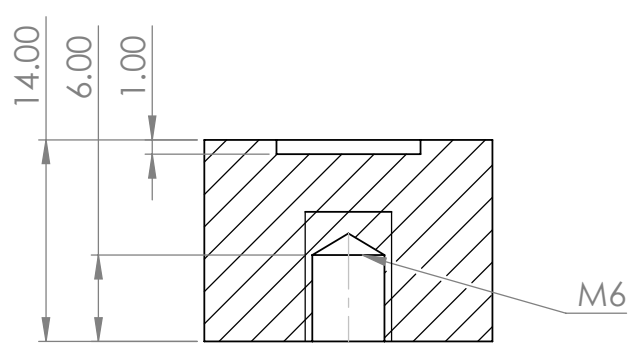
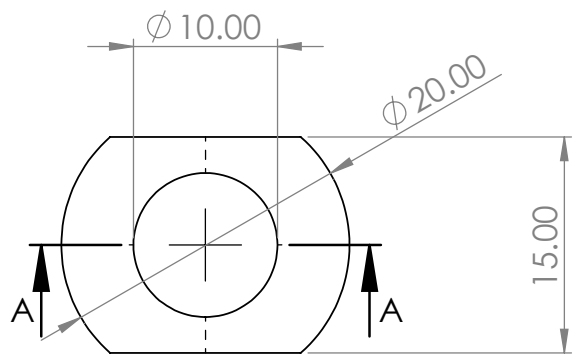
A A



SEZIONE A-A

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:		QUANTITA'	NON SCALARE DISEGNO	REVISIONE
			4		V01

DISEG. VERIF. APPR. FABB. Qual.	NOME	FIRMA	DATA	TITOLO:	
				Vite per Cella di Carico	
	MATERIALE:			N. DISEGNO	A4
	Alluminio				
	PESO:			SCALA:1:1	FOGLIO 1 DI 1



SEZIONE A-A

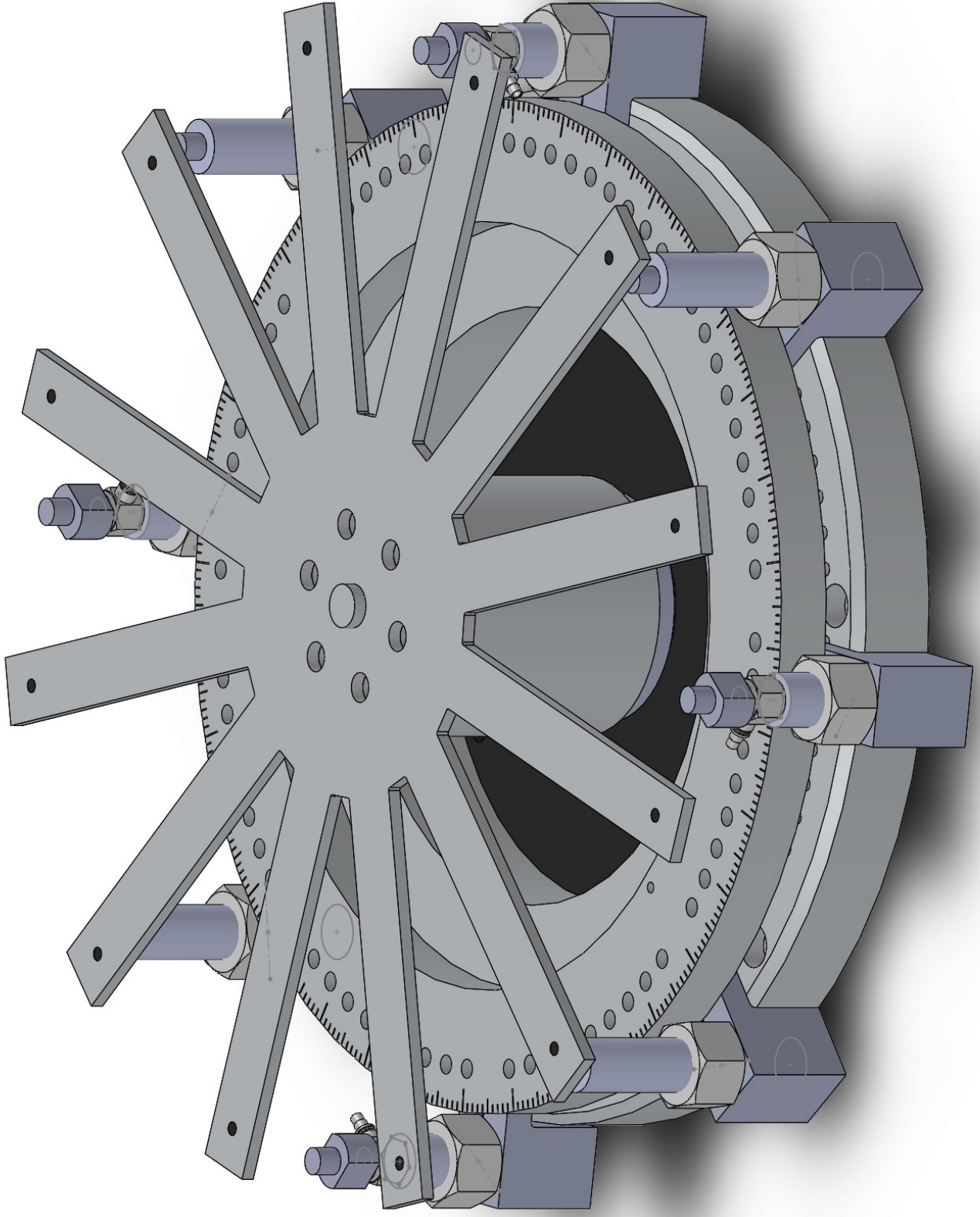
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		QUANTITA' 4		NON SCALARE DISEGNO		VERSIONE V01	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO: Vite con Sede per Magnete per Cella di Carico			
DISEG.		VERIF.		APPR.		FABB.		Quot.	
						MATERIALE: Alluminio		N. DISEGNO A4	
						PESO:		SCALA:2:1	
								FOGLIO 1 DI 1	

