



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione di un banco prova
di tipo twin-disk per la
misurazione dell'usura di profili
ferroviari**

Relatori

Prof. Nicola Bosso

Prof. Matteo Magelli

Prof. Nicolò Zampieri

Candidato

Francesco Pagliero

matricola: 319023

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Sommario

Durante l'interazione da contatto ruota-rotaia un fenomeno molto rilevante è sicuramente quello dell'usura, che, se non controllato, potrebbe compromettere la sicurezza e la stabilità di marcia del convoglio. Nella prima parte dell'elaborato vengono citati i problemi relativi all'usura da contatto e alcuni modelli matematici utilizzati per la determinazione dei volumi asportati. Viene inoltre mostrato un ottimo metodo empirico per la valutazione degli effetti dell'usura, ovvero quello di condurre prove su un banco prova di tipo twin-disk utilizzando un profilometro laser, nel caso in questione il modello Kejence "LJ-v7080". La seconda parte tratta le possibili problematiche che incorrono nel cercare di fissare in maniera adeguata il sensore al banco prova, includendo i possibili errori di montaggio e le relative variazioni sulle misurazioni; viene proposta una soluzione che consenta di avere un montaggio sufficientemente preciso. Successivamente vengono illustrati i risultati di alcune prove svolte su profili campione, necessarie a determinare il comportamento del sensore in condizioni operative, il tutto utilizzando un software specifico per il profilometro in questione ed elaborando in seguito i dati mediante calcolatore. La stabilità del sensore si rivela un parametro fondamentale per dei test accurati e precisi; errori di allineamento possono portare a variazioni dei risultati dell'ordine di 10^{-2} mm compromettendo l'affidabilità dei profili ottenuti. Proprio per questo assume grande importanza la possibilità di poter identificare le imprecisioni di posizionamento del profilometro prima di effettuare la misura, utilizzando, ad esempio, il sistema proposto in seguito. Infine vengono effettuate le prime prove preliminari su un banco prova di tipo twin-disk con successiva analisi dei risultati. La parte finale include la discussione dei risultati ottenuti e alcune considerazioni generali. Vengono poi riportati i disegni relativi al sistema di fissaggio progettato.

Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Bosso, il Prof. Magelli, il Dott. Pagano e il Prof. Zampieri per il tempo che mi è stato dedicato.

Ringrazio la mia famiglia per avermi supportato durante tutto il mio percorso e per avermi aiutato a crescere come persona.

Ringrazio i miei amici per i bei momenti trascorsi insieme che hanno arricchito questi ultimi anni di studio.

Indice

Elenco delle tabelle	6
Elenco delle figure	7
1 Introduzione	9
1.1 Il problema dell'usura	9
1.2 Il banco prova	10
1.3 Il profilometro	12
1.3.1 Funzionamento	12
1.3.2 Sensori LJ-v7080 e LJ-v7200	12
1.4 I modelli di usura	14
1.4.1 Modello di Archard	14
1.4.2 I modelli energetici	15
2 Capitolo 2	19
2.1 Il sistema di fissaggio	19
2.1.1 Collegamento con i tiranti	19
2.1.2 Piastra di sostegno	20
2.1.3 Fissaggio del sensore	22
2.1.4 Montaggio	24
2.1.5 Considerazioni su un montaggio alternativo inclinato	26
2.1.6 Soluzione alternativa con incasso scatola	30
2.2 Gli errori di montaggio	32
2.2.1 Spostamento verticale	32
2.2.2 Rotazione intorno all'asse x	33
2.2.3 Rotazione intorno all'asse y	34
2.2.4 Rotazione intorno all'asse z	35
2.3 Soluzioni apportate per il riconoscimento degli errori	36
2.4 Calibrazione del sensore mediante prove sui profili inseriti nel banco prova	37
2.4.1 Accorgimenti preliminari e preparazione	38
2.4.2 Elaborazione dei dati ottenuti	41

2.4.3	Prove di ripetibilità	50
2.5	Prove su profili usurati	51
3	Conclusioni	61
3.1	Discussione dei risultati ottenuti e considerazioni finali	61
	Bibliografia	63

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra l_f e s	24
2.2	Valori per montaggio inclinato-rullo	28
2.3	Valori per montaggio inclinato-ruota	30
2.4	Valori ricavati dal processo iterativo per le prove 1,2,3 sul rullo . . .	43
2.5	Valori d'errore medio e massimo per le prove 1, 2, 3 sul rullo	46
2.6	Valori ricavati dal processo iterativo per le prove 1,2,3 sulla ruota .	47
2.7	Valori d'errore medio e massimo per le prove 1, 2, 3 sulla ruota . . .	48
2.8	Valori d'errore medio e massimo per la prova di ripetibilità sul rullo	50
2.9	Valori d'errore medio e massimo per la prova di ripetibilità sulla ruota	51
2.10	Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 1-8 - usura elevata	54
2.11	Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 9-15 seguite dal profilo medio - usura elevata	54
2.12	Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 1-8 - usura lieve	55
2.13	Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 9-15 seguite dal profilo medio - usura lieve	56
2.14	Valori riassuntivi dei volumi asportati per entrambe le situazioni sui due rulli	59

Elenco delle figure

1.1	Esempio di profilo ferroviario usurato [3]	10
1.2	Assieme Solidworks del banco prova	11
1.3	Banco prova: vista generale (sx), dettaglio sul ceppo e sui dischi (dx)	11
1.4	Funzionamento di un profilometro laser [8]	12
1.5	Sensori LJ-v7080 (in alto) e LJ-v7200 (in basso)[8]	13
1.6	Regimi di usura secondo il modello di Archard [1]	15
1.7	Valori di usura ricavati dal BRR [7]	15
1.8	Valori di usura ricavati dal USFD [7]	16
1.9	Andamento di K_w in funzione di I_w [6]	16
2.1	Collegamento tirante 1	20
2.2	Collegamento tirante 2	20
2.3	Fissaggio tiranti	20
2.4	Piastra di sostegno per le misurazioni sul rullo	21
2.5	Piastra di sostegno per le misurazioni sulla ruota	22
2.6	Scatola 161-0926 tagliata	23
2.7	Sistema di fissaggio per le misurazioni sul rullo	24
2.8	Sistema di fissaggio per le misurazioni sulla ruota	25
2.9	Sistema di fissaggio progettato per le prove sul rullo montato sul banco prova	25
2.10	Sistema di fissaggio progettato per le prove sulla ruota montato sul banco prova	26
2.11	Schema per il montaggio del sensore LJ-v7200-rullo	27
2.12	Schema per il montaggio del sensore LJ-v7200-ruota	29
2.13	Piastre relative al rullo (sx) e alla ruota (dx) realizzate con incasso	31
2.14	Sistema di fissaggio relativi al rullo (sx) e alla ruota (dx) realizzati con incasso	31
2.15	Traslazione lungo l'asse z	32
2.16	Rotazione intorno all'asse x	33
2.17	Rotazione intorno all'asse y	34
2.18	Rotazione intorno all'asse z	35
2.19	Piastrina di allineamento	37
2.20	Blocchetto magnetico	37

2.21 Prova sul profilo del rullo	38
2.22 Risultati "LJ-Navigator 2" per il rullo	39
2.23 Prova sul profilo della ruota	39
2.24 Risultati "LJ-Navigator 2" per la ruota	40
2.25 Risultati "LJ-Observer per il rullo	40
2.26 Risultati "LJ-Observer per la ruota	41
2.27 Profilo di progetto per il rullo	41
2.28 Profilo di progetto per la ruota	42
2.29 Prove 1, 2, 3 sul rullo	43
2.30 Andamento di $ err $ per le prove 1, 2, 3 sul rullo	45
2.31 Prove 1, 2, 3 sulla ruota	47
2.32 Andamento di $ err $ per le prove 1, 2, 3 sulla ruota	49
2.33 Sistema utilizzato per la prova di ripetibilità sul rullo	50
2.34 Sistema utilizzato per la prova di ripetibilità sul rullo	51
2.35 Profili dei rulli a confronto (sx) e impostazione degli strumenti uti- lizzati per il test (dx)	52
2.36 Prove sul rullo gravemente usurato, numero 4 e 13 seguite dal profilo medio	53
2.37 Prove sul rullo lievemente usurato, numero 3 e 8 seguite dal profilo medio	55
2.38 Diagrammi cartesiani per la schematizzazione dei vari livelli di usura, elevata (in alto) e lieve (in basso)	59
2.39 Diagrammi polari per la schematizzazione dei vari livelli di usura, elevata (in alto) e lieve (in basso)	60

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Il problema dell'usura

Il problema dell'usura ha sempre avuto una grande importanza in ambito ferroviario, infatti la previsione degli effetti di questo fenomeno è fondamentale per ridurre i rischi correlati. L'usura influisce direttamente sulla stabilità di marcia di un veicolo e, in caso di un mezzo adibito al trasporto di passeggeri, sul comfort; la corretta stima e conoscenza dei danni, inoltre, potrebbe ottimizzare le operazioni di manutenzione e quindi ridurre i relativi costi. Le normative prevedono dei determinati livelli di danneggiamento ritenuti come accettabili, dopodichè, una volta superati questi valori, è necessario effettuare le operazioni di manutenzione o, nel caso non fosse più possibile, di sostituzione dei componenti in questione. Prendendo come esempio un cerchione per il trasporto passeggeri, del diametro nominale di 920 mm, si può osservare che l'usura avviene per due motivi: il primo è il contatto ruota rotaia, per quanto riguarda un tratto rettilineo, il secondo è il contatto in curva, che tende a deteriorare la porzione di superficie vicina al bordino. Questi due fenomeni con il trascorrere del tempo riducono la conicità equivalente del cerchione, rendendo così necessaria la riprofilatura della sala, operazione che asporta materiale per uno spessore di circa 5 mm. Il limite di accettabilità è di tre riprofilature, ottenendo così un diametro minimo di 890 mm, dopodichè la sala viene tolta dal servizio.

Come già detto il parametro che risente maggiormente dell'usura è la conicità equivalente λ del profilo di ruota. Tale parametro permette di associare il comportamento del profilo reale, che presenta dei diversi valori di conicità locale, a quello di un profilo conico avente conicità pari a λ . Questa caratteristica è fondamentale per la progettazione di un veicolo ferroviario e per lo studio del suo comportamento dinamico; un'adeguata conicità equivalente permette di avere una migliore stabilità di marcia e di sfruttare correttamente la forza di richiamo gravitazionale, che lungo un rettilineo tende a richiamare la sala verso il centro dei binari e durante la marcia in curva interviene riducendone la resistenza che ne deriva.



Figura 1.1: Esempio di profilo ferroviario usurato [3]

1.2 Il banco prova

Lo studio del fenomeno di usura e delle rispettive variazioni sul profilo della ruota è stato possibile grazie ad un banco prova di tipo twin-disk, che simula la dinamica del contatto ruota-rotaia mediante due dischi opportunamente proporzionati. Il banco, la cui progettazione è accuratamente descritta in [2]-[3], offre la possibilità di controllare due parametri fondamentali per ricreare differenti situazioni dinamiche: il carico applicato P , regolabile attraverso delle molle a elica a loro volta precaricate da un sistema vite, e la velocità di scorrimento tra i due dischi; il controllo di quest'ultima variabile è reso possibile grazie al disaccoppiamento della motorizzazione dei due organi di contatto. Infatti ruota e rullo sono collegati a due motori distinti e indipendenti che ne causano il movimento; regolandone la velocità è possibile ottenere un determinato grado di scorrimento. Di seguito si riportano le immagini del banco, disponibile presso il laboratorio di Ferroviaria del Politecnico di Torino, in fase di montaggio.

