

# POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

## **Progettazione di accessorio per prove di attrito su cuscinetti assiali mediante tribometro pin-on-disc**



### **Relatore**

Prof. Andrea Manuello Bertetto

### **Correlatori**

Prof. Luigi Mazza

Ing. Edoardo Goti

### **Studentessa**

Giulia Vinci

*Anno accademico 2023-2024*



*Alla mia famiglia.*

## Sommario

In questa tesi viene presentata la progettazione di un accessorio per l'esecuzione di prove di attrito su cuscinetti assiali a sfere mediante tribometro pin-on-disc. L'obiettivo principale del lavoro è stato quello di sviluppare un sistema in grado di simulare le condizioni di funzionamento di un cuscinetto assiale a sfere, consentendo di acquisire dati affidabili sul coefficiente di attrito e sulle prestazioni del lubrificante.

La parte principale del lavoro si è concentrata sulla progettazione della struttura e sull'identificazione del layout progettuale più adatto al montaggio dell'accessorio sul tribometro e al suo corretto funzionamento.

In particolare, il supporto che durante il normale funzionamento del tribometro era adibito all'alloggiamento del pezzo da analizzare è stato qui sostituito con una apposita struttura che permettesse l'alloggiamento dei cuscinetti e l'interfaccia con gli altri organi del tribometro.

La modellazione 3D è stata realizzata utilizzando il software SolidWorks, ponendo particolare attenzione alla scelta della geometria delle superfici di interfaccia tra i componenti e alle modalità di ripartizione delle forze, in modo da garantire la precisione e la ripetibilità delle prove.

## **Abstract**

This thesis presents the design of an accessory for performing friction test on thrust ball bearings using a tribometer pin-on-disc. The main scope of this work is to develop a system able to simulate the operating condition of a thrust ball bearings, allowing to acquire reliable data about the friction coefficient and lubricant performance.

The major part of the work is the one related to the design of the structure, trying to identify the best layout for the assembly of the accessory on the tribometer and for his correct working.

Especially, the holder, that is used to house the tested component during the usual functioning of the tribometer, has in this case been replaced with a special structure that allows the ball bearings to be housed and the interface with the other parts of the tribometer.

The 3D modeling was carried out using SolidWorks software, paying particular attention to the choices regarding the geometry of the contact surfaces of each component and the methods of force distribution, in order to ensure the accuracy and repeatability of the tests.

# Indice

|   |    |
|---|----|
| Sommario .....  | 4  |
| Abstract .....  | 5  |
| Indice delle figure.....  | 8  |
| Introduzione .....  | 11 |
| 1. Banchi prova esistenti .....   | 13 |
| 1.1. Banco prova FAG-FE8 .....  | 13 |
| 1.1.1. Test di laboratorio di tipo FE8 per la valutazione della modalità di rottura del cuscinetto a crepe bianche (WEC) in acciaio 100Cr6 .....                    | 15 |
| 1.1.2. Inizio sotto superficiale delle inclusioni non metalliche considerato come uno dei meccanismi per la formazione delle crepe di incisione bianca (WEC).....   | 17 |
| 1.2. SNR – FEB 2 rolling bearing grease tester .....  | 17 |
| 1.3. Altri banchi prova .....   | 19 |
| 1.3.1. Progettazione di un banco di prova innovativo per il monitoraggio di cuscinetti industriali con un layout auto-bilanciante.....                              | 19 |
| 1.3.2. Sistema di carico assiale a doppio controllo PI commutabile per banco di prova dei cuscinetti del supporto dell'asse ad alta velocità di un EMU.....         | 23 |
| 1.3.3. Riduzione di attrito e usura multifase tramite nanoparticelle di rame .....  | 24 |
| 1.4. Influenza della gabbia sul momento di attrito nei cuscinetti assiali a sfere con carico ridotto che operano in condizioni di lubrificazione insufficiente..... | 26 |
| 2. Materiali e Metodi.....  | 28 |
| 2.1. Tribometro pin-on-disc .....   | 28 |
| 2.1.1. Struttura e funzionamento tribometro TRB Anton Paar .....  | 31 |
| 2.2. Cuscinetti assiali a sfere .....   | 33 |
| 2.2.1. Cuscinetti SKF .....   | 34 |
| 3. Impostazione progettuale .....   | 37 |
| 3.1. Scelta layout.....   | 37 |
| 3.2. Scelta della modalità di applicazione della forza.....   | 37 |
| 3.3. Interfaccia con il pin e funzionamento.....  | 40 |
| 3.4. Verifica forza ammissibile .....   | 43 |
| 4. Dettagli strumento.....  | 47 |
| 4.1. Albero centrale accessorio .....   | 50 |
| 4.2. Piastre.....   | 51 |
| 4.2.1. Piastra A.....   | 51 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.2.2. | Piastra B .....                         | 52 |
| 4.2.3. | Piastra C .....                         | 54 |
| 4.2.4. | Piastra D .....                         | 55 |
| 4.3.   | Protezioni per il calore .....          | 56 |
| 4.4.   | Molle .....                             | 57 |
| 4.5.   | Cella di carico .....                   | 58 |
|        | Conclusione.....                        | 59 |
|        | Bibliografia.....                       | 61 |
|        | Appendice A.....                        | 63 |
| A.1    | Sezione struttura cuscinetto 51104..... | 63 |
| A.2    | Sezione struttura cuscinetto 51103..... | 64 |
| A.3    | Sezione struttura cuscinetto 51102..... | 65 |
| A.4    | Sezione struttura cuscinetto 51101..... | 66 |
| A.5    | Sezione struttura cuscinetto 51105..... | 67 |
|        | Appendice B.....                        | 68 |

## Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1 - Banco prova FAG-FE8</i>  | 14 |
| <i>Figura 2 - Test FE8 su cuscinetti 81212</i>   | 16 |
| <i>Figura 3 - Dettagli test WSF</i>  | 17 |
| <i>Figura 4 - SNR – FEB 2 rolling bearing grease tester</i>  | 18 |
| <i>Figura 5 – Aspetto esterno del banco prova</i>  | 19 |
| <i>Figura 6 - Architettura del sistema</i>   | 20 |
| <i>Figura 7 - Schema dell'autobilanciamento interno delle forze all'interno del sistema del rotore</i>             | 22 |
| <i>Figura 8 - Struttura di un banco prova convenzionale</i>  | 23 |
| <i>Figura 9 - Struttura banco MAA</i>  | 24 |
| <i>Figura 10 - Schema banco prova per un cuscinetto assiale</i>  | 25 |
| <i>Figura 11 – Rappresentazione montaggio di un cuscinetto assiale a sfere sulla tavola rotante del tribometro</i> | 26 |
| <i>Figura 12 - Tribometro pin-on-disc</i>  | 28 |
| <i>Figura 13 - Schema funzionamento tribometro pin-on-disc</i>   | 29 |
| <i>Figura 14 - Tribometro pin-on-disc Anton Paar</i>   | 31 |
| <i>Figura 15 - Cuscinetto assiale a sfere SKF</i>  | 33 |
| <i>Figura 16 - Schema dimensioni in cuscinetto assiale a sfere</i>   | 35 |
| <i>Figura 17 - Asse centrale accessorio progettato</i>   | 38 |
| <i>Figura 18 – Asse porta mandrino tribometro pin-on-disc</i>  | 38 |
| <i>Figura 19 - Schema layout prima ipotesi</i>   | 39 |
| <i>Figura 20 - Schema layout scelto</i>  | 39 |
| <i>Figura 21- Struttura accessorio</i>   | 40 |
| <i>Figura 22 - Prima ipotesi interfaccia con pin tribometro</i>  | 41 |
| <i>Figura 23 - Prima ipotesi interfaccia con pin tribometro</i>  | 41 |
| <i>Figura 24 - Forcella di collegamento</i>  | 42 |
| <i>Figura 25 - Schema applicazione forza su forcella di collegamento</i>   | 42 |
| <i>Figura 26 - Schema distribuzione delle forze su braccio tribometro</i>  | 43 |
| <i>Figura 27 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51104</i>   | 44 |
| <i>Figura 28 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51103</i>   | 44 |
| <i>Figura 29 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51102</i>   | 44 |
| <i>Figura 30 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51101</i>   | 45 |
| <i>Figura 31 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51105</i>   | 45 |
| <i>Figura 32 - Sistema di regolazione posizione pin</i>  | 45 |
| <i>Figura 33 - Accessorio montato su tribometro pin-on-disc</i>  | 47 |
| <i>Figura 34 - Sezione accessorio con bollatura</i>  | 48 |
| <i>Figura 35 - Catalogo spine cilindriche</i>  | 48 |
| <i>Figura 36 - Dettaglio parte fissa della struttura</i>   | 49 |
| <i>Figura 37 - Piastra A cuscinetto 51104</i>  | 51 |
| <i>Figura 38 - Vista superiore e sezione piastra A cuscinetto 51104</i>  | 51 |
| <i>Figura 39 - Piastra B cuscinetto 51104</i>  | 52 |
| <i>Figura 40 - Vista superiore e sezioni piastra B cuscinetto 51104</i>  | 52 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 41 - Dettaglio collegamento piastra B con codolo forcella tramite vite a brugola .....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 42 - Viste e sezioni forcella di collegamento.....</i>                                     | <i>54</i> |
| <i>Figura 43 - Vista e sezione piastra C.....</i>  | <i>54</i> |
| <i>Figura 44 - Piastra D cuscinetto 51104.....</i>   | <i>55</i> |
| <i>Figura 45 - Vista frontale e sezione piastra D cuscinetto 51104 .....</i>                         | <i>54</i> |
| <i>Figura 46 - Vista superiore e sezione protezione inferiore.....</i>                               | <i>54</i> |
| <i>Figura 47 - Vista superiore e sezione protezione superiore.....</i>                               | <i>54</i> |
| <i>Figura 48 - Specifiche molle Leespring M02850-0300-05600-C .....</i>                              | <i>55</i> |
| <i>Figura 49 - Schema e geometria molla a tazza.....</i>   | <i>55</i> |
| <i>Figura 50 - Specifiche tecniche cella di carico.....</i>  | <i>56</i> |
| <i>Figura 51 - Schema cella di carico.....</i>   | <i>56</i> |



## Introduzione

Sul mercato sono disponibili diversi banchi prova per la caratterizzazione dei cuscinetti e dei lubrificanti usati nei cuscinetti. Sarebbe, però, utile sviluppare un metodo per poter eseguire prove su cuscinetti utilizzando uno strumento commerciale e largamente diffuso nei laboratori sperimentali, come ad esempio il tribometro pin-on-disc, evitando di dover realizzare appositi banchi prova, spesso ingombranti e costosi.

Inoltre, la misura della coppia d'attrito opposta dal cuscinetto alla rotazione dell'albero è diventata sempre più utile per valutare le perdite e le dissipazioni del sistema. Anche la misura della temperatura è rilevante nell'attività di progettazione e manutenzione, affinché gli operatori siano informati su eventuali comportamenti anomali delle macchine monitorate.

Lo scopo di questo elaborato è quello di riportare le fasi relative alla progettazione di un accessorio per eseguire prove di attrito su cuscinetti tramite un tribometro pin-on-disc.

Nello specifico sono stati presi in considerazione cuscinetti assiali a sfere. È stato scelto come riferimento il cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51104, ma l'accessorio è stato progettato in maniera tale da permettere, tramite alcuni pezzi intercambiabili, di effettuare prove anche su cuscinetti di taglia diversa appartenenti alla medesima serie.

In questo modo, effettuando il test direttamente su ogni taglia di cuscinetto si evita il verificarsi dell'effetto scala. Questo, infatti, rappresenta spesso una criticità nel danneggiamento dei materiali e nello studio della fatica, per cui una prova effettuata direttamente sulle dimensioni reali potrebbe avere effetti benefici sugli strumenti di misura e sulla struttura.

Come prima cosa è stata effettuata una ricerca su anteriorità presenti in letteratura scientifica ed eventuali brevetti relativi a banchi prova per cuscinetti o all'utilizzo di tribometri per effettuare test sui cuscinetti.

In seguito, sono stati valutati diversi schemi progettuali in modo da identificare il layout progettuale più adatto al montaggio dell'accessorio sul tribometro e al corretto funzionamento. Per fare questo, è stato preso come riferimento il metodo SNR-FEB2, il quale analizza il comportamento antiusura dei grassi lubrificanti nei cuscinetti

volventi soggetti a piccoli movimenti oscillatori di rotolamento e strisciamento a carico costante (false brinelling).

L'accessorio prevede una configurazione di test a due cuscinetti accoppiati, con carico applicato tramite un sistema vite-dado ed è dotato di una cella di carico con uscita analogica, per il monitoraggio del carico applicato durante le prove.

La realizzazione del disegno esecutivo CAD è stato realizzato tramite il software Solidworks, dove sono stati modellati i vari componenti del sistema.

# 1. Banchi prova esistenti

I banchi prova sono strumenti in grado di riprodurre le condizioni di lavoro del sistema che si vuole testare, capaci di fornire dati utili nella sua caratterizzazione in modo da consentire al progettista una più affidabile predizione del comportamento nelle poi effettive condizioni finali. In questo modo, quindi, si riescono ad ottenere dati senza la necessità di formulare un modello matematico, che, anche se complesso, non sempre risulta in grado di fornire risultati affidabili.

La grande vastità di applicazioni è garantita anche dal fatto che i banchi prova permettono di testare i componenti in condizioni variabili. Infatti, attraverso metodi dedicati, è possibile progettarli in modo da avere la possibilità di variare le grandezze durante il test e, installando opportuni sensori, effettuare le misurazioni dei parametri ricercati.

In questo contesto, sono state effettuate delle ricerche sui diversi banchi prova utilizzati per effettuare studi sui cuscinetti e, più in particolare, sull'eventuale applicazione di tribometri per realizzare simili prove. In letteratura, però, esistono solo poche attestazioni riguardanti l'utilizzo di tribometri per eseguire test sui cuscinetti, in quanto solitamente i tribometri pin-on disc vengono utilizzati per la valutazione di attrito e usura di superfici generiche.

Sono, invece, stati trovati diversi articoli riguardanti banchi prova realizzati per testare cuscinetti. Vengono riportati quelli inerenti agli studi di attrito, fatica da contatto e problemi di lubrificazione, in cui alcune caratteristiche come la struttura, l'applicazione della forza o la valutazione dei parametri, hanno rappresentato un interessante spunto.

## 1.1. Banco prova FAG-FE8

Il test FAG-FE8 è un particolare banco prova utilizzato per condurre esperimenti e test nel campo dei cuscinetti a rulli. È progettato per simulare le condizioni operative e le prestazioni dei cuscinetti, in particolare per quanto riguarda la fatica al contatto di rotolamento (RCF).

Fornisce un ambiente controllato per valutare le prestazioni dei cuscinetti e studiare specifiche modalità di guasto, come la formazione di WEC e WSF. Consente l'esame

di vari parametri e condizioni al fine di comprendere meglio i fattori che contribuiscono al guasto dei cuscinetti e sviluppare strategie per mitigarli.

Il banco prova è costituito da una configurazione in cui un cuscinetto, o un insieme di cuscinetti, viene montato e sottoposto a carichi controllati e movimento rotazionale. Durante il test, i cuscinetti sono stati sottoposti a fatica al contatto di rotolamento in condizioni specifiche, incluse pressioni di contatto controllate.

A differenza di altre indagini precedentemente effettuate, qui non si raggiungono pressioni di contatto massime relativamente alte (tra 3 e 5,6 GPa) ma fino a un massimo di 1200 MPa. È proprio questo che ha permesso l'esecuzione dell'esame di WSF in diverse condizioni di carico.

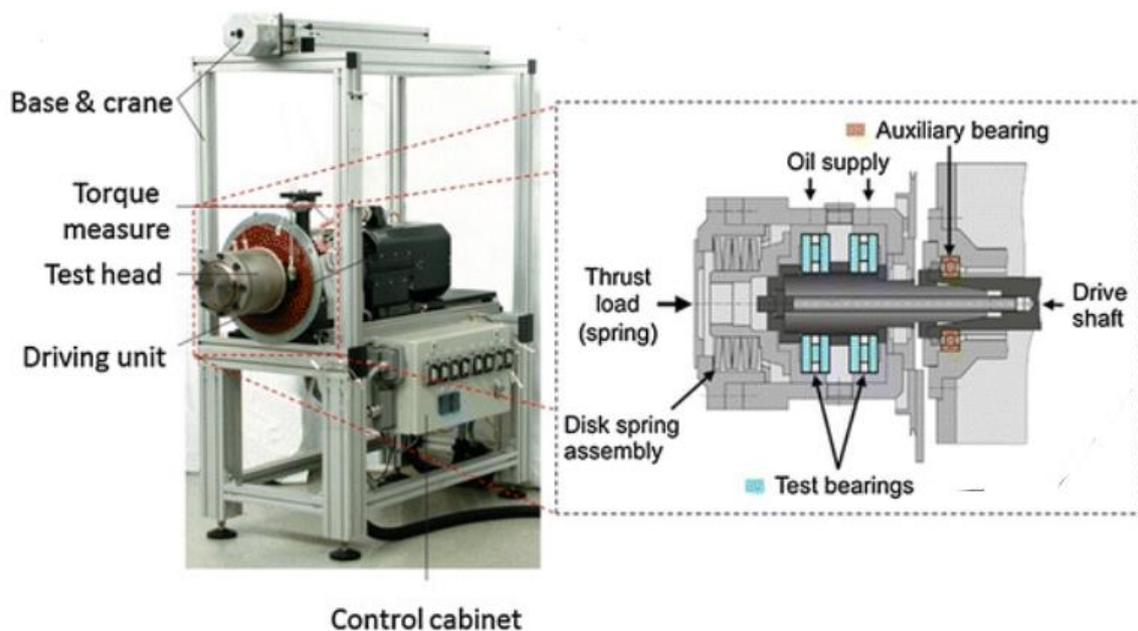


Figura 1- Banco prova FAG-FE8

Il banco prova risponde alle seguenti specifiche:

- Applicazione, mediante attuatori idraulici o meccanici, dei carichi assiali controllati sui cuscinetti, simulando le forze sperimentate nelle applicazioni reali; questo consente di valutare la capacità del cuscinetto di resistere e distribuire i carichi assiali.
- Applicazione, anche in questo caso mediante attuatori idraulici o meccanici, dei carichi radiali controllati sui cuscinetti, imitando i carichi incontrati durante il funzionamento; ciò consente di valutare la capacità del cuscinetto di gestire le forze radiali e mantenere una rotazione fluida.

- Movimento rotazionale del cuscinetto a una velocità e una direzione specificate, replicando il movimento rotazionale sperimentato nelle applicazioni pratiche, per lo studio delle prestazioni del cuscinetto in condizioni dinamiche.
- Sistema di lubrificazione per garantire la corretta lubrificazione dei cuscinetti durante il test. Questo aiuta a valutare le prestazioni del cuscinetto in diverse condizioni di lubrificazione e valutare la sua resistenza all'usura e all'attrito.
- Controllo della temperatura per simulare le temperature operative incontrate dai cuscinetti nelle applicazioni reali, consentendo lo studio degli effetti termici sulle prestazioni del cuscinetto e la valutazione dei meccanismi di guasto legati alla temperatura.
- Sistema di acquisizione dati tramite sensori e strumentazione per misurare vari parametri come carico, temperatura, velocità, vibrazioni e coppia.

Sottoponendo i cuscinetti a carichi, velocità, condizioni di lubrificazione e fattori ambientali controllati, il banco prova FAG-FE8 fornisce un ambiente controllato per valutare il comportamento, le prestazioni e la durata del cuscinetto e/o del lubrificante.

### **1.1.1. Test di laboratorio di tipo FE8 per la valutazione della modalità di rottura del cuscinetto a crepe bianche (WEC) in acciaio 100Cr6**

Questo articolo, realizzato dagli scienziati H.K. Danielsen, F. Gutiérrez Guzmán, M. Muskulus, B.H. Rasmussen, M. Shirani, D. Cornel, P. Sauvage, J. Wu, R. Petrov, G. Jacobs [1] presenta dei test effettuati mediante banchi di prova FE8 su cuscinetti assiali a rulli cilindrici in acciaio martensitico 100Cr6 temprato.

Sono state effettuate simulazioni ed esperimenti in diverse condizioni di carico, compresi test con diverso numero di rulli e test con carichi e velocità dinamiche, per valutare la correlazione tra i parametri analizzati e la rottura WEC (White Etching Cracks). Questa consiste in una modalità di rottura aggressiva e imprevedibile che colpisce particolarmente i cuscinetti nel settore dell'energia eolica.

I test presentati in questo lavoro sono stati condotti utilizzando cuscinetti assiali a rulli cilindrici di tipo 81212 in tre banchi di prova di tipo FE8 di laboratorio. A differenza del sistema molla FE8 standard a carico costante, qui due dei banchi prova sono stati incrementati con un sistema di carico idraulico capace di fornire forze fino a 100 kN, raggiungendo cicli di carico di 50 kN/s e di velocità di 500 rpm/s.

Questi includono servomotori elettrici con velocità regolabili in modo continuo, compreso un cambio a 2 velocità per 7,5 rpm - 4500 rpm, con arresto automatico del test in caso di superamento dei limiti di temperatura, vibrazione o tempo di esecuzione.

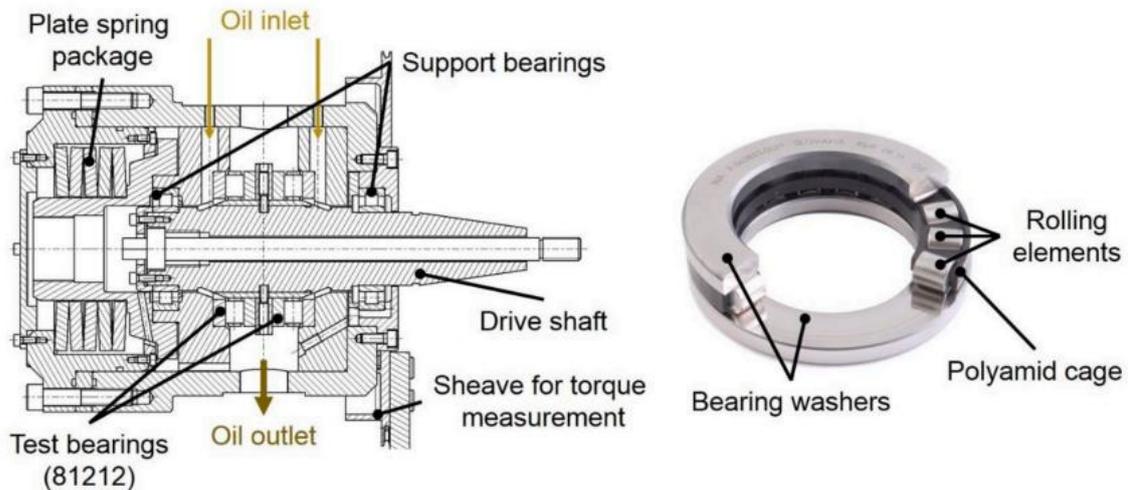


Figura 2 - Test FE8 su cuscinetti 81212

Tutti i banchi di prova sono dotati di accelerometri per rilevare le vibrazioni causate dai danni al cuscinetto. La caratterizzazione dei danni è stata effettuata utilizzando la microscopia ottica e la scansione ad ultrasuoni.

Un altro banco di prova con pacchetto di molle a lamina staticamente caricato è stato utilizzato per condurre test a carico costante. La velocità dell'albero è stata mantenuta costante durante il test a 300 rpm, tranne durante i test dinamici. La valutazione delle condizioni di lubrificazione è stata effettuata calcolando lo spessore specifico del film di lubrificazione  $\lambda_{min}$ .

Durante la scansione, i valori di picco dell'eco sono misurati in due finestre temporali elettroniche. La prima finestra copre la sezione trasversale del cuscinetto, mentre la seconda finestra copre l'eco di ritorno dalla superficie interna del cuscinetto. La frequenza del trasduttore è impostata su 50 MHz e si muove nelle coordinate x e y con una risoluzione di 0,200 mm (limite -6 dB) per ogni misurazione in entrambe le direzioni, che corrisponde alla dimensione approssimativa del WEC che dovrebbe essere facilmente rilevabile.

I test con carichi costanti mostrano una bassa influenza del carico e dimostrano che una rottura WEC può verificarsi sia prematuramente che dopo il superamento della vita utile nominale. Le condizioni dinamiche, invece, non hanno accelerato la rottura WEC e solo i rulli (non le rondelle) sono stati influenzati dalla rottura WEC in condizioni di carico dinamico.

### 1.1.2. Inizio sotto superficiale delle inclusioni non metalliche considerato come uno dei meccanismi per la formazione delle crepe di incisione bianca (WEC)

La formazione di cricche di incrinamento bianche (WEC) sotto la superficie di contatto nei cuscinetti a rulli di acciaio causa una modalità di rottura precoce chiamata distacco della struttura bianca (WSF).

Gli studiosi M.H. Evans, A.D. Richardson, L. Wang, R.J.K. Wood, W.B. Anderson [2] del centro nazionale di tribologia avanzata di Southampton ha condotto diversi test di fatica al contatto di rotolamento sui cuscinetti utilizzando un banco prova FAG-FE8. Per la prima volta, in questo caso, è stata utilizzata la sezionatura seriale per mappare WEC nella loro interezza.

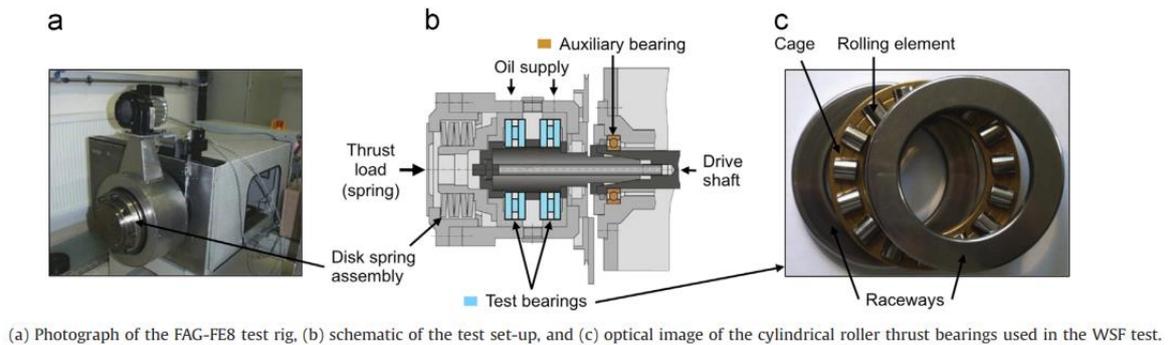


Figura 3 - Dettagli test WSF

È stato effettuato un test RCF per indagare WSF in condizioni non soggette a carica di idrogeno. Sono stati testati contemporaneamente due cuscinetti assiali a rulli cilindrici e l'applicazione del carico è stata fornita tramite due molle a tazza. I cuscinetti sono composti da 15 elementi di rotolamento in acciaio montati su una gabbia in ottone tra due piste di rotolamento in acciaio; sia gli elementi di rotolamento che le piste di rotolamento sono temprati martensiticamente. Le misurazioni di rugosità sono state eseguite utilizzando un profilometro a contatto e sono state effettuate sei misurazioni per ottenere una media per ogni caso.

## 1.2. SNR – FEB 2 rolling bearing grease tester

Il SNR – FEB 2 (Signal-to-Noise Ratio - February 2) Rolling Bearing Grease Tester è un dispositivo utilizzato per valutare la qualità dei grassi lubrificanti utilizzati nei cuscinetti a rotolamento. Questo tester analizza il comportamento antiusura dei grassi

lubrificanti nei cuscinetti volventi soggetti a piccoli movimenti oscillatori di rotolamento e strisciamento e carico costante (false brinelling).

La procedura consiste nelle seguenti fasi:

- Pulire, pesare e lubrificare i cuscinetti prova
- Montare i cuscinetti nel banco prova
- Impostare i parametri di test e iniziare il test
- Smontare, pulire e pesare i dischi dell'albero e dell'alloggiamento dei cuscinetti dopo la fine della prova
- Documentare le perdite di peso, l'aspetto degli elementi del cuscinetto e valutare il grasso lubrificante.

Come risultato del test vengono poi analizzati la perdita di peso dei cuscinetti e la profondità delle scanalature.

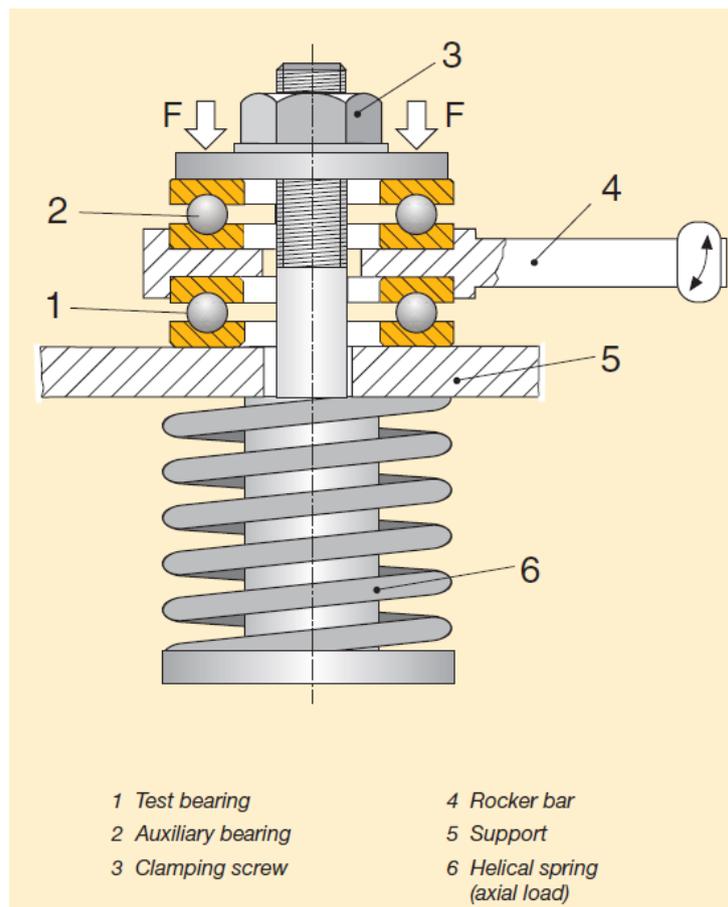


Figura 4 - SNR – FEB 2 rolling bearing grease tester

Come si può osservare dall'immagine, in questo caso la forza sulla struttura è applicata tramite un sistema vite-dado e il collegamento con la barra che garantisce il movimento oscillatorio è costituito da una piastra interposta tra i due cuscinetti.

## 1.3. Altri banchi prova

Vengono in questa sezione riportati ulteriori banchi prova esistenti in letteratura, realizzati per effettuare delle prove su cuscinetti.

### 1.3.1. Progettazione di un banco di prova innovativo per il monitoraggio di cuscinetti industriali con un layout auto-bilanciante

I professori del Politecnico di Torino Eugenio Brusa, Cristiana Delprete, Lorenzo Giorio, Luigi Gianpio Di Maggio e Vittorio Zanella hanno sviluppato insieme al centro SKF di Moncalieri una innovativa architettura di banco prova per cuscinetti, basata sul nuovo concetto di "scatola autosufficiente". L'attività di monitoraggio è applicabile contemporaneamente a un insieme di quattro cuscinetti di dimensioni medie, sottoposti all'applicazione indipendente di carichi radiali e assiali al fine di simulare il comportamento delle reali macchine industriali. La "scatola autosufficiente" porta all'autobilanciamento delle azioni all'interno del sistema del rotore e garantisce la possibilità di installare cuscinetti di varie dimensioni cambiando adattatori meccanici.

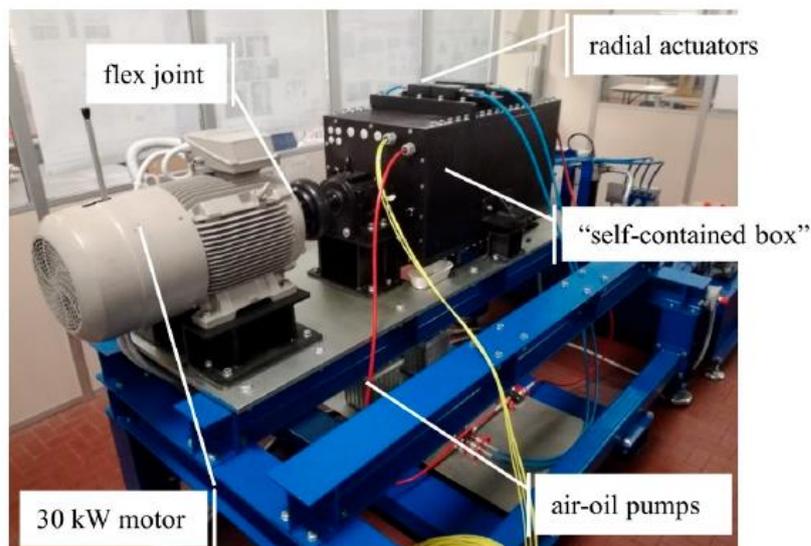


Figura 5 – Aspetto esterno del banco prova

Il banco prova è dotato di strumentazione adeguata a sviluppare procedure e strumenti efficaci per il monitoraggio interno ed esterno del sistema, con lo scopo di testare il cuscinetto a diverse velocità di rotazione, anche durante la dinamica transitoria, mentre il rotore sta accelerando, decelerando o si trova in regime subcritico o supercritico.

Vengono monitorati i parametri tipici di funzionamento, quali carico, velocità, temperatura, ampiezza e frequenza delle vibrazioni e, in alcuni casi, il rumore. Il

sistema di monitoraggio raccoglie i dati durante il funzionamento, attraverso alcuni sensori, e quindi trasferisce le informazioni correlate a un sistema di acquisizione, dove inizia l'elaborazione, avvalendosi di nuove tecnologie come il machine learning e gli algoritmi di deep learning. Vengono quindi eseguiti il monitoraggio, la prognosi e la diagnosi.

Consente di testare almeno due coppie di cuscinetti industriali. La velocità di rotazione varia da alcune centinaia a circa 2500 giri al minuto, con temperature comprese tra -40 °C e 120 °C. I carichi applicati sono estremamente variabili, fino a diverse centinaia di kN. Il banco è progettato per cuscinetti con un diametro esterno compreso tra 200 mm e 450 mm e deve includere due set di cuscinetti, con azionamento indipendente lungo le direzioni radiale e assiale. Il sistema deve essere modulare e sicuro, con protezioni per gli operatori e prevede una adeguata lubrificazione per evitare il surriscaldamento e la contaminazione. I sensori devono essere compatibili con il layout e facilmente manutenibili e calibrabili.

### *Architettura del sistema e sviluppo*

Facendo una panoramica dei layout tipici utilizzati per i sistemi di analisi dei cuscinetti, si può notare come la maggior parte dei banchi prova mirino a monitorare la velocità di rotazione, le vibrazioni, il rumore e solo raramente la temperatura. Per analizzare le differenze tra i diversi banchi si possono considerare come caratteristiche principali il montaggio dei cuscinetti e il monitoraggio del carico e della coppia di attrito, quando viene applicata. Un tipico layout è costituito nel seguente modo.