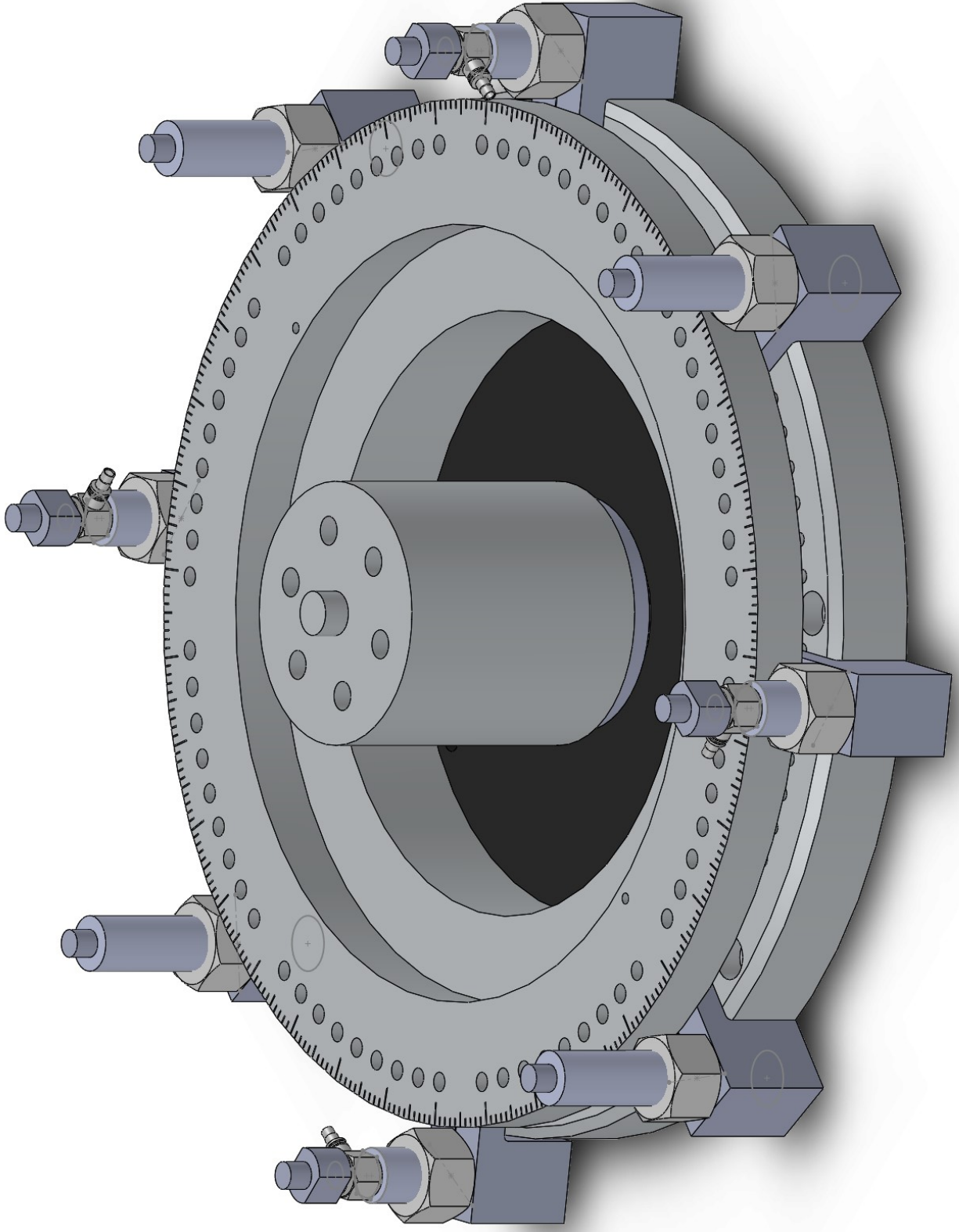
Appendice B

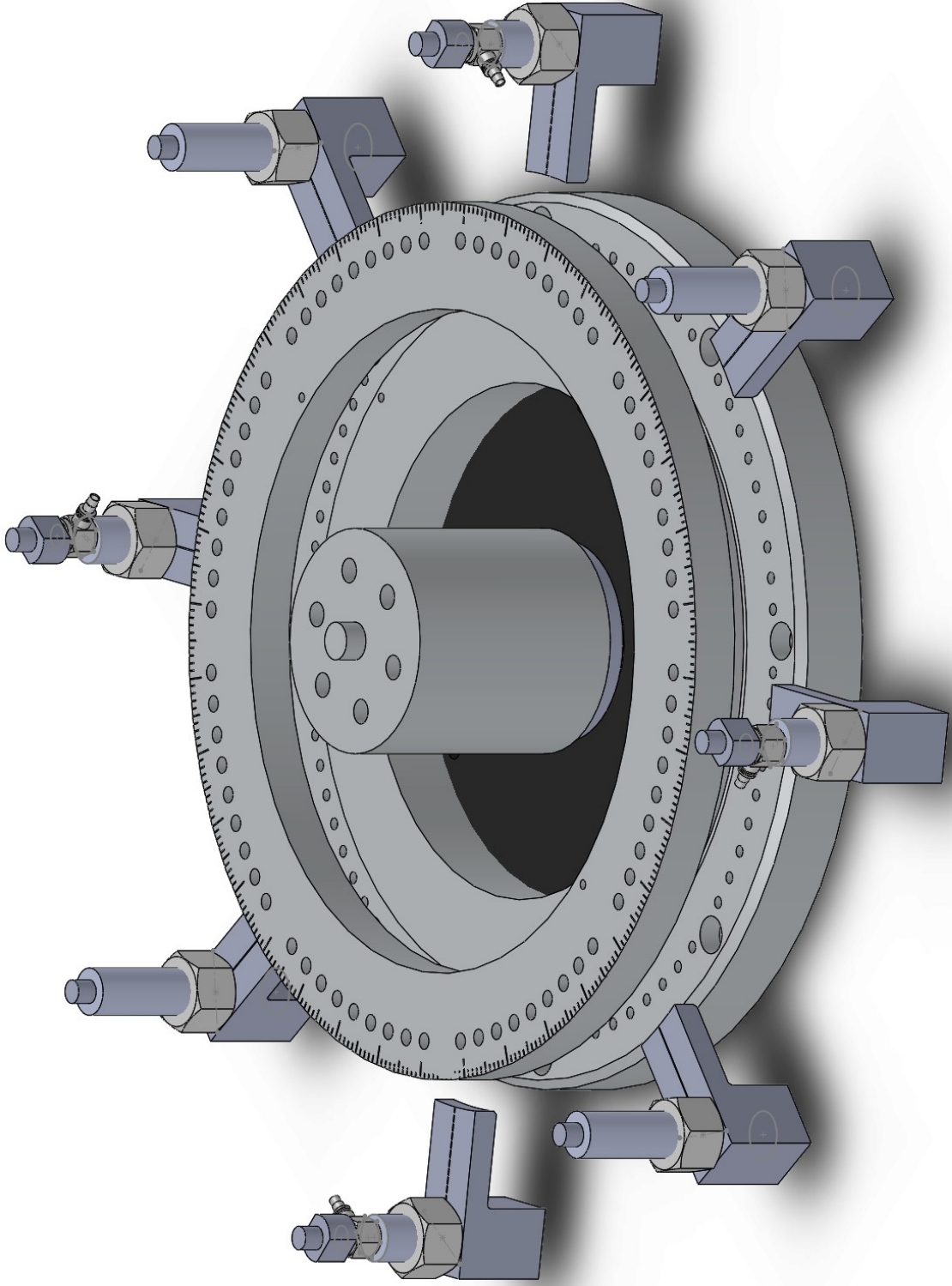
Viste 3D del sistema di eccitazione completo

Sono riportate di seguito le viste 3D del sistema di eccitazione completo, comprensivo di magneti e celle di carico. Nell'ordine si hanno:

1. Vista 3D con il disco
2. Vista 3D senza il disco
3. Vista esplosa





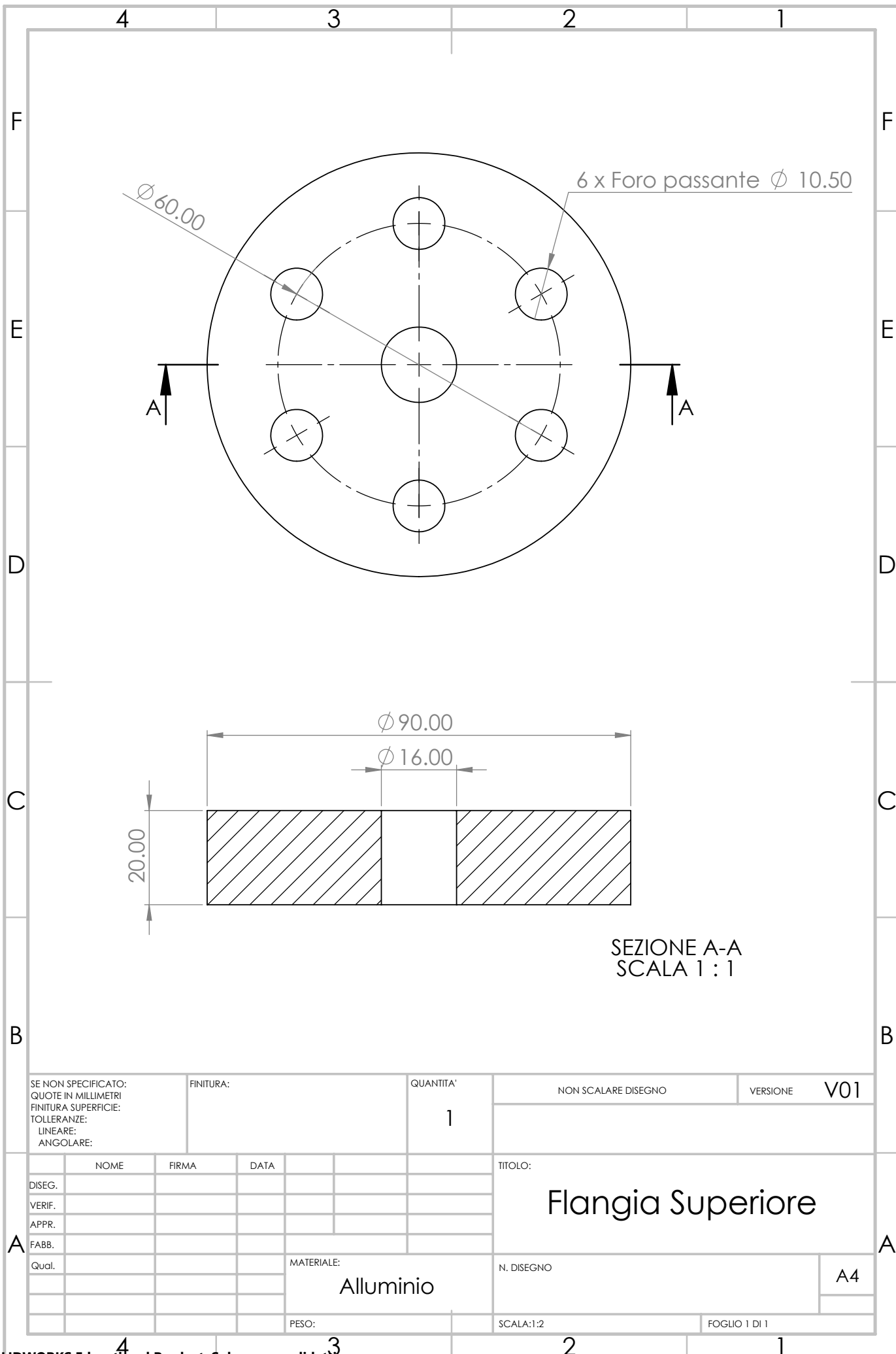


Appendice C

Tavole della flangia

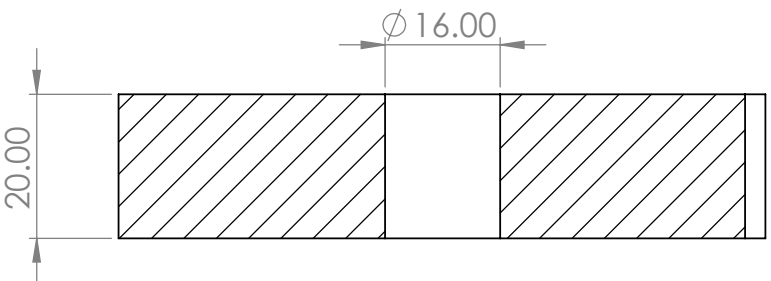
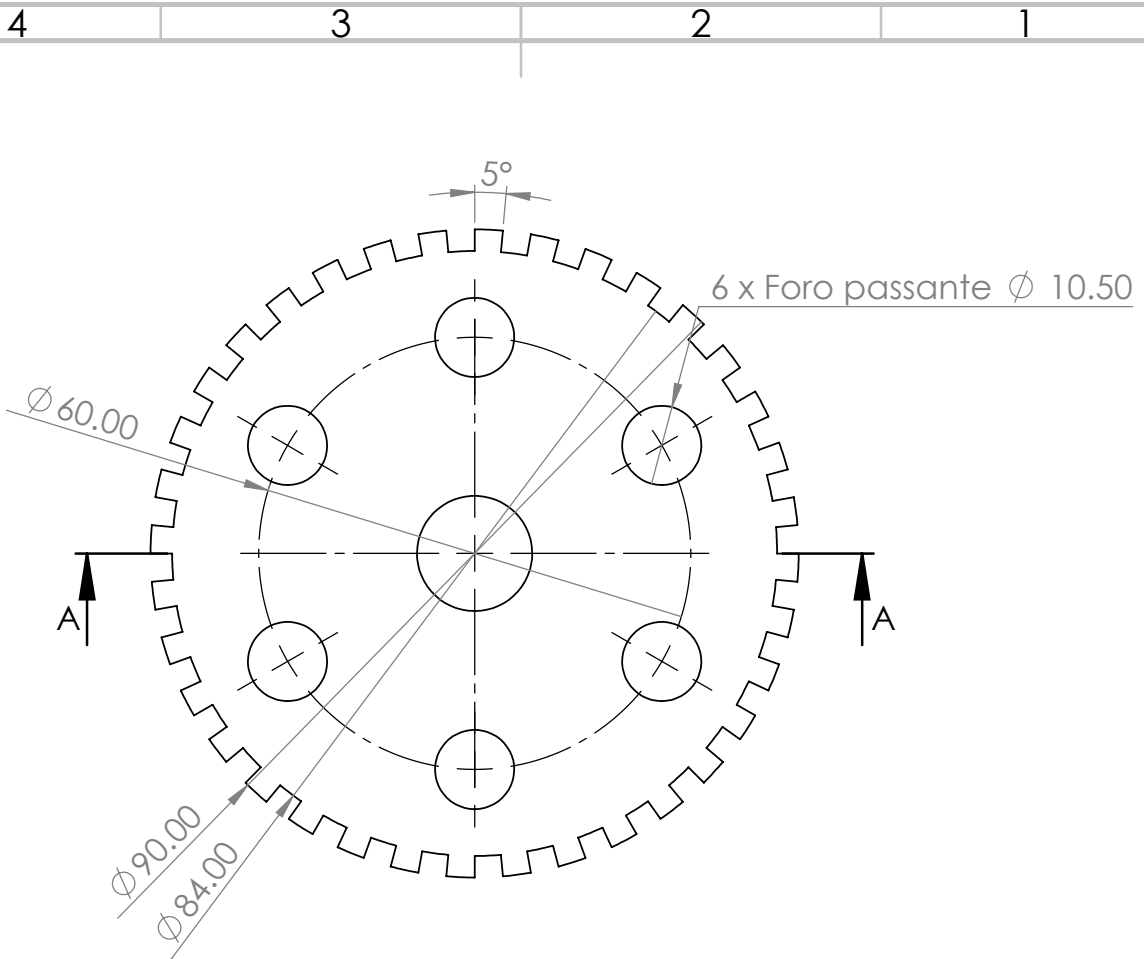
Sono riportate di seguito le tavole della flangia superiore nelle due configurazioni progettate. In particolare si ha:

1. Flangia superiore cilindrica
2. Flangia superiore con scanalatura



SEZIONE A-A
SCALA 1 : 1

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:	QUANTITA' 1	NON SCALARE DISEGNO	VERSIONE V01																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOME</th> <th>FIRMA</th> <th>DATA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>			NOME	FIRMA	DATA																TITOLO: Flangia Superiore	
NOME	FIRMA	DATA																				
MATERIALE: Alluminio			N. DISEGNO A4																			
PESO:			SCALA:1:2																			
			FOGLIO 1 DI 1																			



SEZIONE A-A
SCALA 1:1

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:			FINITURA:	QUANTITA' 1	NON SCALARE DISEGNO	VERSIONE V01																				
<table border="1"> <tr> <th>NOME</th> <th>FIRMA</th> <th>DATA</th> <th></th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>				NOME	FIRMA	DATA																		TITOLO: Flangia Superiore con Scanalatura		
NOME	FIRMA	DATA																								
MATERIALE: Alluminio				N. DISEGNO A4																						
PESO:				SCALA:1:2		FOGLIO 1 DI 1																				

Appendice D

Luci stroboscopiche

È riportata di seguito la scheda tecnica delle luci stroboscopiche MULTILED GX8 e MULTILED QX, in dotazione al laboratorio AERMEC.