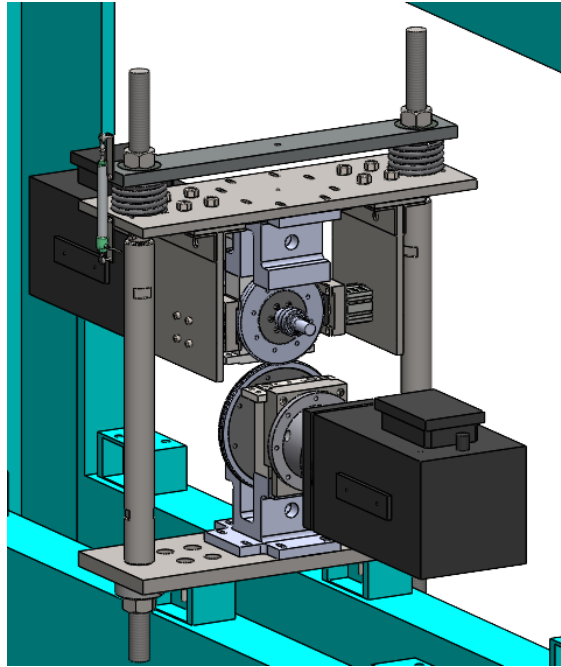


Figura 1.2: Assieme Solidworks del banco prova

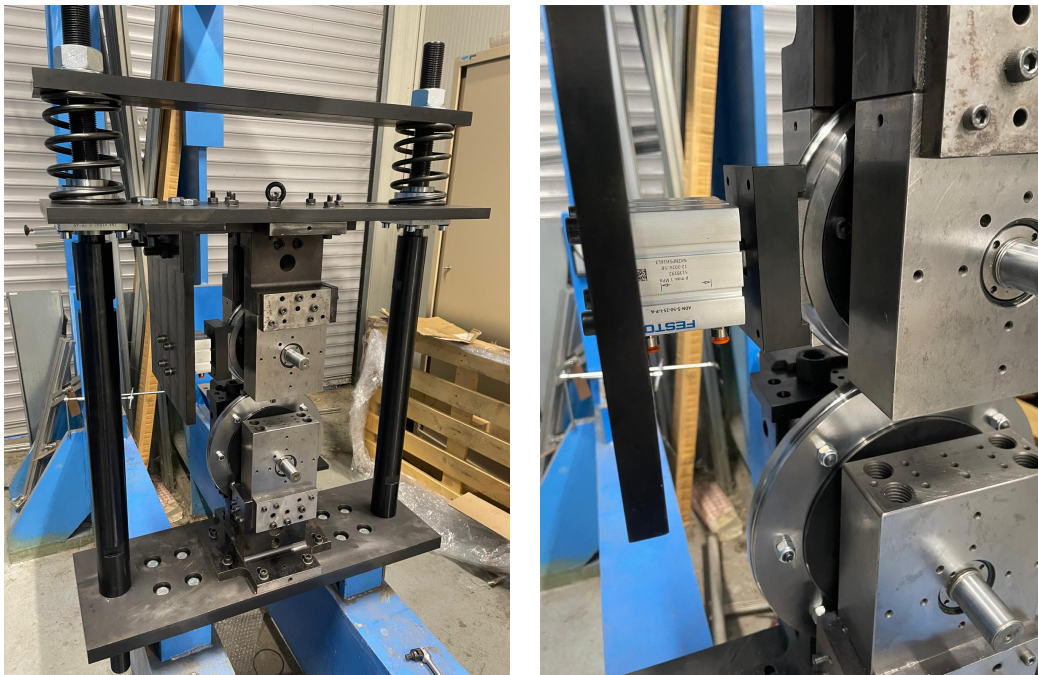


Figura 1.3: Banco prova: vista generale (sx), dettaglio sul ceppo e sui dischi (dx)

1.3 Il profilometro

Per effettuare le misurazioni sui profili usurati della ruota e del rullo è stato utilizzato un profilometro laser, in particolare il modello LJ-v7080 prodotto dalla Keyence. Un profilometro laser, grazie all'elevata frequenza di misurazione e l'ottima risoluzione, offre buone prestazioni per le misurazioni dinamiche.

1.3.1 Funzionamento

Un profilometro laser effettua l'acquisizione della misura lungo una linea, non lungo un punto, rendendo possibili le misurazioni in 2 e 3 dimensioni. Dal dispositivo viene emesso un fascio luminoso per mezzo di una lente cilindrica; una volta raggiunta la superficie sulla quale effettuare la misurazione, ammesso che quest'ultima si trovi ad una distanza accettabile secondo i dati di targa del sensore, si avrà la riflessione dell'onda, che, ritornando al sensore con un certo angolo di inclinazione, attraverserà una serie di lenti con grande apertura. Il raggio viene così convogliato verso un sensore di immagine CMOS.

Come già detto un parametro fondamentale per una corretta misurazione è la distanza presente tra sensore e superficie di misura, occorre quindi prestare molta cura al posizionamento del profilometro per ottenere una misura precisa e affidabile.

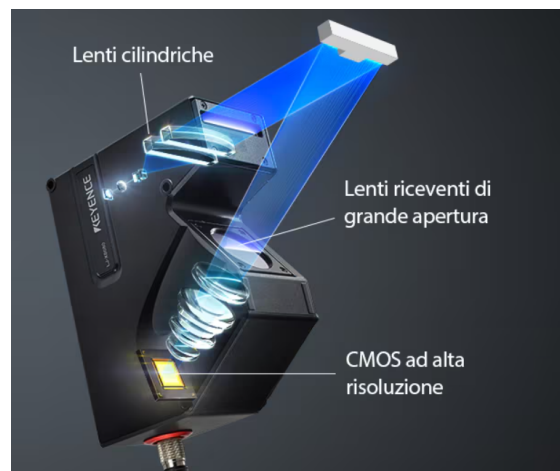


Figura 1.4: Funzionamento di un profilometro laser [8]

1.3.2 Sensori LJ-v7080 e LJ-v7200

I sensori disponibili per la misurazione dei profili sono i modelli LJ-v7080, che, come già detto, è quello effettivamente impiegato, e LJ-v7200. Le due tipologie presentano una distanza di misurazione ottimale espressa in millimetri, rispettivamente $[80 - 23; 80 + 23]$ per il primo e $[200 - 48; 200 + 48]$ per il secondo.

Il profilometro LJ-v7200 è più grande rispetto all'altra variante, inoltre la sua distanza minima di misurazione è nettamente superiore, 152 mm a fronte di 57 mm necessari per il sensore più piccolo LJ-v7080; queste caratteristiche hanno reso difficoltoso l'inserimento del sensore nel banco prova, opzione che avrebbe permesso di misurare i profili di ruota e rullo contemporaneamente utilizzando i due modelli. Si precisa che è stata anche presa in considerazione la possibilità di un montaggio inclinato che verrà analizzata in seguito.



Figura 1.5: Sensori LJ-v7080 (in alto) e LJ-v7200 (in basso)[8]

1.4 I modelli di usura

Per la determinazione del volume di usura esistono differenti metodi. Il più semplice è una prova pratica di pesatura, che fornisce una variazione in massa tramite la quale è possibile risalire direttamente al volume, a patto di conoscere la densità del materiale. In [1]-[4] sono riportati diversi modelli numerici utilizzati, a cominciare dal modello proposto da Bolton e Clayton, che prevede di calcolare il rapporto tra la massa asportata e la distanza percorsa utilizzando il carico normale N e un coefficiente sperimentale k_1 riferito al modello utilizzato:

$$\frac{\Delta m}{d} = N * k_1 \quad (1.1)$$

Fries e Dàvila propongono un modello esponenziale

$$\frac{\Delta m}{d} = k_1 * e^{k_2 * p_z} \quad (1.2)$$

considerando p_z la pressione normale di contatto e k_1, k_2 coefficienti sperimentali.

1.4.1 Modello di Archard

Il modello di Archard è uno dei modelli più utilizzati e permette di determinare il volume asportato per usura mediante la formula

$$V = K_A * \frac{W * s}{H} \quad (1.3)$$

dove W è il carico normale applicato, s la distanza di scorrimento e H la durezza del materiale espressa in Pa. Il parametro K_A è determinato empiricamente. Il valore di K_A da utilizzare, inoltre varia a seconda del regime di usura, a sua volta determinato in funzione del carico normale e della velocità di scorrimento. La seguente mappa mostra tale variazione.

L'equazione (1.1) può essere riscritta in forma locale:

$$z(x, y) = K_A * \frac{p_z(x, y) * s(x, y)}{H} \quad (1.4)$$

La seguente tabella, divulgata dal "Swedish Royale Institute of Technology" mostra il valore del coefficiente di Archard K_A in relazione ai tre principali regimi di usura: lieve, intensa e catastrofica. La distinzione è fatta tenendo conto della pressione di contatto e della velocità di scorrimento, considerando H la durezza del materiale più tenero tra quelli dei due corpi a contatto.

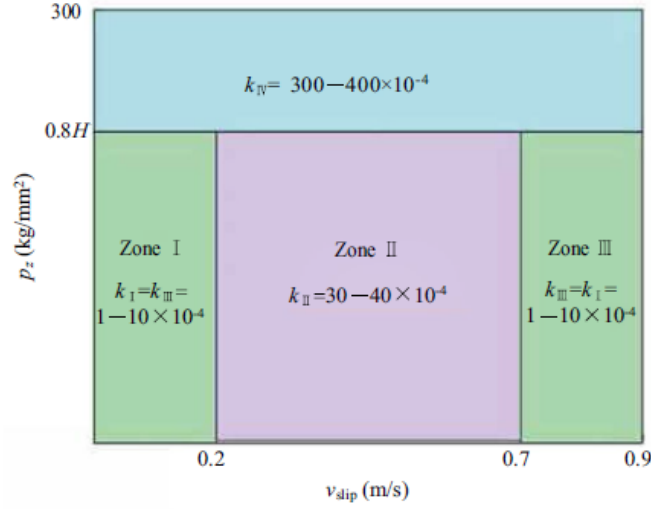


Figura 1.6: Regimi di usura secondo il modello di Archard [1]

1.4.2 I modelli energetici

Un approccio alternativo per lo studio dell'usura è quello di tipo energetico, che parte dal presupposto di correlare la quantità di materiale rimosso al lavoro delle forze di scorrimento e di attrito. L'ipotesi di partenza è che l'usura avvenga unicamente per attrito, trascurando così l'effetto di potenziali cricche o imprecisioni del profilo, che ne accentuerebbero il deterioramento. Considerando l'energia d'attrito come la somma delle sue componenti in direzione trasversale e longitudinale si ha

$$T * \gamma = T_x * \gamma_x + T_y * \gamma_y \quad (1.5)$$

considerando T la forza di scorrimento e γ lo scorrimento. Il "British Rail Research" ha sviluppato un algoritmo per determinare l'usura, espressa in mm^2 di area persa per ogni sezione radiale del profilo e per ogni chilometro di marcia, in funzione del prodotto $T * \gamma$.

$T\gamma$ [N]	Material loss [mm ²]
$T\gamma < 100$	$0.25 T\gamma / D$
$100 \leq T\gamma < 200$	$25 / D$
$T\gamma \geq 200$	$(1.19 T\gamma - 154) / D$

Figura 1.7: Valori di usura ricavati dal BRR [7]

Da considerare che D è il diametro della ruota e che la tabella sopra riportata è stata ricavata conducendo delle prove su un banco twin-disk avente un rullo in acciaio R8T (ruota) e uno in BS11 (rotaia).

Ulteriori simulazioni sono state condotte nell'Università di Sheffield, che ha calcolato il tasso di usura, espresso in μg di materiale asportato per unità di lunghezza percorsa e di superficie di contatto. I materiali delle prove condotte sono stati l'acciaio R8T per la ruota e l'acciaio UIC60 900A per la rotaia.

$T\gamma/A$ [N/mm ²]	Wear rate [mg/m/mm ²]
$T\gamma/A < 10.4$	$5.3T\gamma/A$
$10.4 \leq T\gamma/A < 77.2$	55.0
$T\gamma/A \geq 77.2$	$61.9T\gamma/A$

Figura 1.8: Valori di usura ricavati dal USFD [7]

Una formulazione alternativa del problema, proposta in [6], prevede di definire l'indice di usura

$$I_w = \frac{p_t * s}{V} \quad (1.6)$$

con p_t tensione tangenziale, s scorrimento locale espresso in m/s , V la velocità del punto di contatto. Si verifica sperimentalmente che il fattore I_w è direttamente collegato al tasso di usura K_w ($[K_w] = \frac{\mu g}{m * mm^2}$). In particolare nel caso analizzato risulta

$$K_w(I_w) = \begin{cases} 5.3 * I_w & I_w < 10.4 \\ 55.12 & 10.4 < I_w < 77.2 \\ 61.9 * I_w - 4723.56 & I_w > 77.2 \end{cases} \quad (1.7)$$

Di seguito i risultati rappresentati graficamente

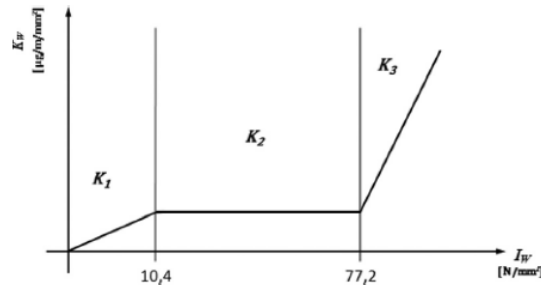


Figura 1.9: Andamento di K_w in funzione di I_w [6]

Una volta determinato $K_w(I_w)$ con il calcolo, in forma locale, del volume asportato per unità di distanza percorsa di superficie di scorrimento, espresso in $\frac{mm^3}{m*mm^2}$

$$\delta(x, y) = \frac{K_w(I_w)}{\rho} \quad (1.8)$$

essendo ρ la densità del materiale.