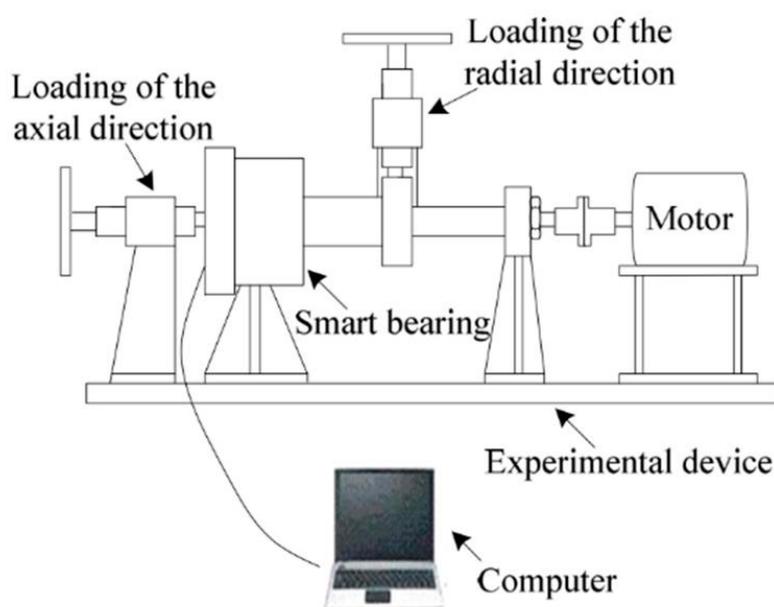


Figura 6 - Architettura del sistema

Il rotore è orizzontale e vi è un solo albero principale. La coppia e la rotazione sono applicate attraverso un giunto meccanico da un motore elettrico. Vi sono due cuscinetti vincolati all'albero; uno supporta il rotore mentre il secondo viene monitorato. Le azioni sono applicate al sistema rotore-albero tramite due attuatori esterni, lungo le direzioni radiale e assiale. In questo modo si ha una struttura compatta con il minor numero di elementi possibile.

In ogni caso i cuscinetti sono indirettamente caricati lungo la curvatura dell'albero. Sul cuscinetto di supporto si può applicare un carico rilevante; se viene richiesto un carico elevato sul cuscinetto analizzato, viene richiesta sull'albero una sostanziale azione lungo la direzione radiale, che influenza la risposta complessiva del sistema. I carichi sono, quindi, trasmessi alla piattaforma e il sistema potrebbe ricevere alcune eccitazioni dalla piattaforma stessa. Questa configurazione può essere definita come rotore mono assiale con due cuscinetti e controllo della velocità.

Le principali differenze tra i layout, simile a quello classico citato in precedenza, consistono nella direzione e nell'ampiezza del carico, un diverso approccio nell'applicazione della forza radiale, il numero e posizione dei cuscinetti, la classificazione di questi come di supporto o da monitorare, le proprietà del motore e la strategia di controllo.

Un'altra tipologia di banco è invece caratterizzata dalla presenza di un albero principale, supportato dai cuscinetti controllati, a cui viene trasmessa la potenza tramite un albero di potenza, alimentato da un motore. Solitamente questa configurazione consente di applicare degli squilibri all'albero principale tramite alcune pulegge, e di introdurre alcuni disturbi dinamici di vario genere, per eccitare i cuscinetti del sistema rotore e testare le capacità di monitoraggio.

Per soddisfare le richieste dei clienti, gli autori hanno progettato un banco prova innovativo, per implementare il monitoraggio attivo dei cuscinetti. Lo scopo è superare alcune delle limitazioni delle precedenti generazioni di banchi prova, relative alle condizioni di carico, velocità di rotazione e dimensione dei cuscinetti. L'obiettivo principale è testare in sicurezza il cuscinetto non all'interno di un vero e proprio impianto industriale, ma simulando le reali condizioni operative.

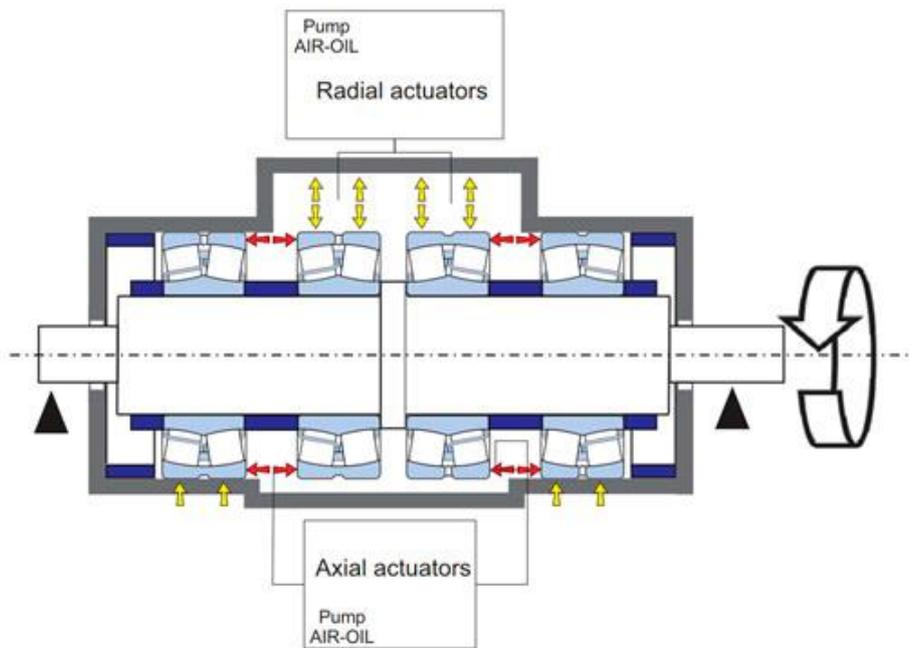


Figura 7 - Schema dell'autobilanciamento interno delle forze all'interno del sistema del rotore

La "scatola autonoma" è un innovativo dispositivo di test che consente di testare almeno due coppie di cuscinetti industriali. Le reazioni dei cuscinetti vengono bilanciate direttamente dalla scatola. È assicurato una sorta di effetto di disaccoppiamento tra i cuscinetti monitorati e quelli di supporto; il che porta a rilevare il comportamento dei cuscinetti tramite sensori, come nel sistema reale, con le stesse dimensioni dei cuscinetti e una contaminazione minima dei segnali rilevati. La "scatola autonoma" consente anche di applicare grandi carichi, sia in direzione radiale che assiale, tramite una serie di attuatori idraulici.

Ci sono, infatti, quattro attuatori idraulici posizionati sulla parte superiore della scatola, che agiscono sui cuscinetti centrali delle due coppie, esercitando una pressione radiale fino a 200 kN di carico statico. La scatola stessa reagisce e mantiene il sistema in equilibrio, con i cuscinetti esterni delle coppie che vengono caricati tramite l'albero e premuti contro la faccia inferiore della scatola.

La scatola ha piastre a basso attrito all'interno delle pareti laterali per facilitare lo scorrimento degli adattatori cuscinetto-scatoia fissati all'anello esterno di ciascun cuscinetto.

Viene utilizzato un sensore di carico per misurare la coppia di attrito opposta dai cuscinetti alla rotazione dell'albero. Gli attuatori idraulici sono alimentati da pompe aria-olio che generano una pressione fino a 500 bar.

La scatola è progettata per ospitare cuscinetti con un diametro esterno fino a 420 mm e un diametro dell'albero di 200 mm. I segnali dei sensori e delle celle di carico vengono raccolti da un sistema di acquisizione dati.

Tra i vantaggi di questo banco prova si hanno: carichi indipendenti sui cuscinetti, test simultaneo di quattro cuscinetti, alta modularità e misurazione diretta della coppia di attrito.

### 1.3.2. Sistema di carico assiale a doppio controllo PI commutabile per banco di prova dei cuscinetti del supporto dell'asse ad alta velocità di un EMU

Un banco prova per cuscinetti di unità multiple elettriche ad alta velocità (HS-EMU), che simula le condizioni operative dei cuscinetti delle scatole assiali, è un importante dispositivo per la valutazione delle prestazioni.

A causa dei pesanti carichi di lavoro ad alta velocità, durante i test dei cuscinetti industriali delle scatole assiali HS-EMU su un banco prova convenzionale sono comunemente riscontrati due problemi: un carico assiale altamente sbilanciato sui cuscinetti di supporto ed effetti sfavorevoli di gioco sul cuscinetto in prova.

Per questo è stato sviluppato un controllore proporzionale-integrale (PI) duale con un commutatore soft logico fuzzy selezionabile. La strategia di controllo può essere facilmente implementata su un programmabile controllore logico industriale, in quanto si basa solo su valori di forza misurati e richiede una piccola quantità di calcolo.

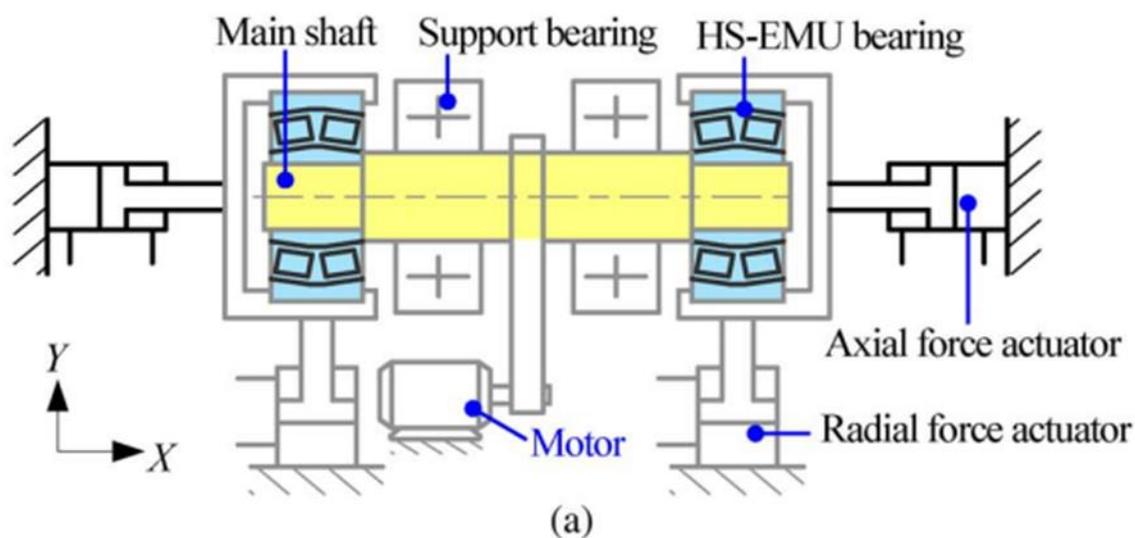


Figura 8 - Struttura di un banco prova convenzionale

### *MAA test (con attuatore monoassiale)*

La struttura comprende un attuatore idraulico asimmetrico collegato a un meccanismo a quattro bracci, che applica un'azione assiale alle scatole dei cuscinetti. Le parti meccaniche sono modellate come tre corpi rigidi con le relative masse: l'albero, il cilindro combinato e il meccanismo a quattro bracci, il pistone e le parti mobili ad esso collegate. La dinamica del banco di prova MAA è caratterizzata da equazioni che coinvolgono gli spostamenti dell'attuatore e lo spostamento dell'albero.

Il banco di prova MAA riduce i carichi assiali sui cuscinetti di supporto rispetto al banco di prova convenzionale. Questa riduzione consente di raggiungere velocità di prova più elevate, consentendo la simulazione delle condizioni operative dei treni ad alta velocità. Il banco di prova MAA è anche sicuro, poiché i cuscinetti di supporto non sono soggetti alle forze dell'attuatore e sono esposti solo alle forze dinamiche dei cuscinetti.

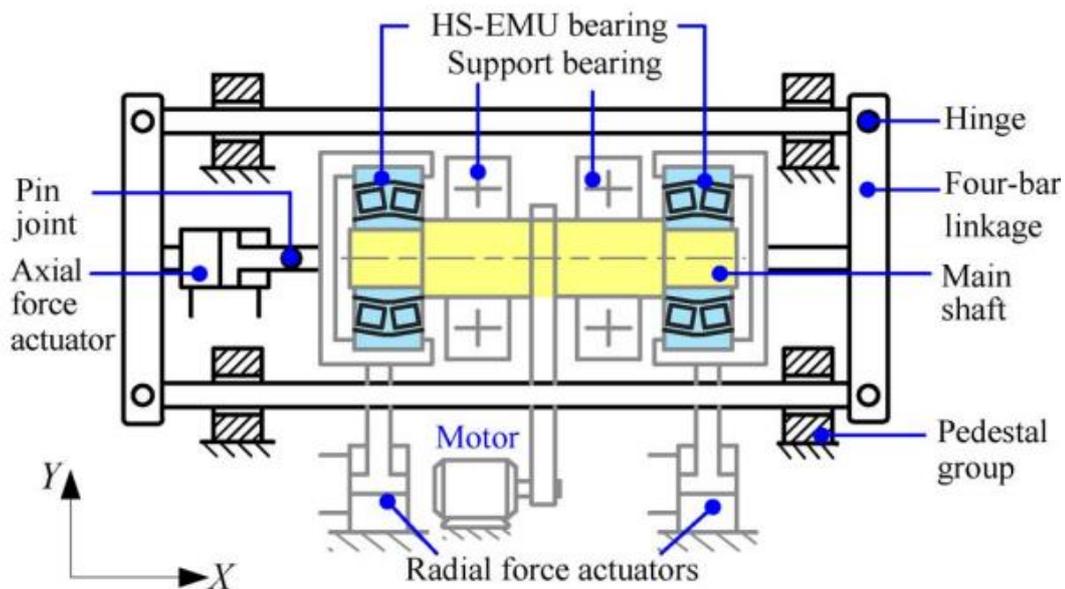


Figura 9 - Struttura banco MAA

### **1.3.3. Riduzione di attrito e usura multifase tramite nanoparticelle di rame**

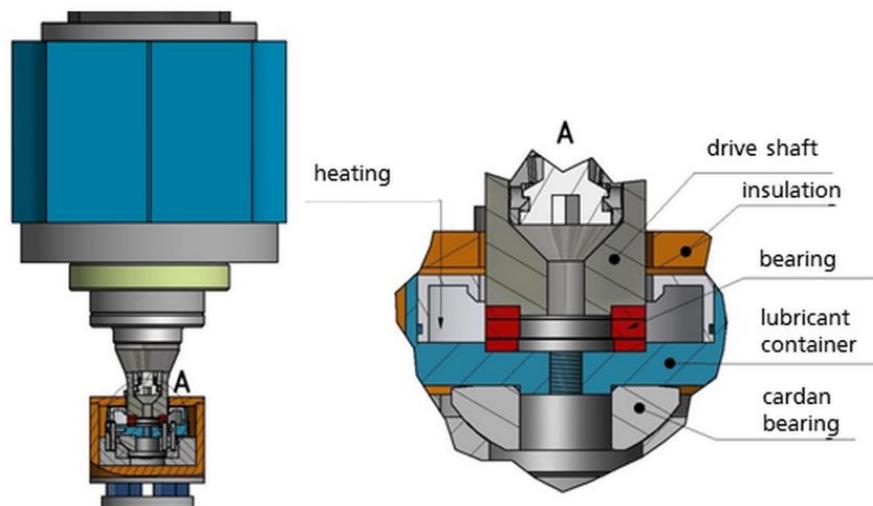
Nanoparticelle di rame finemente disperse sono state aggiunte come additivo agli oli motore completamente formulati. L'additivo di rame era sotto forma colloidale, con un nucleo interno di atomi di  $\text{Cu}_2^+$  coperti da tensioattivi per formare miscele inverse stabili completamente disperdibili nell'olio base.

Il processo tribologico per formare film protettivi sulla superficie del metallo è composto da tre fasi.

La fase I può essere considerata un processo fisico che coinvolge l'accumulo di molecole polari per assorbimento al fine di produrre un film modificatore di attrito, mentre le fasi II e III devono essere trattate come processi mecanochimici che comprendono una combinazione di reazioni redox e formazione di un terzo corpo.

Le prestazioni tribologiche sono state indagate utilizzando la microscopia a forza atomica, un microtribometro, un tribometro a perno su disco in combinazione con misurazioni continue e ad alta risoluzione dell'usura mediante tecnica dei radionuclidi e stress ad alta pressione in un banco prova di cuscinetti a rulli di spinta. Inoltre, la nanostruttura dell'additivo è stata caratterizzata mediante microscopia a forza atomica. Infine, la composizione chimica della superficie metallica è stata analizzata utilizzando la spettroscopia fotoelettronica.

È stato utilizzato un banco di prova personalizzato per simulare l'attrito di rotolamento a pressioni di contatto più elevate su cuscinetti assiali a rulli 81104-TV (Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Germania).



*Figura 10 - Schema banco prova per un cuscinetto assiale*

La capacità massima di carico è di 10 kN a una velocità di rotazione di 1500 rpm. Durante il test del cuscinetto, sono stati registrati il momento di attrito, la temperatura del lubrificante, il carico, la velocità di rotazione, lo spostamento e la durata.

I test sono stati eseguiti con carico e velocità di scorrimento costante, e sono state ottenute serie regolari di curve di Stribeck con una forza normale di 8 kN, corrispondente a uno stress di contatto massimo di Hertz di 1930 MPa.

Il banco di prova è stato operato per una durata di 100 ore a 700 rpm. L'olio lubrificante utilizzato era Chevron Taro 30 DP 40, con una temperatura mantenuta costante a 115 °C. Il cuscinetto è composto da due rondelle in acciaio 100Cr6 ed elementi del cuscinetto a rulli con un limite di fatica di 800 MPa e uno sforzo di snervamento di 1200 MPa.

#### **1.4. Influenza della gabbia sul momento di attrito nei cuscinetti assiali a sfere con carico ridotto che operano in condizioni di lubrificazione insufficiente**

In questo articolo viene riportata una analisi della coppia di attrito in un cuscinetto a sfere reggispinta modificato che opera con un carico assiale molto basso in condizioni di lubrificazione insufficiente, utilizzando solo tre sfere e una gabbia. Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando la metodologia di rallentamento della rotazione.

I risultati hanno evidenziato l'influenza dell'attrito di scorrimento tra la gabbia e le sfere sulla coppia di attrito totale. Si è concluso che a carichi molto bassi, l'attrito tra la gabbia e le sfere in un cuscinetto a sfere reggispinta contribuisce in modo significativo alla coppia di attrito totale.

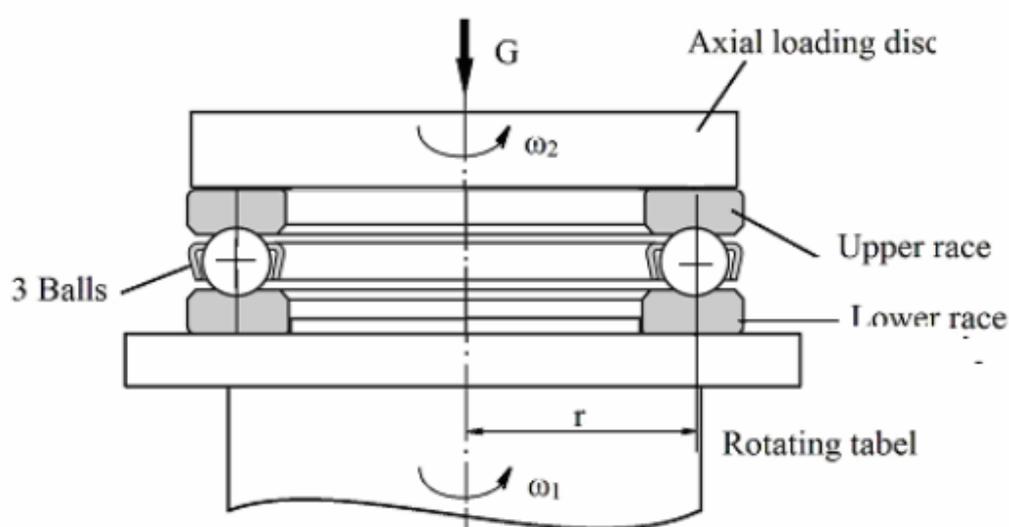


Figura 11 – Rappresentazione montaggio di un cuscinetto assiale a sfere sulla tavola rotante del tribometro

Viene proposto un modello analitico per un cuscinetto assiale a sfere modificato, che ha solo tre sfere posizionate a 120 gradi e una gabbia. La pista inferiore è montata sul tavolo rotante del tribometro CETR UMT-2. Sulla gabbia superiore è attaccato un disco di peso noto, indicato con G in figura 11.

Per il modello analitico è stato utilizzato il metodo di rallentamento della rotazione. Quindi, imponendo una velocità angolare costante sia al tavolo rotante che alla pista inferiore del cuscinetto assiale a sfere, la pista superiore e il disco raggiungono, dopo un po' di tempo, una velocità angolare uguale a quella della pista inferiore, a causa dell'attrito tra le sfere e le due piste. Successivamente, il tavolo rotante e la pista inferiore vengono improvvisamente fermati, mentre la pista superiore inizia un movimento di decelerazione fino a fermarsi completamente.

Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando il Tribometro CETR UMT 2 del laboratorio tribologico della facoltà di Ingegneria Meccanica di Iasi, in Romania. È stato montato un cuscinetto assiale a sfere 51100 sul tavolo rotante del tribometro, con un disco di peso noto attaccato alla pista superiore per determinare il carico assiale.

Per misurare il momento di attrito di rotolamento nel cuscinetto assiale a sfere, è stato utilizzato il metodo di rallentamento della rotazione sviluppato dagli autori.

Sono stati condotti due tipi di esperimenti: uno utilizzando solo tre sfere senza la gabbia e l'altro utilizzando tre sfere montate in una gabbia di acciaio a 120 gradi. Gli esperimenti sono stati effettuati in condizioni asciutte con una velocità di rotazione della pista superiore compresa tra 60 e 210 giri al minuto.

Durante gli esperimenti, è stata monitorata la posizione angolare totale della pista superiore e il tempo relativo allo specifico processo di decelerazione del metodo di rallentamento della rotazione.

## 2. Materiali e Metodi

Alla base del lavoro di questa tesi vi è l'analisi di uno strumento utilizzabile per la caratterizzazione dell'attrito e dell'usura dei materiali e una sua possibile implementazione per estendere il suo utilizzo anche a componenti più complessi.

In questo capitolo verrà, perciò, introdotto lo strumento in esame e le modifiche che hanno portato alla progettazione dell'accessorio.

### 2.1. Tribometro pin-on-disc

La caratterizzazione dell'attrito e dell'usura dei materiali (tipicamente i tassi di usura e la resistenza all'usura) viene eseguita utilizzando vari tipi di tribometri. Tra questi i tribometri pin-on-disc sono comunemente utilizzati nei laboratori di ricerca. La popolarità del metodo è dovuta alla sua relativa semplicità ed è applicato per studiare in modo semplificato una varietà di materiali e di applicazioni reali: dai contatti a secco di bulloni e viti al contatto ruota-rotaia delle ferrovie fino al contatto lubrificato di impianti biologici. Il test in genere consente di testare diverse modalità di movimento, come quelle unidirezionali, a sfregamento e, recentemente, anche altri modelli di movimento complessi.



Figura 12 - Tribometro pin-on-disc

Schematicamente, il test "pin on disc" è rappresentato nella figura di seguito. Il pin stazionario viene premuto contro il disco rotante sotto un carico prestabilito e può avere qualsiasi forma. Tuttavia, le configurazioni più comuni utilizzano pin a punta sferica (sfera o lente) o cilindrica. Per la facilità di allineamento si preferiscono pin a estremità sferica mentre i puntali piatti sono tipicamente soggetti a disallineamenti che possono portare a carichi non uniformi e difficoltà di analisi teorica. Durante il test vengono monitorate continuamente la forza di attrito, lo spostamento verticale del pin e la temperatura.

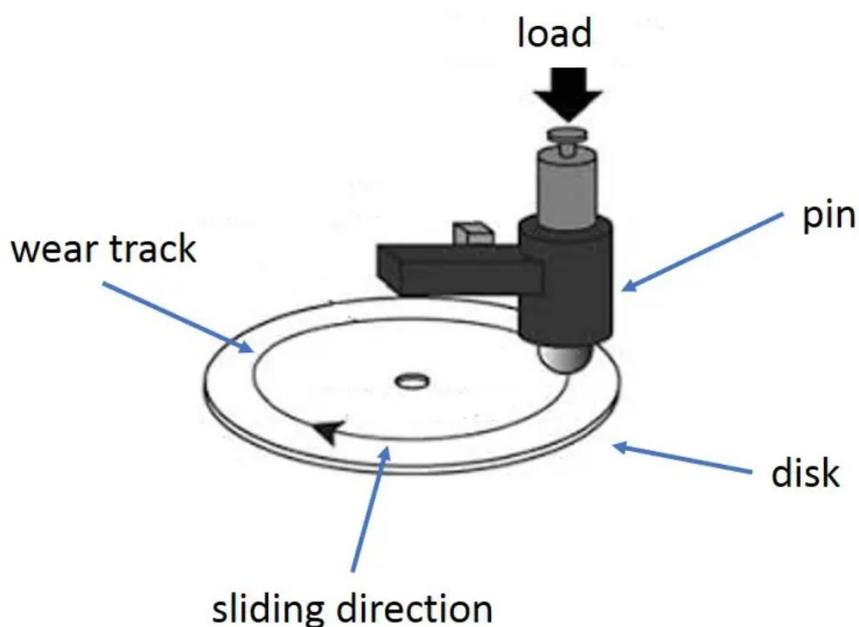


Figura 13 - Schema funzionamento tribometro pin-on-disc

Il coefficiente di attrito  $C_f$  viene misurato come il rapporto tra la forza tangenziale  $F_T$  risultante dal contatto e la forza  $F_N$  applicata sull'albero rotante:

$$C_f = \frac{F_T}{F_N} \quad (2.1)$$

La forza tangenziale può essere misurata sia attraverso una misurazione della coppia sull'albero, sia direttamente attraverso la misurazione della forza agente sul perno.

Il test, inoltre, può essere eseguito in condizioni sia secche che lubrificate. Nel caso di contatto lubrificato, il pin è tipicamente immerso nel bagno del lubrificante.

Oltre alle caratteristiche già citate, il test può essere implementato in modo da valutare anche il volume di usura e l'evoluzione della ruvidezza superficiale, o tramite microscopia elettronica a scansione o spettroscopia a raggi X la dispersione di energia per l'analisi della composizione chimica/delle particelle, dei tribofilm, e l'analisi

microstrutturale. Se il test è stato eseguito in condizioni lubrificate, anche l'olio può essere analizzato per determinare la dimensione delle particelle d'usura e il deterioramento degli additivi.

Solitamente, un tribometro pin-on-disc è composto dai seguenti componenti:

- Perno: un piccolo campione del materiale da testare, generalmente cilindrico.
- Disco: un campione del materiale contro cui il perno scorre, generalmente piatto e rotante.
- Sistema di carico: applica una forza predefinita al perno per simulare le condizioni di contatto reali, può essere attivo (con attuatore) o passivo (mediante peso morto)
- Sistema di misurazione: misura il coefficiente di attrito tra il perno e il disco, la coppia motrice e l'usura dei materiali.
- Software di controllo: gestisce i parametri di test e acquisisce i dati.

### **Fattori importanti e condizioni di prova**

Durante la preparazione e l'impostazione del test, bisogna tenere in considerazione diversi parametri, in modo tale da rappresentare al meglio il contatto tribologico reale e ottenere risultati verosimili. Tra questi:

- *Forma del pin.*

Il test "ball on disc" utilizza un pin a sfera o una lente, ma anche pin piatti o a forma di chip.

- *Allineamento del pin.*

Se il piolo è a punta piatta è necessario assicurare l'allineamento, altrimenti si verifica un carico non uniforme con conseguente usura non uniforme e possibilmente condizioni sovraccariche. Per di più, bisogna controllare che i bordi degli spezzoni piatti non siano affilati, altrimenti potrebbe verificarsi la scheggiatura.

- *Materiale del pin.*

La scelta del materiale del pin è anch'essa molto importante. Infatti, tipicamente il comportamento tribologico per la stessa coppia di materiali è diverso a seconda di quale materiale viene utilizzato per il pin e quale materiale viene utilizzato per il disco. Questo è particolarmente vero nel caso del contatto tra materiali 'morbidi' e 'duri'. La

differenza deriva dal fatto che l'usura avviene principalmente sul materiale più morbido.

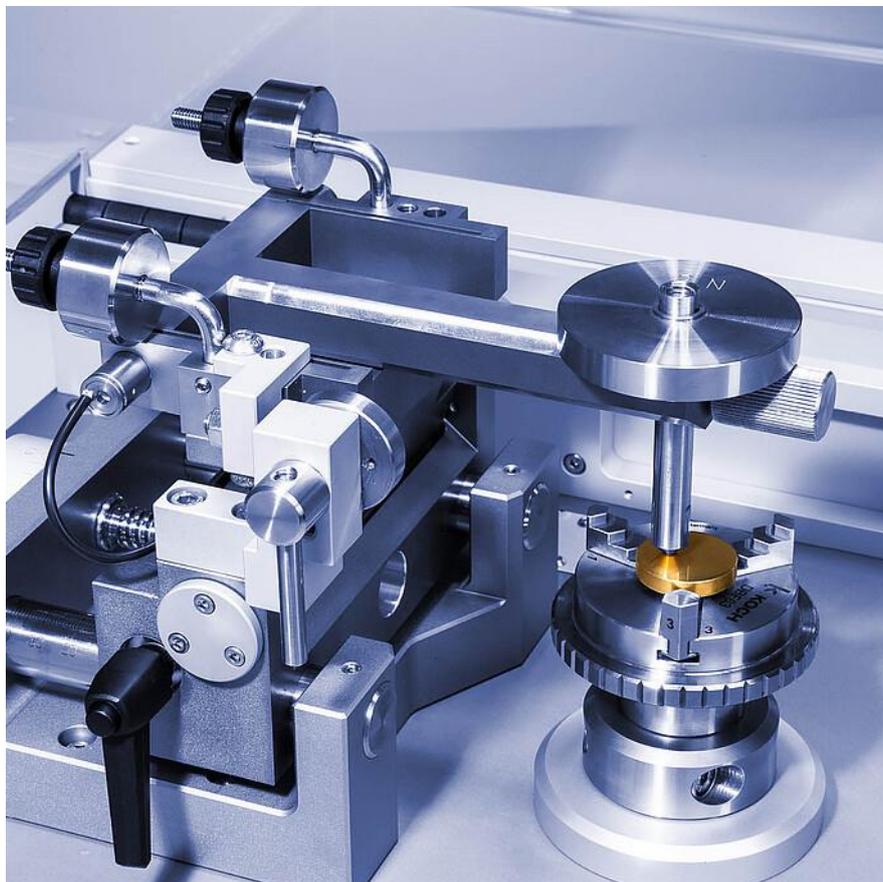
Nel caso del test “ball on disc”, se la sfera è più morbida si usurerà più velocemente e formerà un contatto piano su piano con un profilo di pressione significativamente diverso da quello iniziale; se il disco è più morbido, allora si formerà una scanalatura sul disco e si verificherà l'usura da aratura.

- *Posizione del pin.*

È possibile posizionare il pin sulla parte superiore del disco. Tuttavia, in molti casi il pin viene premuto contro il disco dal basso. Ciò di solito viene fatto per evitare che le particelle di usura ritornino in contatto una volta formate o per raccogliere le particelle per ulteriori successive analisi.

### **2.1.1. Struttura e funzionamento tribometro TRB Anton Paar**

Lo strumento oggetto di studio in questa tesi è il tribometro pin on disc TRB Anton Paar, presente all'interno del laboratorio di automazione e robotica del dipartimento DIMEAS del Politecnico di Torino.



*Figura 14 - Tribometro pin-on-disc Anton Paar*

Si tratta di è uno strumento ampiamente utilizzato in ambito scientifico e industriale per studi di caratterizzazione dei materiali, test di lubrificazione e sviluppo di rivestimenti protettivi. Il dispositivo prevede l'utilizzo di un pin che viene premuto contro un disco rotante e che, durante il test, esercita una forza sulla superficie del disco, generando attrito e usura.

### **Funzionamento**

Il disco del materiale che si vuole testare viene agganciato su un supporto a un mandrino messo in rotazione tramite un motore elettrico, la cui velocità può essere costantemente controllata.

A questo punto, quando il pin e il disco vengono portati a contatto e messi in movimento relativo, si generano forze di attrito che resistono al movimento relativo tra di essi.

Prima di eseguire il test, è necessario impostare i parametri di prova desiderati, che possono includere la velocità di rotazione del disco, la velocità di scorrimento del pin, la forza di carico, il tempo di test e altre variabili pertinenti. Il braccio del tribometro, inoltre, è dotato di un sistema di bilanciamento delle forze che consente di applicare una pressione controllata e uniforme tra il pin e il disco durante il test, e che viene regolata in base alle specifiche esigenze del test e alle condizioni di prova desiderate.

Una volta impostati i parametri, il test viene avviato. Il pin e il disco vengono portati a contatto e messi in movimento relativo, si generano forze di attrito che resistono al movimento relativo tra di essi.

Durante il test, vengono registrate varie grandezze fisiche, tra cui la forza di attrito, la temperatura, la distanza percorsa dal pin, e altre caratteristiche pertinenti.

Infine, i dati raccolti vengono analizzati per valutare le prestazioni del materiale del pin e del disco, nonché per comprendere il comportamento dell'attrito e dell'usura in diverse condizioni.

Di seguito viene riportata una tabella con le specifiche tecniche associate al tribometro in esame. Queste risulteranno particolarmente utili in seguito.

| Types                        | Ranges                                  |
|------------------------------|---|
| normal load (dead weight/s)  | Up to 60 N                              |
| friction force               | Up to 10 N, <b>optional</b> 20 N        |
| rotation speed (Pin on Disk) | 0.3 - 500 rpm, <b>optional</b> 1500 rpm |
| linear speed                 | 100 mm/s                                |
| linear stroke                | 60 mm                                   |
| sample diameter              | up to $\varnothing$ 60 mm               |

In particolare, la forza ammissibile sul braccio del tribometro rappresenta un parametro discriminante nella selezione dei cuscinetti da testare, come verrà spiegato nel paragrafo successivo.

## 2.2. Cuscinetti assiali a sfere

I cuscinetti assiali a sfere rappresentano una categoria di cuscinetti progettati per gestire carichi assiali, cioè carichi che agiscono lungo l'asse di rotazione. Questi cuscinetti utilizzano sfere come elementi di rotolamento, disposti tra due anelli di tenuta; l'anello interno si attacca all'albero, mentre l'anello esterno si connette alla struttura circostante.



Figura 15 - Cuscinetto assiale a sfere SKF

L'azione delle sfere tra gli anelli consente una rotazione fluida ed efficiente, riducendo l'attrito e la resistenza durante il movimento. Grazie alla loro capacità di sopportare carichi assiali, i cuscinetti assiali a sfere sono ampiamente utilizzati in applicazioni

come macchinari industriali, trasmissioni di potenza e automotive, dove è necessario trasferire carichi lungo l'asse di rotazione.

Questi cuscinetti sono disponibili in una varietà di configurazioni, tra cui cuscinetti assiali a sfere a contatto angolare, cuscinetti assiali a sfere a contatto radiale e cuscinetti assiali a sfere a semplice e doppio effetto, ciascuno progettato per adattarsi a diverse esigenze di carico, velocità e precisione.

In sintesi, i cuscinetti assiali a sfere giocano un ruolo fondamentale nel garantire un funzionamento fluido e affidabile di una vasta gamma di macchinari e apparecchiature, offrendo una soluzione efficiente e durevole per la gestione dei carichi assiali.