For MultiLed ZX, MX, QX, QX MINI

- **Up to 8 lamp heads**
- **Up to 1.200 W**
- **Remote control**
- **Large color LCD Display**

**WE BUILD THINGS THAT WORK THE WAY
YOU WISH THEY WOULD.**

MultiLed products cover all applications of high speed cameras and many applications in the machine vision market. Some models e.g. cover sub microsecond exposure time, monochromatic light or give you enough light to fully close aperture at some microseconds exposure time. Designed from a decade of experience with thousands of customer projects in mind, MultiLed products offer ultra strong lighting at an affordable price.

MULTILED GX8 - KEY FEATURES

- GX8 is the control and power supply unit for up to 8:
 - ZX, MX, QX, QX MINI
- Up to 8 lamp heads
- Complete status display for each connected lamp head
- Up to 1.2 kW power supply
- Large LCD color display
- Trigger and enable input
- Rotary switch for easy menu navigation - camera specific power cable not included
- Camera power supply unit embedded / cable not included
- Standard version: desktop housing
- Optional version 1: 19" rack mount housing 2U
- Huge selection of special feature power supplies available: desktop rackmount, IP protection, high efficiency
- Trigger and Enable inputs: TTL, isolated, up to 8V, invertable





CONTROLLER

MULTILED GX8

Supply Voltage	48 Vdc
Bundled PS	Depends on LED set use our purchasing service
Lamp head connector	8 * MOLEX
Power connector	ODU Push-Pull
Environmental temp. (operation)	-25°C - 45°C
temp. (Storage)	-25°C - 80°C
For LED Model	All Colors except G8-R models
IP class	IP 20
Dimensions	103 * 166 * 62 mm
Weight	450 g
Control	Large color LCD and control knob. (Alternative RS 485)
Minimum Pulse length	By LED (~200 nanoseconds)
Housing	Aluminum (G8) PC/Aluminum (G8/19")
Light modes	Continuous, Pulsed
Light Intensity	Adjustable, 0%..100%
Camera Power Supply	Onboard, 12/16V, 4A





- Exchangeable lenses
- 12.000 Lm white
- Pulsed or continuous
- Small size
- Down to 200 ns strobe

WE BUILD THINGS THAT WORK THE WAY YOU WISH THEY WOULD.

MultiLed products cover all applications of high speed cameras and many applications in the machine vision market. Some models e.g. cover sub microsecond exposure time, monochromatic light or give you enough light to fully close aperture at some microseconds exposure time. Designed from a decade of experience with thousands of customer projects in mind, MultiLed products offer ultra strong lighting at an affordable price.

MULTILED QX - KEY FEATURES

The MultiLed QX is a standalone lamp head for continuous operation. With the optional MultiLed GX8 controller connected between power supply and lamp head, you can access a lot more functionality:

- Preinstalled lens (horizontal x vertical): 12°x12°
- Additional lenses (horizontal x vertical): 25°x25° - 40°x40° - 60°x60° - 30°x13° - 60°x12°
- 12000 Lumen
- Standard desktop power supply with 5 m cable included
- White light (look at CT model for color LED)
- 150W 48V
- Continuous operation
- Bottom 1/4-inch standard thread for photographic accessories and mount
- Status LED
- Uses MULTILED GEN4 System cable

Advanced features when connected to MultiLed GX8 as power supply:

New GS Vitec „ultra high speed strobe“ technology.

- down to 200 nanoseconds strobe length at full output power
- Pulse delay: 220 ns
- Pulse rise time: 100 ns
- Pulse fall time: 350 ns
- Shortest usable pulswidth: 200 ns
- Adjustable intensity for each channel: 0% to 100%
- Temperature and status display for each lamp head
- All communications and power supply come from the GX8 through 1 MULTILED GEN4 System cable

Scope of delivery:

- QX: lamp head, desktop power supply, 5m cable, 12°x12° lens
- QX Plus: as QX, additional lenses: (horizontal x vertical): 25°x25° - 40°x40° - 60°x60° - 30°x13° - 60°x12°
- QX Set: 2-8 x QX lamp head, 1 x GX8 controller, power supply with 5m cable, 320 W (2 QX); 600 W (3-4 QX); 2 x 600 W (5-8 QX), 2 x 5m trigger cable, full lens sets of (horizontal x vertical): 25°x25° - 40°x40° - 60°x60° - 30°x13° - 60°x12° for each lamp head.