Capitolo 2

Capitolo 2

2.1 Il sistema di fissaggio

Per effettuare delle prove affidabili e precise è necessario fissare adeguatamente il sensore ai tiranti del banco prova, tenendo conto di alcuni aspetti progettuali quali l'ingombro del sistema di fissaggio, il corretto allineamento del sensore con la direzione radiale della ruota o del rullo e il rispetto della distanza ottimale di misurazione riferita al sensore. L'idea di partenza è stata quella di fornire un appoggio su tre piani al sensore, vincolando quest'ultimo ad una scatola metallica. Una volta fatto ciò il sistema "scatola-sensore" sarà la parte mobile che verrà spostata per effettuare le misurazioni su ruota e rullo. Da qui si ricerca una soluzione adeguata alle esigenze del caso in questione. Di seguito si riportano i componenti del sistema di fissaggio.

2.1.1 Collegamento con i tiranti

Il collegamento ai tiranti viene effettuato mediante un sistema in due pezzi, realizzato partendo da un parallelepipedo in acciaio forato e, successivamente, tagliato; su una delle due parti ottenute è stato realizzato un foro filettato M6, sull'altra un foro passante. I pezzi dovranno essere chiusi sul tirante con una forza sufficiente a garantire un sistema stabile. Nell'assieme, sono presenti quattro unità del componente appena descritto, due per il sistema dedicato alla ruota e due per quello dedicato al rullo.

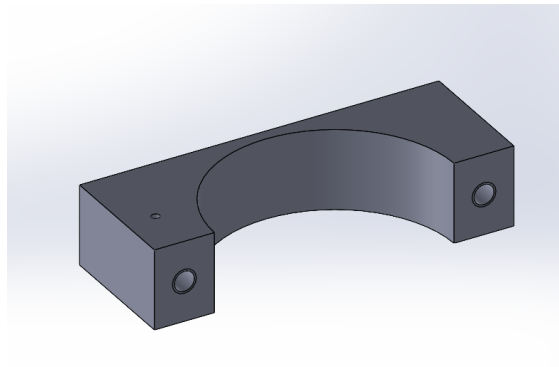


Figura 2.1: Collegamento tirante 1

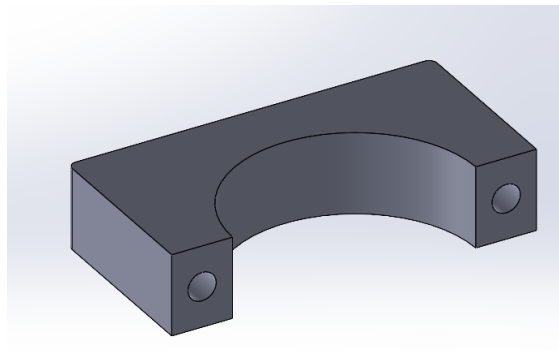


Figura 2.2: Collegamento tirante 2

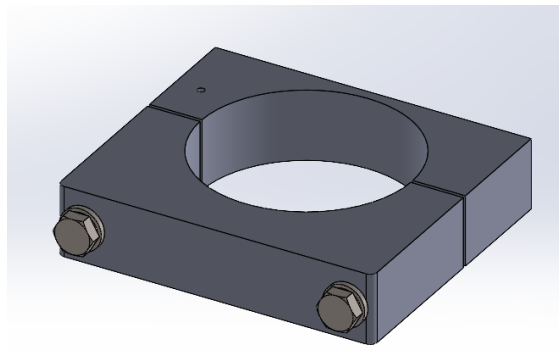


Figura 2.3: Fissaggio tiranti

2.1.2 Piastra di sostegno

La piastra di sostegno ha la funzione di fornire un appoggio al sistema "scatola-sensore" e di collegarlo ai fissaggi con i tiranti. Si tratta del componente più critico,

perchè collegata a tutti gli altri elementi, rendendo quindi necessaria una stretta tolleranza sulla localizzazione dei fori e sulla planarità della superficie di appoggio della scatola.

Il requisito di una specifica distanza di misurazione per il sensore ha fatto sì che fosse necessaria la realizzazione di due piastre, una per la ruota e una per il rullo, dimensionate in modo da poter convivere con il sistema comprensivo della parte frenante. Un criterio di progettazione attuato è quello di allineare il centro della fascia luminosa con il piano medio del disco, pertanto occorre dimensionare correttamente lo spessore delle piastre.

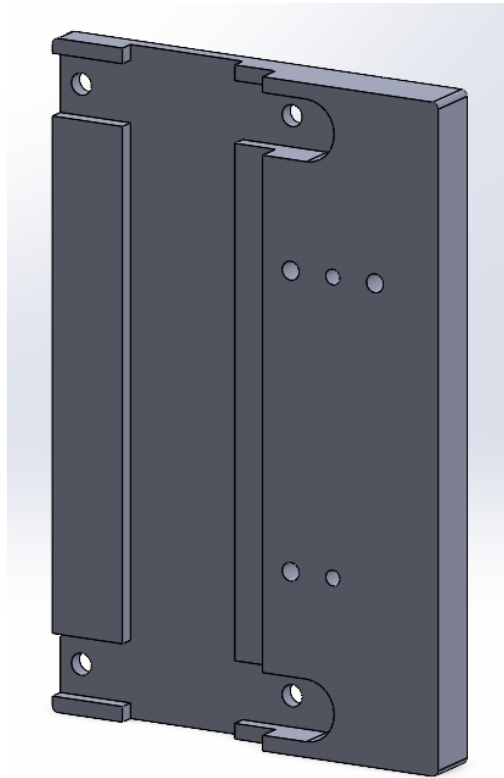


Figura 2.4: Piastra di sostegno per le misurazioni sul rullo

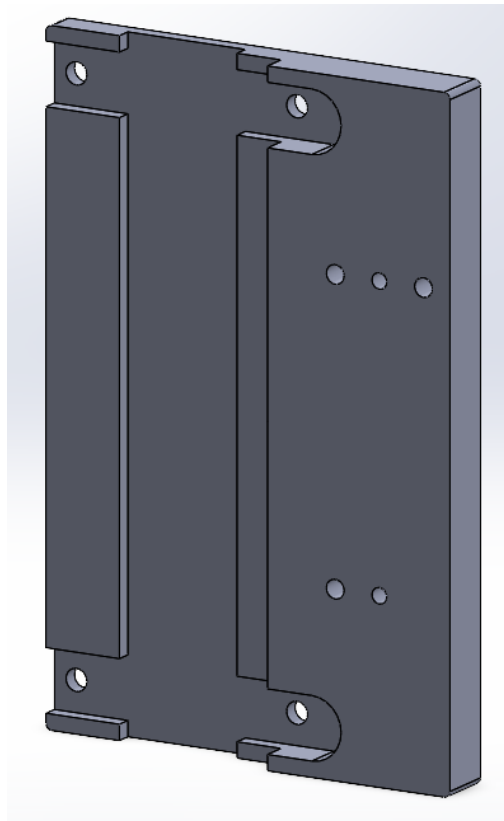


Figura 2.5: Piastra di sostegno per le misurazioni sulla ruota

2.1.3 Fissaggio del sensore

Come detto in precedenza il sensore è stato collegato ad un scatola, in particolare il modello 161-0926 in alluminio pressofuso, prodotto dall'azienda RS. Questo accoppiamento permette di realizzare un appoggio su tre piani per il profilometro ed evitarne l'eccessivo maneggiamento per quanto riguarda l'inserimento e la rimozione delle viti di fissaggio. Infatti, realizzando il sistema "scatola-sensore", si effettuano le operazioni di montaggio e smontaggio solo sulla prima.

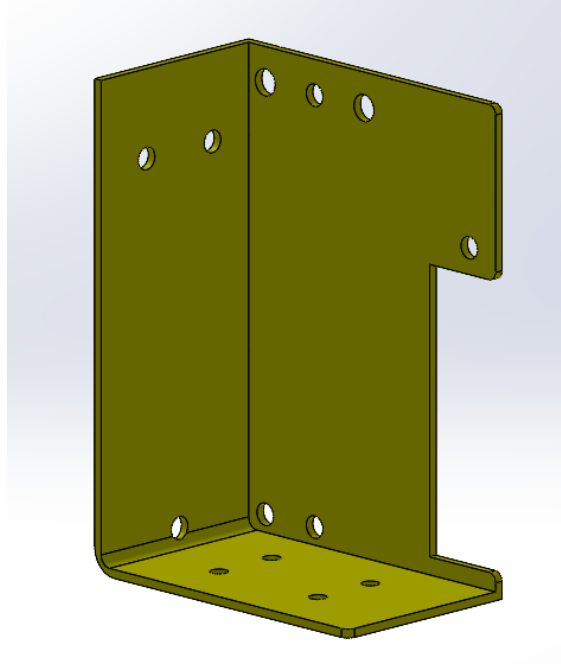


Figura 2.6: Scatola 161-0926 tagliata

Un'importante verifica da effettuare una volta dimensionato tutto il sistema è il confronto tra la larghezza del fascio l_f laser e lo spessore s del disco da misurare. Per quanto riguarda le misurazioni sulla ruota si ha che la distanza d tra il profilo di quest'ultima e il punto di emissione del fascio è 98,5 mm, valore compreso nel campo accettabile $[d_{min}; d_{max}] = [57; 103]$. Facendo riferimento alla figura (numero della figura) si vede che la larghezza della banda luminosa, nel campo accettabile, varia da $l_{min} = 25$ mm a $l_{max} = 39$ mm. Si può calcolare l_f nel seguente modo

$$\begin{cases} l_f = 2 * (\frac{l_{max}}{2} - (d_{max} - d) * \tan \alpha \\ \alpha = \arctan(\frac{\frac{l_{max} - l_{min}}{2}}{d_{max} - d_{min}}) \end{cases} \quad (2.1)$$

Analogamente si calcola la l_f per il rullo considerando una distanza $d = 72$ mm. In entrambi i casi la condizione $l_f > s$ risulta verificata. La seguente tabella contiene i rispettivi valori in mm.

	ruota	rullo
l_f	37.63	29.57
s	26	20

Tabella 2.1: Confronto tra l_f e s

2.1.4 Montaggio

Essendo state prodotte due piastre altrettanti sistemi di fissaggio sono stati realizzati. Si riporta ora l'assieme dei due sostegni. L'assemblaggio delle piastre con i collegamenti per i tiranti è stato effettuato mediante delle viti mordenti M6 a testa esagonale. La scatola necessita, nel collegamento con la piastra di sostegno, di una buona tenuta e una grande precisione, rendendo necessario l'utilizzo di un sistema composto da due viti M5 e due spine di centraggio con $\phi = 5$ mm. Per quanto riguarda il sensore la scelta per il fissaggio è ricaduta sull'utilizzo di due barre filettate, una M4x55, che lo collega alla scatola in un punto, e una M4x80, che ha la medesima funzione ma sul lato opposto; inoltre quest'ultima effettua il collegamento tra sensore scatola e piastra perchè, per problemi di spazio e per garantire al sensore l'appoggio sulle tre facce della scatola, non è stato possibile disaccoppiare i collegamenti. Infine sono stati previsti sulla scatola 3 fori del diametro di 5 mm e 4 fori del diametro di 4 mm, che avranno l'eventuale scopo di centrare ulteriormente il sensore mediante viti M4 e M5. Si riportano ora i due assiemi completi.