### **2.2.1. Cuscinetti SKF**

I cuscinetti SKF assiali a sfere a semplice effetto sono costituiti da una ralla per albero, una ralla per alloggiamento e un gruppo gabbia a sfere. I cuscinetti sono scomponibili e il montaggio è semplice grazie alla possibilità di montare separatamente le ralle e il gruppo gabbia a sfere. I tipi più piccoli sono disponibili con una superficie di appoggio piana sulla ralla per alloggiamento o con una superficie di appoggio sferica. I cuscinetti con ralla per alloggiamento sferica possono essere utilizzati insieme a una sede di alloggiamento anch'essa sferica per compensare gli errori di allineamento fra la superficie di appoggio nell'alloggiamento e l'albero.

I cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto, come indica il nome, ammettono carichi assiali in un senso e quindi vincolano l'albero assialmente in una direzione e, ovviamente, non devono essere soggetti a carichi radiali.

Per lo sviluppo dell'accessorio oggetto di studio di questa tesi sono stati presi in considerazione dei cuscinetti volventi assiali a sfere a semplice effetto. Nello specifico dal catalogo SKF è stato preso come riferimento il cuscinetto 51104.

Si è deciso, poi, di analizzare anche altri cuscinetti della stessa serie in maniera tale da rendere lo strumento più versatile e riuscire, tramite l'utilizzo di alcune parti intercambiabili, ad effettuare prove su cuscinetti di diverse dimensioni.

Di seguito vengono riportate le specifiche relative ai cuscinetti coinvolti nella progettazione dell'accessorio. All'interno del progetto è stata associata una lettera a ogni modello di cuscinetto, in modo tale da rendere chiaro e immediato il riferimento.

### A. Cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto SKF 51104

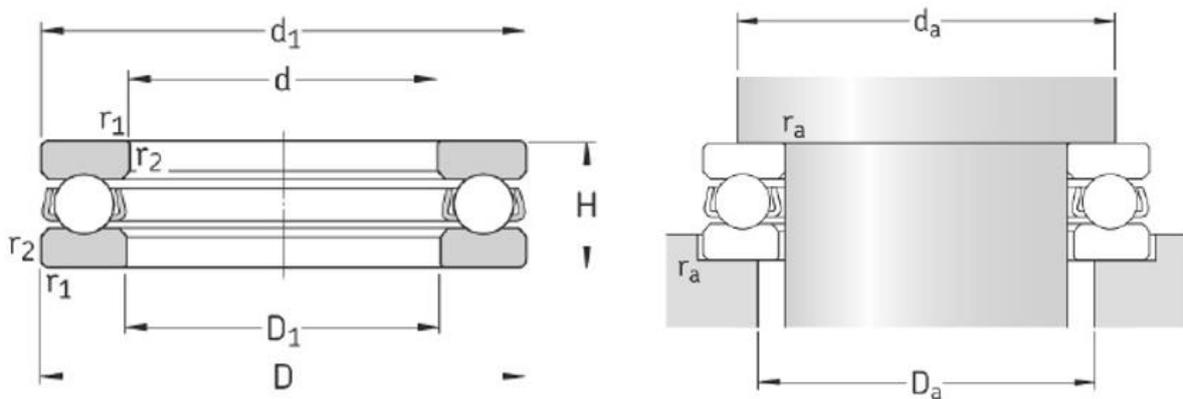


Figura 16 - Schema dimensioni in cuscinetto assiale a sfere

| Dimensioni principali |    |    | Coeff. di carico<br>dinam. stat. |       | Carico<br>limite<br>di fatica<br>$P_u$ | Fattore<br>di carico<br>minimo<br>A | Velocità di base<br>Velocità<br>di refe-<br>renza Velocità<br>limite |        | Massa | Appellativo |
|-----------------------|----|----|----------------------------------|-------|--|-------------------------------------|--|--------|-------|-------------|
| d                     | D  | H  | C                                | $C_0$ |  |                                     |  |        |       |             |
| mm                    |    |    | kN                               |       | kN                                     | -                                   | giri/1'  |        | kg    | -           |
| 20                    | 35 | 10 | 15,1                             | 29    | 1,08                                   | 0,0044                              | 7 500  | 10 000 | 0,037 | 51104       |

| Dimensioni |            |            |                  | Dimensioni delle parti<br>che accolgono il cuscinetto |              |              |
|------------|------------|------------|------------------|---|--------------|--------------|
| d          | $d_1$<br>~ | $D_1$<br>~ | $r_{1,2}$<br>min | $d_a$<br>min  | $D_a$<br>max | $r_a$<br>max |
| mm         |            |            |                  | mm  |              |              |
| 20         | 35         | 21         | 0,3              | 29  | 26           | 0,3          |

### B. Cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto SKF 51103

| Dimensioni principali |    |   | Coeff. di carico<br>dinam. stat. |       | Carico<br>limite<br>di fatica<br>$P_u$ | Fattore<br>di carico<br>minimo<br>A | Velocità di base<br>Velocità<br>di refe-<br>renza Velocità<br>limite |        | Massa | Appellativo |
|-----------------------|----|---|----------------------------------|-------|--|-------------------------------------|--|--------|-------|-------------|
| d                     | D  | H | C                                | $C_0$ |  |                                     |  |        |       |             |
| mm                    |    |   | kN                               |       | kN                                     | -                                   | giri/1'  |        | kg    | -           |
| 17                    | 30 | 9 | 11,4                             | 21,2  | 0,78                                   | 0,0023                              | 8 500  | 12 000 | 0,025 | 51103       |

| Dimensioni |            |            |                  | Dimensioni delle parti<br>che accolgono il cuscinetto |              |              |
|------------|------------|------------|------------------|---|--------------|--------------|
| d          | $d_1$<br>~ | $D_1$<br>~ | $r_{1,2}$<br>min | $d_a$<br>min  | $D_a$<br>max | $r_a$<br>max |
| mm         |            |            |                  | mm  |              |              |
| 17         | 30         | 18         | 0,3              | 25  | 22           | 0,3          |

### C. Cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto SKF 51102

| Dimensioni principali |    |   | Coeff. di carico<br>dinam. stat. |       | Carico<br>limite<br>di fatica<br>$P_u$ | Fattore<br>di carico<br>minimo<br>A | Velocità di base              |                    | Massa | Appellativo |
|-----------------------|----|---|----------------------------------|-------|--|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------|-------------|
| d                     | D  | H | C                                | $C_0$ |  |                                     | Velocità<br>di refe-<br>renza | Velocità<br>limite |       |             |
| mm                    |    |   | kN                               |       | kN                                     | -                                   | giri/1'                       |                    | kg    | -           |
| 15                    | 28 | 9 | 10,6                             | 18,3  | 0,67                                   | 0,0017                              | 8 500                         | 12 000             | 0,023 | 51102       |

| Dimensioni |       |       |                  | Dimensioni delle parti<br>che accolgono il cuscinetto |              |              |
|------------|-------|-------|------------------|---|--------------|--------------|
| d          | $d_1$ | $D_1$ | $r_{1,2}$<br>min | $d_a$<br>min  | $D_a$<br>max | $r_a$<br>max |
| mm         |       |       |                  | mm  |              |              |
| 15         | 28    | 16    | 0,3              | 23  | 20           | 0,3          |

### D. Cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto SKF 51101

| Dimensioni principali |    |   | Coeff. di carico<br>dinam. stat. |       | Carico<br>limite<br>di fatica<br>$P_u$ | Fattore<br>di carico<br>minimo<br>A | Velocità di base              |                    | Massa | Appellativo |
|-----------------------|----|---|----------------------------------|-------|--|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------|-------------|
| d                     | D  | H | C                                | $C_0$ |  |                                     | Velocità<br>di refe-<br>renza | Velocità<br>limite |       |             |
| mm                    |    |   | kN                               |       | kN                                     | -                                   | giri/1'                       |                    | kg    | -           |
| 12                    | 26 | 9 | 10,4                             | 16,6  | 0,62                                   | 0,0014                              | 9 000                         | 13 000             | 0,022 | 51101       |

| Dimensioni |       |       |                  | Dimensioni delle parti<br>che accolgono il cuscinetto |              |              |
|------------|-------|-------|------------------|---|--------------|--------------|
| d          | $d_1$ | $D_1$ | $r_{1,2}$<br>min | $d_a$<br>min  | $D_a$<br>max | $r_a$<br>max |
| mm         |       |       |                  | mm  |              |              |
| 12         | 26    | 13    | 0,3              | 21  | 17           | 0,3          |

### E. Cuscinetti assiali a sfere a semplice effetto SKF 51105

| Dimensioni principali |    |    | Coeff. di carico<br>dinam. stat. |       | Carico<br>limite<br>di fatica<br>$P_u$ | Fattore<br>di carico<br>minimo<br>A | Velocità di base              |                    | Massa | Appellativo |
|-----------------------|----|----|----------------------------------|-------|--|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------|-------------|
| d                     | D  | H  | C                                | $C_0$ |  |                                     | Velocità<br>di refe-<br>renza | Velocità<br>limite |       |             |
| mm                    |    |    | kN                               |       | kN                                     | -                                   | giri/1'                       |                    | kg    | -           |
| 25                    | 42 | 11 | 18,2                             | 39    | 1,43                                   | 0,0079                              | 6 300                         | 9 000              | 0,056 | 51105       |

| Dimensioni |       |       |                  | Dimensioni delle parti<br>che accolgono il cuscinetto |              |              |
|------------|-------|-------|------------------|---|--------------|--------------|
| d          | $d_1$ | $D_1$ | $r_{1,2}$<br>min | $d_a$<br>min  | $D_a$<br>max | $r_a$<br>max |
| mm         |       |       |                  | mm  |              |              |
| 25         | 42    | 26    | 0,6              | 35  | 32           | 0,6          |

## **3. Impostazione progettuale**

### **3.1. Scelta layout**

Come anticipato in precedenza, lo scopo di questo progetto è stato quello di sviluppare un accessorio per estendere l'utilizzo del tribometro pin on disc anche allo studio dell'attrito in cuscinetti assiali.

Sono stati, quindi, realizzati diversi schemi e tentativi, che hanno portato alla progettazione dello strumento e dei diversi componenti.

Le fasi principali della progettazione sono state quelle riguardanti la parte centrale della struttura, e quindi la modalità di applicazione della forza sui cuscinetti, e l'interfaccia di collegamento tra l'accessorio e il pin del tribometro.

Come riferimento per il layout è stato preso in considerazione il test SNR-FEB 2, descritto nel paragrafo 1.2. Si è deciso infatti di sviluppare l'applicazione della forza tramite un sistema vite e dado. Inoltre, si è preso spunto per la disposizione dei cuscinetti in opposizione, con interposta una piastra di collegamento con il banco. Come si vedrà in seguito, in questo caso la struttura sarà composta, però, da più di una piastra e il collegamento con il braccio del tribometro sarà realizzato tramite un apposito elemento.

### **3.2. Scelta della modalità di applicazione della forza**

Le ipotesi prese in considerazione prima di identificare il layout della struttura sono state diverse. Nello specifico in questo paragrafo verrà presentata la parte dell'albero centrale della struttura, che rappresenta il primo componente progettato.

Poiché la geometria interna dell'albero porta mandrino era già definita, per lo sviluppo di questo componente è stato preso come riferimento sulla parte della base il disegno relativo al mandrino già esistente ed è stata poi modificata la parte superiore, in modo da soddisfare le esigenze dell'accessorio. Come si può notare dai due disegni sottostanti, infatti, la geometria della sezione a sinistra della linea rossa, corrispondente alla porzione di albero che alloggia all'interno del porta mandrino, risulta la stessa.

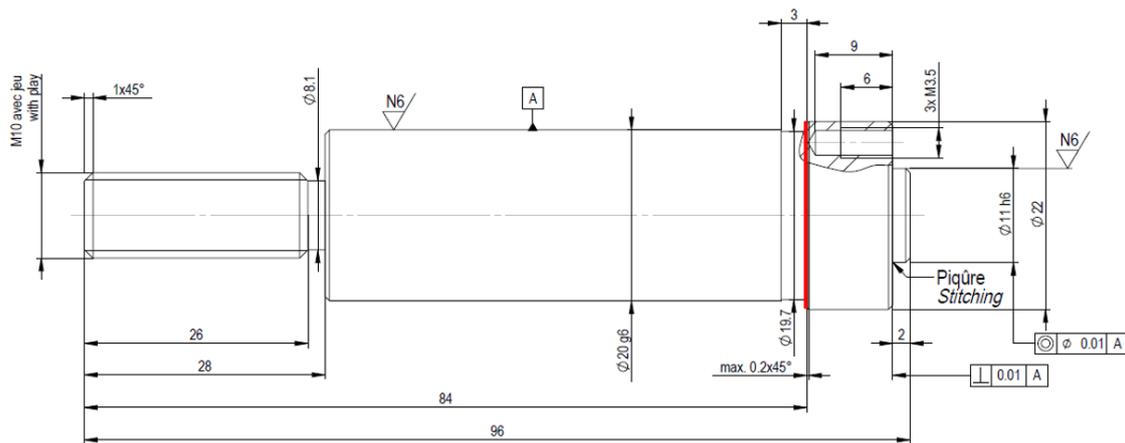


Figura 18 – Asse porta mandrino tribometro pin-on-disc

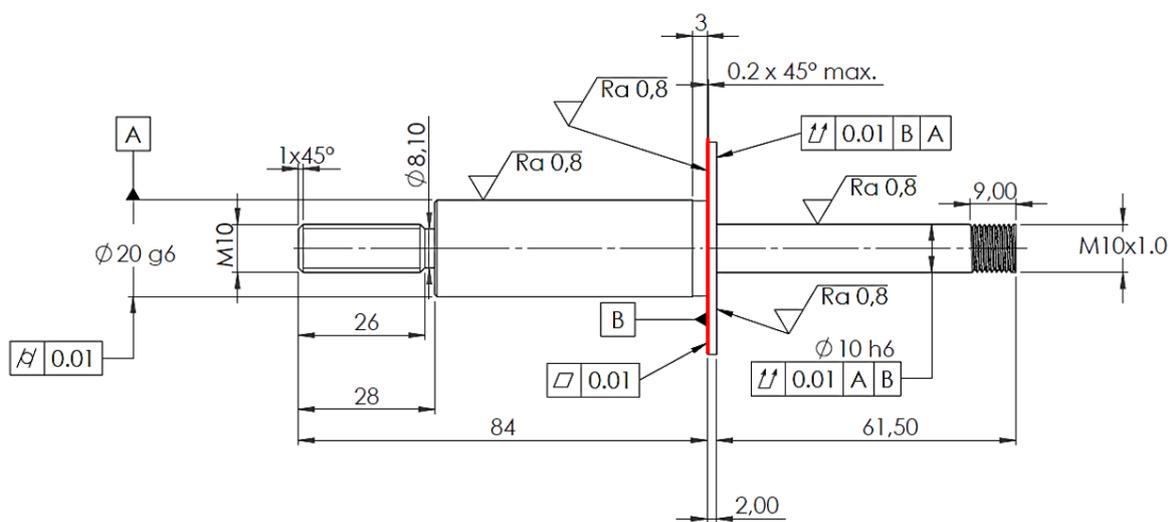
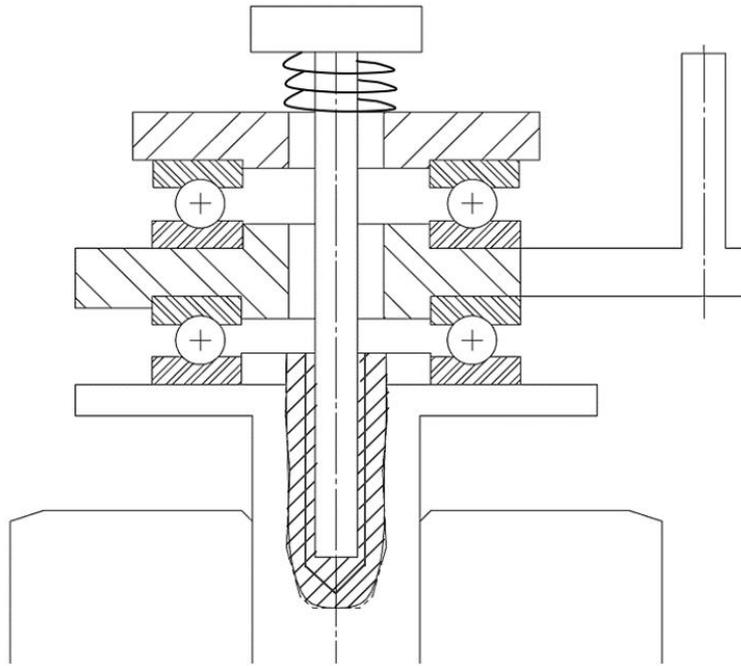


Figura 17 - Asse centrale accessorio progettato

Per l'applicazione della forza, le due strutture ipotizzate sono state le seguenti.

La prima prevedeva l'applicazione della forza tramite un albero filettato al fondo che avvitava all'interno del portamandrino.

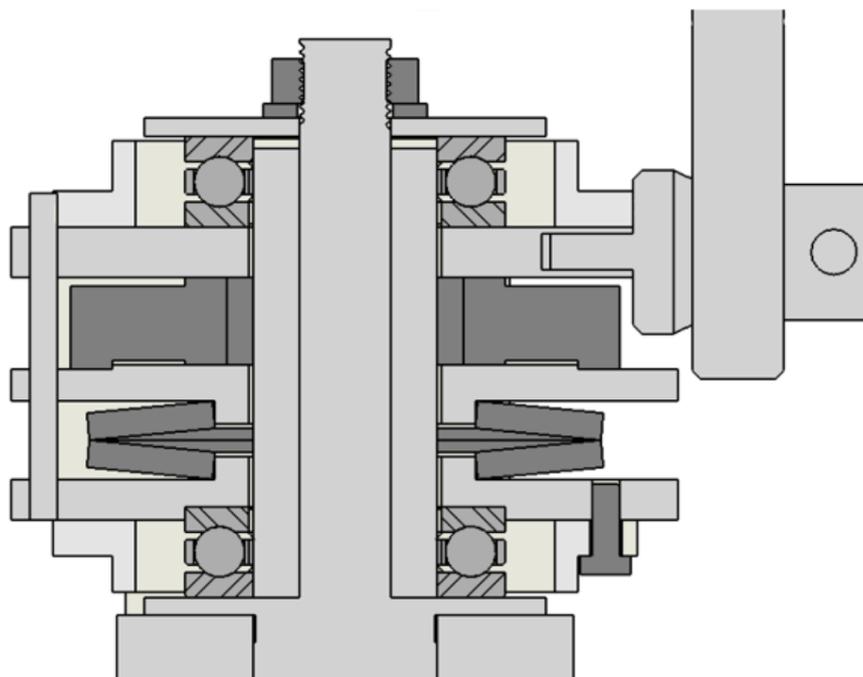
Questa possibilità è stata presto scartata poichè di complicata realizzazione, in quanto non era ben definibile come realizzare l'interfaccia tra il supporto per l'albero e il foro del portamandrino.



*Figura 19 - Schema layout prima ipotesi*

Successivamente è stata ipotizzata una struttura diversa, in cui la forza venisse applicata tramite un sistema vite-dado. In questo caso la vite è sostituita dall'albero centrale realizzato di pezzo assieme sull'albero porta mandrino e filettato all'estremità superiore. Il carico viene quindi applicato assialmente sulla coppia di cuscinetti disposti in configurazione antiparallela mediante una vite di pressione.

La struttura si sviluppa in verticale e prevede la presenza di diverse piastre interposte tra i cuscinetti e i diversi elementi coinvolti.



*Figura 20 - Schema layout scelto*

La componente elastica è rappresentata dalla presenza di due molle a tazza disposte in serie, che permettono di fornire una forza costante e controllata sui cuscinetti in esame, nonché di mantenere la stabilità e ridurre le vibrazioni. In questo caso le molle a tazza inserite hanno anche lo scopo di compensare le dilatazioni termiche e dunque minimizzare le fluttuazioni del carico applicato per interferenza.

All'interno della struttura è presente anche una cella di carico, per monitorare e valutare la forza applicata durante il test.

I diversi componenti della struttura verranno in ogni caso analizzati meglio nel capitolo successivo.

### 3.3. Interfaccia con il pin e funzionamento

L'interfaccia tra la struttura dell'accessorio e il pin del tribometro rappresenta la parte più delicata del progetto. In questa fase sono state prese in considerazione diverse ipotesi, in maniera tale da rendere il contatto quanto più preciso e stabile possibile e permettere una corretta distribuzione delle forze.

Prima di procedere con la descrizione delle ipotesi e dei ragionamenti che hanno portato alla scelta della disposizione e della struttura dei componenti, bisogna fare una breve spiegazione sul funzionamento del test.

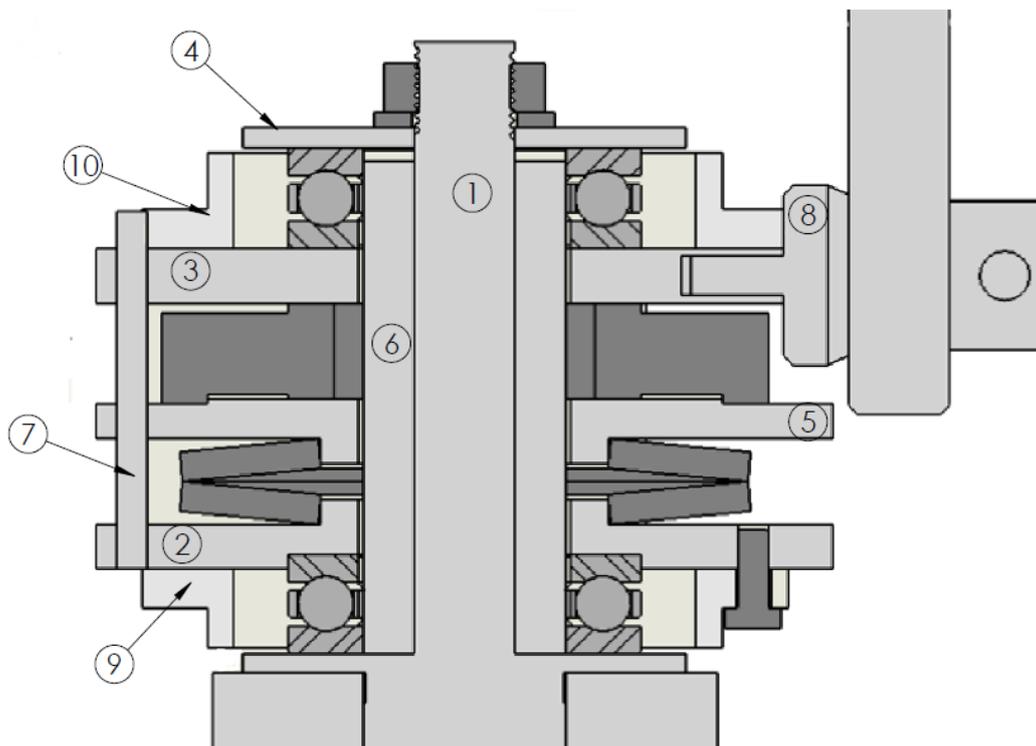
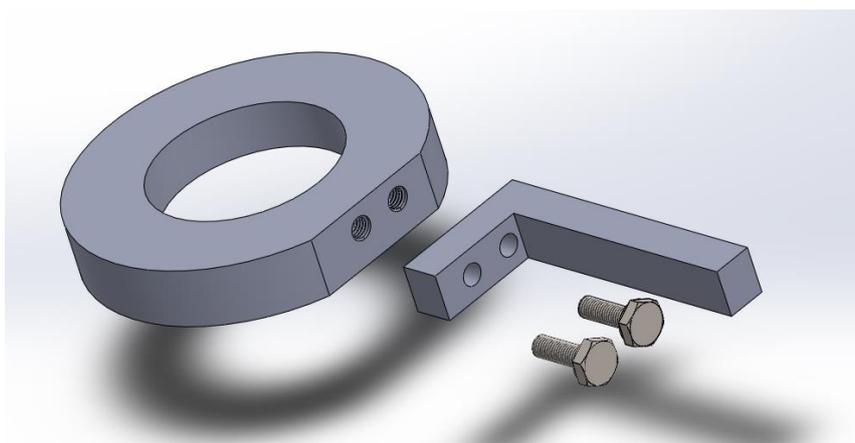


Figura 21- Struttura accessorio

L'albero centrale (1) calettato all'interno del porta mandrino viene messo in rotazione e, insieme ad esso, porta in rotazione la piastra superiore (4) e le ralle interne dei cuscinetti in contatto con le parti mobili. Per effettuare la prova, e quindi calcolare l'attrito, è necessario che le ralle esterne siano in qualche modo bloccate. Per questo si è sviluppata la struttura in maniera tale che la parte centrale vada in battuta con il pin e sia quindi fissa. La forza di attrito è misurata come forza di reazione vincolare alla rotazione delle ralle interne dei cuscinetti in prova.

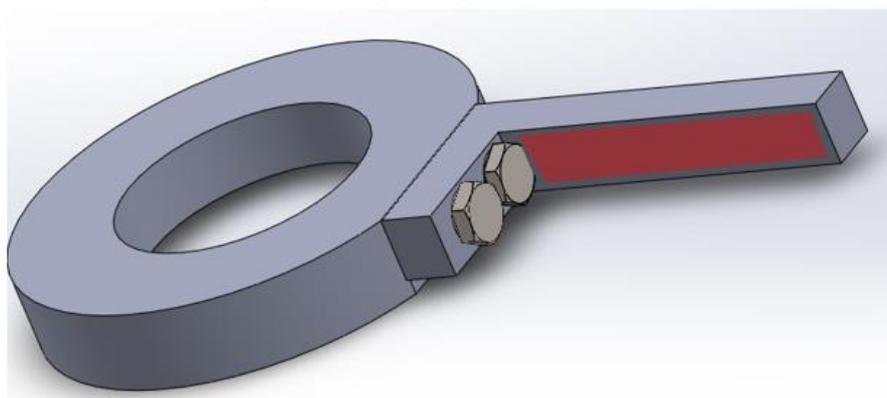
Altri dettagli sull'interazione tra le diverse parti e le motivazioni che hanno portato allo sviluppo della struttura verranno forniti nell'apposito capitolo; qui verrà riportata la descrizione relativa alla forcella di interfaccia (8).

Inizialmente, si è pensato di realizzare una barra che andasse in battuta contro il pin e collegata a una delle piastre centrali tramite dei bulloni, come nell'immagine successiva.



*Figura 22 - Prima ipotesi interfaccia con pin tribometro*

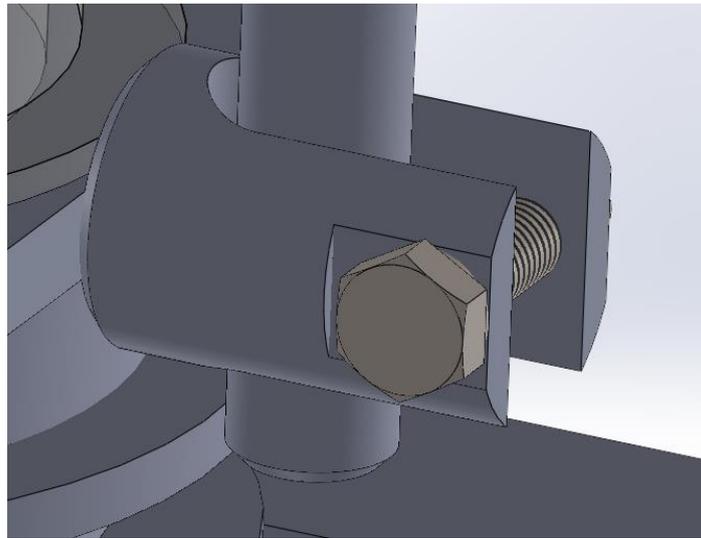
In questo caso la piastra in figura, calettata sull'albero rotante, tenderebbe anch'essa a ruotare durante il test, ma una volta che la barra va in battuta sul pin lungo la faccia evidenziata in rosso nella figura 22, questa parte del sistema risulta bloccata.



*Figura 23 - Prima ipotesi interfaccia con pin tribometro*

Un contatto sviluppato in questo modo, però, non avrebbe garantito una perfetta ripartizione della forza tangenziale, rischiando di sviluppare componenti di forza anche lungo altri assi, in caso di non perfetto allineamento della superficie della piastra.

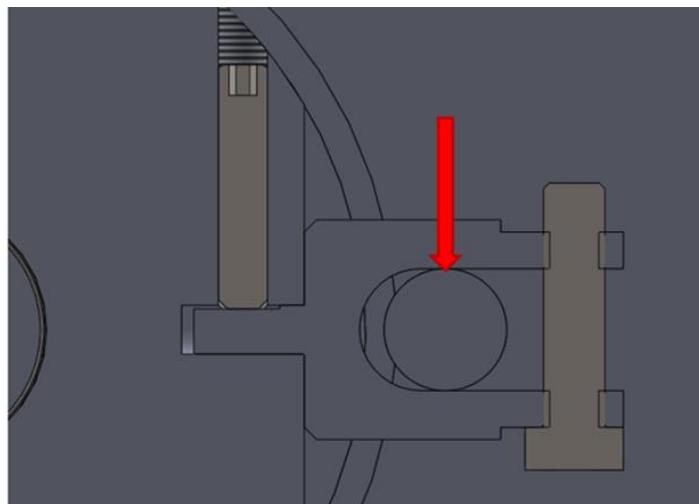
Si è, quindi, deciso di realizzare una forcella che accogliesse il pin in maniera precisa, evitando qualsiasi tipo di disallineamento o scorretta distribuzione di forze.



*Figura 24 - Forcella di collegamento*

La forcella è collegata alla piastra centrale tramite un codolo cilindrico smussato su un lato e con una vite a brugola con punta piatta, che garantisce l'allenamento con l'asse del pin.

In questo modo non solo viene garantito che il pin calzi in modo preciso la forcella ma anche che la forza applicata, indicata con una freccia rossa nello schema di figura 24, risulti perfettamente tangenziale.



*Figura 25 - Schema applicazione forza su forcella di collegamento*

### 3.4. Verifica forza ammissibile

Come anticipato nel paragrafo 2.1.1, la forza d'attrito massima che il braccio del tribometro è capace di sopportare è pari a 20 N, di conseguenza questa sarà la massima forza accettabile sul punto di contatto tra il pin e l'interfaccia con l'accessorio.

Per questo motivo è stato necessario valutare la coppia sviluppata dai diversi modelli di cuscinetti e verificare che la distanza tra l'asse del cuscinetto e l'asse del pin, cioè il braccio che genera il momento (rappresentato nello schema di fig. 25), fosse tale da garantire che sul braccio del tribometro non si sviluppasse una forza troppo elevata.

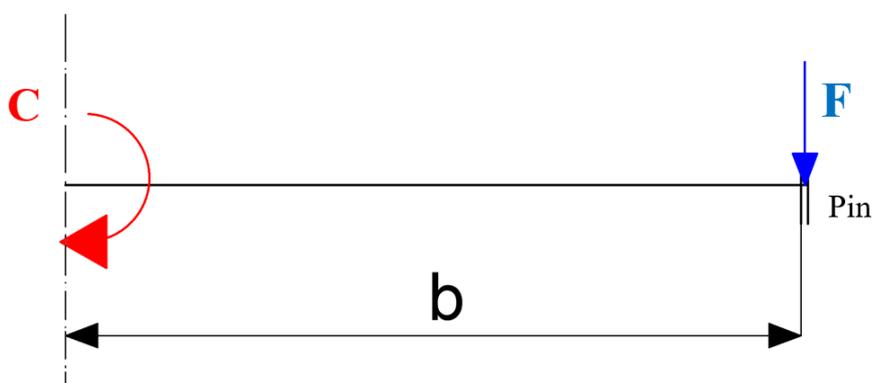


Figura 26 - Schema distribuzione delle forze su braccio tribometro

Anziché, quindi, valutare un momento a partire da forza e braccio, in questo caso è stata fatta la verifica opposta. A partire dalla massima forza applicabile sul pin e dalla coppia sviluppata dal cuscinetto, in questo caso raddoppiata perché, come si vedrà in seguito, la configurazione prevede la presenza di due cuscinetti per effettuare la prova, è stato quindi calcolato il minimo braccio necessario affinché la prova possa essere effettuata senza sopraccaricare, e quindi danneggiare, il tribometro.

Il calcolo della coppia sviluppata è stato effettuato per ognuno dei cinque cuscinetti in esame tramite il calcolatore presente sul sito ufficiale della SKF, impostando due ipotetiche velocità di funzionamento pari a 1500 rpm e 1000 rpm.

Successivamente, il calcolo del braccio, cioè della minima distanza tra l'asse dei cuscinetti e il punto di applicazione della forza sul pin, è stato calcolato tramite la seguente formula.

$$b_{min} \geq \frac{2 \cdot C}{F} \quad (3.1)$$

Dove C rappresenta la coppia sviluppata dal cuscinetto ed F la forza applicabile sul pin, pari a 20 N.

Vengono riportati di seguito i calcoli relativi a ognuno dei cuscinetti, considerando una forza applicata pari a 10 kN.

#### A. Cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51104

| Designazione | Caso di carico | Momento di attrito |                                   | Fonti di attrito           |                       |                 |                             | Perdita di potenza |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
|              |                | Totale             | All'avvio 20-30°C e velocità zero | Rotolamento                | Scorrevole            | Foche           | Perdita di trascinamento    |                    |
|              |                | M (Nmm)            | Inizio M (Nmm)                    | Signor <sub>rr</sub> (Nmm) | M <sub>sl</sub> (Nmm) | sigillo M (Nmm) | M <sub>trascina</sub> (Nmm) | perdita P (W)      |
| 51104        | LC1            | 266                | 610                               | 37.6                       | 228                   | 0               | 0                           | 42                 |
|              | LC2            | 305                | 610                               | 30.2                       | 275                   | 0               | 0                           | 32                 |

Figura 27 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51104

$$n_1=1500 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 266 \text{ Nmm} = 532 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 26,6 \text{ mm}$$

$$n_2=1000 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 305 \text{ Nmm} = 610 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 30,5 \text{ mm}$$

#### B. Cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51103

| Designazione | Caso di carico | Momento di attrito |                                   | Fonti di attrito           |                       |                 |                             | Perdita di potenza |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
|              |                | Totale             | All'avvio 20-30°C e velocità zero | Rotolamento                | Scorrevole            | Foche           | Perdita di trascinamento    |                    |
|              |                | M (Nmm)            | Inizio M (Nmm)                    | Signor <sub>rr</sub> (Nmm) | M <sub>sl</sub> (Nmm) | sigillo M (Nmm) | M <sub>trascina</sub> (Nmm) | perdita P (W)      |
| 51103        | LC1            | 265                | 605                               | 28.4                       | 237                   | 0               | 0                           | 42                 |
|              | LC2            | 311                | 605                               | 22.7                       | 289                   | 0               | 0                           | 33                 |

Figura 28 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51103

$$n_1=1500 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 265 \text{ Nmm} = 530 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 26,6 \text{ mm}$$

$$n_2=1000 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 311 \text{ Nmm} = 622 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 31,1 \text{ mm}$$

#### C. Cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51102

| Designazione | Caso di carico | Momento di attrito |                                   | Fonti di attrito           |                       |                 |                             | Perdita di potenza |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
|              |                | Totale             | All'avvio 20-30°C e velocità zero | Rotolamento                | Scorrevole            | Foche           | Perdita di trascinamento    |                    |
|              |                | M (Nmm)            | Inizio M (Nmm)                    | Signor <sub>rr</sub> (Nmm) | M <sub>sl</sub> (Nmm) | sigillo M (Nmm) | M <sub>trascina</sub> (Nmm) | perdita P (W)      |
| 51102        | LC1            | 267                | 602                               | 24.3                       | 243                   | 0               | 0                           | 42                 |
|              | LC2            | 316                | 602                               | 19.4                       | 297                   | 0               | 0                           | 33                 |

Figura 29 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51102

$$n_1=1500 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 267 \text{ Nmm} = 534 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 26,7 \text{ mm}$$

$$n_2=1000 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 316 \text{ Nmm} = 632 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 31,6 \text{ mm}$$

#### D. Cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51101

| SKF          |                | Momento di attrito |                                   | Fonti di attrito           |                       |                 |                             | Perdita di potenza |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| Designazione | Caso di carico | Totale             | All'avvio 20-30°C e velocità zero | Rotolamento                | Scorrevole            | Foche           | Perdita di trascinamento    | perdita P (W)      |
|              |                | M (Nmm)            | Inizio M (Nmm)                    | Signor <sub>rr</sub> (Nmm) | M <sub>sl</sub> (Nmm) | sigillo M (Nmm) | M <sub>trascina</sub> (Nmm) |                    |
| 51101        | LC1            | 271                | 599                               | 19.5                       | 252                   | 0               | 0                           | 43                 |
|              | LC2            | 323                | 599                               | 15.5                       | 307                   | 0               | 0                           | 34                 |

Figura 30 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51101

$$n_1=1500 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 271 \text{ Nmm} = 542 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 27,1 \text{ mm}$$

$$n_2=1000 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 323 \text{ Nmm} = 646 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 32,3 \text{ mm}$$

#### E. Cuscinetto assiale a sfere a semplice effetto SKF 51105

| SKF          |                | Momento di attrito |                                   | Fonti di attrito           |                       |                 |                             | Perdita di potenza |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| Designazione | Caso di carico | Totale             | All'avvio 20-30°C e velocità zero | Rotolamento                | Scorrevole            | Foche           | Perdita di trascinamento    | perdita P (W)      |
|              |                | M (Nmm)            | Inizio M (Nmm)                    | Signor <sub>rr</sub> (Nmm) | M <sub>sl</sub> (Nmm) | sigillo M (Nmm) | M <sub>trascina</sub> (Nmm) |                    |
| 51105        | LC1            | 273                | 616                               | 53.4                       | 220                   | 0               | 0                           | 43                 |
|              | LC2            | 302                | 616                               | 43                         | 259                   | 0               | 0                           | 32                 |

Figura 31 - Calcolo coppia cuscinetto SKF 51105

$$n_1=1500 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 273 \text{ Nmm} = 546 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 27,3 \text{ mm}$$

$$n_2=1000 \text{ rpm} \quad C_{tot} = 2 \cdot C = 2 \cdot 302 \text{ Nmm} = 604 \text{ Nmm} \rightarrow b_{min} = 30,2 \text{ mm}$$

La posizione dell'asse del pin del tribometro è regolabile tramite un sistema avente una determinata corsa.