VALUE SERIES

MULTILED QX

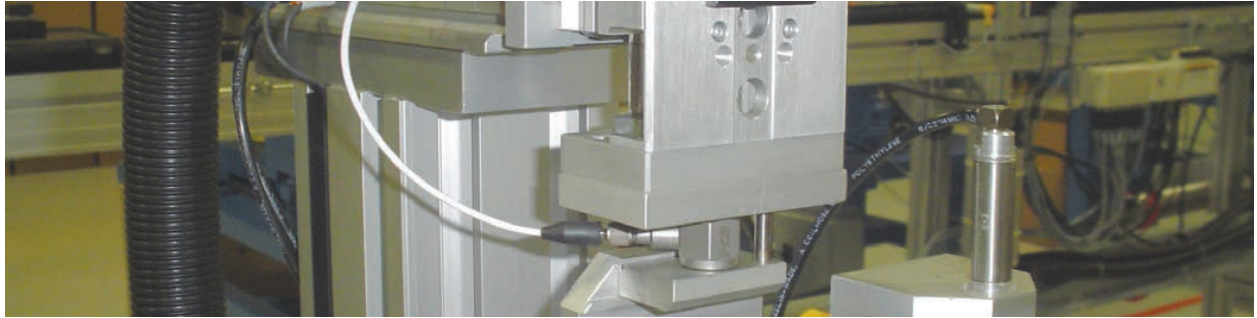
Luminous Flux	white, 12.000 Lumen
Power	150 W
Supply Voltage	48 Vdc
Bundled PS	Desktop, 48 V, 160 W
Connector	MULTILED GEN4 System
Heat Dissipation	Active, heatsink and 2 fans
Einvironmental temp. (operation)	-25°C - 45°C
temp. (Storage)	-25°C - 80°C
Overtemperature Protection	Sensor onboard
IP class	IP 20
Mounting Options	1/4" thread
Standard Lenses	12° FWHM, exchangeable
Optional Lenses (QX Plus)	25°x 25°, 40° x 40°, 60° x 60°, 30° x 13°, 60° x 12° (horizontal x vertical)
Dimensions	78 * 104 * 64 mm
Weight	650 g
Setup	MultiLED GX8 controller
Delay / rise and fall time	220 ns / 100 ns / 350 ns
LED	12
Housing	Aluminium
Light modes	Continuous, Pulsed
Light Intensity	Adjustable, 0%..100%



Appendice E

Celle di carico

È riportata di seguito la scheda tecnica delle celle di carico 208C01, in dotazione al laboratorio AERMEC.



SERIES 208C

GENERAL PURPOSE ICP[®] QUARTZ FORCE SENSORS



- Sensitivities from 1 mV/lb to 500 mV/lb
- Factory preloaded for both tension and compression measurement
- High resolution with low noise floor
- Includes impact cap, calibration certificate, UNF & metric mounting studs.

TYPICAL APPLICATIONS

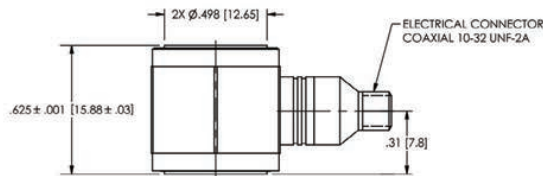
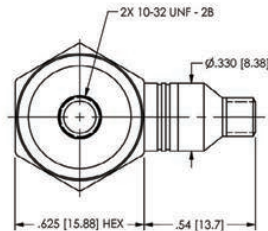
- Validation of dynamic force in repetitive process operations
- Drop testing & integrated into force plates
- Automation & machine tool processes
- Material sample testing equipment

General purpose force sensors are constructed with stainless steel housings and piezoelectric quartz sensing elements, which are “sandwiched” between upper and lower base plates. The sensing elements are preloaded in compression to a specific value and welded into an assembly. This construction results in an extremely stiff sensor with an upper frequency limit of 36000 Hz. Each unit is factory calibrated for dynamic force measurement applications; compression, tension, and impact.

PCB[®] Platinum models (208C01-208C05) referenced here are internally threaded and hermetically sealed with side mounted connectors. The internal threads can accommodate stud mounting and/or threaded fasteners. Note that tensile measurement is limited by internal, factory preload, the number of threads engaged, and tensile yield strength of associated fasteners. Five measurement ranges are offered with full-scale measurement ranges from 10 lb (45 N) to 5000 lb (22k N) compression and up to 500 lb (2200 N) tension. For higher measurement ranges, consider other PCB designs such as: Force Ring, Force Link, or Impact-style sensors.