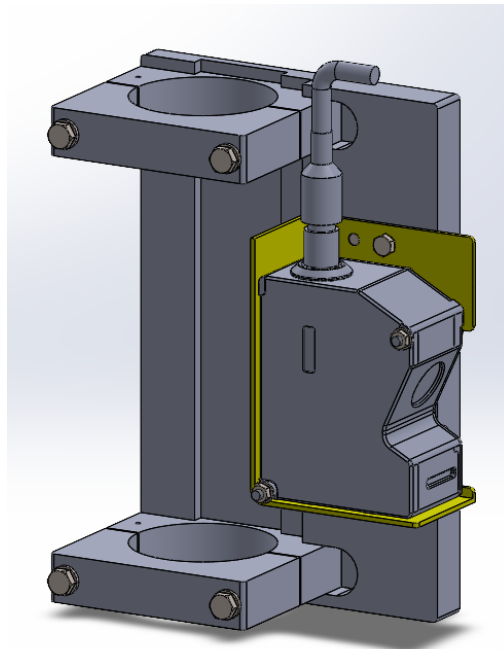


Figura 2.7: Sistema di fissaggio per le misurazioni sul rullo

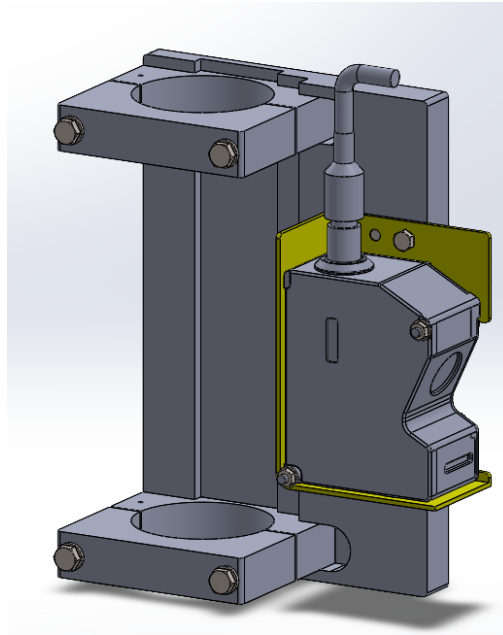


Figura 2.8: Sistema di fissaggio per le misurazioni sulla ruota

Durante l'inserimento del sistema nel banco prova sarà molto importante prestare cura alla quota di fissaggio, in modo da garantire il perfetto allineamento tra il fascio luminoso e la direzione radiale orizzontale del rullo e delle ruota. Considerando il sistema ideato per il rullo la distanza tra l'estremità inferiore del sistema di fissaggio e la piastra di sostegno inferiore è di 169.5 mm.

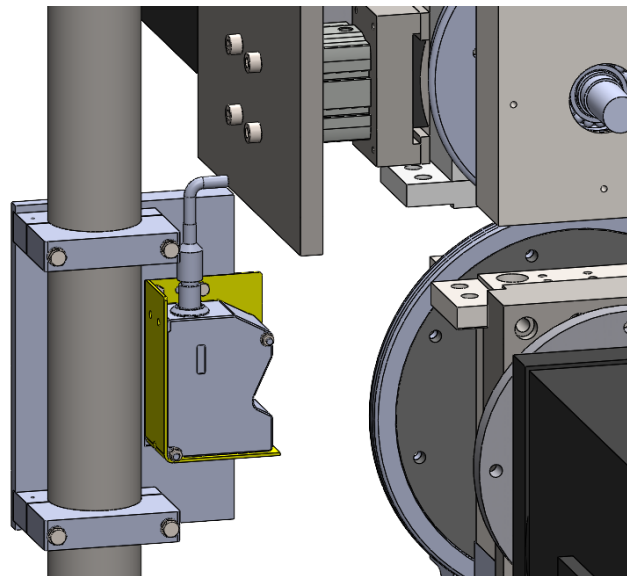


Figura 2.9: Sistema di fissaggio progettato per le prove sul rullo montato sul banco prova

Per quanto riguarda la ruota invece, come già detto, è necessario smontare alcuni componenti della parte frenante per l'inserimento del sensore. Si ricorda che la scatola e il sensore sono componenti unici e che per effettuare le prove devono essere smontati e spostati tra i due sistemi di fissaggio progettati. La distanza tra l'estremità del sistema ideato per la ruota e la piastra di sostegno inferiore è di 393.5 mm.

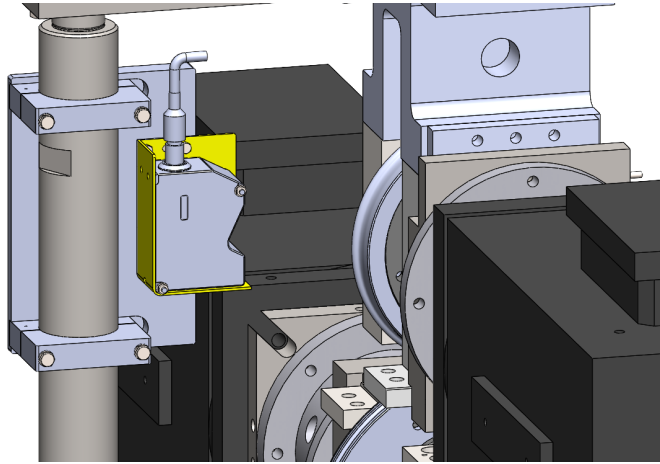


Figura 2.10: Sistema di fissaggio progettato per le prove sulla ruota montato sul banco prova

2.1.5 Considerazioni su un montaggio alternativo inclinato

La misurazione del profilo non deve necessariamente avvenire lungo la direzione orizzontale, è sufficiente che ci sia un allineamento tra la banda luminosa emessa dal sensore e la direzione radiale dei dischi; pertanto è stata considerata anche un'opzione di montaggio inclinato per effettuare la misura. Il principale effetto benefico di questa configurazione è quello di poter utilizzare entrambi i profilometri e acquisire così le misure sui profili senza dover smontare i sensori tra una prova e l'altra. Di seguito viene rappresentato lo schema raffigurante il montaggio del sensore LJ-v7200 per le prove rispettivamente sul rullo; questo modello presenta ingombri maggiori rispetto alla versione LJ-v7080, ma l'altezza, rispetto alla base del sensore, alla quale viene emesso il laser è la stessa per entrambi, cioè 12 mm. Il sensore LJ-v7080 ha un intervallo di misurazione ridotto, pertanto il montaggio inclinato non è necessario, anzi, potrebbe anche complicare inutilmente il sistema.

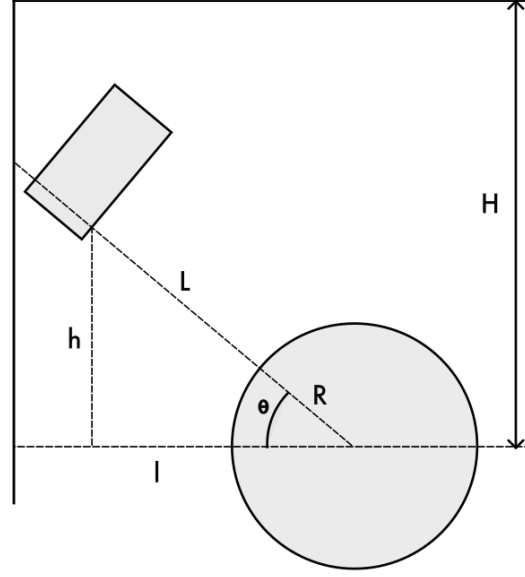


Figura 2.11: Schema per il montaggio del sensore LJ-v7200-rotolo

Per questi calcoli è stata fatta l'ipotesi di avere una luce di almeno 5 mm tra il tirante e lo spigolo del sensore più vicino ad esso. Considerando la configurazione utilizzata per il rotolo la distanza L riferita ad un determinato angolo θ sarà calcolata come

$$\sqrt{h^2 + (l + R_{\text{rotolo}})^2} - R_{\text{rotolo}} \quad (2.2)$$

con h differenza di quota tra il centro del rotolo e il punto di emissione del fascio luminoso e l la distanza lungo la direzione orizzontale tra tale punto e l'estremità del rotolo. Il calcolo di l deve essere effettuato considerando che il sensore occuperà uno spazio a lungo l'orizzontale maggiore rispetto al caso di montaggio non inclinato, nel quale tale ingombro era pari alla lunghezza del sensore stesso. Pertanto, essendo $T = 315$ mm la distanza tra l'asse del tirante e il centro del rotolo, si ha che

$$\begin{cases} l = T - R_{\text{tirante}} - R_{\text{rotolo}} - \text{luce} - a \\ a = l_{\text{sensore}} * \cos \theta + h_{\text{banda}} * \sin \theta \\ h = l * \tan \theta \end{cases} \quad (2.3)$$

L'altezza h presenta un valore massimo, dato dalla piastra di sostegno superiore del banco prova; viene pertanto definita un h_{MAX} ipotizzando una distanza minima $d_{\text{min}} = 10$ mm tra l'estremo superiore del sensore e la piastra del banco.

$$h_{\text{MAX}} = H - l_{\text{sensore}} * \sin \theta - (h_{\text{sensore}} - h_{\text{banda}}) * \cos \theta - d_{\text{min}} \quad (2.4)$$

essendo $H = 445$ mm la distanza tra l'asse del rotolo e la piastra superiore. In sintesi le condizioni che devono essere verificate per un corretto inserimento del

profilometro sono le seguenti:

$$\begin{cases} 152 \text{ mm} < L(\theta) < 248 \text{ mm} \\ h(\theta) < h_{MAX} \end{cases} \quad (2.5)$$

Di seguito si riporta una tabella con i valori ottenuti da una possibile configurazione.

$R_{tirante}$	30	mm
R_{rullo}	132	mm
θ_{rad}	0.873	rad
θ	50	gradi
$l_{sensore}$	77	mm
$h_{sensore}$	145	mm
a	58.69	mm
l	89.31	mm
L	212.30	mm
h	263.75	mm
h_{MAX}	290.52	mm
θ_{id}	48.50	gradi
θ_{min}	41.08	gradi

Tabella 2.2: Valori per montaggio inclinato-rullo

Si specifica che le due dimensioni θ_{id} e θ_{min} sono gli angoli tali per cui la distanza di misurazione sia rispettivamente pari a 200 mm e 152 mm.
Si riporta ora lo schema di montaggio per le misurazioni sulla ruota.

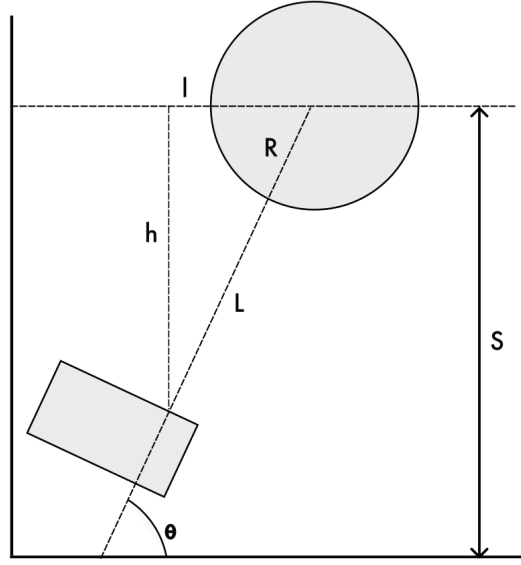


Figura 2.12: Schema per il montaggio del sensore LJ-v7200-ruota

Analizzando la figura [2.12] si può vedere che il sistema è leggermente differente rispetto al caso precedente. La condizione (2.5) deve comunque essere verificata ma i parametri a e h_{MAX} saranno calcolati nel seguente modo

$$\begin{cases} a = h_{sensore} * \sin \theta + l_{sensore} * \cos \theta - h_{banda} * \sin \theta \\ h_{MAX} = S - h_{banda} * \cos \theta - l_{sensore} * \sin \theta - d_{min} \end{cases} \quad (2.6)$$

Con d_{min} la distanza lasciata come gioco pari a 10 mm e S la distanza tra l'asse della ruota e la piastra inferiore del banco; tale distanza è pari a 460 mm. Si riporta ora la tabella riassuntiva dei valori ottenuti nel caso della ruota.