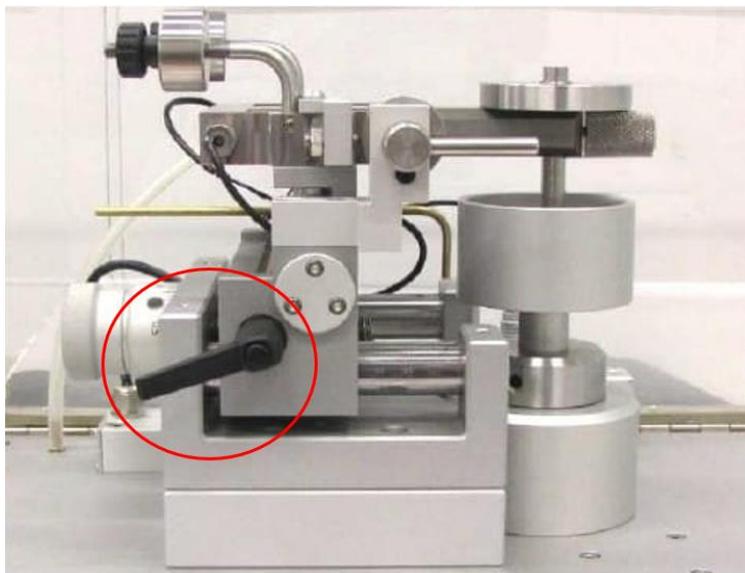


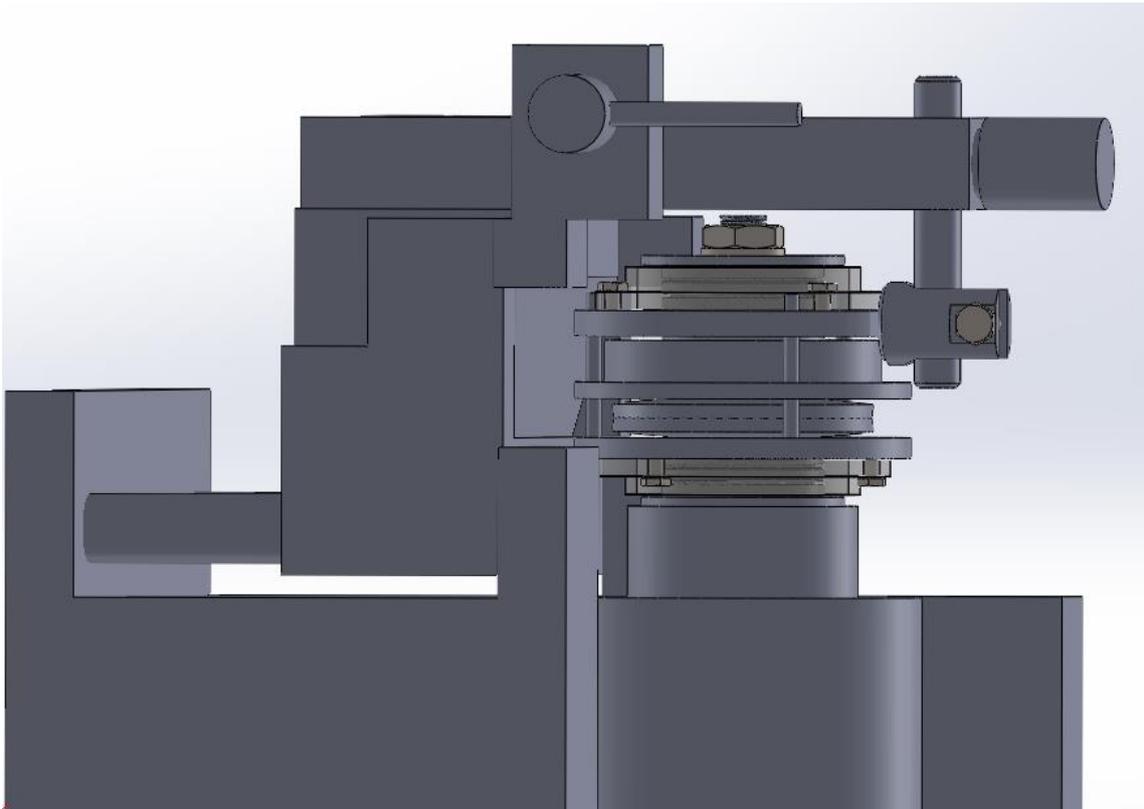
Figura 32 - Sistema di regolazione posizione pin

In questo caso, portando la base del tribometro in battuta sul supporto, si ottiene la massima distanza del pin, per cui la distanza tra l'asse del mandrino su cui verrà montato l'accessorio e l'asse del pin, e quindi di applicazione della forza, risulta pari a 40 mm.

Scegliendo questa posizione del tribometro come configurazione di utilizzo durante le prove, questa distanza rappresenterà il braccio generatore del momento. Confrontando questa distanza con i valori ottenuti dai precedenti calcoli, si può notare come questo supera in tutti i casi il minimo, per cui a parità di momento generato la forza sviluppata sul punto di contatto sarà inferiore al massimo applicabile.

## 4. Dettagli strumento

L'accessorio è stato sviluppato a partire dalla struttura dell'albero centrale. Come anticipato, infatti, questo è stato realizzando prendendo come riferimento la geometria dell'asse porta mandrino e modificandola in maniera tale da poterla rendere adatta all'utilizzo.



*Figura 33 - Accessorio montato su tribometro pin-on-disc*

Viene riportata di seguito la sezione dell'accessorio con indicazione della nomenclatura attribuita alle diverse parti, in modo da rendere più comprensibili i riferimenti.

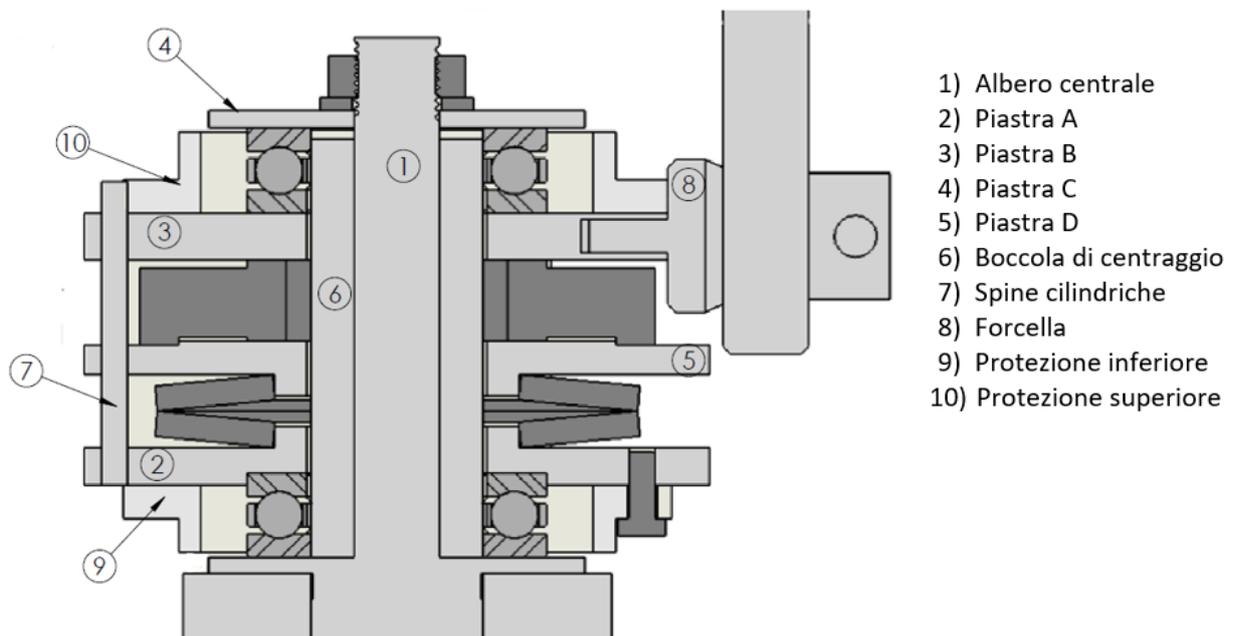


Figura 34 - Sezione accessorio con bollatura

Sono state previste delle piastre per l'alloggiamento dei cuscinetti e della cella di carico, forate nella parte centrale in modo da permetterne l'inserimento assiale lungo l'albero. Per il centraggio dei cuscinetti e delle piastre sono state previste delle boccole di dimensioni apposite. La parte centrale della struttura, calettata all'interno del porta mandrino, verrà posta in rotazione e, di conseguenza, porterà in rotazione le ralle interne dei due cuscinetti.

La piastra B, invece, è collegata alla forcella che, essendo vincolata al pin, fisso, del tribometro fa sì che la rotazione sia impedita.

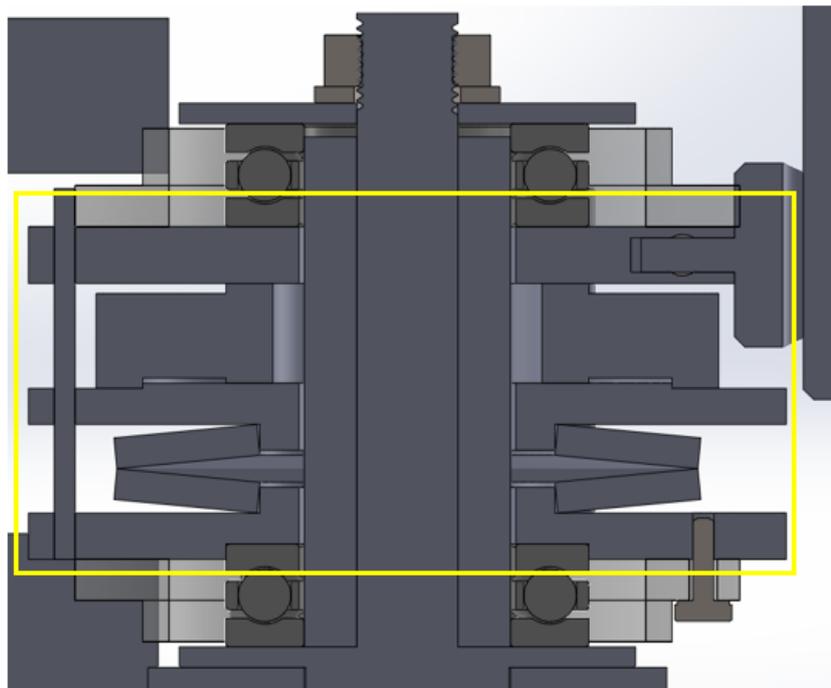
Poiché la parte centrale fissa della struttura è sviluppata su più livelli, le piastre A e D devono essere vincolate in qualche modo alla piastra B. Per questo sono stati realizzati dei fori dove inserire delle spine cilindriche, in modo da permettere lo scorrimento assiale delle piastre, ma vincolarne la rotazione.

Sono state scelte delle spine cilindriche in acciaio non temprate da catalogo.

|                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| <b>ISO 2338</b> | <b>SPINE CILINDRICHE NON TEMPRATE (m6)</b>  |   |
| UNI 1707<br>    | <p><b>Rettificata</b></p> <p>Forma dell'estremità a discrezione del produttore</p> <p>1) Raggio e concavità dell'estremità della spina sono ammessi</p> | <p><b>MATERIALE: ACCIAIO</b><br/>         9 S Mn Pb 28 K (1.0718)<br/>         o altro acciaio ad alta velocità (AVP)</p> |

Figura 35 - Catalogo spine cilindriche

In questo modo quindi, la parte della struttura riquadrata in giallo non sarà coinvolta dalla rotazione degli altri componenti.



*Figura 36 - Dettaglio parte fissa della struttura*

## 4.1. Albero centrale accessorio

Sulla parte terminale dell'albero centrale dell'accessorio è stato previsto un tratto filettato, in modo da rendere possibile l'accoppiamento vite – dado per l'applicazione della forza assiale sui cuscinetti.

Nello specifico, è stata scelta la filettatura metrica ISO a passo fine M10 x 1.

Per la verifica della vite è stata calcolata la forza assiale limite, utilizzando la seguente formula, ottenuta supponendo di poter sollecitare la vite al montaggio fino ad una frazione X del limite elastico del materiale della vite (tipicamente si considera X= 0.9).

$$F_{v,lim} = \sigma_{a,lim} \cdot A_n = \frac{X \cdot R_{p0.2}}{\sqrt{1+3 \cdot k^2}} \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \quad (4.1)$$

$$\text{Con } k = \left[ \frac{2}{d_n} \left( \frac{p}{\pi} + d_m \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha} \right) \right] = \left[ \frac{2}{8,773} \left( \frac{1}{\pi} + 9,35 \cdot \frac{0,12}{\cos 30} \right) \right] = 0,368 \quad (4.2)$$

Dove:

- $A_n$ : sezione di riferimento, solitamente quella maggiormente sollecitata corrisponde a quella di nocciolo;
- $k$ : fattore dipendente da fattori geometrici e dall'attrito;
- $d_m$ : diametro medio del filetto, in questo caso pari a 9,35 mm;
- $d_n$ : diametro di nocciolo della vite, in questo caso pari a 8,773 mm;
- $p$ : passo del filetto;
- $\tan \varphi = f$ : coefficiente di attrito, in questo caso pari a 0,12;
- $\alpha = 30^\circ$  per filettature metriche;
- $R_{p0.2}$ : limite elastico del materiale, dipende dalla classe di resistenza

La verifica è stata effettuata prendendo in considerazione diverse classi di resistenza di acciai.

- Classe A: 6.8  $\rightarrow R_{p0.2} = 480$  Mpa
- Classe B: 8.8  $\rightarrow R_{p0.2} = 640$  Mpa

Si ottiene, quindi:

- $F_{v,lim_A} = 22021$  N
- $F_{v,lim_B} = 29357$  N

La vite risulta in entrambi i casi abbondantemente verificata.

## 4.2. Piastre

La geometria delle piastre è stata definita in maniera tale da permettere l'alloggiamento dei cuscinetti e degli altri componenti dell'accessorio.

Come già anticipato, sono state progettate diverse piastre in modo da poter adattare l'utilizzo dell'accessorio a cuscinetti di diversa taglia.

Vengono di seguito riportati i dettagli relativi a ognuna delle piastre progettate. Per le piastre A, B e D, verrà comunque raffigurato lo schema relativo a un solo modello di cuscinetto, poiché la struttura proposta per ogni piastra risulta la medesima per ogni taglia, a meno delle dimensioni che fanno riferimento alla geometria del cuscinetto.

Solo la piastra C risulta comune a tutti i modelli, in quanto calettata direttamente sull'albero centrale.

### 4.2.1. Piastra A

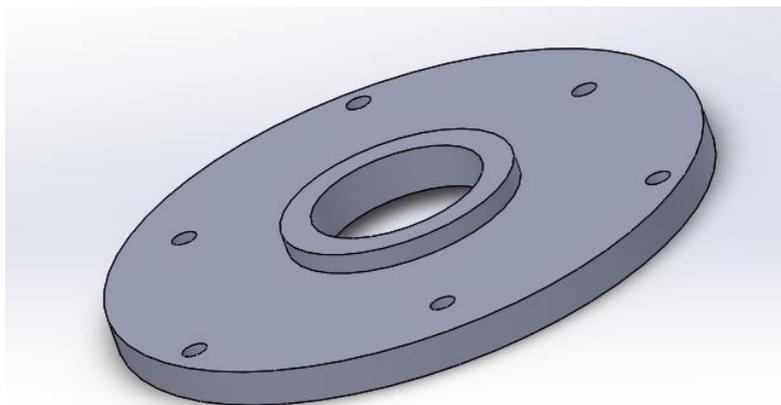


Figura 37 - Piastra A cuscinetto 51104

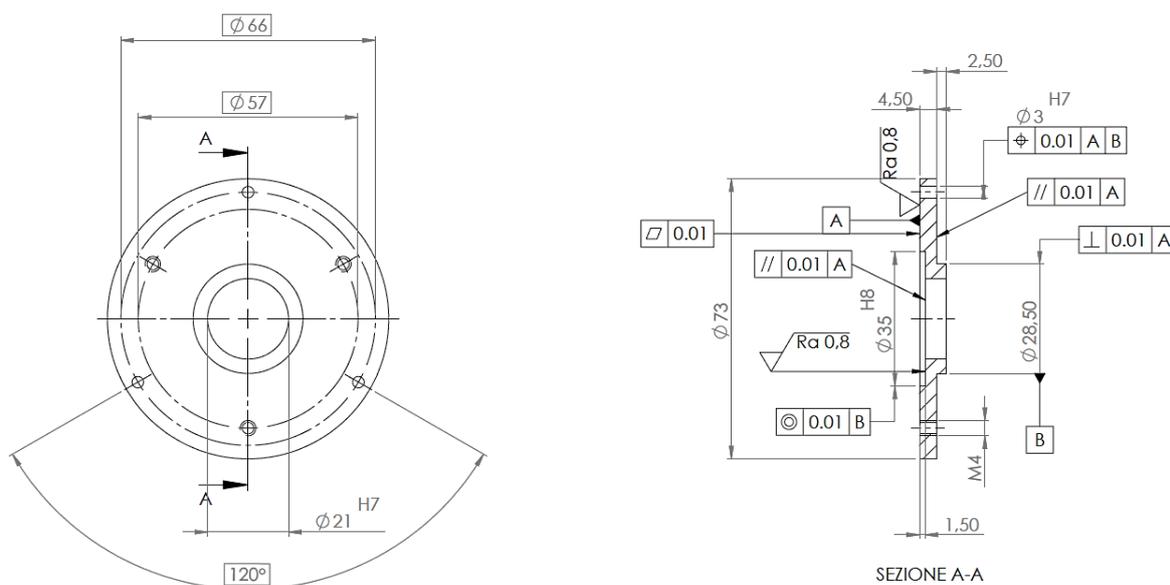


Figura 378 - Vista superiore e sezione piastra A cuscinetto 51104

Questa piastra presenta una cava nella parte inferiore di diametro pari al diametro esterno del cuscinetto, necessaria per il centraggio.

Il foro interno è definito dalla dimensione della boccola.

Presenta poi due serie di fori, una di fori passanti per l'inserimento delle spine e una di fori filettati per il collegamento delle protezioni in plexiglass.

#### 4.2.2. Piastra B

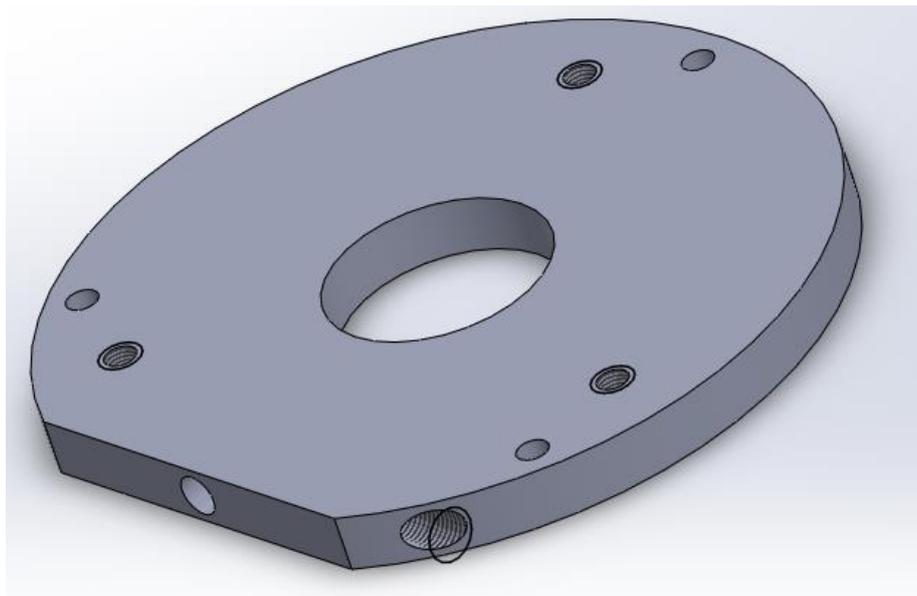


Figura 38 - Piastra B cuscinetto 51104

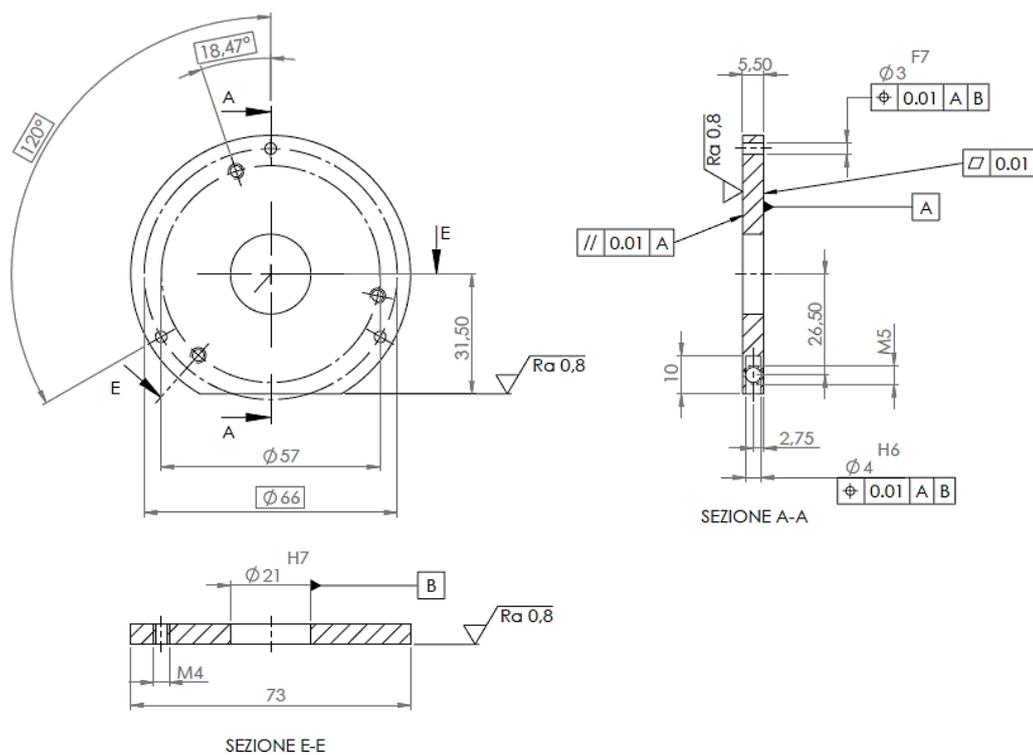
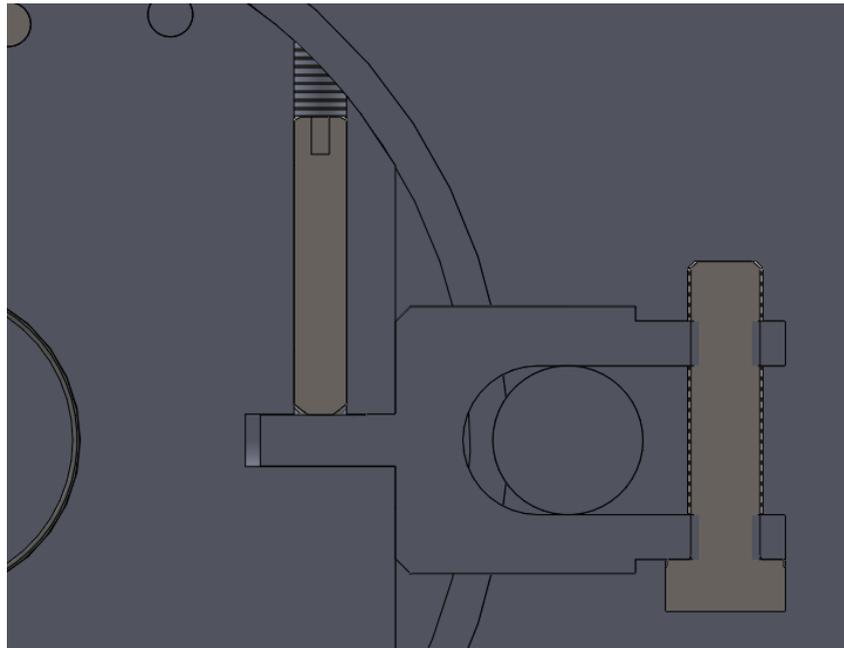


Figura 39 - Vista superiore e sezioni piastra B cuscinetto 51104

La piastra B è disposta tra il cuscinetto e la cella di carico ed è collegata alla forcella di interfaccia con il pin del tribometro.

È stato effettuato un taglio lungo un piano parallelo al piano frontale della piastra, in modo da ottenere una superficie piana, su cui è stato poi ricavato un foro per l'inserimento del codolo cilindrico. Ortogonale a questo, è stato realizzato un altro foro per l'inserimento di una vite a brugola M5 con punta piatta, in modo da garantire l'allineamento della forcella con l'asse del pin.



*Figura 40 - Dettaglio collegamento piastra B con codolo forcella tramite vite a brugola*

Anche in questo caso il foro interno è definito dalla dimensione della boccia e la piastra presenta due serie di fori, una di fori filettati per il collegamento delle protezioni in plexiglass e una di fori passanti per l'inserimento delle spine, che qui non sono incastrate ma presentano un certo gioco.

### **Forcella di collegamento**

Sulle due estremità della forcella sono stati realizzati due fori filettati, per l'inserimento di una vite ISO 4017 M5, in modo da migliorare il contatto tra le superfici interne e il pin ed evitare vibrazioni.

La forcella è stata realizzata in maniera tale da poter essere utilizzata come interfaccia per ogni taglia di cuscinetto considerato.

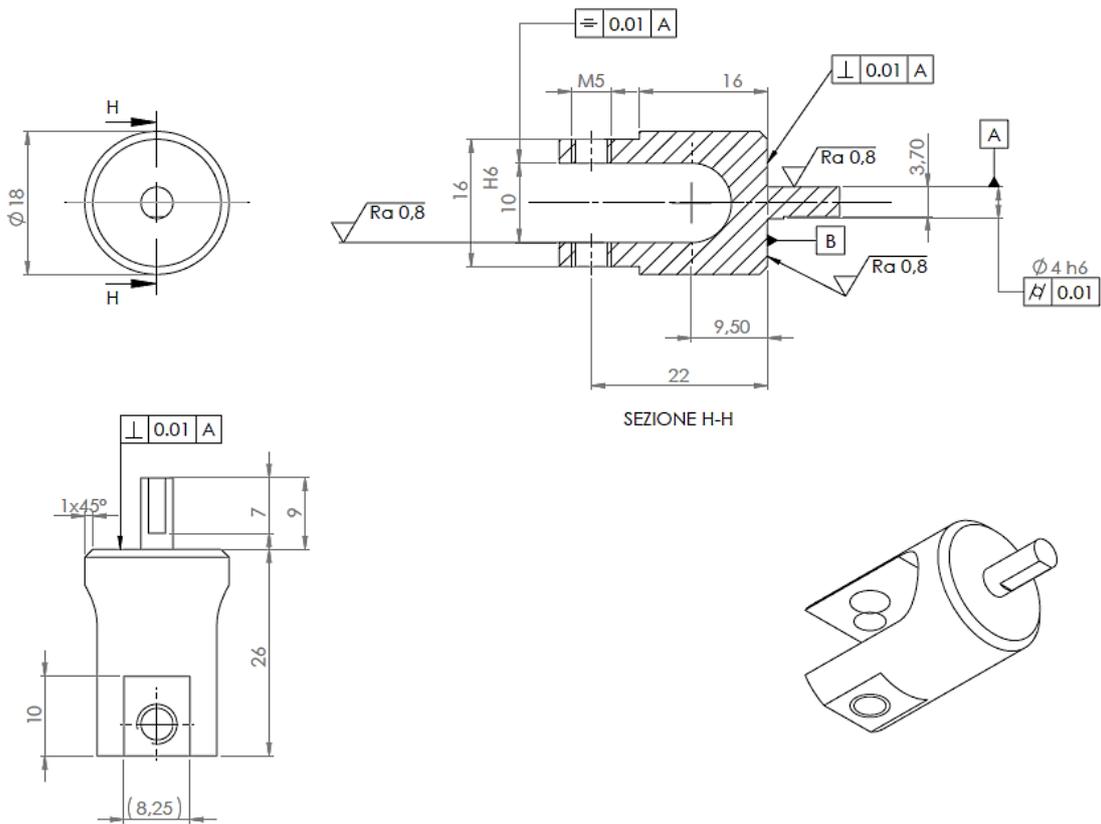


Figura 41 - Viste e sezioni forcella di collegamento

### 4.2.3. Piastra C

La piastra C è costituita da un semplice disco forato e la sua geometria non dipende dalla dimensione dei cuscinetti. Essa si trova interposta tra il cuscinetto superiore e il dado di avvitamento e, essendo calettata direttamente sull'albero centrale, risulta comune per tutte le taglie di cuscinetti considerati.

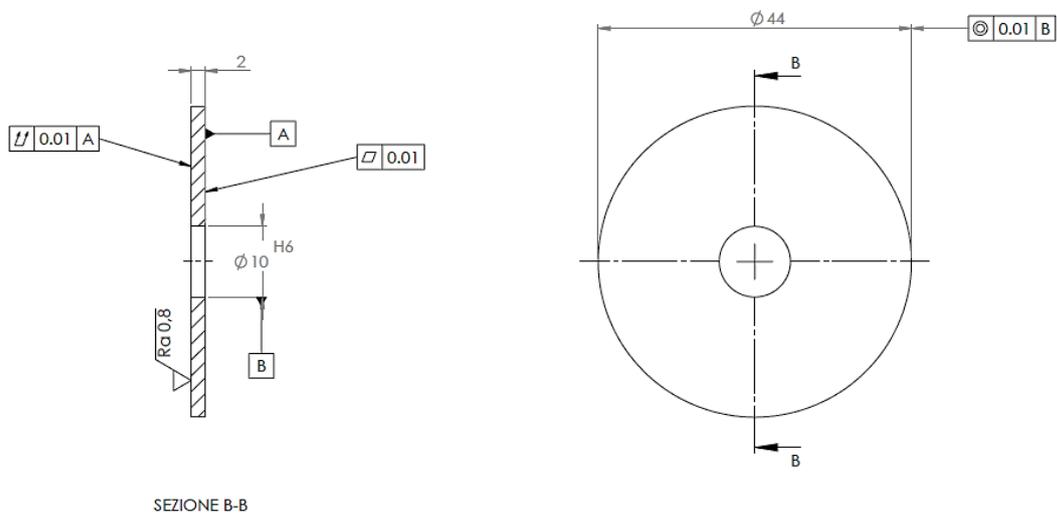


Figura 42 - Vista e sezione piastra C

#### 4.2.4. Piastra D

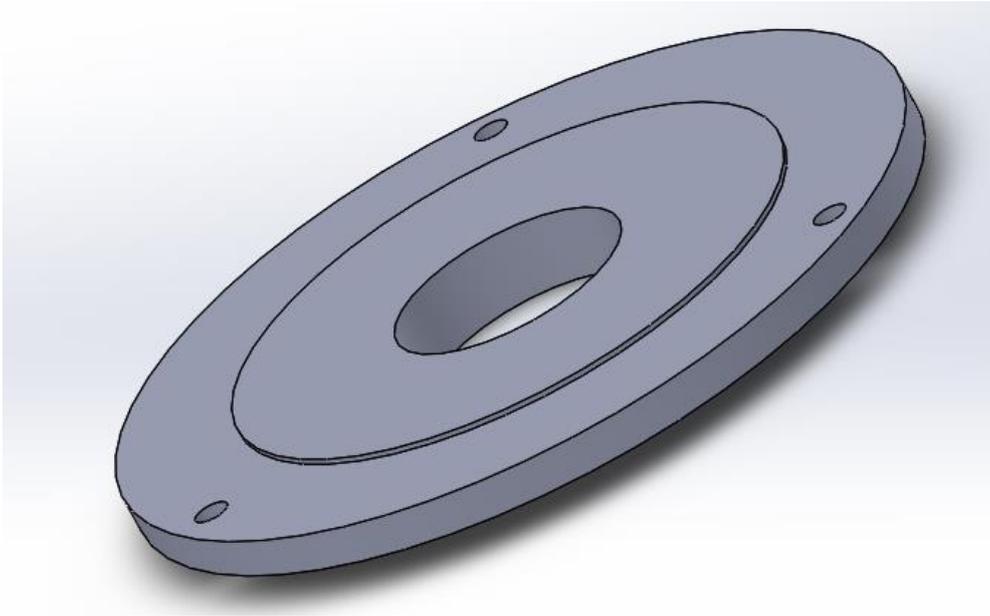


Figura 43 - Piastra D cuscinetto 51104

Questa piastra presenta un rialzo nella parte superiore per il corretto posizionamento della cella di carico.

Anche in questo caso il foro interno è definito dalla dimensione della boccia ma stavolta la piastra presenta solo una serie di fori passanti per l'inserimento delle spine, che qui non sono incastrate ma presentano un certo gioco.