SPECIFICATIONS

Model Number	208C01		208C02		208C03		208C04		208C05	
	English	SI	English	SI	English	SI	English	SI	English	SI
Performance										
Sensitivity ($\pm 15\%$)	500 mV/lb	112410 mV/kN	50 mV/lb	11241 mV/kN	10 mV/lb	2248 mV/kN	5 mV/lb	1124 mV/kN	1 mV/lb	224.82 mV/kN
Measurement Range (Compression)	10 lb	0.0445 kN	100 lb	0.445 kN	500 lb	2.224 kN	1000 lb	4.448 kN	5000 lb	22.24 kN
Measurement Range (Tension)	10 lb	0.0445 kN	100 lb	0.445 kN	500 lb	2.224 kN	500 lb	2.224 kN	500 lb	2.224 kN
Maximum Static Force (Compression)	60 lb	0.27 kN	600 lb	2.669 kN	3000 lb	13.50 kN	6000 lb	26.69 kN	8000 lb	35.59 kN
Maximum Static Force (Tension)	60 lb	0.27 kN	500 lb	2.224 kN	500 lb	2.224 kN	500 lb	2.224 kN	500 lb	2.224 kN
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.0001 lb-rms	0.0005 N-rms	0.001 lb-rms	0.004 N-rms	0.005 lb-rms	0.02 N-rms	0.01 lb-rms	0.0445 N-rms	0.05 lb-rms	0.222 N-rms
Upper Frequency Limit	36000 Hz									
Non-Linearity	$\leq 1\%$ FS									
Environmental										
Temperature Range	-65 to +250 °F (-54 to +121 °C)									
Temperature Coefficient of Sensitivity	$\leq 0.05\%$ /°F ($\leq 0.09\%$ /°C)									
Electrical										
Discharge Time Constant	≥ 50 sec		≥ 500 sec		≥ 2000 sec					
Excitation Voltage	18 to 30 VDC				20 to 30 VDC					
Constant Current Excitation	2 to 20 mA									
Output Impedance	≤ 100 Ohm									
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC		8 to 14 VDC							
Spectral Noise (1Hz)	0.0000126 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000056 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000135 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000603 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000211 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000942 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000798 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00356 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00168 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00750 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (10Hz)	0.00000424 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000189 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000276 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000123 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000109 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000488 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000286 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00128 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00112 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00501 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (100Hz)	0.00000149 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000067 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000096 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000043 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000039 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000173 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000086 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000384 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000459 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.00205 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (1000Hz)	0.00000052 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000023 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000021 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000095 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.0000086 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000039 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000028 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000123 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000133 lb/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.000592 N/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output Polarity, Compression	Positive									
Physical										
Stiffness - typical	6 lb/ μin (1.05 kN/ μm)									
Weight	0.80 oz (22.7 gm)									
Housing / Connector / Mount	Hermetic stainless steel housing, side mounted 10-32 coaxial jack, 10-32 internal mounting thread									
Supplied Accessories										
084A03 Impact Cap, Qty 1 080A81 Thread Locker, Qty 1 081B05 Mounting Stud, BeCu (10-32 to 10-32), Qty 2 M081A62 Mounting stud, BeCu (10-32 to M6 x 1), Qty 2 Calibration per FCS-46, Full Scale Range in 20% intervals, compression only - certificate provided.										



Bibliografia

- [1] J. Baqersad, P. Poozesh, C. Niezrecki e P. Avitabile. «A Noncontacting Approach for Full-Field Strain Monitoring of Rotating Structures». In: *Journal of Vibration and Acustics* 138, Issue 3 (2016) (cit. a p. 4).
- [2] G. Musotto. «Digital Image Correlation: applicazioni di tecniche convenzionali e sviluppo di soluzioni innovative per la stima e l'incremento dell'accuratezza». Politecnico di Milano, 2012 (cit. a p. 6).
- [3] J. Baqersad, P. Poozesh, C. Niezrecki e P. Avitabile. «Photogrammetry and Optical Methods in Structural Dynamics – A Review». In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 86 (2017), pp. 17–34 (cit. a p. 6).
- [4] D. Solav. «MultiDIC. Instruction Manual. Version 1.0.0». Massachusetts Institute of Technology, 2018 (cit. a p. 10).
- [5] S. Pavone. «Design and Development of a Spin Test Rig for Turbine Disks». Tesi di dott. Politecnico di Torino, 2010 (cit. alle pp. 27, 29).
- [6] R. Wu, H. Qian e D. Zhang. «Robust Full-field Measurement considering Rotation using Digital Image Correlation». In: *Measurement Science and Technology* (2016) (cit. a p. 42).
- [7] P. J. Sousa, J. M. R. S. Tavares, P. J. S. Tavares e P. M. G. P. Moreira. «Correction of Rigid Body Motion in Deformation Measurement of Rotating Objects». In: *Measurement* 129 (2018), pp. 436–444 (cit. a p. 42).
- [8] S. Occhipinti, D. Mastrodicasa, S. Manzato e E. Di Lorenzo. «Application of Digital Image Correlation in Operational Modal Analysis of Rotating Structures». In: *Proceedings of the ISMA* (2024) (cit. a p. 42).