$R_{tirante}$	30	mm
R_{ruota}	92	mm
θ_{rad}	1.134	rad
θ	65	gradi
$l_{sensore}$	77	mm
$h_{sensore}$	145	mm
a	153.08	mm
l	34.92	mm
L	208.32	mm
h	272.18	mm
h_{MAX}	375.14	mm
θ_{id}	64.27	gradi
θ_{min}	58.81	gradi

Tabella 2.3: Valori per montaggio inclinato-ruota

La soluzione proposta è risultata valida, anche se effettuare una misurazione sul profilo della ruota potrebbe avvicinare il sensore al rullo rischiando un contatto; occorre pertanto prestare molta attenzione agli ingombri del sistema in funzione dell'angolo θ . Una scelta adeguata potrebbe essere quella di utilizzare il modello LJ-v7200 per una misurazione inclinata sul profilo del rullo, come in figura [2.11], e il sensore LJ-v7080 per effettuare la misura sulla ruota lungo l'asse orizzontale. L'adozione di questo schema di montaggio richiede comunque lo smontaggio della parte frenante, inoltre un'imprecisione sull'inclinazione del sensore causerebbe un disallineamento tra il fascio e la direzione radiale del rullo, comportando un errore di misurazione. Si è quindi scelto di utilizzare solo il sensore più piccolo per effettuare le misurazioni sui due profili lungo la direzione orizzontale, il tutto spostandolo tra i due punti individuati per effettuare le prove. Proprio questa scelta ha reso necessario l'utilizzo della scatola RS 161-0926 per evitare di danneggiare i filetti dei fori del sensore a causa dei continui smontaggi e montaggi.

2.1.6 Soluzione alternativa con incasso scatola

Una soluzione precedentemente analizzata è stata quella di prevedere un incasso dello spessore di 2 mm sulla superficie della piastra, in modo da poterci inserire la scatola. Tale scanalatura avrebbe avuto lo scopo di stabilizzare e centrare la scatola senza dover ricorrere alle spine; come nel caso attuale le piastre sono diverse per via della necessità di avere una determinata distanza tra sensore e profilo dei dischi, ma la distanza tra i fori presenti negli incassi deve comunque essere costante dal momento che il sistema scatola-sensore deve essere spostato tra una piastra e l'altra. Vista la maggiore complessità di realizzazione e i maggiori costi di questa idea è stata preferita la soluzione comprensiva delle spine. Ciò nonostante la soluzione

è valida e va considerato che maggiore è la precisione di realizzazione dell'incasso maggiore sarà il centraggio sul posizionamento della scatola e quindi del sensore. Di seguito vengono riportate le piastre, gli unici componenti a variare rispetto alla configurazione utilizzata, e gli assiemi del sistema progettato.

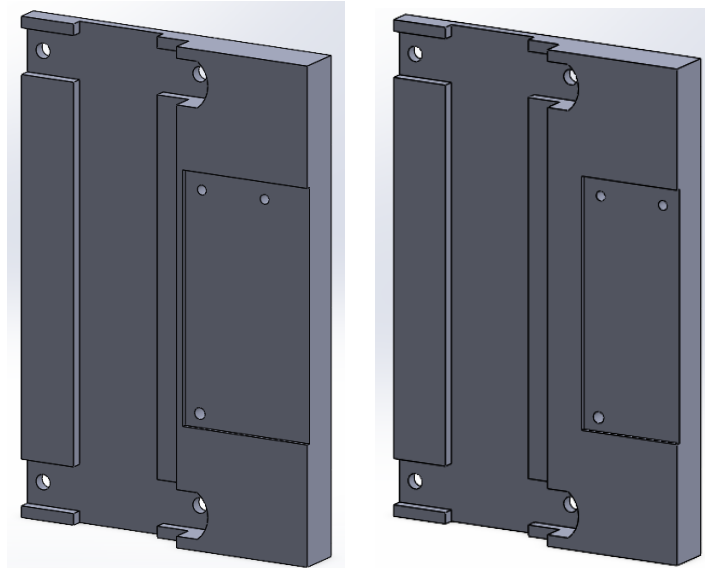


Figura 2.13: Piastre relative al rullo (sx) e alla ruota (dx) realizzate con incasso

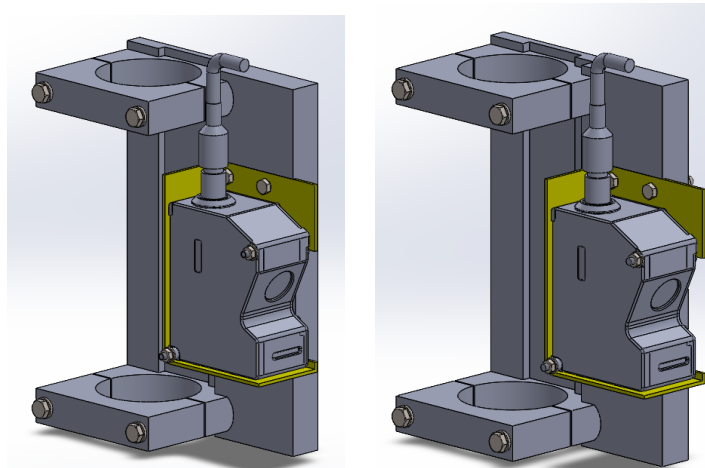


Figura 2.14: Sistema di fissaggio relativi al rullo (sx) e alla ruota (dx) realizzati con incasso

2.2 Gli errori di montaggio

Le operazioni di assemblaggio del sistema di fissaggio e unione di quest'ultimo alla struttura del banco prova sono effettuate manualmente, pertanto occorre tenere in considerazione dei possibili errori di montaggio che influenzeranno i risultati delle misurazioni. Non solo, anche le imprecisioni di forma dei pezzi e le relative tolleranze hanno un ruolo nella modifica dei risultati finali.

2.2.1 Spostamento verticale

La traslazione lungo l'asse z può derivare da piccoli spostamenti non desiderati durante l'avvitamento del sistema sul tirante. Questo errore genera uno spostamento del punto di emissione del fascio facendolo passare da O a O' ; tale traslazione non solo genera un proprio errore, ma può anche incrementare l'effetto della rotazione attorno a y , di cui si parlerà in seguito

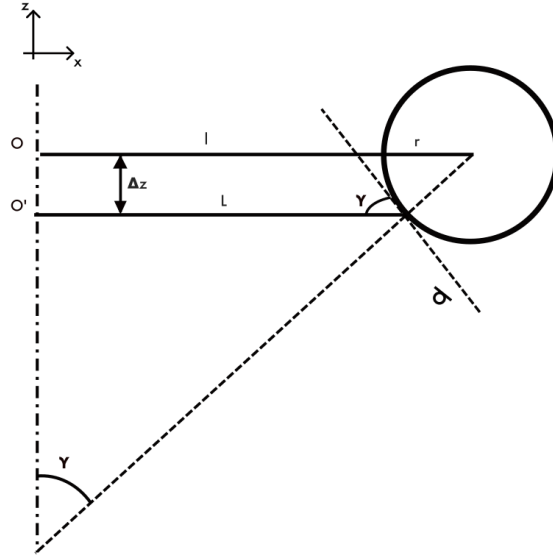


Figura 2.15: Traslazione lungo l'asse z

Si consideri ora la sola influenza dello spostamento verticale, l'errore sulla misurazione è determinabile utilizzando le equazioni sotto riportate

$$\begin{cases} \frac{i}{\sin \gamma} = \frac{L}{\sin \gamma} + r \\ \Delta z = r * \cos \gamma \end{cases} \quad (2.7)$$

Si può vedere che l'errore generato nasce a causa della curvatura del profilo da misurare e che all'aumentare di quest'ultima si può osservare una riduzione del primo.

Inoltre, se si confronta $L - l$ rispetto al caso di rotazione attorno all'asse y si nota che in questa situazione l'effetto legato all'imprecisione di montaggio è minore; si parla di variazioni che raggiungono circa i $5 * 10^{-3}$ mm.

2.2.2 Rotazione intorno all'asse x

La rotazione intorno all'asse x produce un effetto analogo a quello di una traslazione verticale, tenendo però presente che quest'ultima sarà nulla nel centro di rotazione e che crescerà linearmente man mano che ci si avvicina alle estremità del disco.

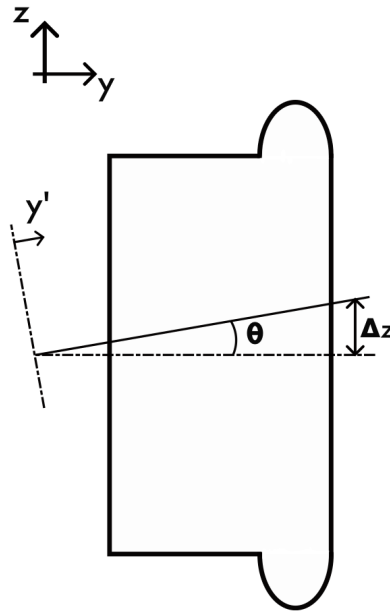


Figura 2.16: Rotazione intorno all'asse x

Si consideri ora il centro di rotazione nella mezzeria del disco, la traslazione verticale è esprimibile come

$$\Delta z = \frac{s}{2} * tg(\psi) \quad (2.8)$$

Volendo tenere in considerazione una eventuale condizione peggiorativa, quale un'imprecisione con l'allineamento orizzontale del sensore con la mezzeria del disco, si ipotizza uno spostamento verso sinistra di 1 mm; modificando la precedente espressione si ottiene

$$\Delta z = (\frac{s}{2} + 1) * tg(\psi) \quad (2.9)$$

In realtà tale formulazione non tiene conto della rotazione della banda del sensore e quindi del sistema di riferimento; per un'analisi più approfondita occorre

determinare le nuove coordinate nel sistema $x-z$ utilizzando la matrice di rotazione

$$\begin{Bmatrix} x' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ z \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

Considerando $z = 0$, in riferimento alla condizione di banda perfettamente orizzontale, si osserva una riduzione dei rispettivi valori di x ; la conclusione è che tale errore non influisce solo sui valori di z , ma influisce sullo stesso sistema di riferimento, pertanto necessita qualche attenzione in più nel suo studio. Tali accortezze verranno analizzate in maniera esaustiva nei paragrafi successivi.

2.2.3 Rotazione intorno all'asse y

L'errore di rotazione attorno all'asse y è quello che da una variazione di misura maggiore, pertanto è necessario prestare particolare attenzione al posizionamento del sistema di fissaggio per ridurne gli effetti. Anche la superficie della scatola parallela alla direzione radiale della ruota, o del rullo, deve presentare una buona planarità ed essere orientata in maniera molto precisa.

Come si può vedere nell'immagine sopra riportata l'errore comporta la rilevazione

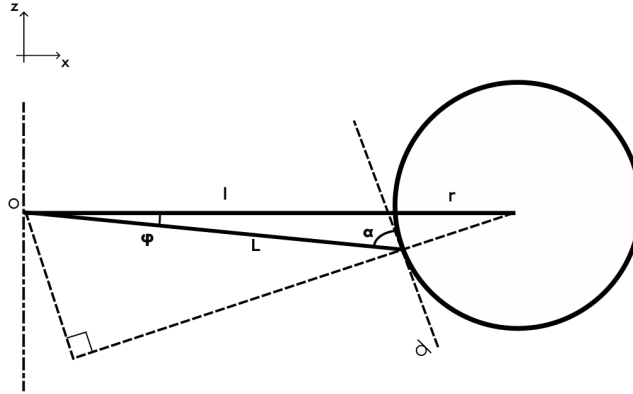


Figura 2.17: Rotazione intorno all'asse y

di una distanza L , misura ricavata dalla prova, maggiore della distanza corretta l ; la differenza tra i due valori è accentuata dalla curvatura del profilo. Utilizzando il seguente sistema di equazioni è possibile trovare una relazione tra L e l .

$$\begin{cases} i = l + r \\ L * \cos(\phi) - l = r - r * \cos(\phi) \\ i * \cos(\phi + \alpha) = L * \cos(\alpha) \end{cases} \quad (2.11)$$

Si precisa che i è la distanza tra il punto di origine del fascio laser e il centro della ruota, o del rullo; tale misura ha un valore costante, calcolato dalla geometria del

sistema iniziale. r è il raggio attuale del disco in questione, che sarà minore del raggio di progetto R a causa dell'usura.

Un aspetto interessante è la valutazione dell'interazione tra l'errore prodotto dalla traslazione lungo z e quello dato dalla rotazione intorno ad y . L'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti potrebbe non essere sempre esaustiva perchè è necessario tenere conto della posizione verticale del sensore rispetto al centro ruota. La traslazione verticale infatti riduce lo scostamento della misura ottenuta da quella corretta nel caso in cui ci si avvicini alla condizione di perfetto allineamento orizzontale tra il fascio laser e il centro del disco. Una volta raggiunto questo punto, nel caso in cui la traslazione progredisca, l'errore inizierà a crescere.