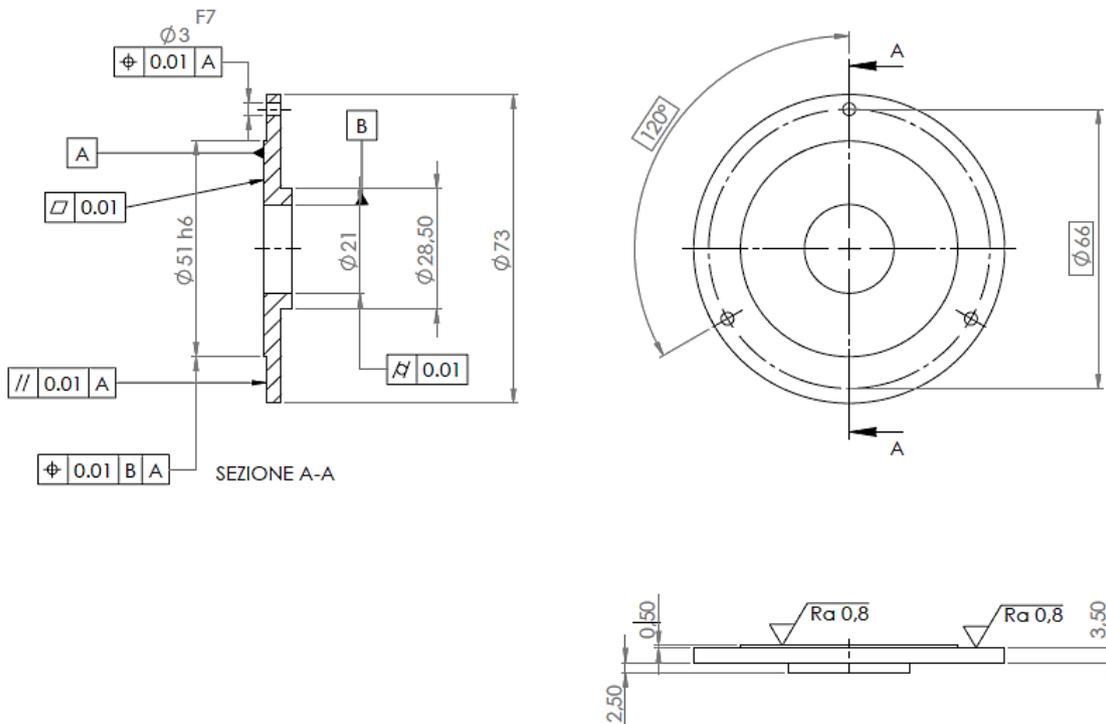


Figura 44 - Vista frontale e sezione piastra D cuscinetto 51104

### 4.3. Protezioni per il calore

Sono state previste delle protezioni in plexiglass per il calore, da agganciare alla struttura tramite delle viti ISO 4017 M3 disposte a 120° di distanza.

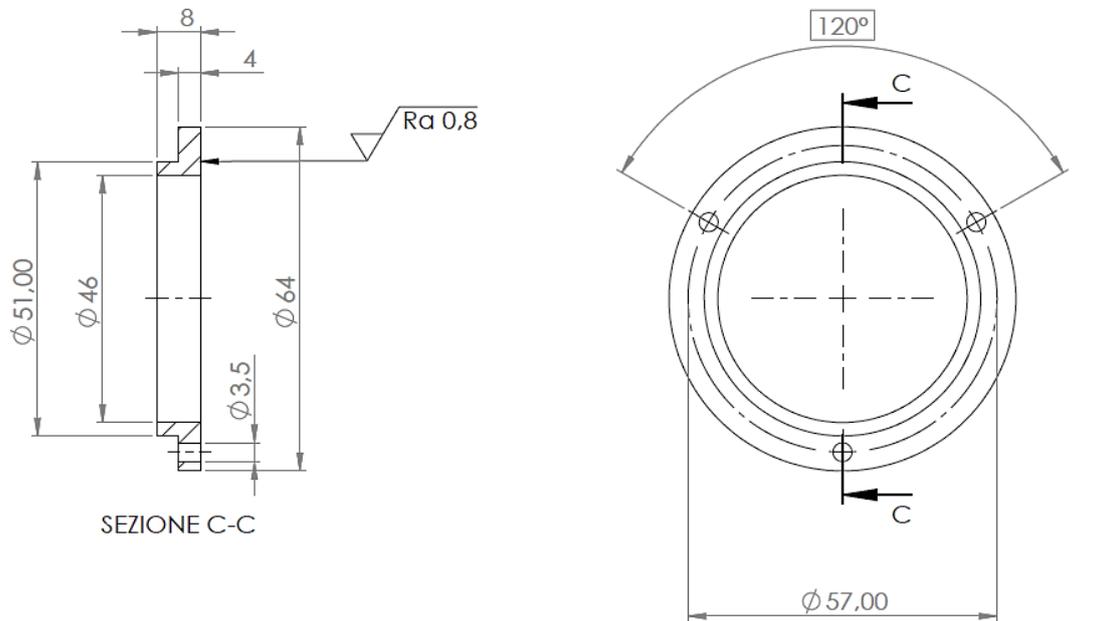


Figura 46 - Vista superiore e sezione protezione inferiore

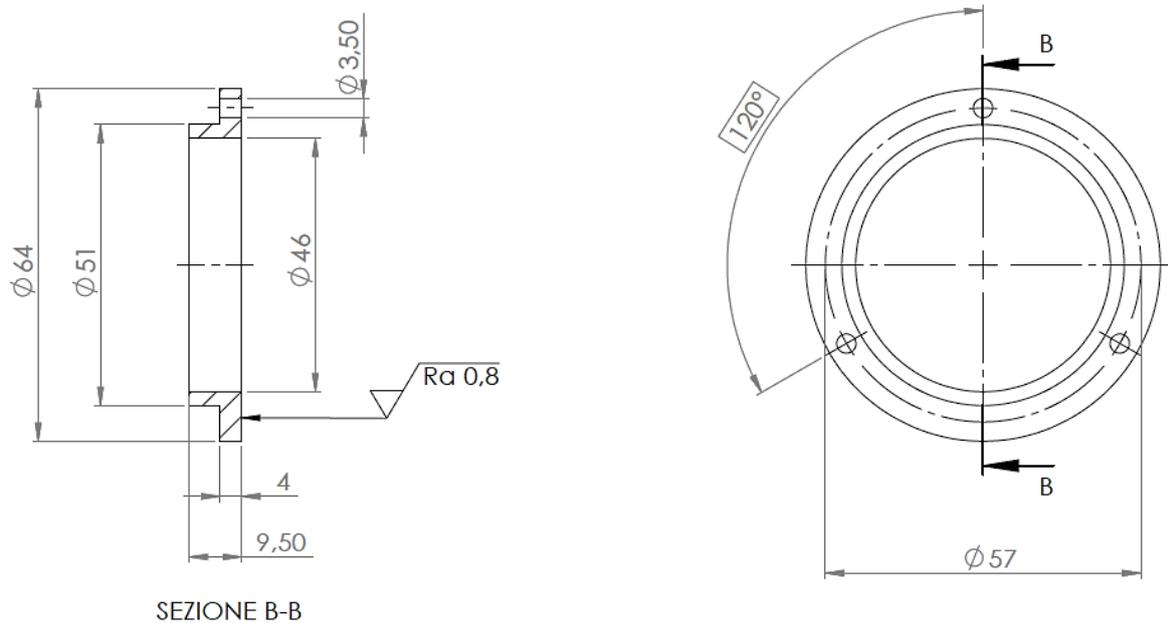


Figura 47 - Vista superiore e sezione protezione superiore

## 4.4. Molle

Come componente elastica sono state inserite delle molle a tazza belleville disposte in serie e inserite tra le piastre D e B, in modo da non essere coinvolte nella rotazione della struttura e non generare eventuali squilibri con la loro massa.

Si tratta delle molle Leespring M02850-0300-05600-C, di cui viene riportata la scheda tecnica.

### Numero parte

**M02850-0300-05600-C**

| Descrizione                  | Specifiche                   |
|------------------------------|------------------------------|
| Spring Type:                 | DIN 2093 rondelle belleville |
| Outside Diameter (mm):       | 56                           |
| Inside Diameter (mm):        | 28.5                         |
| Thickness (mm):              | 3                            |
| Calculated Load at Flat (N): | 14752                        |
| Free Height (mm):            | 4.3                          |
| Bolt Size:                   | M28                          |
| Material:                    | 6150 Acciaio al carbonio     |
| Work Over Rod Diameter (mm): | null                         |
| Finish:                      | Fosfatato e oliato           |

Figura 48 - Specifiche molle Leespring M02850-0300-05600-C

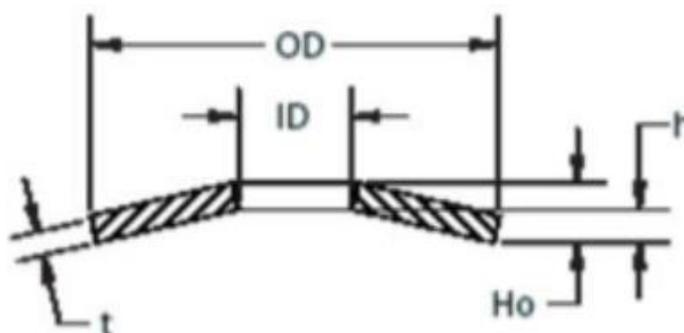


Figura 49 - Schema e geometria molla a tazza

Le molle sono state scelte in modo tale da riuscire a sopportare una forza applicata di 10 kN e disposte in serie così da avere una freccia abbastanza ampia, in modo da compensare le dilatazioni termiche e minimizzare le fluttuazioni del carico applicato per interferenza.

## 4.5. Cella di carico

All'interno della struttura è stata inserita una cella di carico ad anello, in modo da poter monitorare l'applicazione della forza durante la prova.

Trattandosi di una struttura rotante, l'idea iniziale è stata quella di ricercare una cella di carico wireless, in modo da non avere un cavo di intralcio durante la rotazione. Tuttavia, tra le celle in commercio è stato difficile trovarne una di questa taglia, per cui si è optato per una cella di carico ad anello con cavo, da disporre tra due piastre nella parte fissa della struttura. In ogni caso, si è cercato di sceglierla quanto più sottile possibile in modo da minimizzare gli ingombri.

Vengono di seguito riportate le specifiche e la geometria della cella di carico scelta.

**Technique Specifications**  
Capacity :15kN  
Rated Output:2.0±0.2mV/V  
Zero Balance: ±2%F.S.  
Non-Linearity :<±0.5%F.S.  
Hysteresis <±0.5%F.S.  
Repeatability :<±0.5%F.S.  
Creep(30min) :<±0.5%F.S.  
Temp.Effect On Output :0.2% F.S./10°C  
Temp Effect On Zero :0.2 % F.S./10°C  
Input impedance:700±10Ω  
Output impedance:700±10Ω  
Insulation: ≥5000MΩ/100VDC  
Maximum excitation:10 V  
Compensated Temp.Range :-10-60°C  
Operation Temp Range :-20-150°C  
Safe Overload: 120 % F.S.  
Ultimate Overload:150 % F.S.  
Cable Size:φ2 length 4m  
Protection Class :IP64

Figura 50 - Specifiche tecniche cella di carico

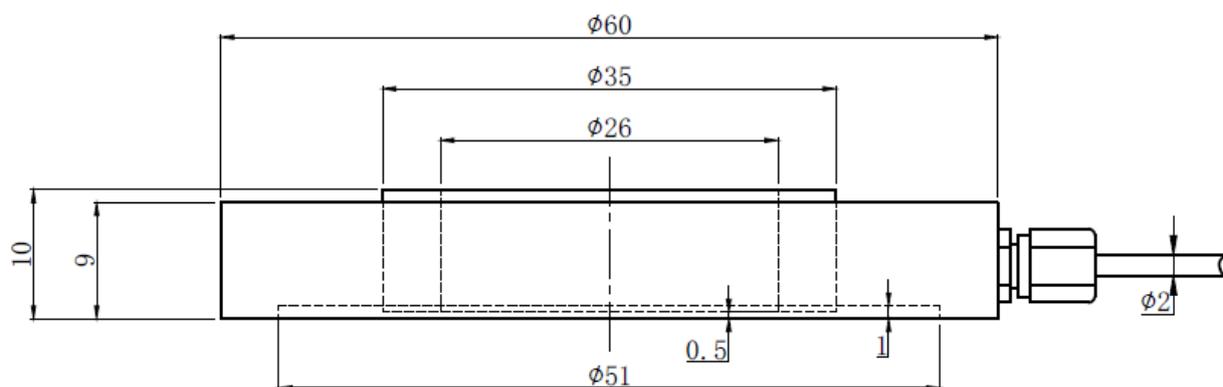


Figura 51 - Schema cella di carico

## Conclusione

Lo scopo di questo elaborato è stato quello di sviluppare un metodo per poter eseguire prove su cuscinetti utilizzando uno strumento commerciale già presente nei laboratori sperimentali, in modo da ridurre la necessità di progettare e costruire appositi banchi prova. È stato, quindi, implementato un tribometro pin-on-disc, progettando un accessorio che permettesse di utilizzare questo strumento per effettuare prove di attrito su cuscinetti assiali a sfere.

Utilizzare uno strumento commerciale implementato anziché costruire un banco prova apposito può offrire diversi vantaggi sia a livello funzionale che economico.

Gli strumenti commerciali sono spesso progettati per essere plug-and-play, il che significa che richiedono meno tempo per l'installazione e l'implementazione rispetto alla costruzione di un banco prova personalizzato. Ciò consente di iniziare le prove più rapidamente, riducendo i tempi di inattività. Molti strumenti commerciali, inoltre, sono progettati per essere versatili e adattabili a diverse applicazioni; per cui possono essere dotati di diverse opzioni e modalità di prova che consentono di eseguire una varietà di test sui cuscinetti senza la necessità di modifiche significative. Spesso vengono anche forniti con aggiornamenti software regolari e supporto tecnico dedicato e questo può essere prezioso nel caso in cui sorgano problemi o si desideri migliorare le funzionalità esistenti nel corso del tempo.

A livello economico, invece, bisogna considerare che la creazione di un banco prova personalizzato richiede degli investimenti significativi in termini di tempo, risorse umane e finanziarie per progettare, acquistare materiali e assemblare il banco prova, per cui la realizzazione di componenti da inserire su uno strumento commerciale può sicuramente richiedere costi iniziali minori. Facendo poi una valutazione nel tempo, bisogna tenere in considerazione che potrebbe essere necessario aggiornare o espandere le capacità del banco prova. In questo caso, gli strumenti commerciali spesso offrono opzioni di aggiornamento modulare o pacchetti software aggiuntivi a costi relativamente ridotti rispetto alla necessità di apportare modifiche significative a un banco prova personalizzato.

L'accessorio qui progettato rappresenta, quindi, un esempio di come si possa implementare uno strumento commerciale e adattarne, tramite la realizzazione di alcuni componenti in metallo, l'utilizzo ad altre applicazioni.

La struttura progettata è stata dotata in questa fase preliminare di una cella di carico con uscita analogica, per il monitoraggio del carico applicato durante le prove, ma questo non è l'unico sensore che era stato previsto nella fase iniziale di ipotesi del progetto. Si potrebbe, infatti, implementare in futuro l'accessorio con l'inserimento di ulteriori sensori, come delle termocoppie per la misura della temperatura dei cuscinetti. In ogni caso, l'aver progettato una struttura che estenda l'utilizzo di un tribometro pin-on-disc alla valutazione dell'attrito non solo su semplici superfici ma su cuscinetti assiali a sfere di diverse taglie rappresenta già un buon punto di partenza per eventuali sviluppi futuri.

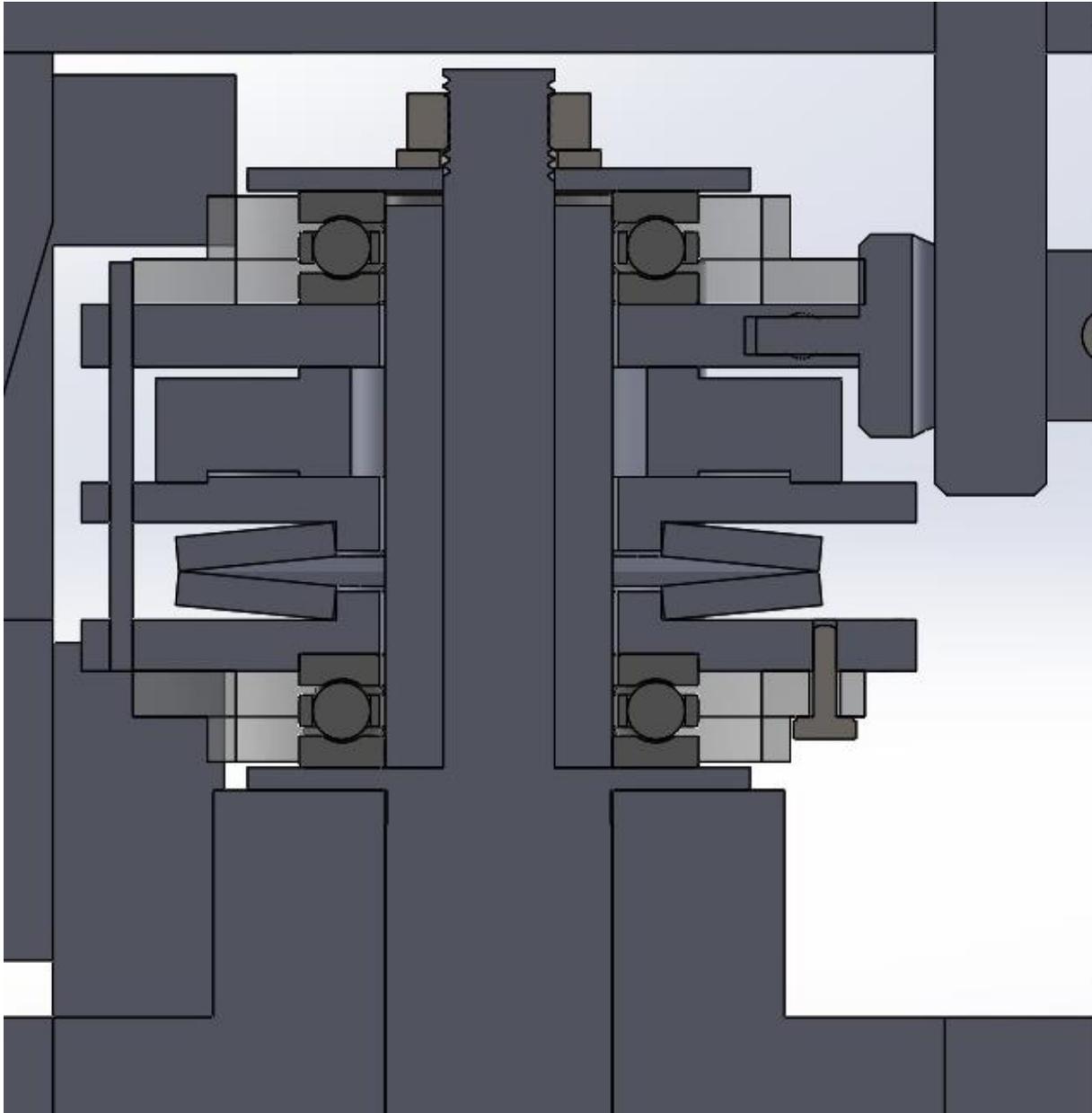
## Bibliografia

- [1] Danielsen, H. K., et al. «FE8 type laboratory testing of white etching crack (WEC) bearing failure mode in 100Cr6». *Wear*, vol. 434–435, settembre 2019, p. 202962. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202962>.
- [2] Evans, M. H., et al. «Confirming subsurface initiation at non-metallic inclusions as one mechanism for white etching crack (WEC) formation». *Tribology International*, vol. 75, luglio 2014, pp. 87–97. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.012>.
- [3] Soluzioni lubrificanti speciali per l'industria eolica.  
<https://www.klueber.com/landingpages/in/en/lubricants-for-the-wind-industry/>.
- [4] Klüber Lubrication München SE & Co. KG, Geisenhausenerstraße 7, 81379 München, Germany.
- [5] Brusa, Eugenio, et al. «Design of an Innovative Test Rig for Industrial Bearing Monitoring with Self-Balancing Layout». *Machines*, vol. 10, fasc. 1, gennaio 2022, p. 54. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/machines10010054>.
- [6] Fan, Bo-Qian, et al. «Soft-Switchable Dual-PI Controlled Axial Loading System for High-Speed EMU Axle-Box Bearing Test Rig». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, fasc. 12, dicembre 2015, pp. 7370–81. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2458303>.
- [7] Scherge, Matthias, et al. «Multi-Phase Friction and Wear Reduction by Copper Nanoparticles». *Lubricants*, vol. 4, fasc. 4, ottobre 2016, p. 36. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/lubricants4040036>.
- [8] Olaru, D., et al. «Influence of the cage on friction torque in low loaded thrust ball bearing operating in dry conditions». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 147, agosto 2016, p. 012027. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/147/1/012027>.
- [9] «Tribometro pin-on-disk: TRB3». Anton Paar, <https://www.anton-paar.com/it-it/prodotti/dettagli/trb3-tribometro-pin-on-disk/>.
- [10] Tribonet.<https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>, «Pin on Disk Test - About Tribology», 7 giugno 2020.
- [11] SKF.<https://www.skf.com/it/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/general-bearing-specifications>.

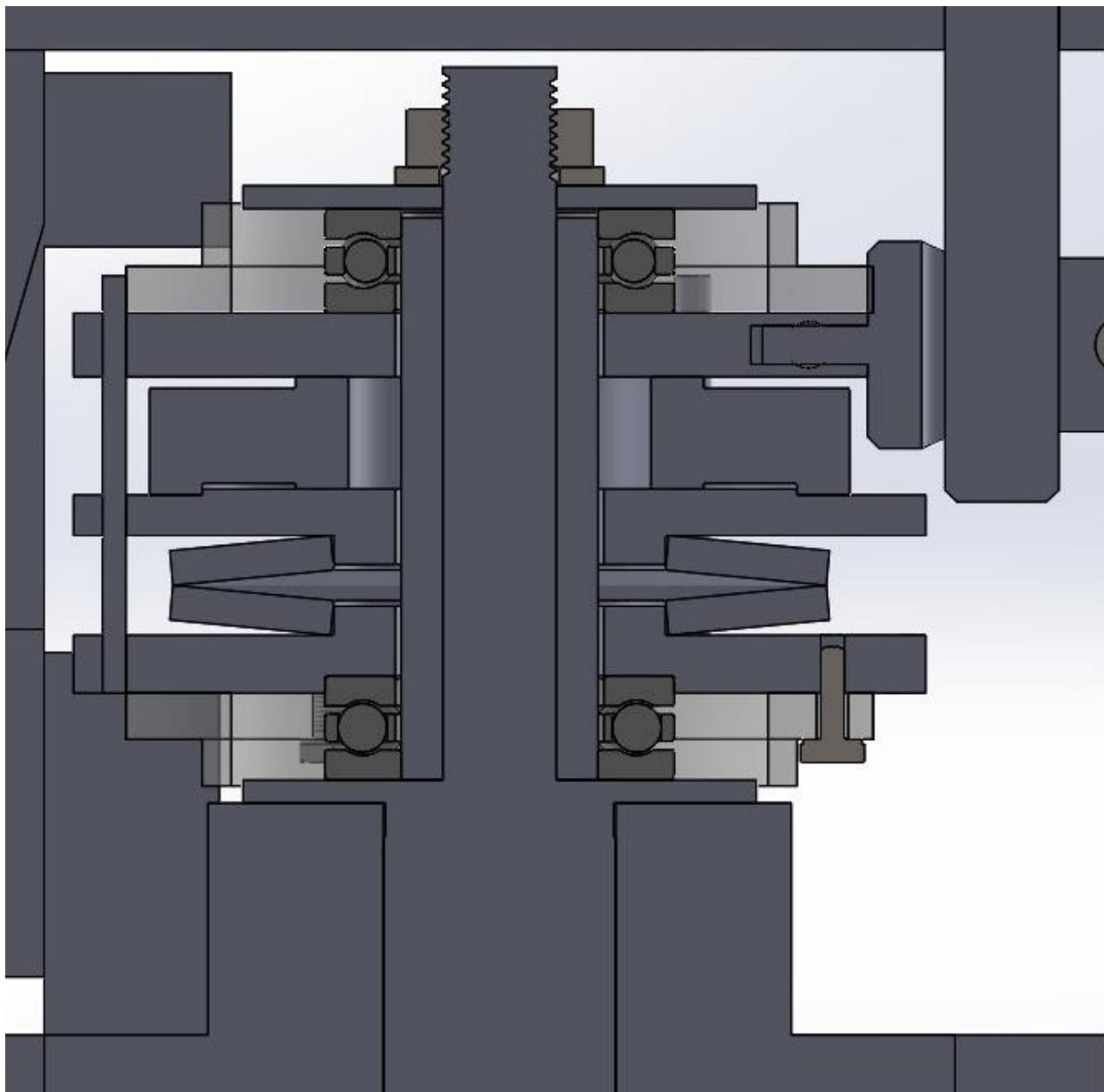
- [12] Bader, N., et al. Examination of friction and wear of a 100Cr6 ball against a bearing ring in a micro-pin-on-disk tester. 2015, pp. 47–58. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.2495/SECM150051>.
- [13] A.De Paulis, P. Forte, F. Frenzo, E. Manfredi, Costruzione di macchine, Pearson, II Ed., 2019.
- [14] R.C. Juvinall, K.M. Marshek, Fondamenti di Costruzione di Macchine, Città Studi, 2017.
- [15] J.E. Shigley, R.G. Budynas, J.K. Nisbett, Progetto e costruzione di macchine, McGraw Hill, III Ed. Italiana, 2013.
- [16] Molle belleville, Lee Spring. <https://www.leespring.it/it/molle-a-tazza-belleville>
- [17] BULLONERIA EMILIANA. <https://www.bulloneriaemiliana.it/prodotti-it.html>

## Appendice A

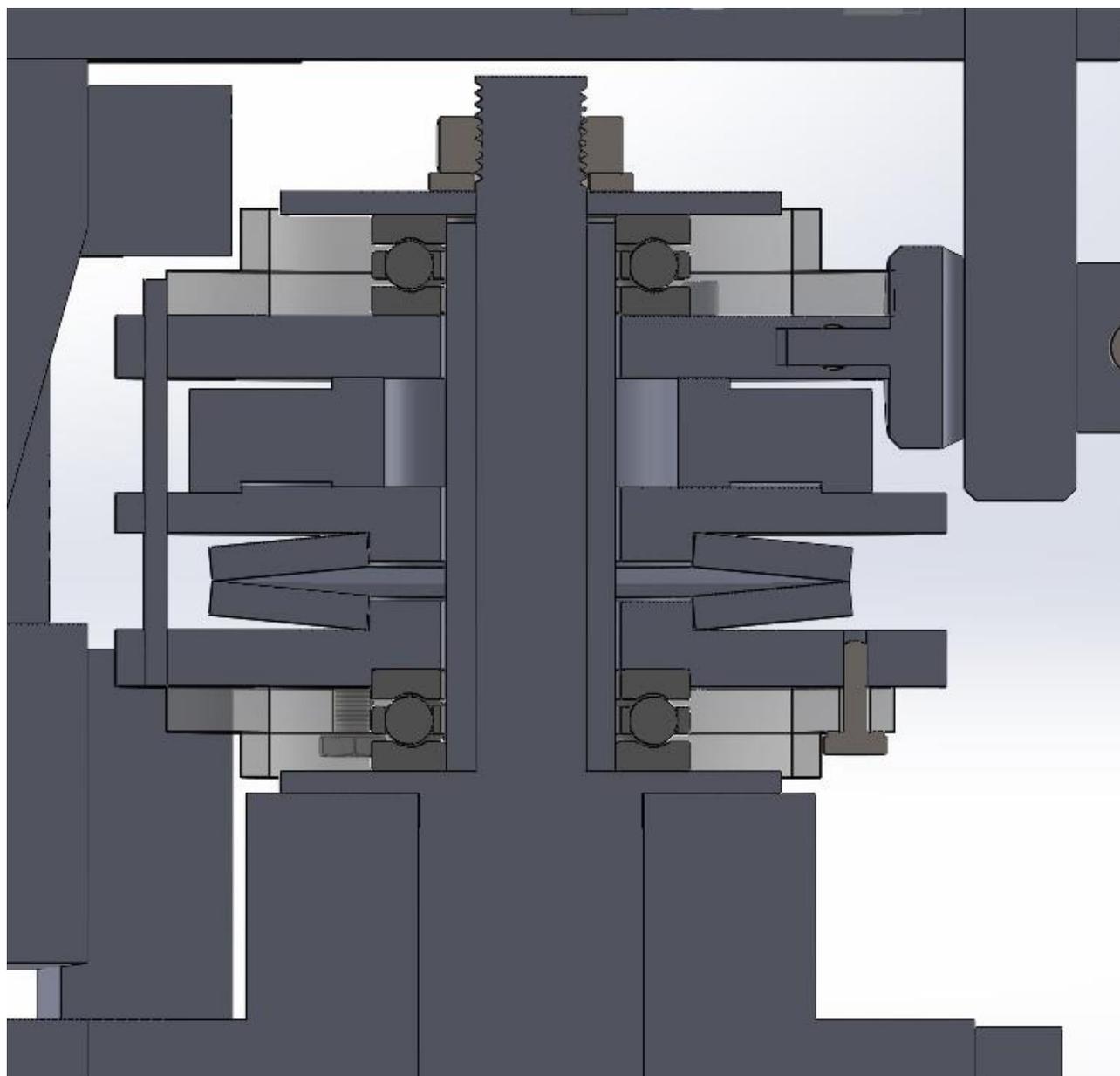
### A.1 Sezione struttura cuscinetto 51104



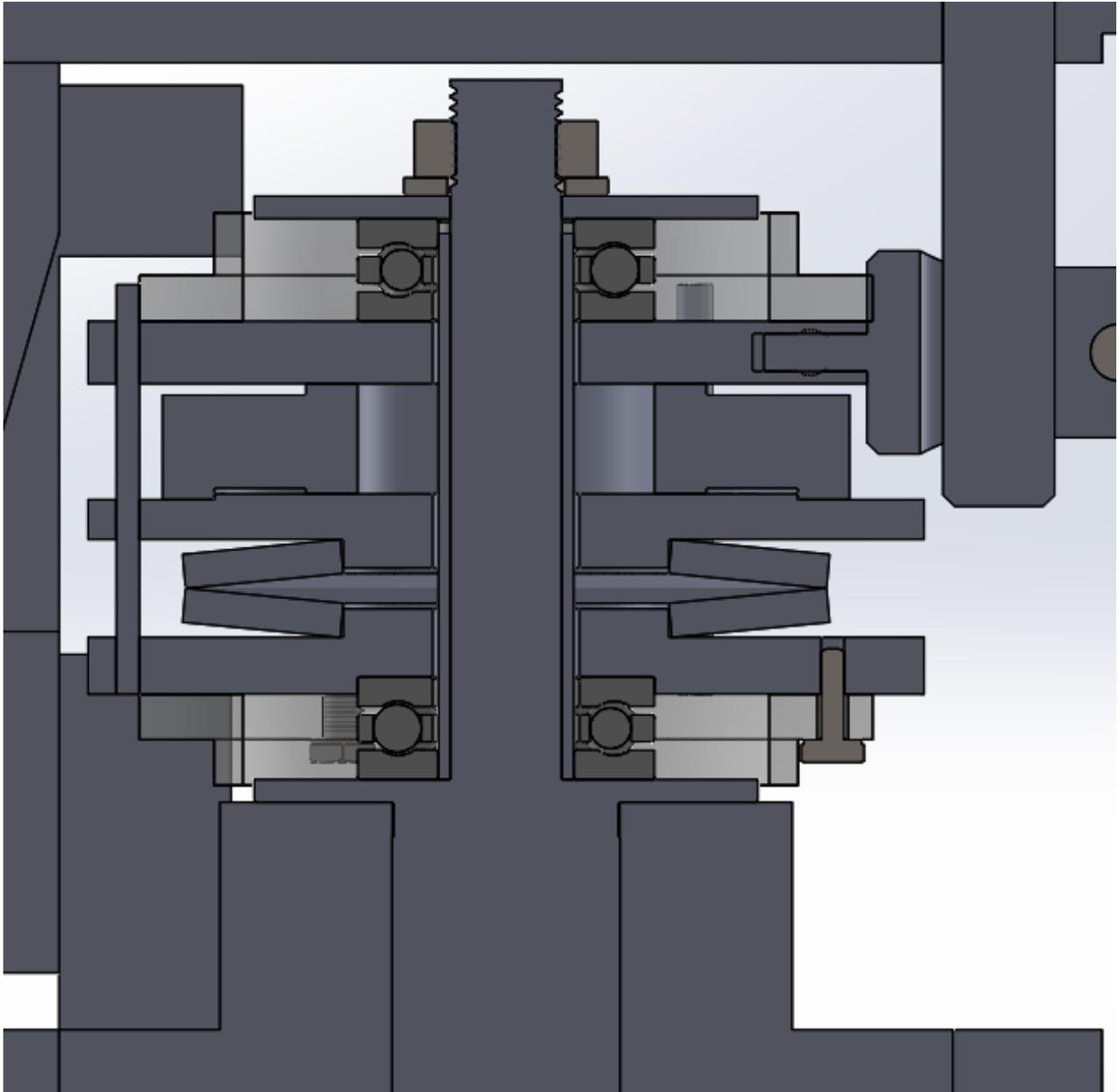
## A.2 Sezione struttura cuscinetto 51103