2.2.4 Rotazione intorno all'asse z

L'ultimo errore analizzato è quello di rotazione intorno all'asse z . In questo caso l'effetto prodotto è quello di causare una variazione di distanza misurata lungo lo spessore del disco, anche in caso di profilo senza alcuna curvatura. Ne deriva che, unendo i singoli punti di misura, si osserva un'inclinazione del profilo. Si può vedere

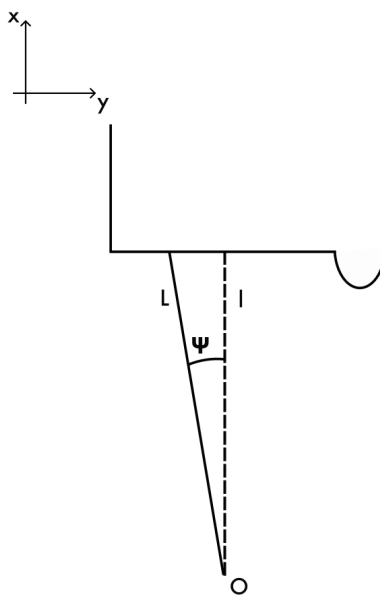


Figura 2.18: Rotazione intorno all'asse z

che nel caso in cui l sia perpendicolare al profilo si avrà

$$L = \frac{l}{\cos\psi} \quad (2.12)$$

Se si considera invece una lunghezza l' , inclinata di un certo angolo ψ_0 rispetto ad l , la nuova lunghezza L' dovrà essere calcolata nel seguente modo.

$$\begin{cases} l = l' * \cos\psi_0 \\ L = \frac{l}{\cos(\psi_0 + \psi)} \end{cases} \quad (2.13)$$

Se si considera positivo l'angolo ψ in figura 2.18 si può notare che le lunghezza l' , inclinata di un angolo ψ_0 positivo, quindi inclinata a sinistra, risulterà inferiore alla sua corrispondente L' , mentre una misura l' inclinata di un angolo ψ_0 negativo sarà maggiore della rispettiva L' . Detto questo risulta chiaro come il profilo possa sembrare inclinato dal punto di vista del sensore.

2.3 Soluzioni apportate per il riconoscimento degli errori

Si è parlato in precedenza dei possibili errori riscontrabili durante in posizionamento del sensore e dei loro effetti sulle misurazioni; tutti i precedenti calcoli sono stati fatti partendo da una stima di un preciso valore dell'errore, come $\phi = 1^\circ$ o $\Delta z = 1$ mm. Tale approssimazione però non rispecchia quello che accade nella realtà dal momento che non è possibile determinare il valore preciso dell'errore commesso. È stato necessario cercare delle soluzioni che permettessero il riconoscimento visivo degli errori, in modo da ridurne al minimo gli effetti. Una prima proposta è stata quella di sfruttare i fori presenti sui dischi per il collegamento di una piccola piastrina, sulla quale vengono previsti dei fori per l'inserimento di due sensori di distanza. Ogni sensore misurerà la distanza dal lato del profilometro; l'errore sull'angolo di inclinazione (angolo del tipo "rotazione intorno all'asse z "), sarà direttamente proporzionale alla differenza tra le due distanze misurate. Aggiungendo poi un terzo foro è possibile misurare due distanza anche lungo la direzione verticale, riconoscendo così l'errore del tipo "rotazione intorno all'asse x ". In questo modo si possono prevedere due delle tre tipologie di rotazione descritte. Passando ora alla "rotazione intorno all'asse y ", si è pensato di utilizzare un blocchetto magnetico tagliato in modo da poter aderire al profilo del rullo o della ruota. Su questo piccolo elemento dovrà essere presente una scanalatura abbastanza larga da permettere il passaggio della banda luminosa ma abbastanza piccola da permettere di individuare piccoli errori angolari. Nel caso in cui il sensore sia inclinato il laser non raggiungerà il fondo della scanalatura, o meglio, non prima di aver rilevato il profilo della parete superiore o inferiore; tale incidenza potrà essere facilmente leggibile a schermo perchè verrà raffigurato uno spigolo. Il software utilizzato per la visualizzazione del profilo verrà descritto in seguito. Sono stati abbozzati due modelli Solidworks preliminari dei componenti appena descritti; una volta che il banco sarà montato si potranno definire meglio le geometrie e l'efficacia di questi ultimi.

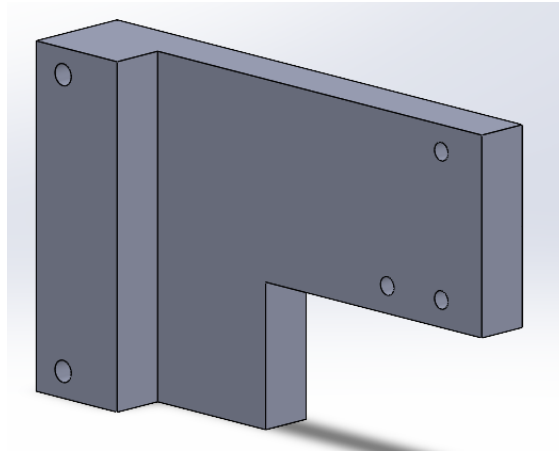


Figura 2.19: Piastrina di allineamento

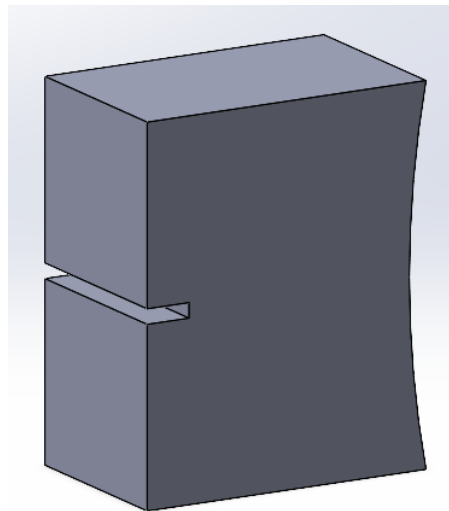


Figura 2.20: Blocchetto magnetico

2.4 Calibrazione del sensore mediante prove sui profili inseriti nel banco prova

Prima di effettuare le prove di usura è necessario capire il funzionamento del sensore e il suo comportamento in relazione a disturbi esterni o errori di posizionamento. Nella precedente parte sono state affrontate in modo teorico queste problematiche, tuttavia un approccio pratico può rendere più completa la comprensione dei vari fenomeni.

Le prove sono state condotte sulla ruota e sul rullo che saranno poi inseriti nel

banco. Per questi test il posizionamento del sensore e dei dischi è avvenuto manualmente, senza alcun sistema di fissaggio o centraggio, pertanto è possibile notare uno scostamento del profilo ottenuto da quello di progetto. I software utilizzati per le prove sono "LJ-Navigator 2" e "LJ-Observer".

2.4.1 Accorgimenti preliminari e preparazione

Prima di effettuare le misurazioni occorre preparare gli appoggi per il sensore e per i campioni, tenendo in considerazione che la larghezza della fascia di misurazione del profilometro varia con la distanza di quest'ultimo dal profilo del disco; è quindi necessario ridurre il dislivello tra i due elementi per evitare che il sensore misuri solo una parte del profilo.

Di seguito si indica come sono state condotte le prove sui due componenti. Per quanto riguarda il rullo è stato necessario fornire a quest'ultimo una sopraelevazione sufficiente a consentire una corretta misurazione. Supponendo di trovarsi alla distanza di misurazione ideale, 80 mm, la larghezza della fascia laser è 32 mm. Occorre pertanto tenere conto degli spessori utilizzati per il sostegno dei due componenti e verificare che il profilo sia acquisibile su tutto lo spessore del rullo, pari a 20 mm.

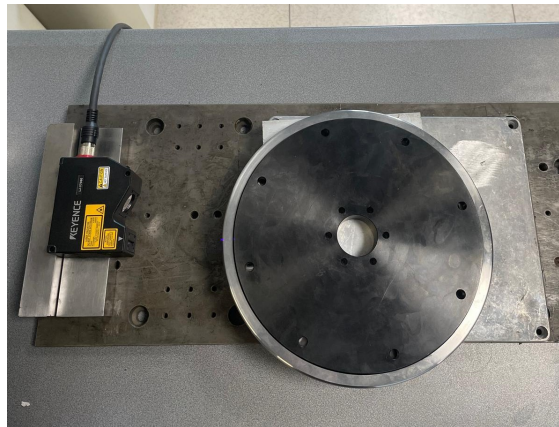


Figura 2.21: Prova sul profilo del rullo

Di seguito il profilo acquisito durante la prova:

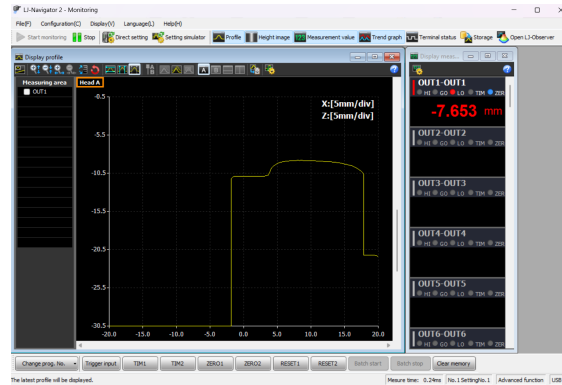


Figura 2.22: Risultati "LJ-Navigator 2" per il rullo

In alto a destra si può leggere lo scostamento della distanza di misurazione corrente da quella ideale, in questo caso è stato verificato che la misurazione è risultata meno disturbata posizionandosi più lontano rispetto alla condizione preferita. La verifica che la misurazione sia avvenuta su tutto lo spessore del rullo viene effettuata in maniera visiva: è possibile infatti utilizzare a schermo due indicatori mobili, posizionabili agli estremi del profilo misurato, per poi leggerne la distanza, che dovrà corrispondere allo spessore; ulteriore conferma che la misura sia corretta è il fatto che sulla destra del grafico è visibile una parte più bassa, corrispondente al mozzo.

Si mostra adesso la prova effettuata sul profilo della ruota, la quale ha uno spessore maggiore rispetto al rullo, 26 mm; è quindi necessario modificare gli spessori inseriti sotto ai componenti.

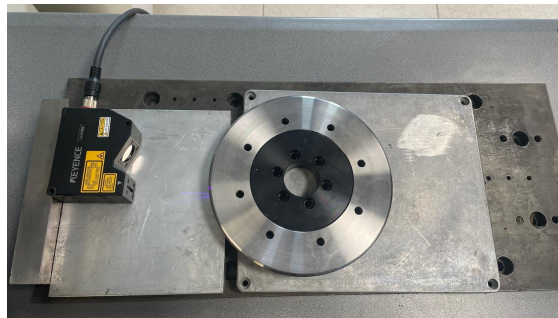


Figura 2.23: Prova sul profilo della ruota

Come si può vedere in questo caso la misurazione è più disturbata per via dell'appoggio del sensore su una superficie maggiore, causa di un fenomeno di riflessione; in ogni caso queste alterazioni non hanno compromesso la rilevazione del profilo, che è risultata buona. Da considerare che per la ruota è stato possibile operare ad una distanza più vicina a quella ideale rispetto al caso del rullo.

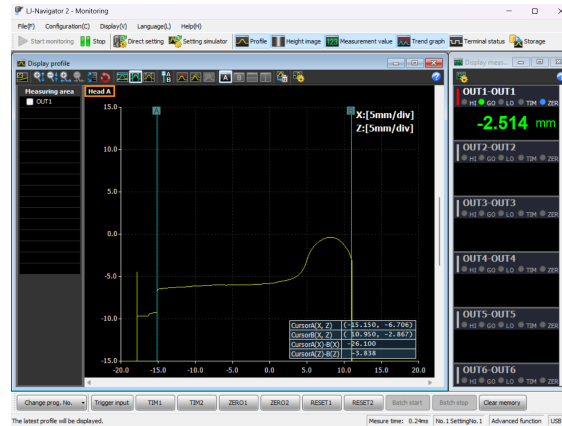


Figura 2.24: Risultati "LJ-Navigator 2" per la ruota

I grafici ottenuti dalle prove effettuate mediante "LJ-Navigator 2" possono essere riportati su "LJ-Observer", che permette di poter studiare graficamente i profili ottenuti. In particolare, come si può vedere dalle immagini seguenti, è possibile effettuare un'analisi sulle singole porzioni della fascia di misura completa; considerando infatti che l'altezza dell'area colorata corrisponde all'altezza della banda luminosa si può rilevare il profilo ottenuto lungo una linea orizzontale, effettuando una misura locale, oppure considerare un'area rettangolare; in quest'ultimo caso la forma ottenuta sarà data dalle media dei profili contenuti in quell'area. Queste funzioni possono essere selezionate nel riquadro in alto a destra, mentre sullo stesso lato in basso si possono trovare dei veri e propri strumenti di misura, utili per valutare il dislivello tra due punti, l'altezza media di una porzione di profilo e l'angolo tra due tratti di quest'ultimo.