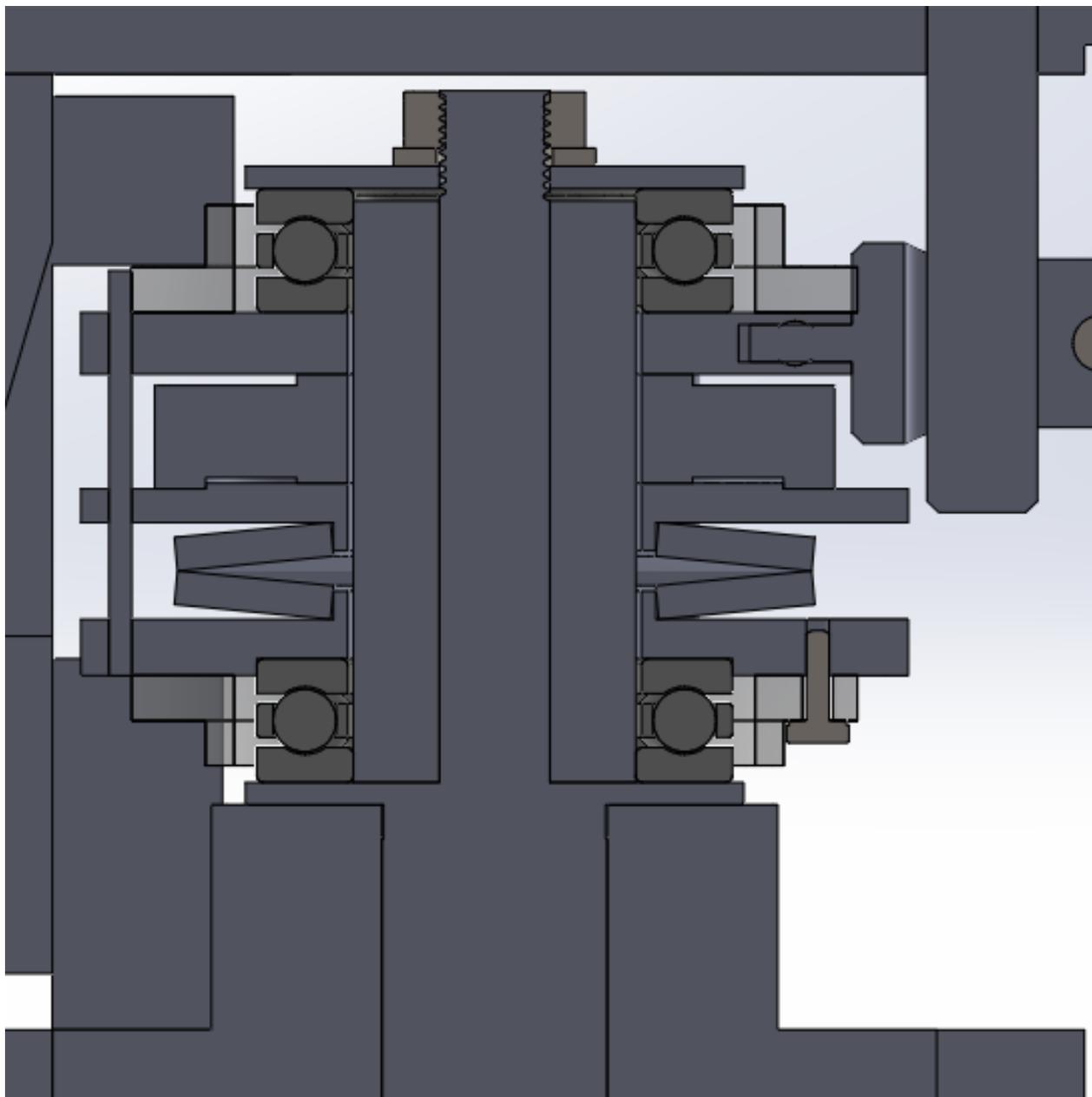
### A.3 Sezione struttura cuscinetto 51102



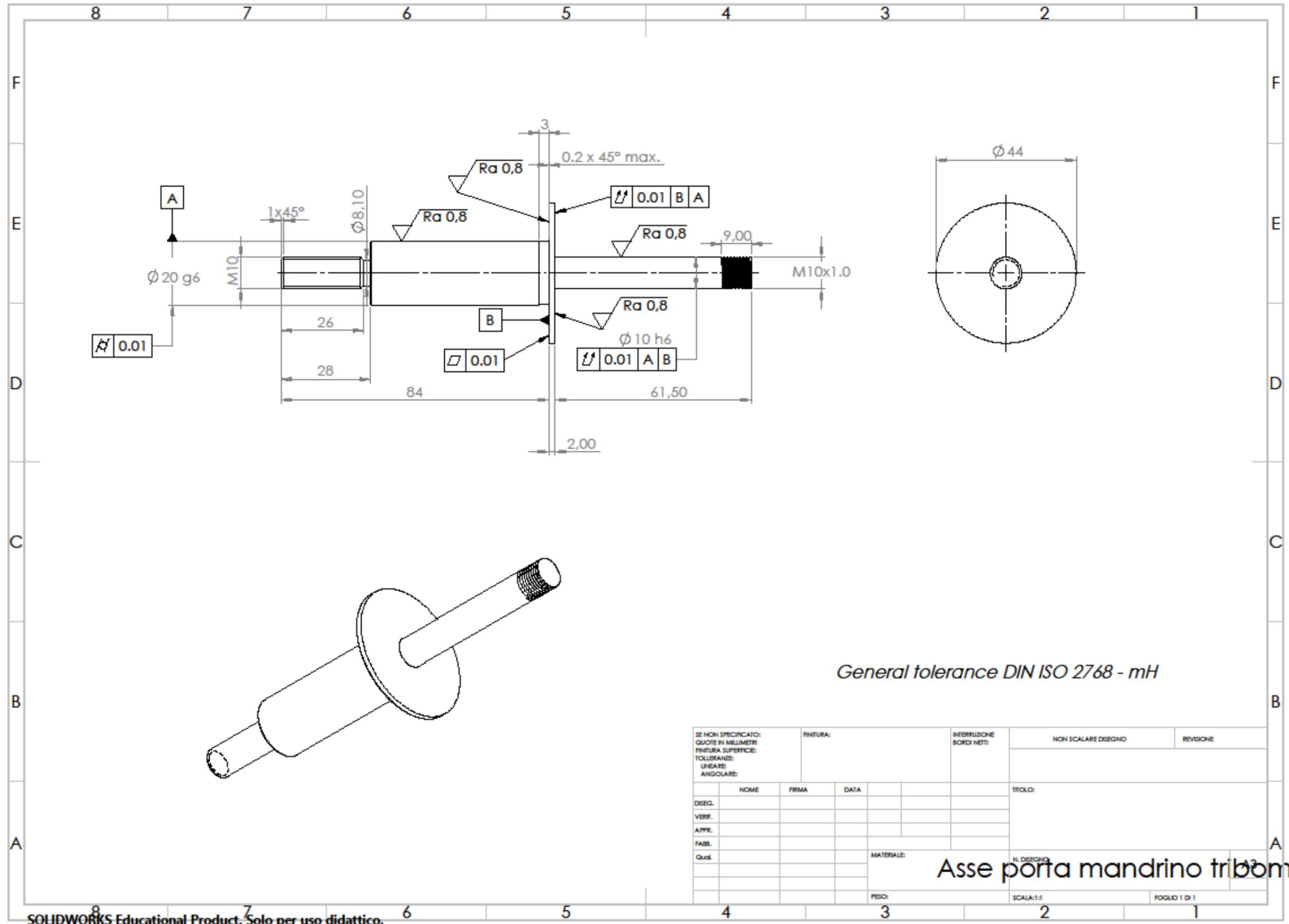
#### A.4 Sezione struttura cuscinetto 51101

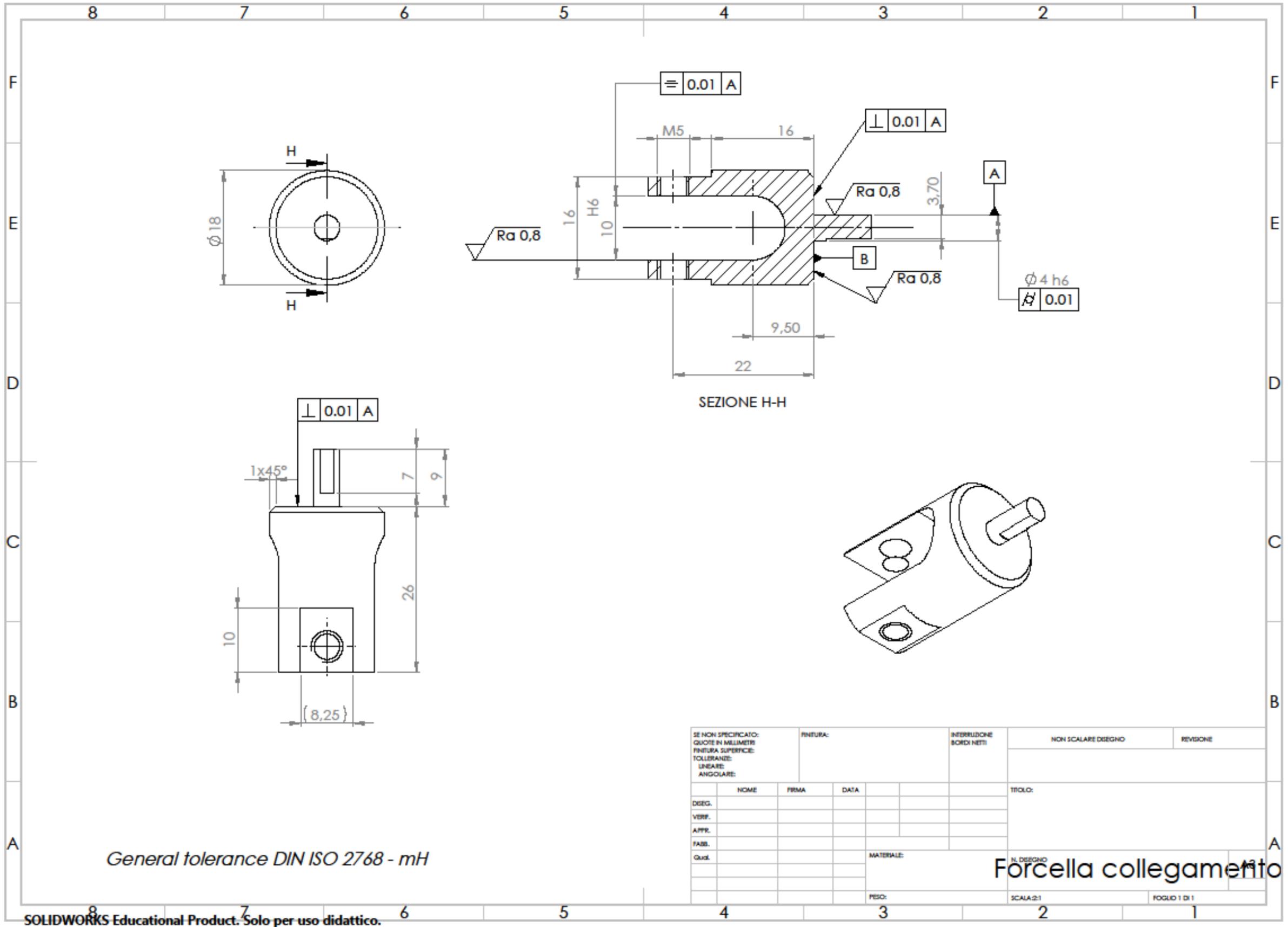


## A.5 Sezione struttura cuscinetto 51105



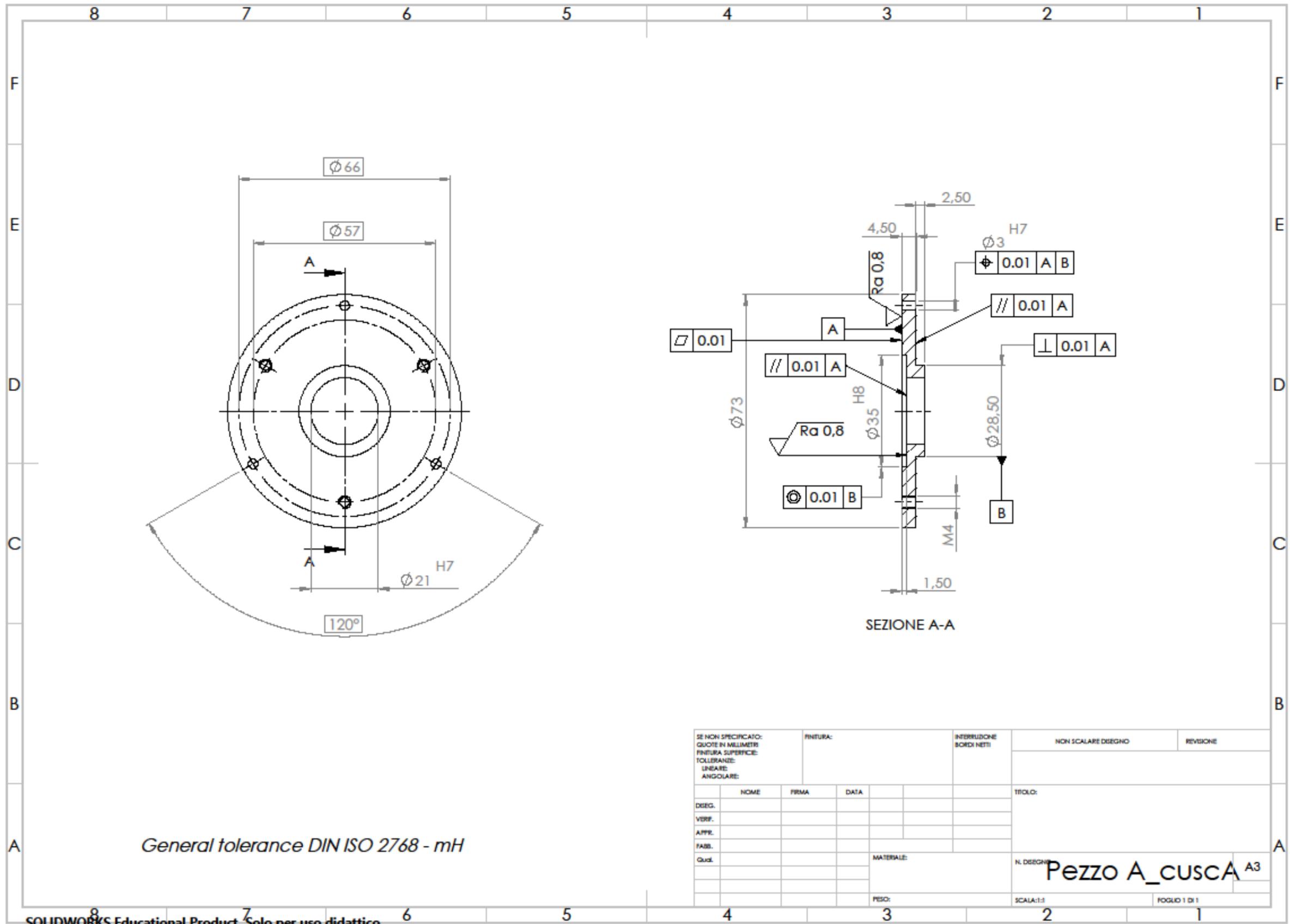
Appendice B

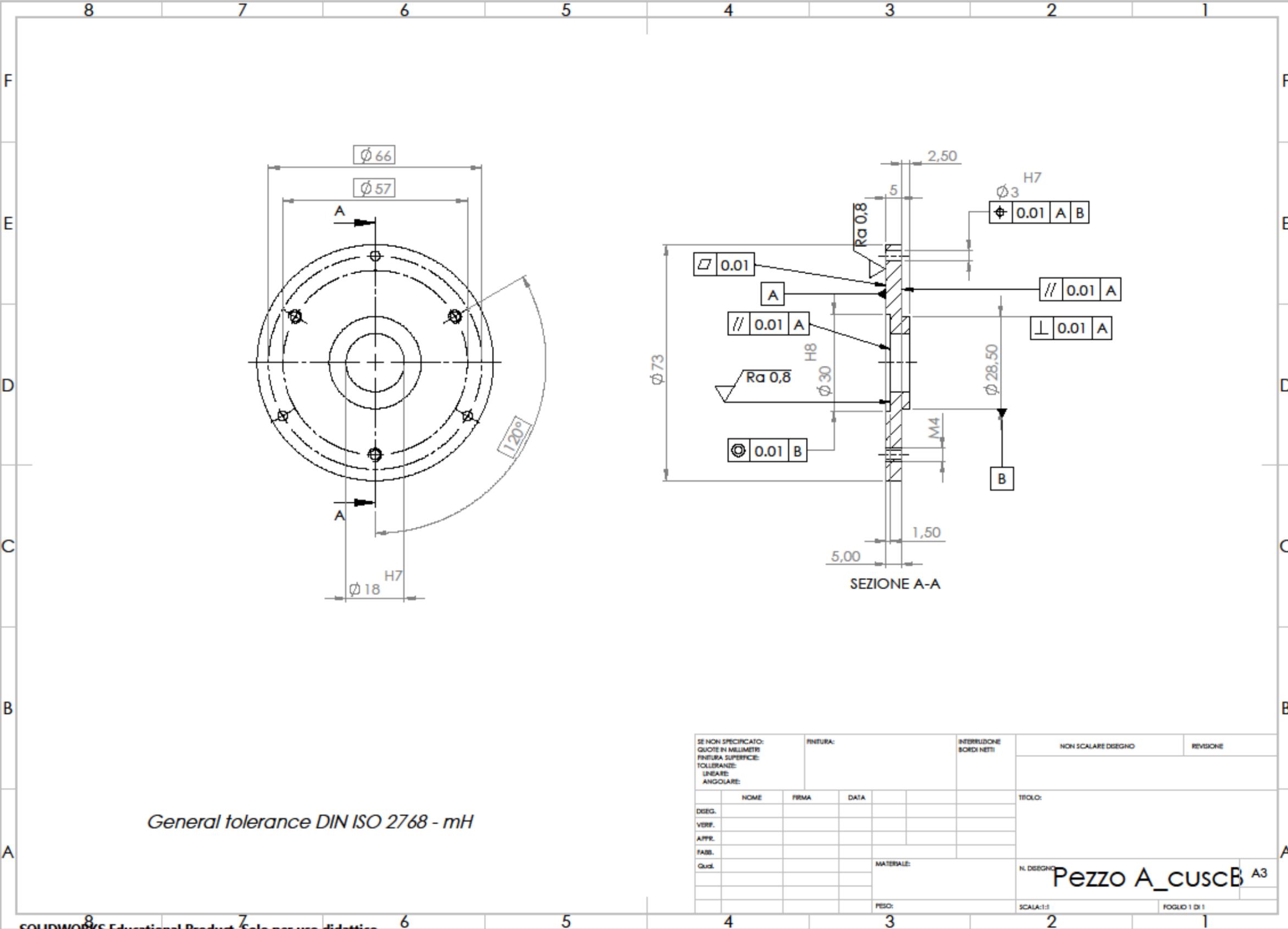




General tolerance DIN ISO 2768 - mH

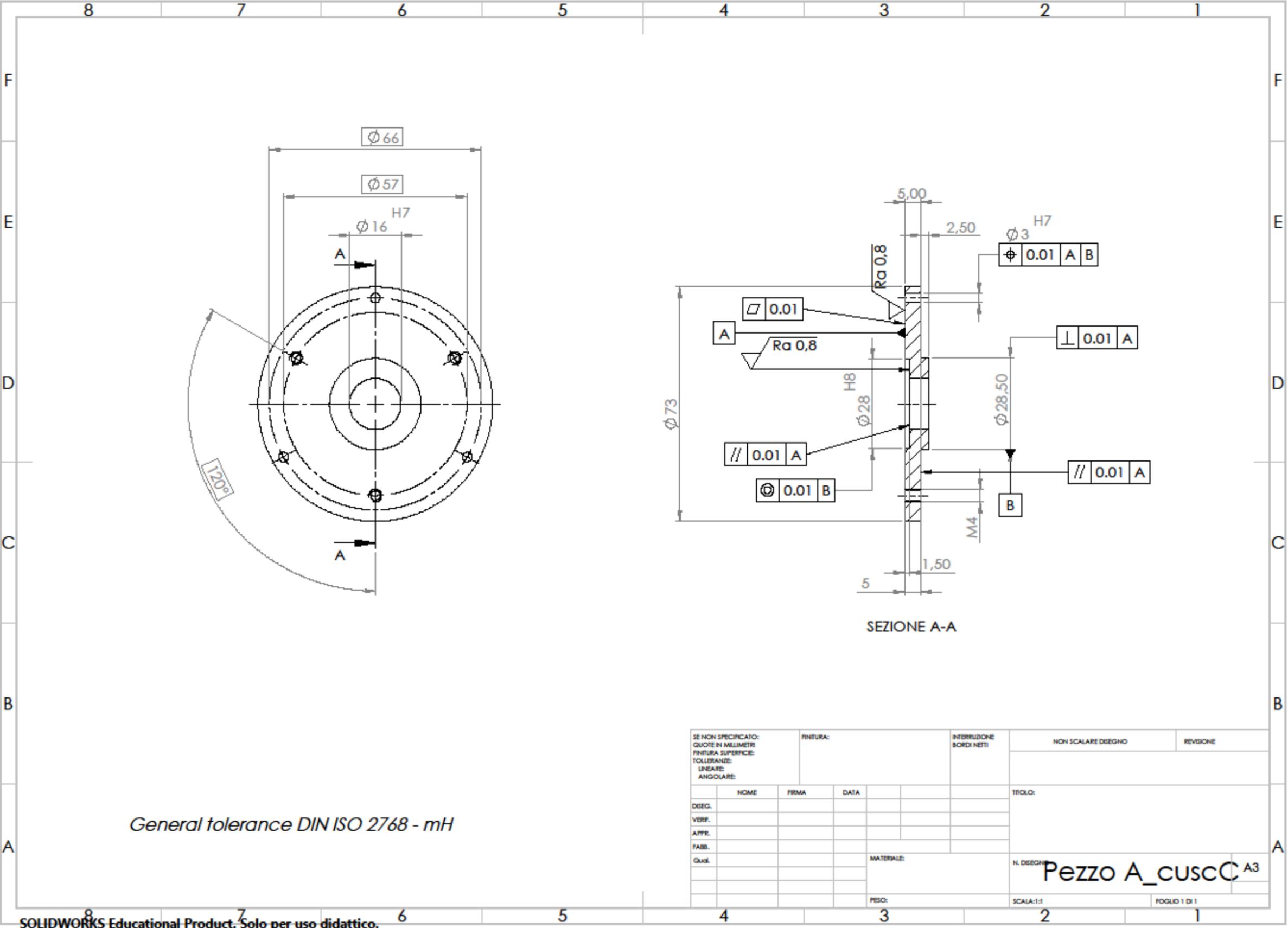
|   |      |       |      |          |            |                             |  |                     |  |               |  |
|---|------|-------|------|----------|------------|-----------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINTURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |      |       |      | FINTURA: |            | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE     |  |
| DESEG.  | NOME | FIRMA | DATA |          |            | TITOLO:                     |  |                     |  |               |  |
| VERIF.  |      |       |      |          |            |                             |  |                     |  |               |  |
| APPR.   |      |       |      |          |            |                             |  |                     |  |               |  |
| FABB.   |      |       |      |          |            |                             |  |                     |  |               |  |
| Quot.   |      |       |      |          | MATERIALE: | IL DISEGNO                  |  |                     |  |               |  |
|   |      |       |      |          |            | Forcella collegamento       |  |                     |  |               |  |
|   |      |       |      |          | PESO:      | SCALA:2:1                   |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |





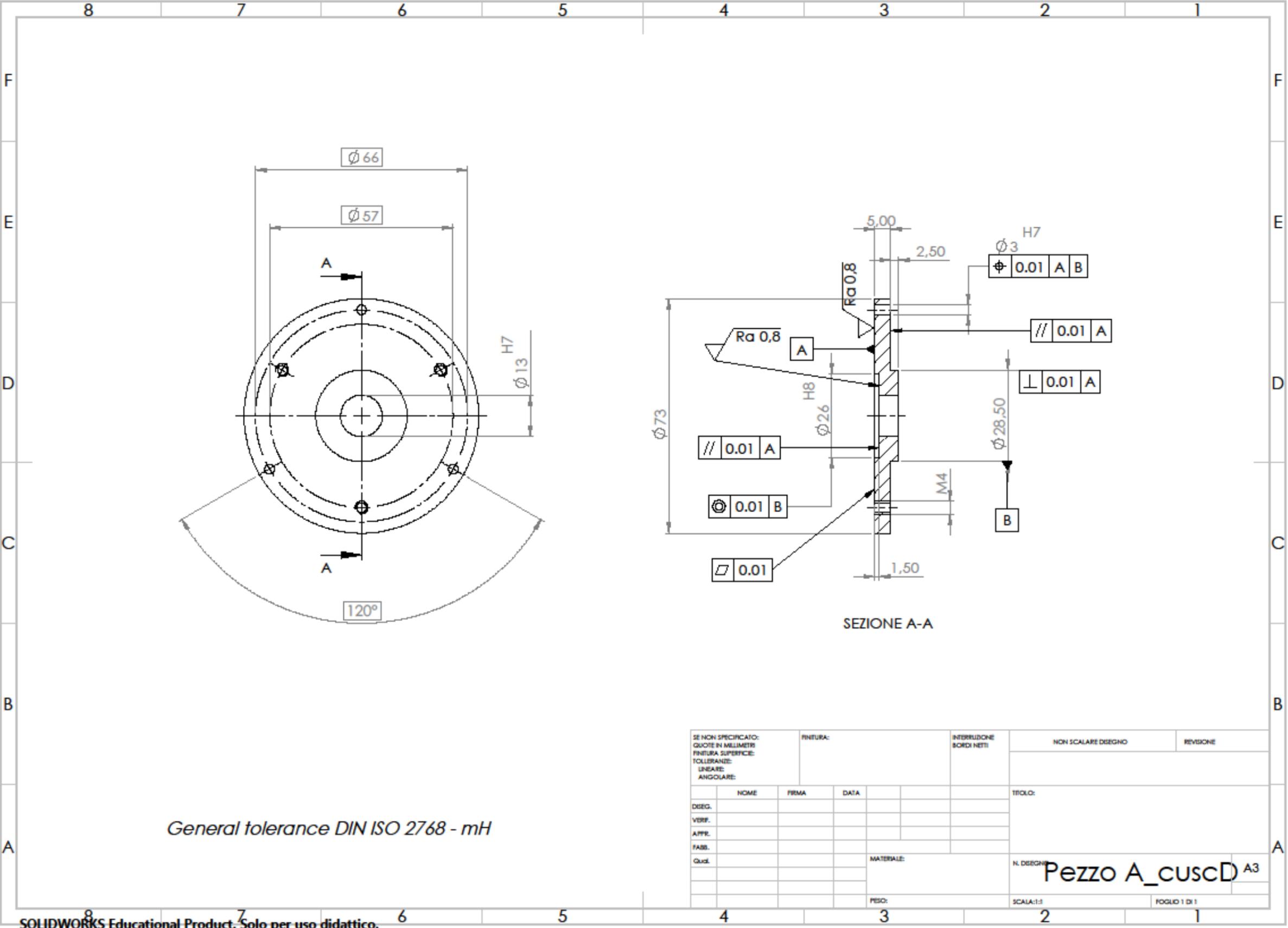
General tolerance DIN ISO 2768 - mH

|  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
|--|--|--|--|-----------|--|----------------------------|--|---------------------|--|------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  |  | FINITURA: |  | INTERLUDONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE        |  |
| DISEG.   |  |  |  | NOME      |  | FIRMA                      |  | DATA                |  | TITOLO:          |  |
| VERIF.   |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| APPR.  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| FABB.  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| Quot.  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  | MATERIALE:       |  |
|  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  | N. DISEGNO       |  |
|  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  | Pezzo A_cuscB A3 |  |
|  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  | SCALA:1:1        |  |
|  |  |  |  |           |  |                            |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1    |  |

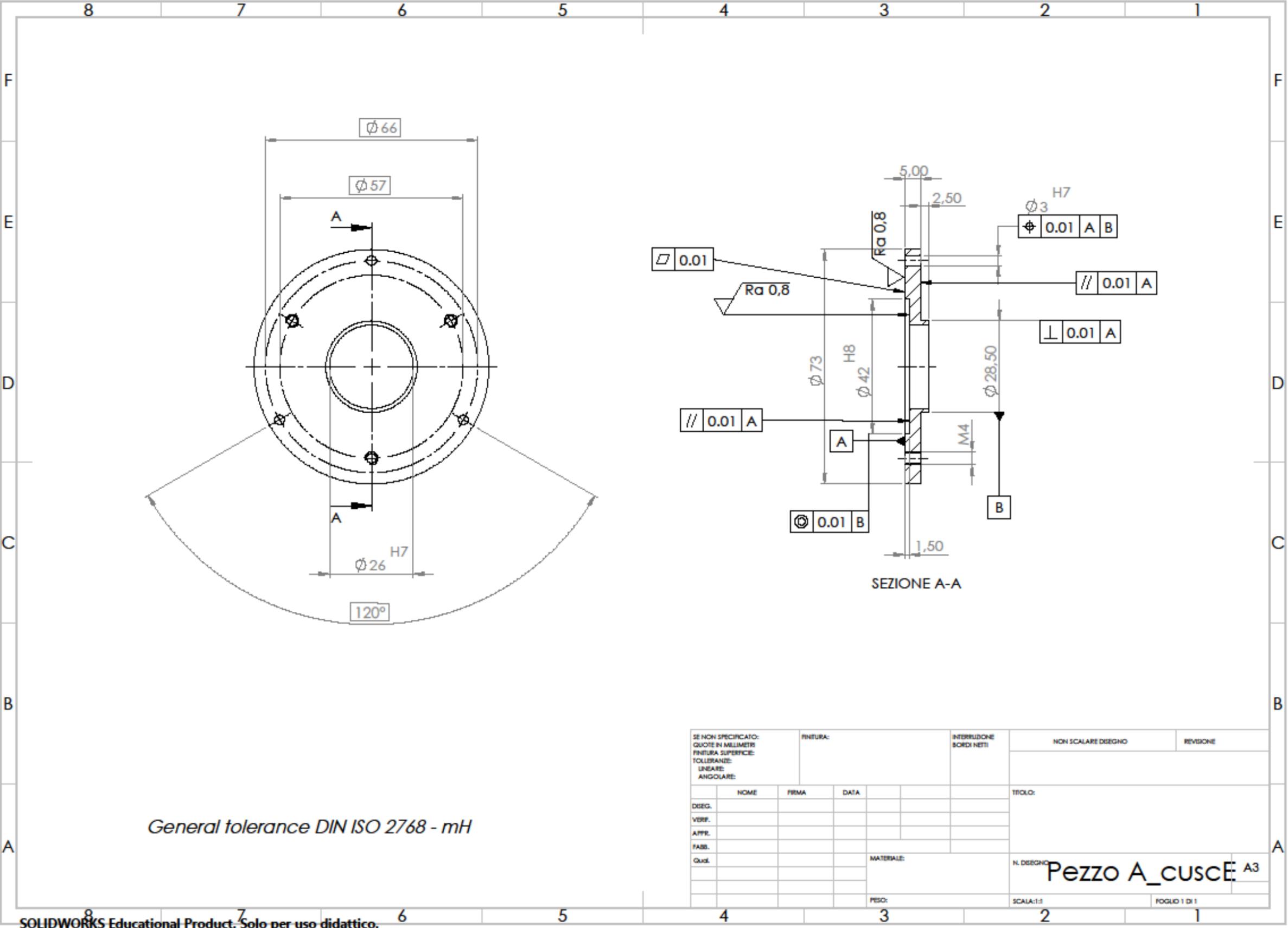


General tolerance DIN ISO 2768 - mH

|  |  |  |  |           |  |                              |  |                     |  |               |  |
|--|--|--|--|-----------|--|------------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  |  | FINITURA: |  | INTEREDICIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE     |  |
| DISEG.   |  |  |  | NOME      |  | FIRMA                        |  | DATA                |  | TITOLO:       |  |
| VERIF.   |  |  |  |           |  |                              |  |                     |  |               |  |
| APPR.  |  |  |  |           |  |                              |  |                     |  |               |  |
| FABR.  |  |  |  |           |  |                              |  |                     |  |               |  |
| Qual.  |  |  |  |           |  |                              |  | MATERIALE:          |  | N. DISEGNO    |  |
|  |  |  |  |           |  |                              |  | PEZZO A_cuscC       |  | A3            |  |
|  |  |  |  |           |  |                              |  | PESO:               |  | SCALA:1:1     |  |
|  |  |  |  |           |  |                              |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |

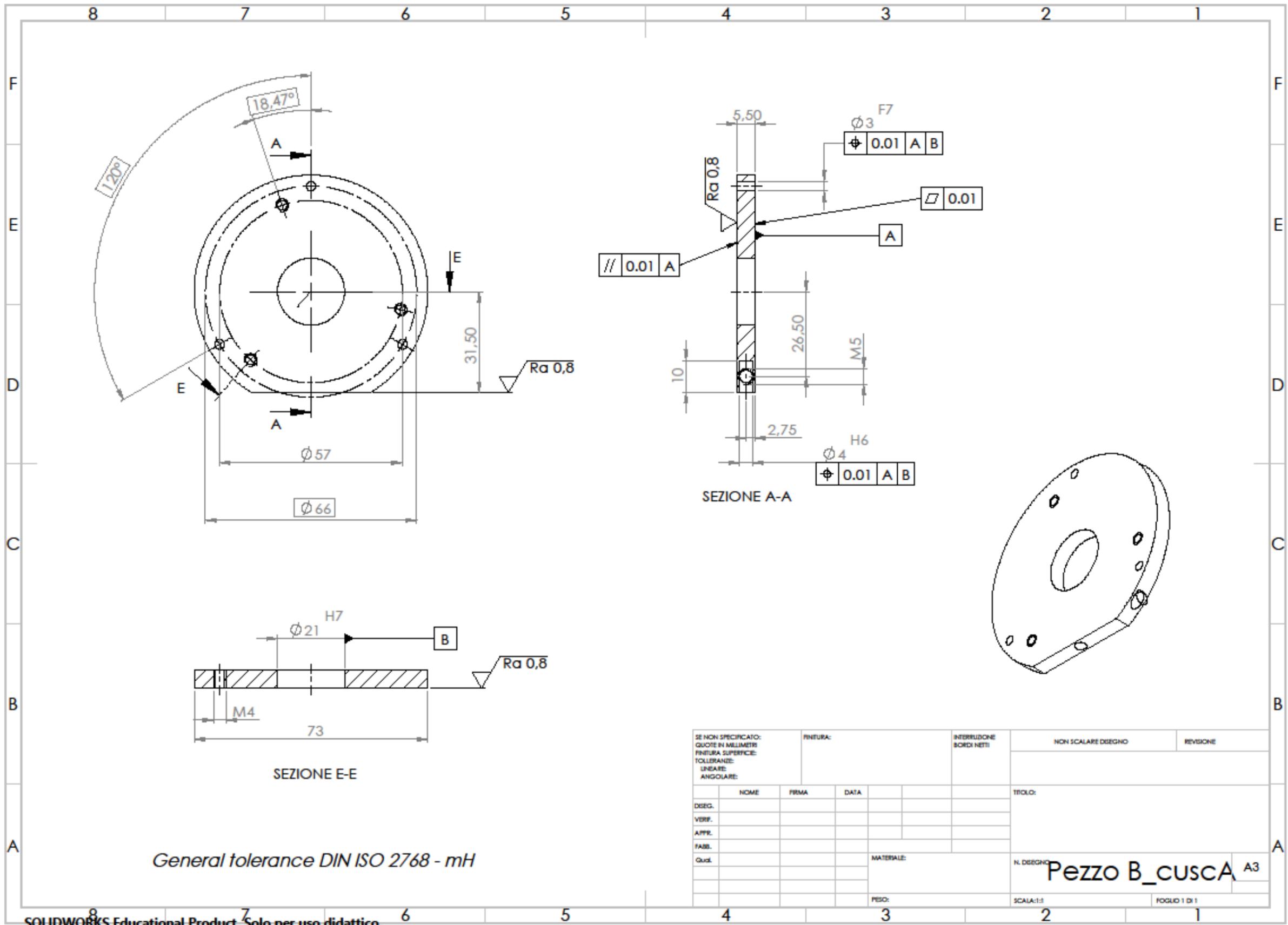


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



General tolerance DIN ISO 2768 - mH

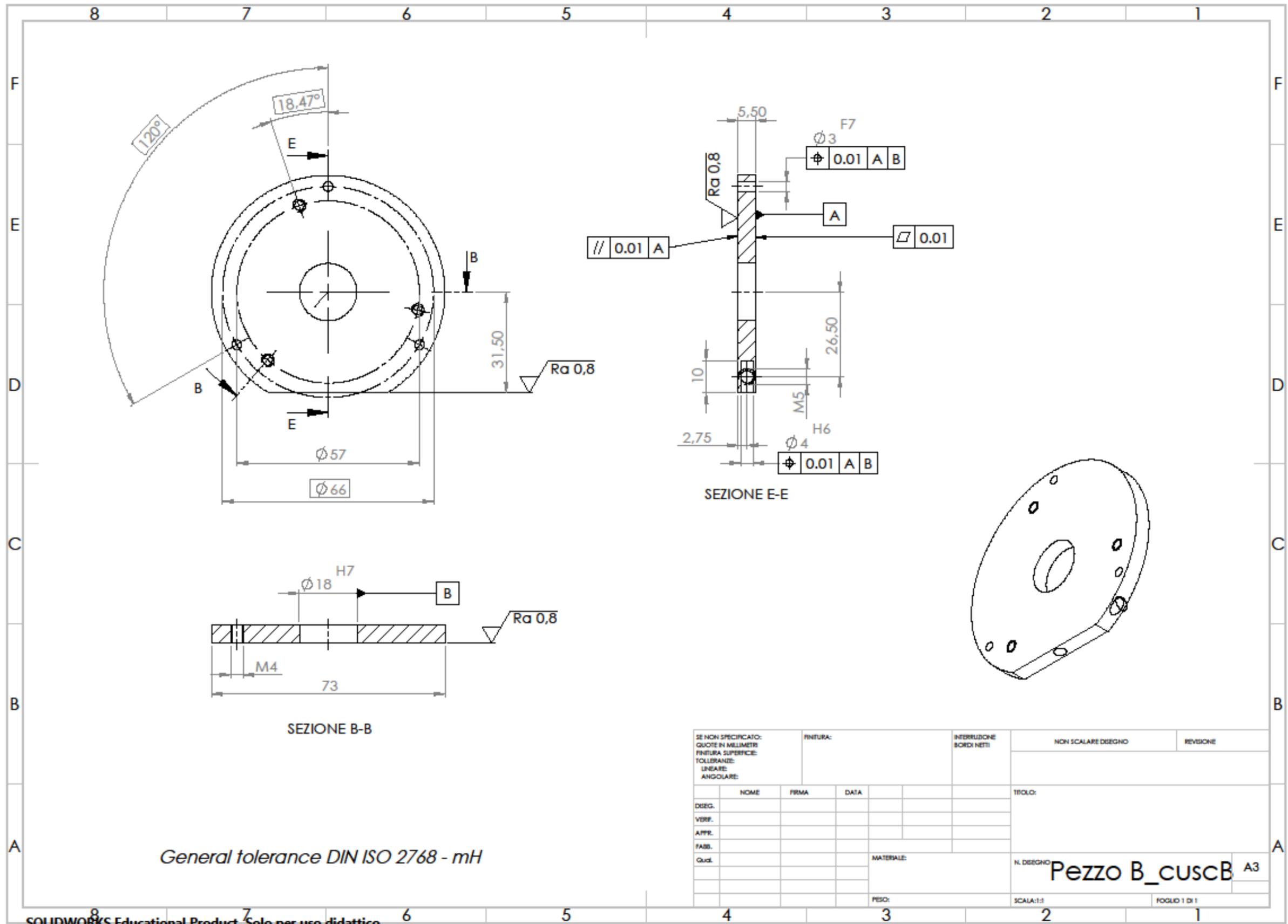
|  |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
|--|--|--|-----------|--|------------------------------|--|--------------------|--|------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  | FINITURA: |  | INTERLUCIDINE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DEEGNO |  | REVISIONE        |  |
|  |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
|  |  |  | NOME      |  | FIRMA                        |  | DATA               |  | TITOLO:          |  |
| DEEG.  |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
| VERIF.   |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
| APPF.  |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
| FAB.   |  |  |           |  |                              |  |                    |  |                  |  |
| Qual.  |  |  |           |  |                              |  | MATERIALE:         |  | N. DEEGNO        |  |
|  |  |  |           |  |                              |  |                    |  | Pezzo A_cusce A3 |  |
|  |  |  |           |  |                              |  | PESO:              |  | SCALA:1:1        |  |
|  |  |  |           |  |                              |  |                    |  | FOGLIO 1 DI 1    |  |