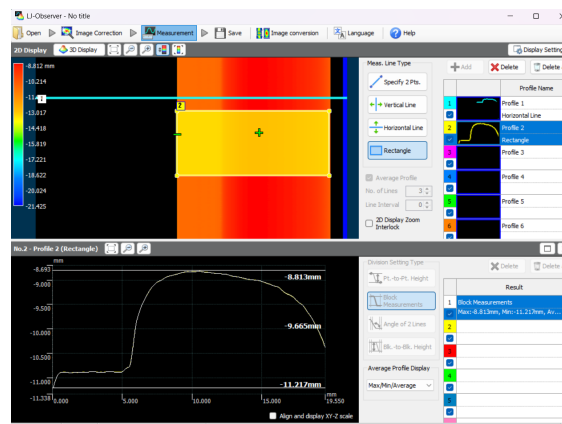


Figura 2.25: Risultati "LJ-Observer per il rullo

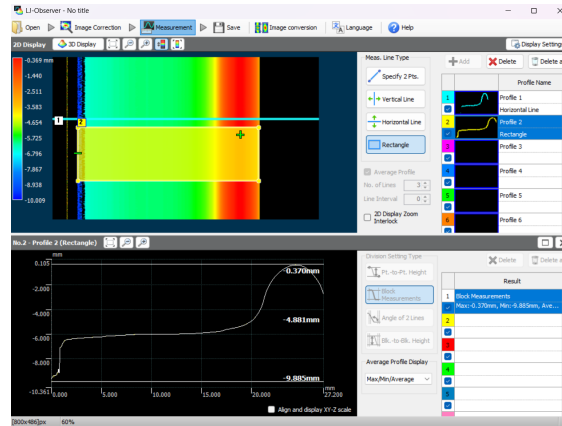


Figura 2.26: Risultati "LJ-Observer per la ruota

2.4.2 Elaborazione dei dati ottenuti

Una volta effettuate le prove in maniera corretta, verificando che tutto il profilo sia incluso nella misurazione, è possibile ottenere da "LJ-Navigator 2" un insieme di dati che rappresentano i valori X e i rispettivi Y . Si osserva che le misurazioni vengono effettuate con un passo di X pari a 0.05 mm. Lo scopo dell'elaborazione è quello di confrontare i profili ottenuti con quelli forniti da progetto e di valutare le differenze tra i due. Di seguito vengono riportati i grafici riferiti ai profili di progetto; si precisa che per il rullo è stata descritta la parte di curvatura senza il tratto rettilineo, in seguito il profilo verrà completato per effettuare il confronto.

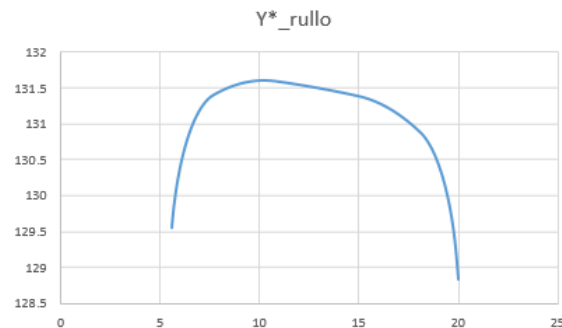


Figura 2.27: Profilo di progetto per il rullo



Figura 2.28: Profilo di progetto per la ruota

Come già detto il software di misura restituisce una serie di valori x e y ; rappresentando graficamente questi valori è possibile vedere l'andamento del profilo. Si nota subito che la porzione acquisita è maggiore di quella corrispondente alla larghezza di banda stimata, questo perchè, a prescindere dalla distanza di misurazione, il sensore registra punti x in uno spazio $X = [-20 \text{ mm}; +20 \text{ mm}]$; nel caso in cui la misura non sia eseguibile, ad esempio a causa di del verificarsi della condizione $l_f < s$ oppure per via di fenomeni di riflessione, il sensore registrerà il valore 99.99 nel punto x_i in questione. Risulta quindi possibile vedere quali sono i punti da considerare per le verifiche, escludendo tutti gli altri. Si può quindi procedere al confronto tra il profilo ottenuto e quello teorico. Si deve tenere conto che il grafico derivante dalla misurazione, rispetto a quello di progetto, risulterà traslato lungo le direzioni x e y , rendendo necessarie delle traslazioni che compensino la differenza di posizione. Non solo, si dovrà tenere conto anche di una rotazione relativa tra i due profili, questo perchè, essendo posizionato a mano, il sensore presenta un angolo di rotazione che comporterà un errore di inclinazione del profilo; è quindi necessario riallineare le curve. Una ulteriore considerazione da fare riguarda il sistema di riferimento $x - y$ considerato: se si considera un angolo di rotazione θ tale sistema si modificherà, sarà quindi necessario ridefinire i punti considerati utilizzando una matrice di rotazione.

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

Riassumendo, il parametro Δx trasla il profilo in modo da correggere l'allineamento tra il centro della banda luminosa e la mezzzeria dello spessore del disco, Δy effettua uno spostamento della sagoma ottenuta in modo da compensare gli errori di tipo "Rotazione intorno all'asse y " (2.2.3) e "Spostamento verticale" (2.2.1), mentre la variazione di θ riduce l'effetto prodotto dagli errori di "Rotazione intorno all'asse x " (2.2.2) e "Rotazione intorno all'asse z " (2.2.4).

Vengono effettuate diverse prove, ruotando il disco cercando di non traslarlo tra una prova e l'altra; per ogni prova sono stati annotati i punti rilevati dal sensore e successivamente, in maniera iterativa, sono stati assegnati dei valori di Δx , Δy e θ

in modo da far coincidere il profilo misurato con quello teorico. Da precisare che per il rullo si è utilizzato come riferimento il tratto piano del profilo, per la ruota invece è stata effettuata una valutazione visiva complessiva. Si riportano i risultati ottenuti per alcune prove effettuate sul rullo.

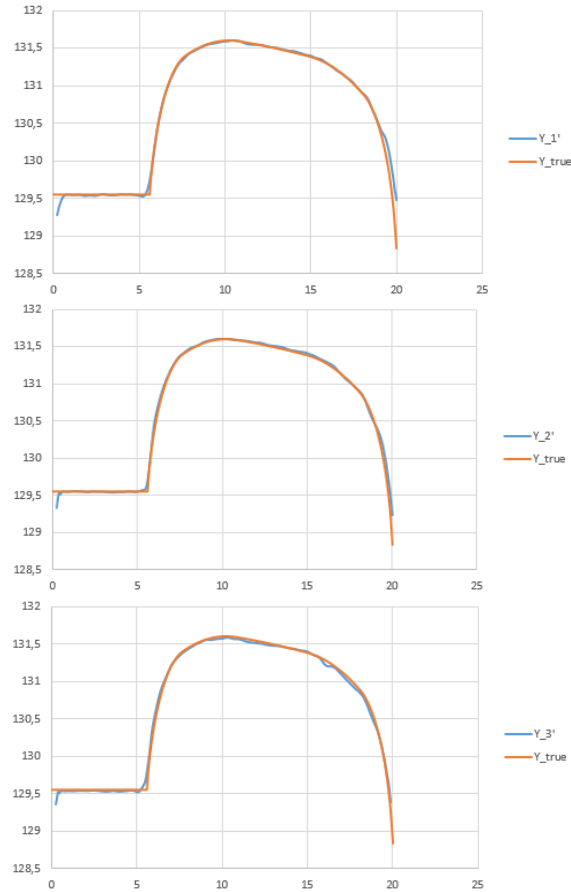


Figura 2.29: Prove 1, 2, 3 sul rullo

Per tutte le prove è stato poi effettuato il procedimento iterativo per la sovrapposizione dei due profili, in particolare si hanno i seguenti risultati.

	1	2	3	
Δx	3.35	3.51	3.55	mm
Δy	135.3	131	134.05	mm
θ	-0.7	-0.65	-0.62	°

Tabella 2.4: Valori ricavati dal processo iterativo per le prove 1,2,3 sul rullo

Con questo metodo è stata trovata una soluzione per cercare di sovrapporre il più

possibile i due profili e verificarne ad occhio la corrispondenza. Il passo successivo è quello di determinare con precisione l'errore locale e medio tra le due curve; per farlo è necessario l'utilizzo del software Matlab dal momento che il profilo teorico e quello ottenuto dalle prove sono riferiti a due diversi domini, rispettivamente X_{true} e X . Una volta importati i dati su Matlab è quindi necessario creare uno spazio normalizzato X_{norm} dato dall'unione dei due domini, per poi interpolare le due immagini Y_{true} e Y su quest'ultimo, utilizzando la funzione *interp1*. Così facendo sarà possibile valutare punto per punto la differenza tra i due profili, determinando l'andamento e il valore massimo di tale differenza. Ai fini della determinazione dell'errore medio è interessante considerare il valore assoluto dell'errore, in modo da evitare la compensazione tra gli errori positivi e negativi.

Listing 2.1: Codice Matlab per la determinazione dell'errore sul profilo del rullo-prova 1

```
% importazione di dati da Excel
[X]=xlsread('Rullo_1.xlsx','Foglio1','A2:A397');
[Y]=xlsread('Rullo_1.xlsx','Foglio1','B2:B397');
[X_true]=xlsread('Rullo_1.xlsx','Foglio1','D2:D397');
[Y_true]=xlsread('Rullo_1.xlsx','Foglio1','E2:E397');
%creazione di un dominio comune e successiva
  interpolazione
X_norm=union(X,X_true);
Y_norm=interp1(X,Y,X_norm,'spline');
Y_true_norm=interp1(X_true,Y_true,X_norm,'spline');
%esclusione dei valori non significativi
val_eclusi=find(X_norm <=0.7 | (X_norm >= 4.6 & X_norm <=
    6.6))
X_norm(val_eclusi)=[];
Y_norm(val_eclusi)=[];
Y_true_norm(val_eclusi)=[];
% valutazione dell'errore
err=Y_norm-Y_true_norm;
abs_err=abs(err);
err_m=mean(abs_err);
MAX_err=max(abs_err);
```

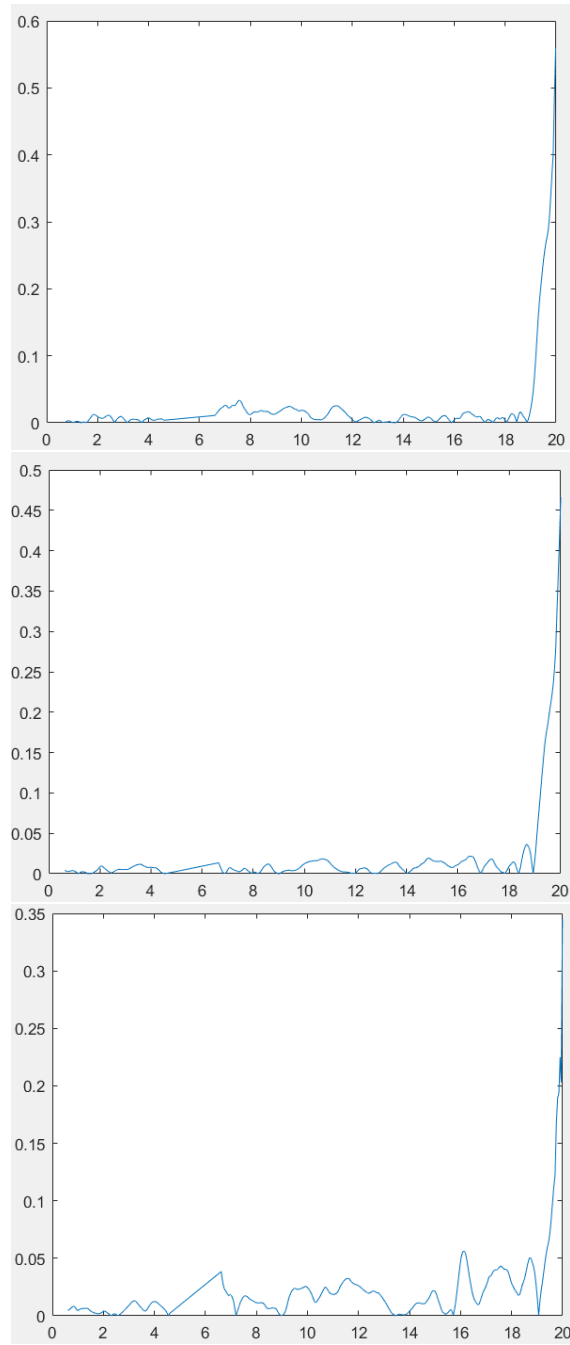



Figura 2.30: Andamento di $|err|$ per le prove 1, 2, 3 sul rullo

	1	2	3	
err_m	0.0204	0.0169	0.0197	mm
MAX_{err}	0.5599	0.4662	0.3453	mm

Tabella 2.5: Valori d'errore medio e massimo per le prove 1, 2, 3 sul rullo

Va specificato che alcuni punti del dominio X_{norm} , e i rispettivi Y_{norm} , non sono stati considerati essendo dei punti non interessati dal fenomeno dell'usura o comunque dei punti che avrebbero fornito un risultato non veritieri in quanto il profilo di progetto, come già detto in precedenza è stato completato manualmente. Infatti per rappresentare la parte di profilo piana, è stato utilizzato un valore costante $Y = 129,55$, creando così uno spigolo vivo nel punto di giunzione con la curvatura e trascurando la presenza di uno smusso alla fine del profilo. Tutti questi fattori avrebbero portato ad un aumento dell'errore che non corrisponde alla realtà. Dopo aver effettuato le prove sulla ruota i dati sono stati trattati come nel caso del rullo, quindi prima con un procedimento iterativo per la determinazione dei parametri Δx , Δy , θ , successivamente con un'analisi dell'errore mediante Matlab. Anche in questo caso si è deciso di escludere i punti più esterni del profilo, che non sono interessati dall'usura durante le prove. Vengono ora riportati i risultati.