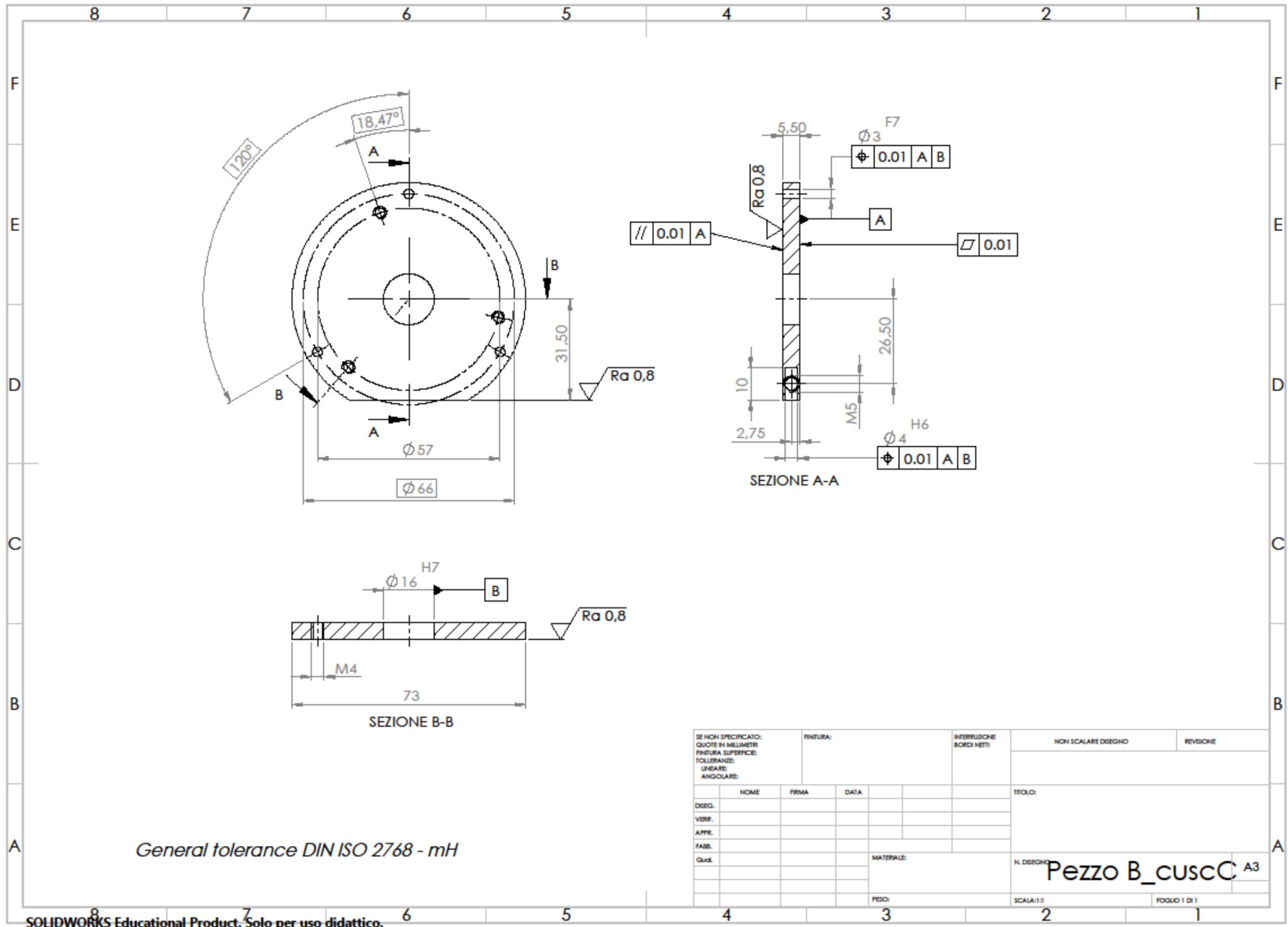


General tolerance DIN ISO 2768 - mH

|  |  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |  |
|--|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  | FINITURA: |  | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DEEGRNO |  | REVISIONE     |  |  |
| DEEG.  |  |  | NOME      |  | FIRMA                       |  | DATA                |  | TITOLO:       |  |  |
| VERIF.   |  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |  |
| APPR.  |  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |  |
| FABB.  |  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |  |
| Quot.  |  |  |           |  |                             |  |                     |  | MATERIALE:    |  |  |
|  |  |  |           |  |                             |  |                     |  | N. DEEGRNO:   |  |  |
|  |  |  |           |  |                             |  |                     |  | PESO:         |  |  |
|  |  |  |           |  |                             |  |                     |  | SCALA:1:1     |  |  |
|  |  |  |           |  |                             |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |  |

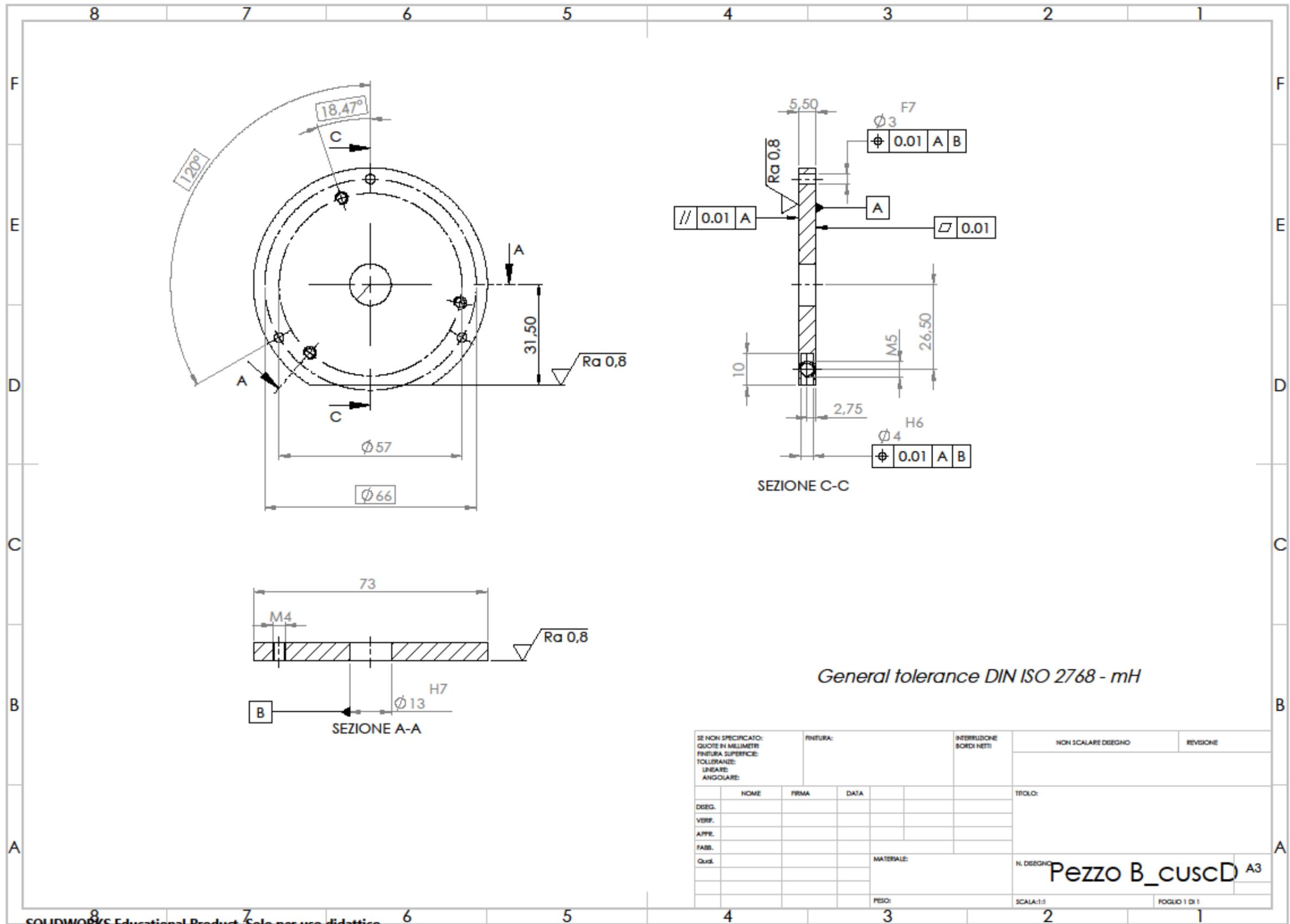
Pezzo B\_cusca A3



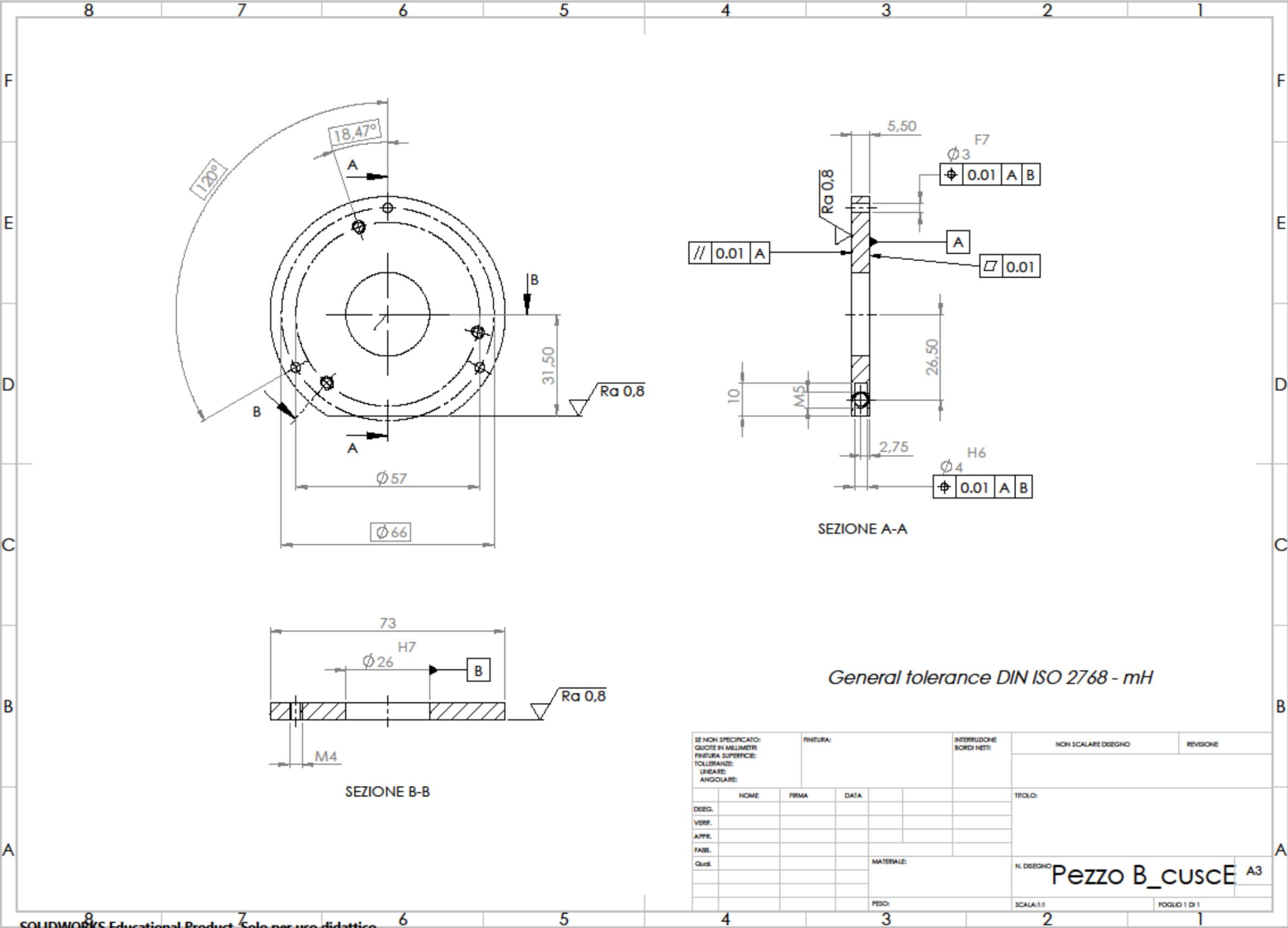


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

|  |      |       |      |            |                           |                      |               |
|--|------|-------|------|------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |      |       |      | FINITURA:  | INTERLUCIDE<br>BORDI NETI | NON SCALARE DISEGNO  | REVISIONE     |
| DESIGN.  | NOME | FIRMA | DATA |            |                           | TITOLO:              |               |
| VERIF.   |      |       |      |            |                           |                      |               |
| APPR.  |      |       |      |            |                           |                      |               |
| FABR.  |      |       |      |            |                           |                      |               |
| Qual.  |      |       |      | MATERIALE: |                           | N. DISEGNO:          |               |
|  |      |       |      |            |                           | <b>Pezzo B_cuscC</b> | A3            |
|  |      |       |      | PESO:      |                           | SCALA:1:1            | FOGLIO 1 DI 1 |

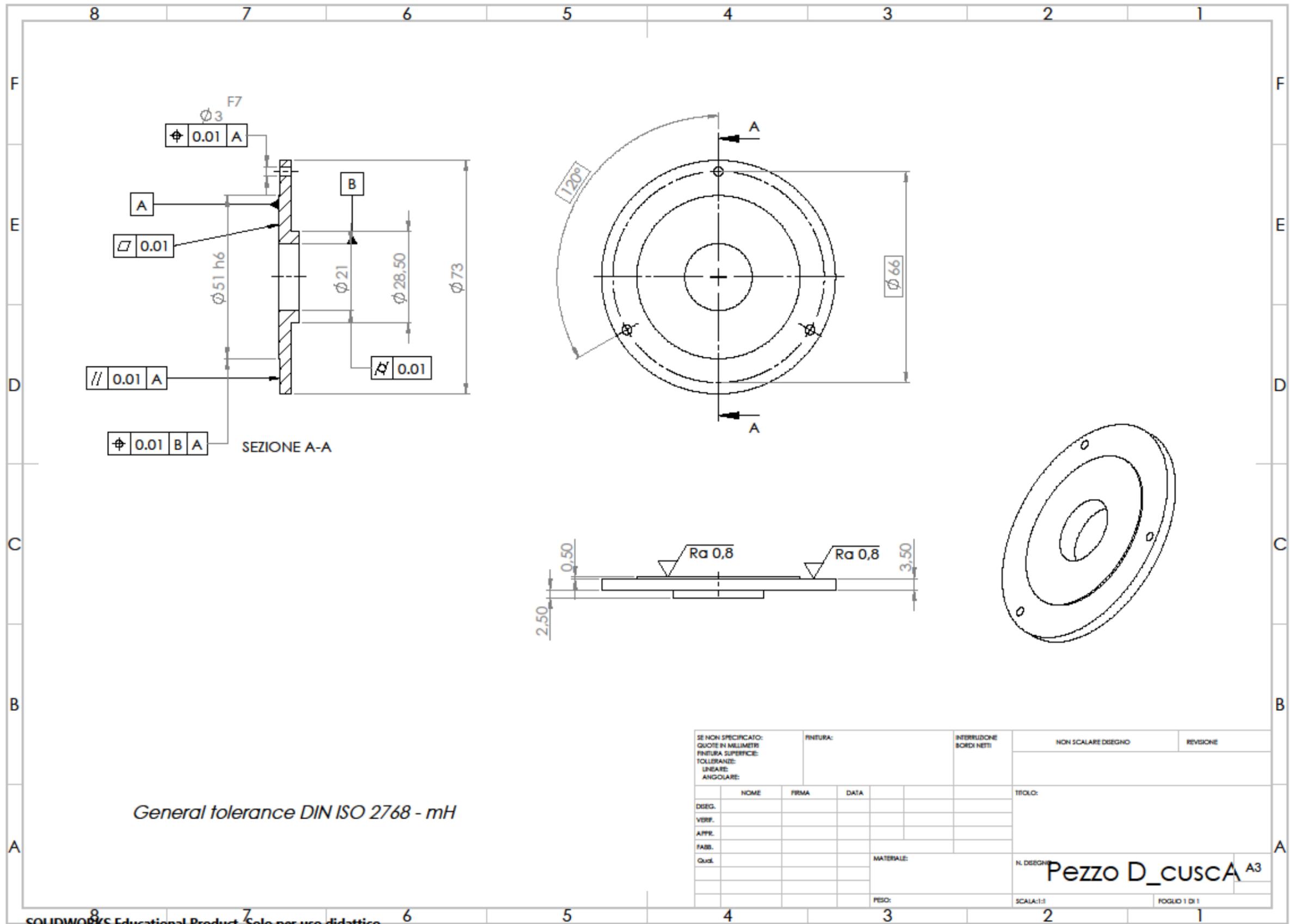


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



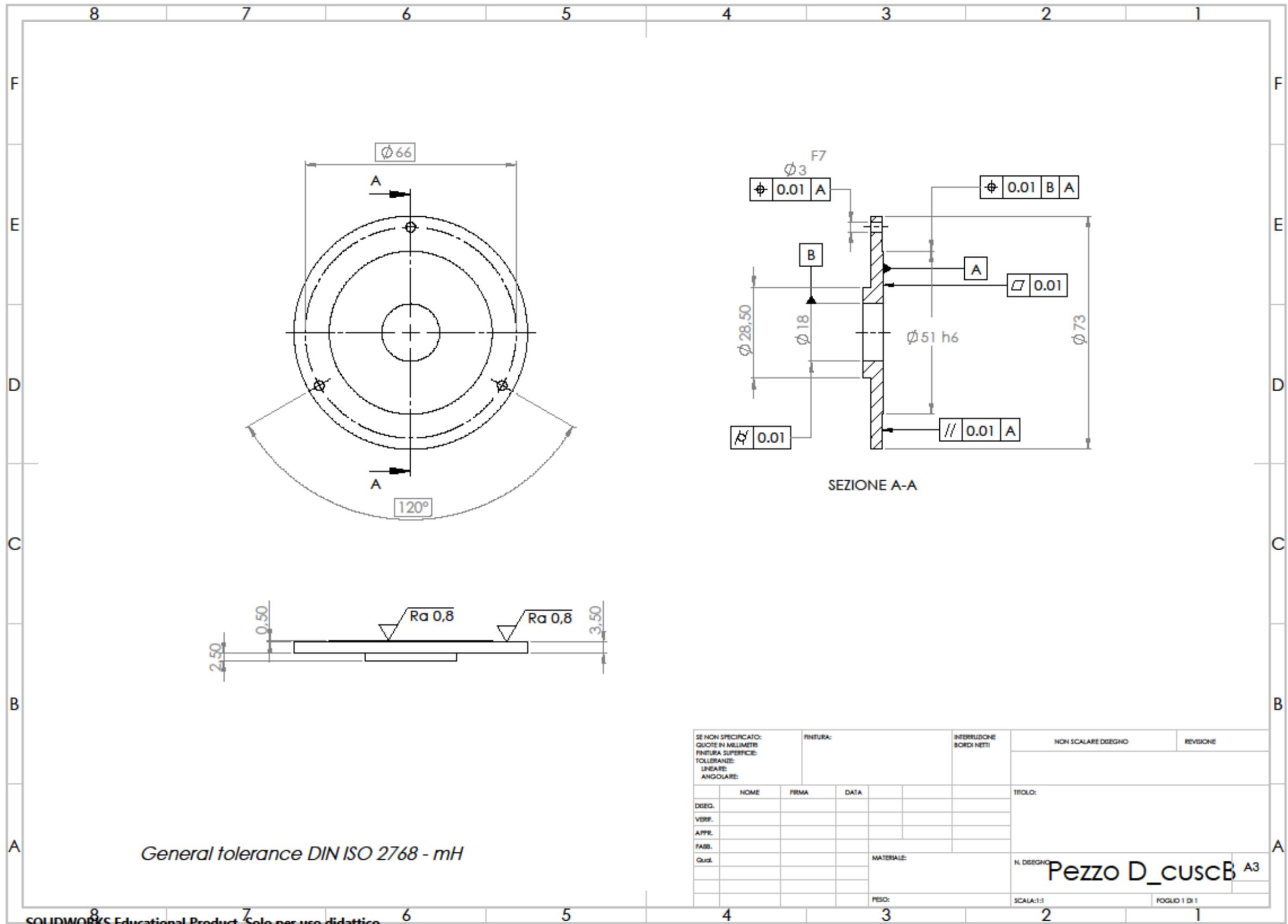
General tolerance DIN ISO 2768 - mH

|  |  |           |  |                             |  |                     |  |                  |  |
|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE        |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | PRIMA                       |  | DATA                |  | TITOLO:          |  |
| VERIF.   |  |           |  |                             |  |                     |  |                  |  |
| APPR.  |  |           |  |                             |  |                     |  |                  |  |
| FABB.  |  |           |  |                             |  |                     |  |                  |  |
| QUOT.  |  |           |  |                             |  |                     |  | MATERIALE:       |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | N. DISEGNO       |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | Pezzo B_cusce A3 |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | PESO:            |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | SCALA:1:1        |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1    |  |

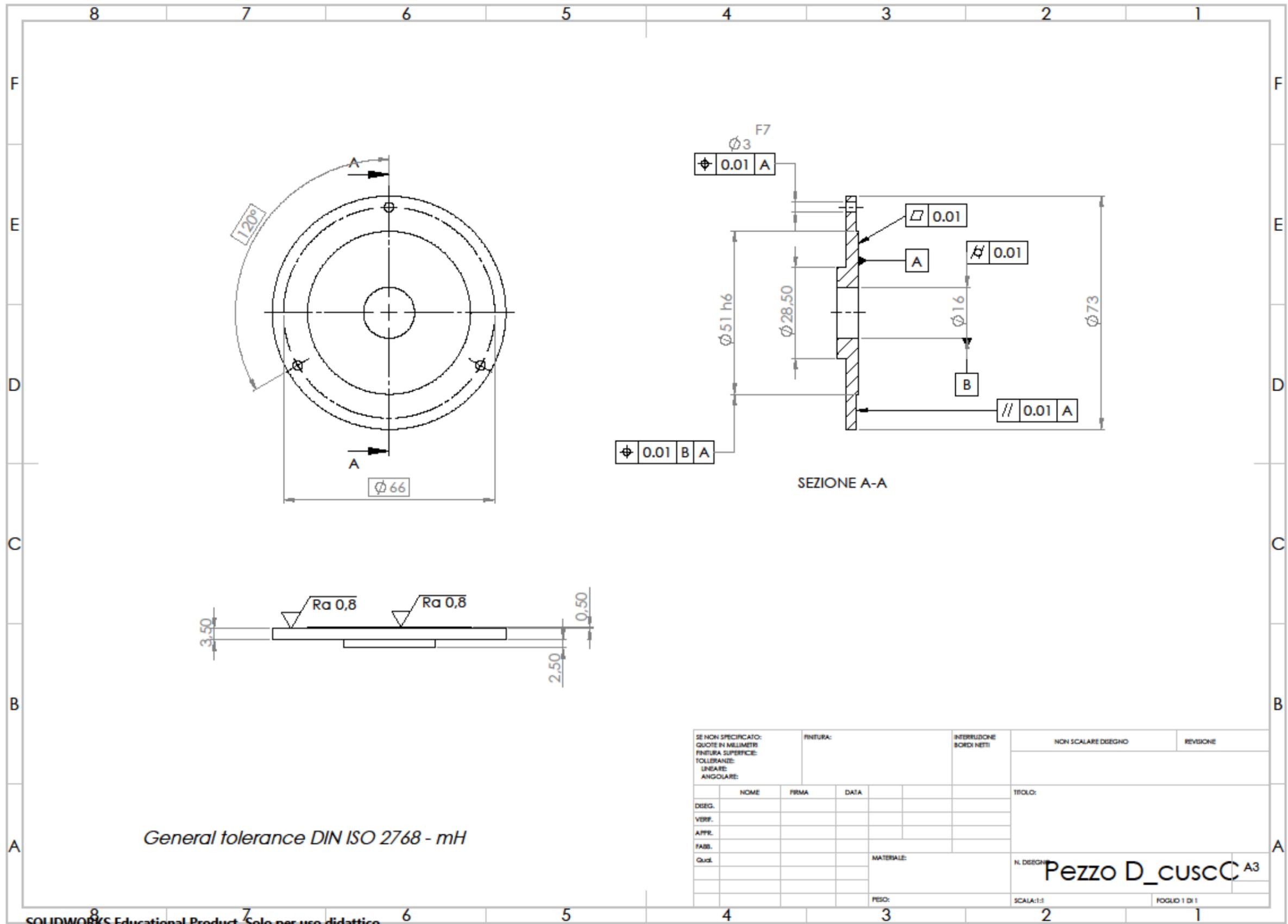


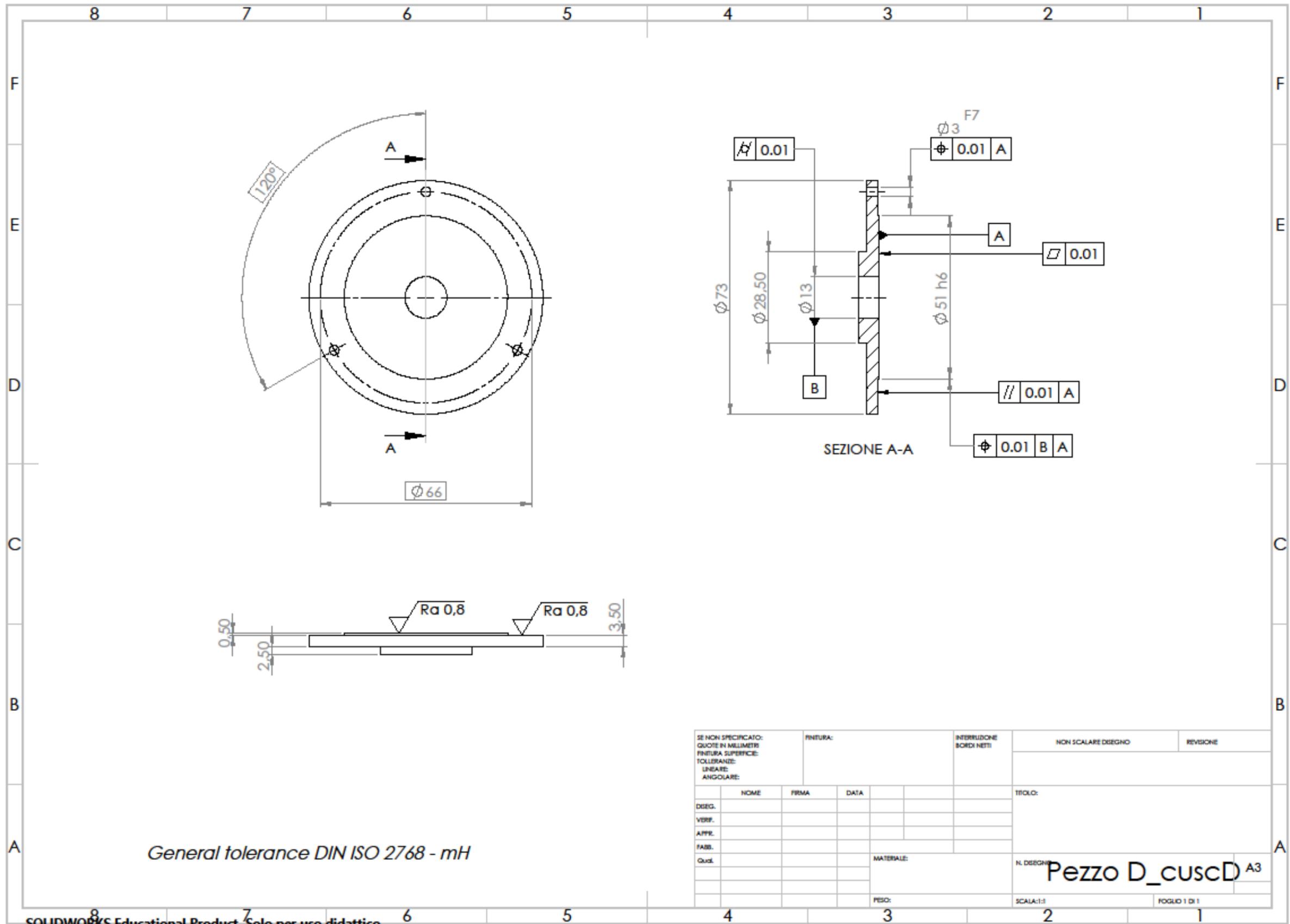
General tolerance DIN ISO 2768 - mH

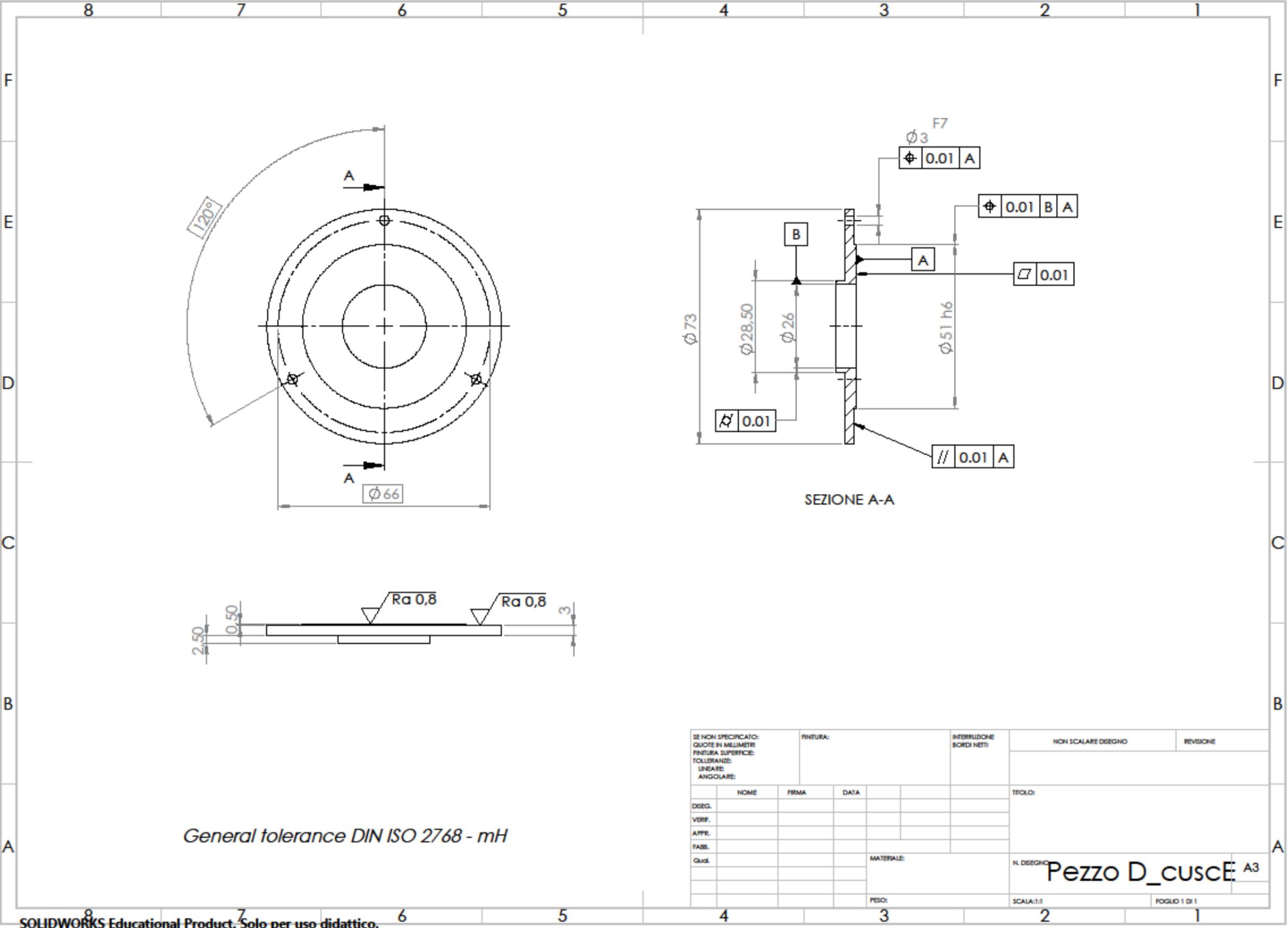
|  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
|--|--|-----------|--|----------------------------|--|---------------------|--|------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTERLUDONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE        |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | PRIMA                      |  | DATA                |  | TITOLO:          |  |
| VERIF.   |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| APPR.  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| FABB.  |  |           |  |                            |  |                     |  |                  |  |
| Quot.  |  |           |  |                            |  | MATERIALE:          |  | N. DISEGNO:      |  |
|  |  |           |  |                            |  |                     |  | Pezzo D_cusca A3 |  |
|  |  |           |  |                            |  | PESO:               |  | SCALA:1:1        |  |
|  |  |           |  |                            |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1    |  |



|  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE     |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | DATA                        |  | TITOLO:             |  |               |  |
| VERIF.   |  | FIRMA     |  |                             |  |                     |  |               |  |
| APPR.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| FABB.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| Quot.  |  |           |  | MATERIALE:                  |  | N. DISEGNO:         |  | A3            |  |
|  |  |           |  | PESO:                       |  | SCALA:1:1           |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |

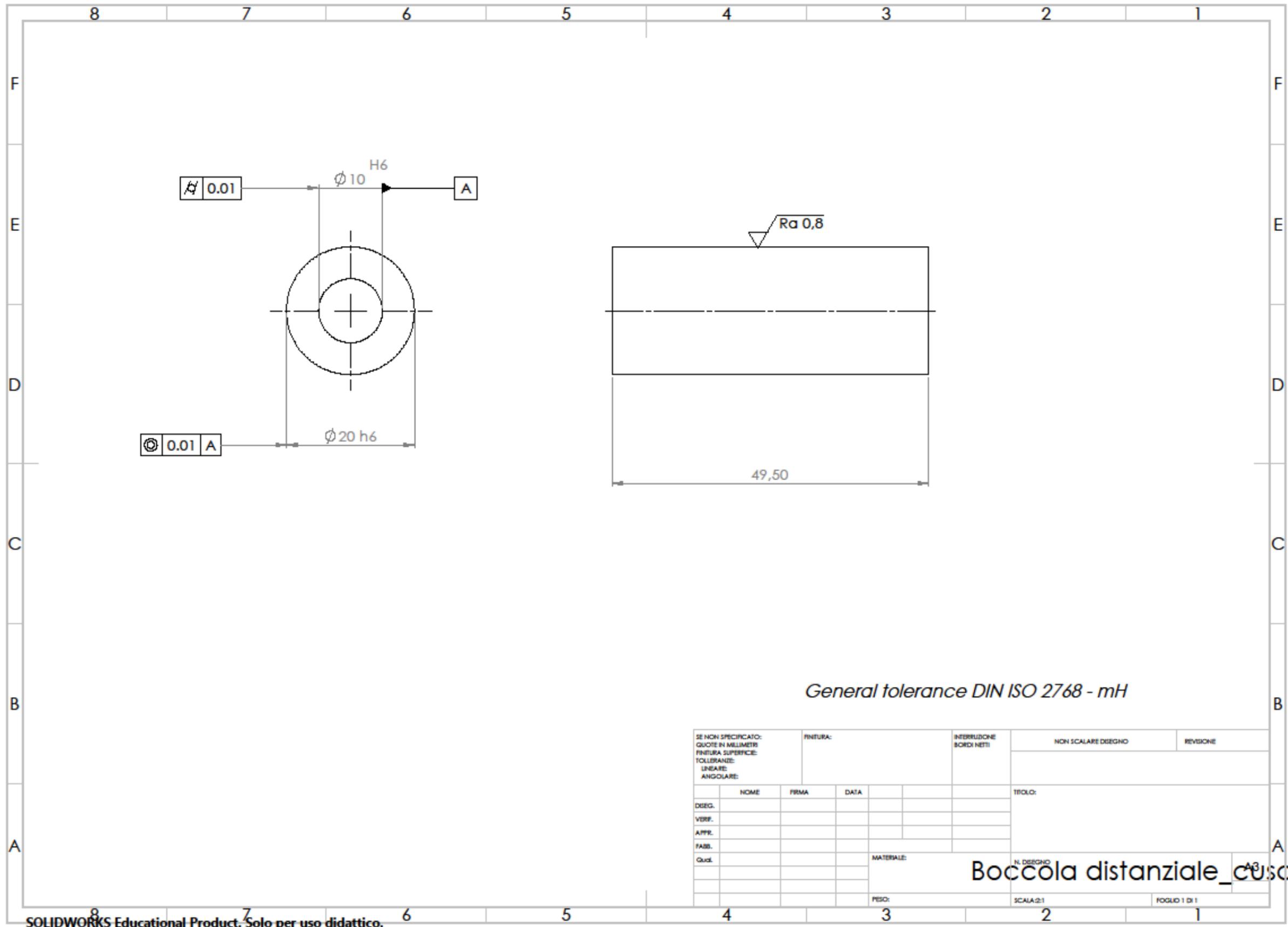






General tolerance DIN ISO 2768 - mH

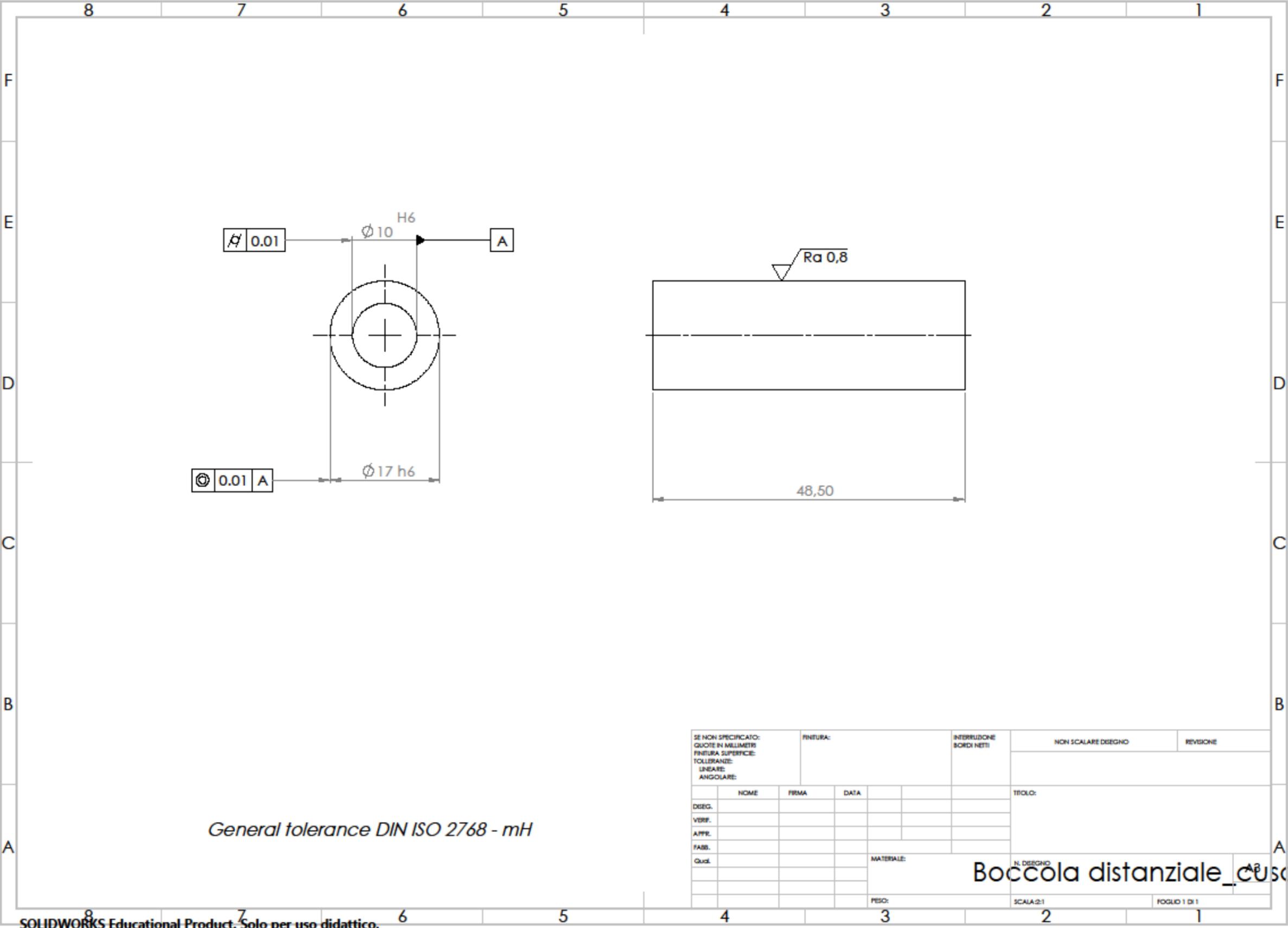
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |                  |  |
|--|--|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|--------------------|--|------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  |  | FINITURA: |  | INTERLUCIDHE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DEEGNO |  | REVISIONE        |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |                  |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | TITOLO:          |  |
| DIEG.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | N. DEEGNO        |  |
| VERIF.   |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | Pezzo D_cuscE A3 |  |
| APPF.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | MATERIALE:       |  |
| FAB.   |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | PESO:            |  |
| Qual.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | SCALA:1:1        |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | FOGLIO 1 DI 1    |  |



General tolerance DIN ISO 2768 - mH

|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |               |  |
|--|--|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|--------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  |  |  | FINITURA: |  | INTEREDICIONE<br>BORDI NETI |  | NON SCALARE DEEGNO |  | REVISIONE     |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |               |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | TITOLO:       |  |
| DISEG.   |  |  |  | NOME      |  | FIRMA                       |  | DATA               |  |               |  |
| VERIF.   |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |               |  |
| APPR.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |               |  |
| FABR.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  |               |  |
| Qual.  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | MATERIALE:    |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | N. DEEGNO     |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | PESO:         |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | SCALA: 2:1    |  |
|  |  |  |  |           |  |                             |  |                    |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |

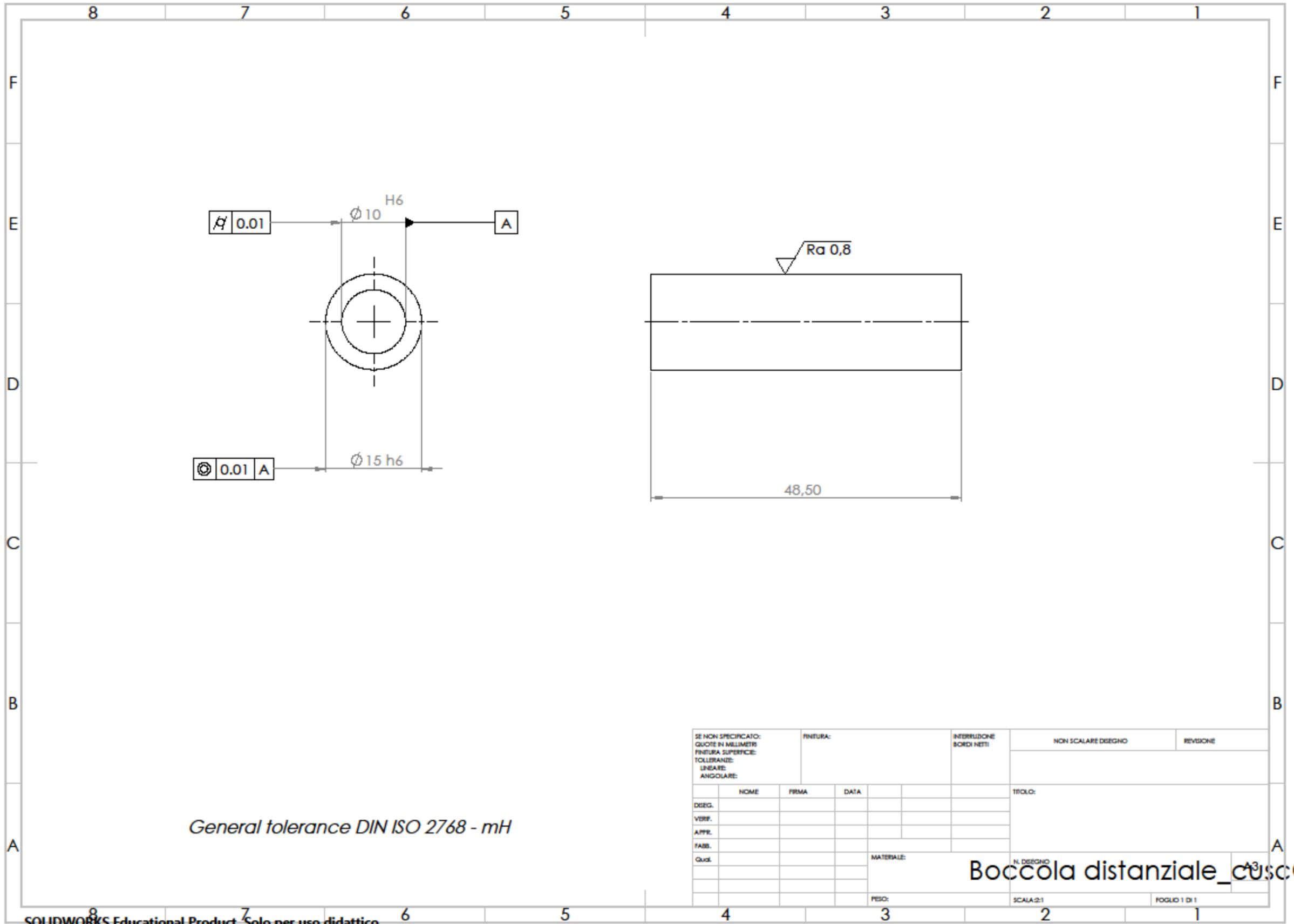
Boccola distanziale\_cusca

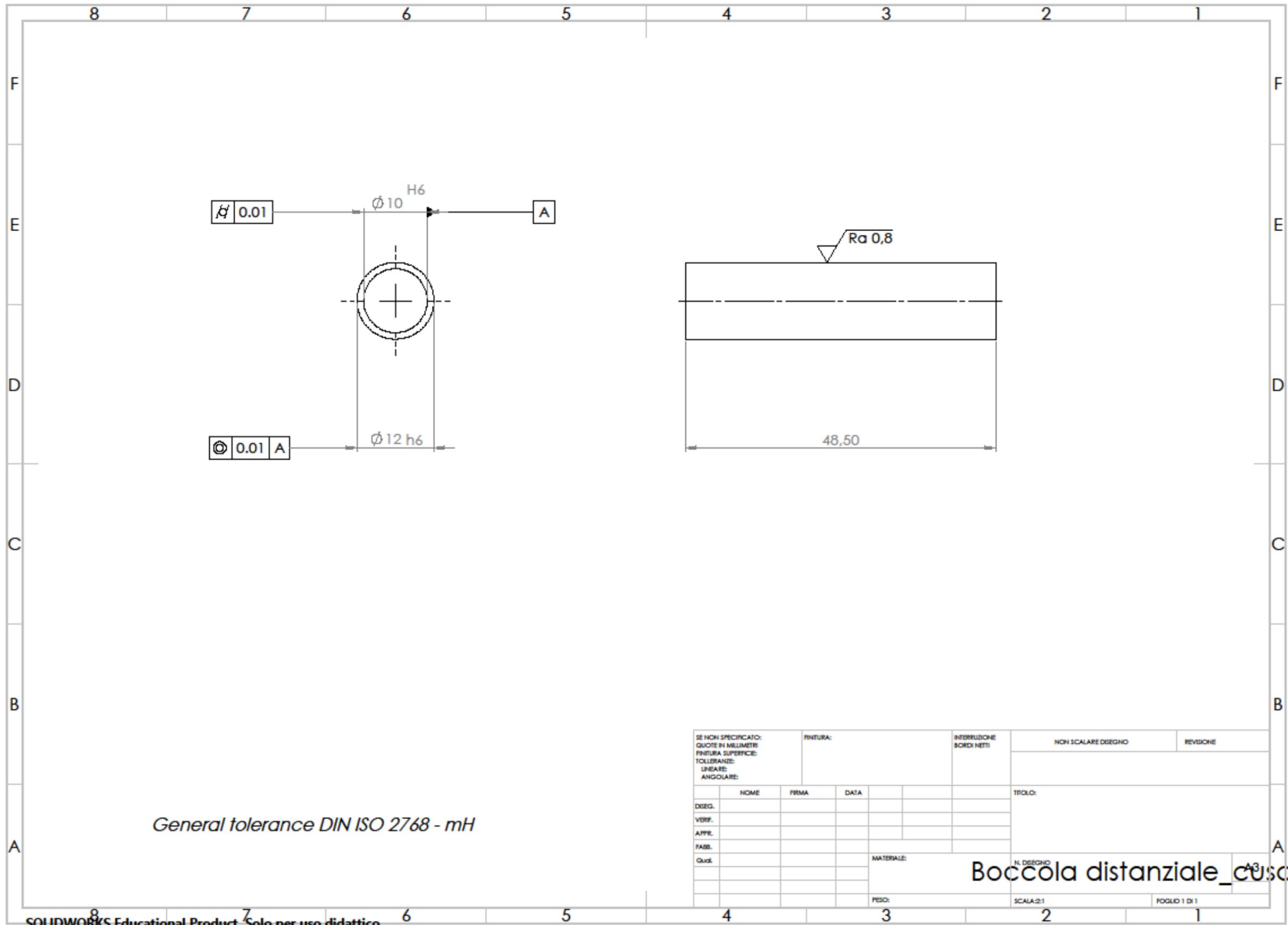


General tolerance DIN ISO 2768 - mH

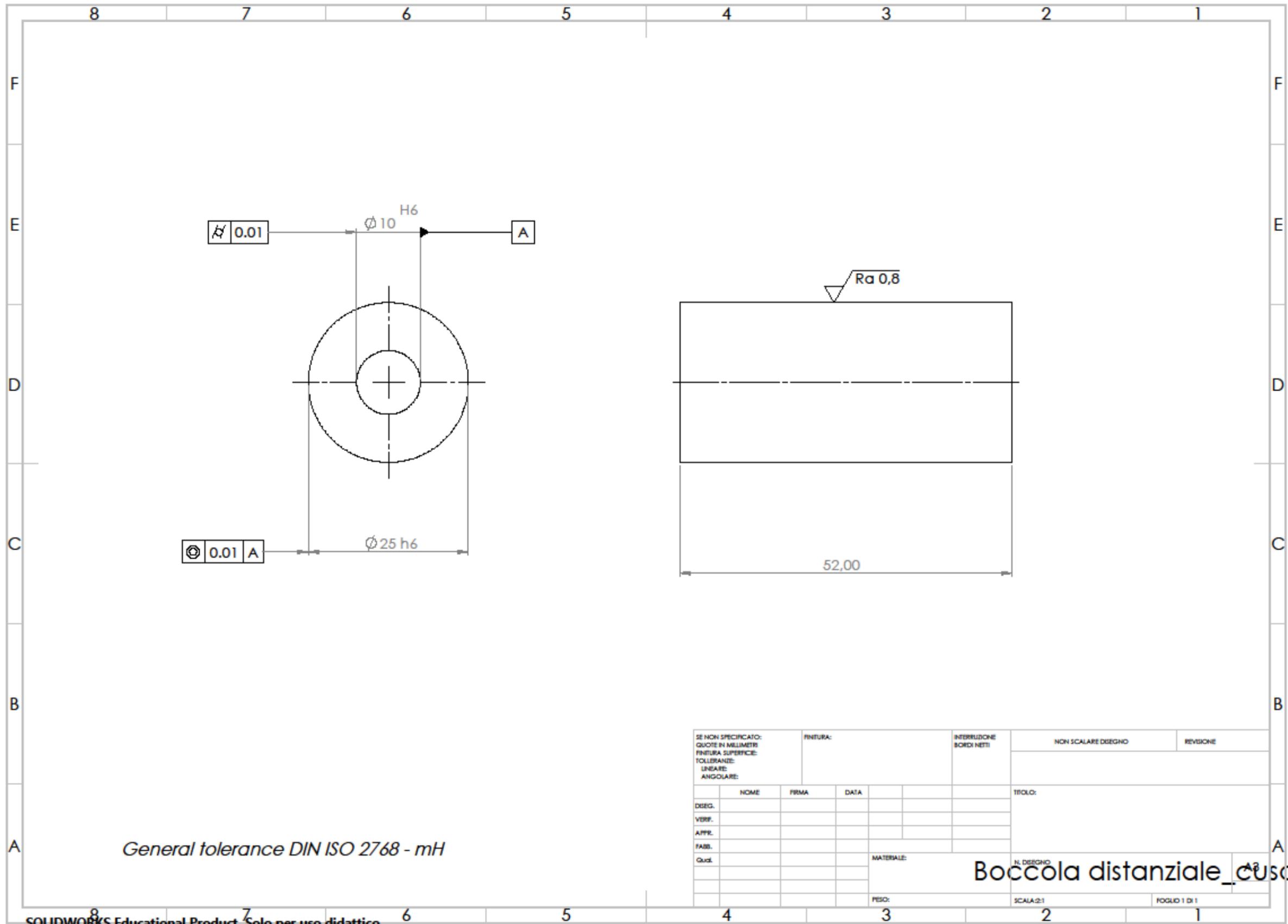
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: | FINITURA:   |       |      | INTEREDIZIONE<br>BORDI NETI | NON SCALARE DISEGNO | REVISIONE |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
|--|---|-------|------|-----------------------------|---------------------|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------|--|--|---------|------------|
|  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO</th> <th>NOME</th> <th>FIRMA</th> <th>DATA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> | NO    | NOME | FIRMA                       | DATA                |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | MATERIALE: |  |  | TITOLO: | N. DISEGNO |
| NO   | NOME  | FIRMA | DATA |                             |                     |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
|  |   |       |      |                             |                     |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
|  |   |       |      |                             |                     |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
|  |   |       |      |                             |                     |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
|  |   |       |      |                             |                     |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |
| PESO:  |   |       |      | SCALA: 2:1                  | FOGLIO 1 DI 1       |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |         |            |

Boccola distanziale\_cusce



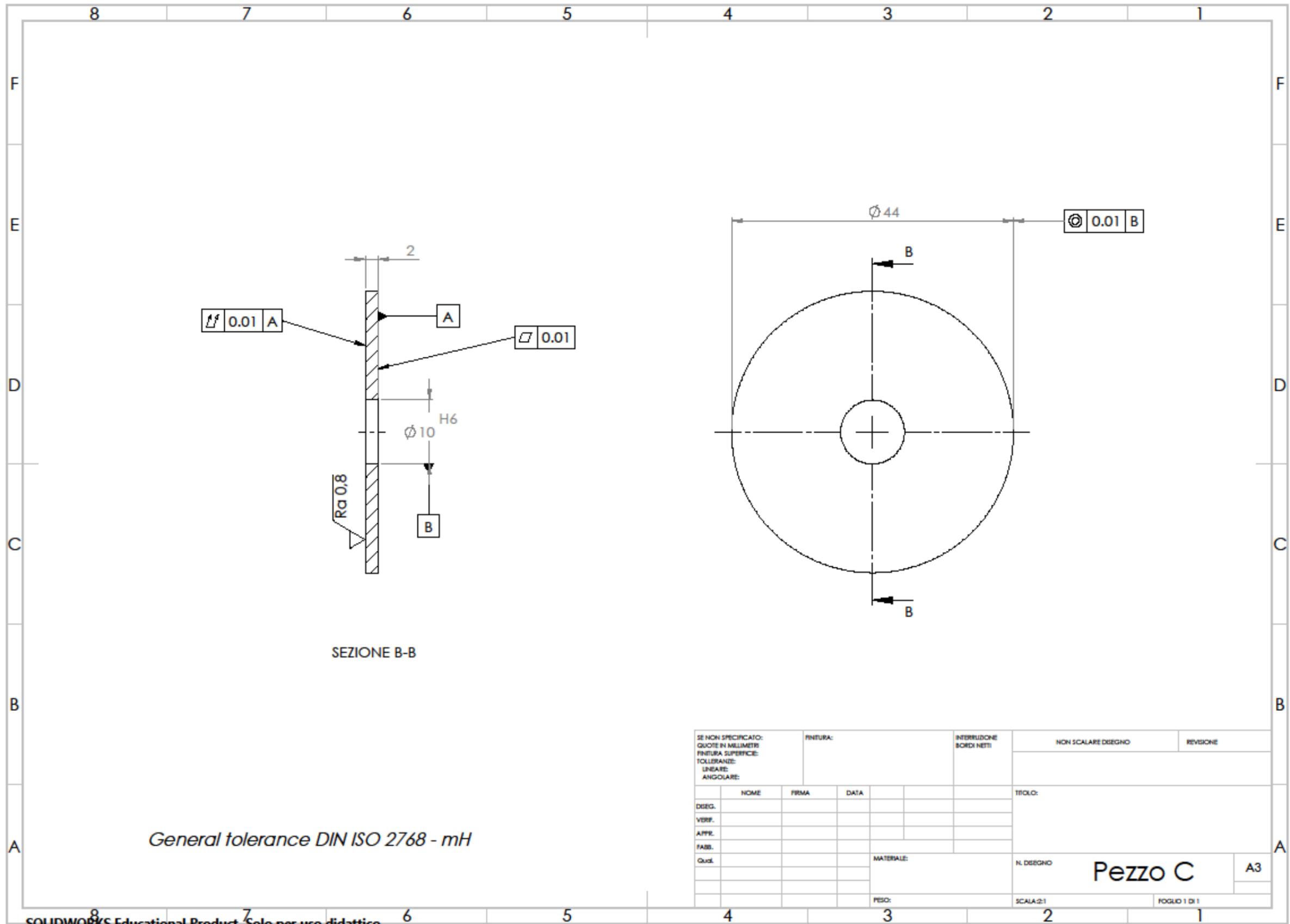


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

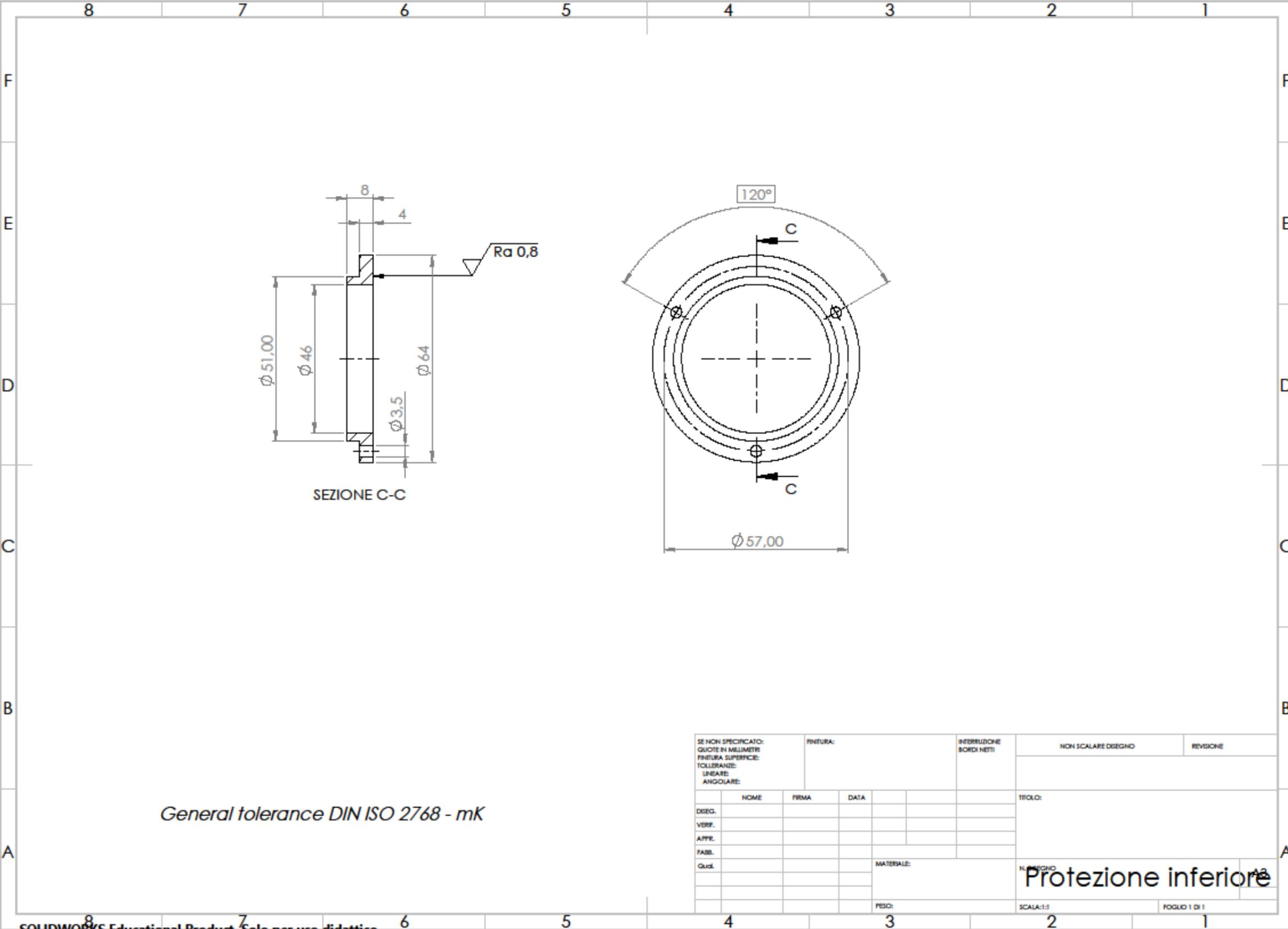


|  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE     |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | PRIMA                       |  | DATA                |  | TITOLO:       |  |
| VERIF.   |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| APPR.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| FABB.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| Quot.  |  |           |  |                             |  |                     |  | MATERIALE:    |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | N. DISEGNO:   |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | PESO:         |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | SCALA: 2:1    |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |

Boccola distanziale\_cuscf



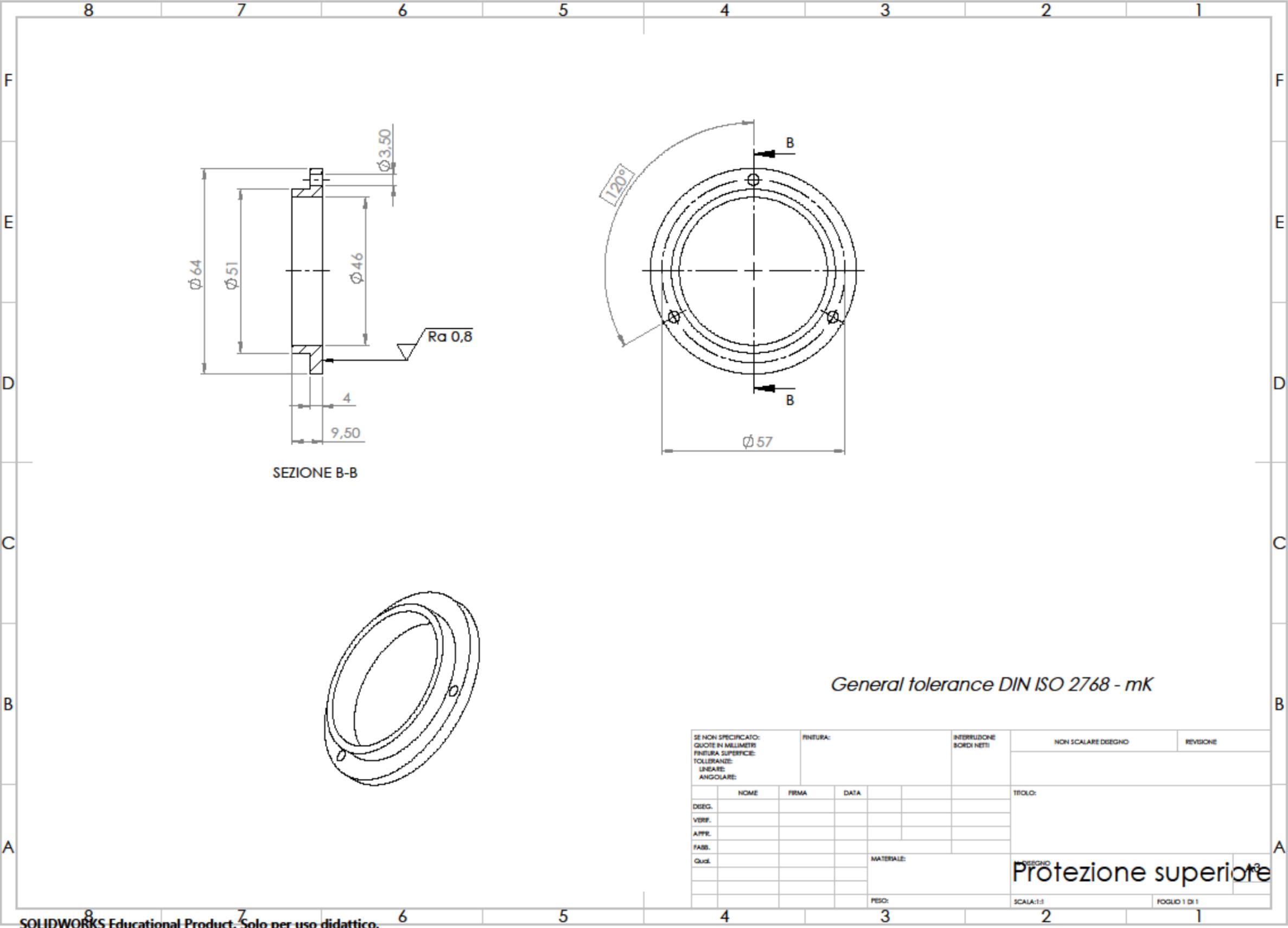
SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



General tolerance DIN ISO 2768 - mK

|  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|---------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTERRUZIONE<br>BORDI NETTI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE     |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | PRIMA                       |  | DATA                |  | TITOLO:       |  |
| VERIF.   |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| APPR.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| FABB.  |  |           |  |                             |  |                     |  |               |  |
| Quot.  |  |           |  |                             |  | MATERIALE:          |  | N. DISEGNO    |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | 12            |  |
|  |  |           |  |                             |  | PESO:               |  | SCALA:1:1     |  |
|  |  |           |  |                             |  |                     |  | FOGLIO 1 DI 1 |  |

Protezione inferiore



General tolerance DIN ISO 2768 - mK

|  |  |           |  |                             |  |                     |  |                      |  |
|--|--|-----------|--|-----------------------------|--|---------------------|--|----------------------|--|
| SE NON SPECIFICATO:<br>QUOTE IN MILLIMETRI<br>FINITURA SUPERFICIE:<br>TOLLERANZE:<br>LINEARE:<br>ANGOLARE: |  | FINITURA: |  | INTEREDIZIONE<br>BORDI NETI |  | NON SCALARE DISEGNO |  | REVISIONE            |  |
| DISEG.   |  | NOME      |  | DATA                        |  | TITOLO:             |  |                      |  |
| VERIF.   |  | FIRMA     |  |                             |  |                     |  |                      |  |
| APP.   |  |           |  |                             |  |                     |  |                      |  |
| FAB.   |  |           |  |                             |  |                     |  |                      |  |
| Quis.  |  |           |  | MATERIALE:                  |  | DISEGNO             |  | Protezione superiore |  |
|  |  |           |  | PESO:                       |  | SCALA:1:1           |  | FOGLIO 1 DI 1        |  |