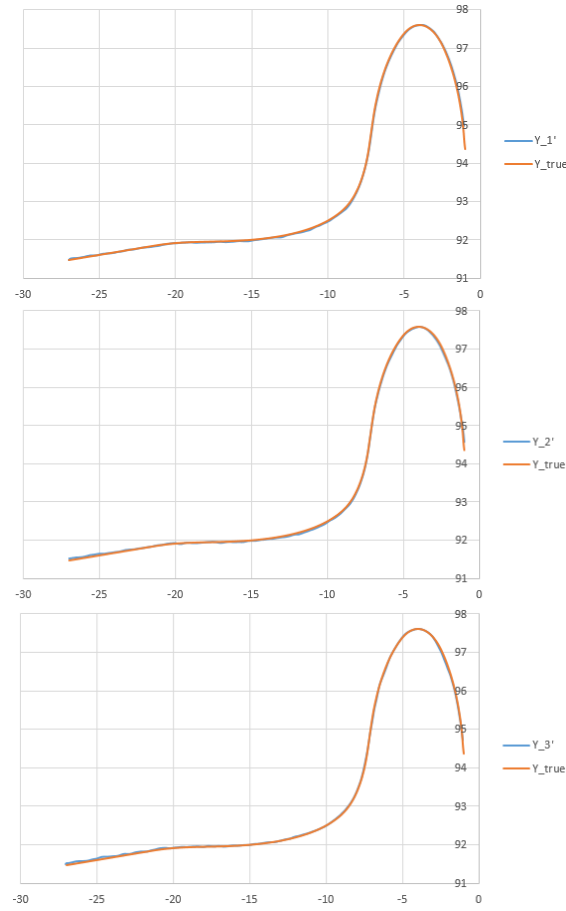


Figura 2.31: Prove 1, 2, 3 sulla ruota

	1	2	3	
Δx	-11.85	-10.95	-10.82	mm
Δy	97.58	98,68	98.33	mm
θ	0.15	-0.5	-0.4	°

Tabella 2.6: Valori ricavati dal processo iterativo per le prove 1,2,3 sulla ruota

Listing 2.2: Codice Matlab per la determinazione dell'errore sul profilo del ruota-prova 1

```
% importazione di dati da Excel
[X]=xlsread('Ruota_1.xlsx','Foglio1','A2:A521');
[Y]=xlsread('Ruota_1.xlsx','Foglio1','B2:B521');
[X_true]=xlsread('Ruota_1.xlsx','Foglio1','D2:D521');
[Y_true]=xlsread('Ruota_1.xlsx','Foglio1','E2:E521');
%creazione di un dominio comune e successiva
interpolazione
X_norm=union(X,X_true);
Y_norm=interp1(X,Y,X_norm,'spline');
Y_true_norm=interp1(X_true,Y_true,X_norm,'spline');
%esclusione dei valori non significativi
val_eclusi=find(X_norm >= -4 | X_norm <= -26.8);
X_norm(val_eclusi)=[];
Y_norm(val_eclusi)=[];
Y_true_norm(val_eclusi)=[];
% valutazione dell'errore
err=Y_norm-Y_true_norm;
abs_err=abs(err);
err_m=mean(abs_err);
MAX_err=max(abs_err);
```

	1	2	3	
err_m	0.0294	0.0130	0.0124	mm
MAX_{err}	0.0862	0.1081	0.0310	mm

Tabella 2.7: Valori d'errore medio e massimo per le prove 1, 2, 3 sulla ruota

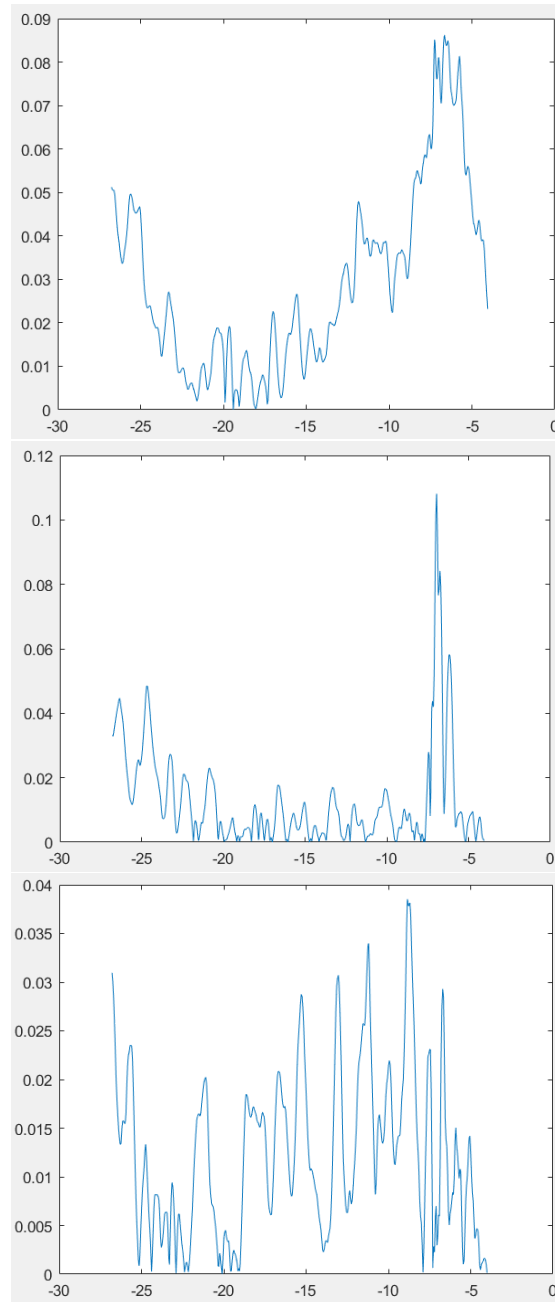


Figura 2.32: Andamento di $|err|$ per le prove 1, 2, 3 sulla ruota

Confrontando i risultati di errore per i due componenti è risultato che, sebbene il valore medio dell'errore nei due componenti sia simile, il rullo presenta dei massimi decisamente più elevati rispetto alla ruota; questo picco è stato rilevato per tutte le prove nella porzione finale del profilo e tale scostamento è visibile anche graficamente.

2.4.3 Prove di ripetibilità

Una caratteristica fondamentale per la determinazione delle prestazioni di un sensore è la sua ripetibilità. Per la verifica di questo parametro sono state condotte quattro prove a distanza di tre minuti l'una dall'altra e senza modificare il sistema. In questo caso è stato possibile posizionare i dischi con lo stesso orientamento che avrebbero avuto sul banco prova, non essendo fondamentale il corretto allineamento tra la banda luminosa e la direzione radiale orizzontale del disco. In figura (2.33) viene riportato il sistema utilizzato per la prova sul rullo.

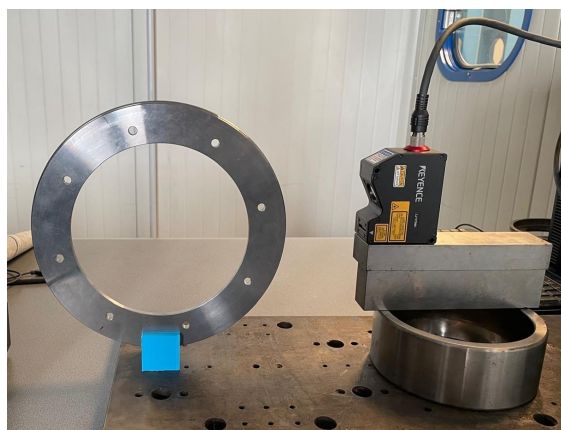


Figura 2.33: Sistema utilizzato per la prova di ripetibilità sul rullo

Dopo aver effettuato i test sono stati analizzati i dati ed è stato calcolato lo scostamento medio e massimo tra i vari profili ottenuti.

	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4	
err_m	0.0062	0.0106	0.0129	0.0065	0.0089	0.0032	mm
MAX_{err}	0.0528	0.0478	0.0444	0.1002	0.0840	0.0164	mm

Tabella 2.8: Valori d'errore medio e massimo per la prova di ripetibilità sul rullo

Come si può vedere confronto più critico dal punto di vista dell'errore medio è il confronto 1 – 4, mentre per il 2 – 3 è stato riscontrato il valore massimo di errore. Si passa ora alla ruota.

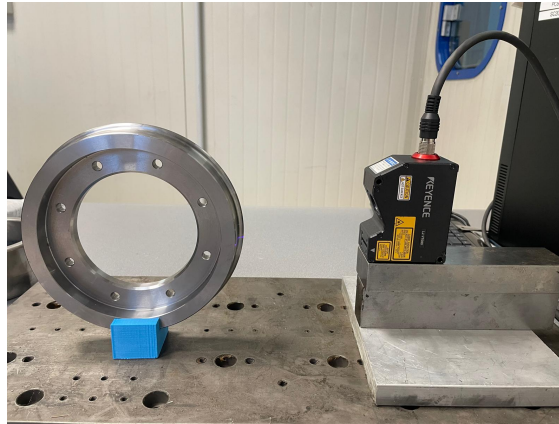


Figura 2.34: Sistema utilizzato per la prova di ripetibilità sul rullo

	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4	
err_m	0.0050	0.0069	0.0092	0.0023	0.0048	0.0029	mm
MAX_{err}	0.0332	0.0386	0.0428	0.0102	0.0166	0.0142	mm

Tabella 2.9: Valori d'errore medio e massimo per la prova di ripetibilità sulla ruota

Come per il rullo si identifica il confronto più critico considerando l'errore medio e massimo, in entrambi i casi risulta essere 1 – 4. Una differenza apprezzabile è il fatto che la ruota in generale presenti errori minimi e massimi inferiori al rullo; questo comportamento non è strano: durante le prove con il rullo sono state riscontrate maggiori oscillazioni rispetto a quelle sulla ruota, compromettendo così l'accuratezza della misura. Le cause potrebbero essere molteplici, ad esempio le imprecisioni nella fabbricazione, o l'effetto di ombreggiatura di alcune zone di misurazione, dovuto ad un errore del tipo descritto nel paragrafo 2.2.4. Una ulteriore complicazione potrebbe essere portata dal punto di variazione di forma del profilo sul rullo, quindi dove avviene il passaggio da un profilo caratterizzato da una curvatura ad uno costituito da un tratto piano. Si è potuto constatare, a seguito di diverse prove, che questo punto è il più critico per le misurazioni.

2.5 Prove su profili usurati

Le ultime prove effettuate con il sensore sono state condotte su profili non appartenenti al banco prova. In particolare sono stati utilizzati due rulli con conicità pari a 0.05 e spessi 27 mm. La differenza tra i due sta nel livello di usura, infatti il primo presenta un lieve danneggiamento mentre il secondo è gravemente usurato.

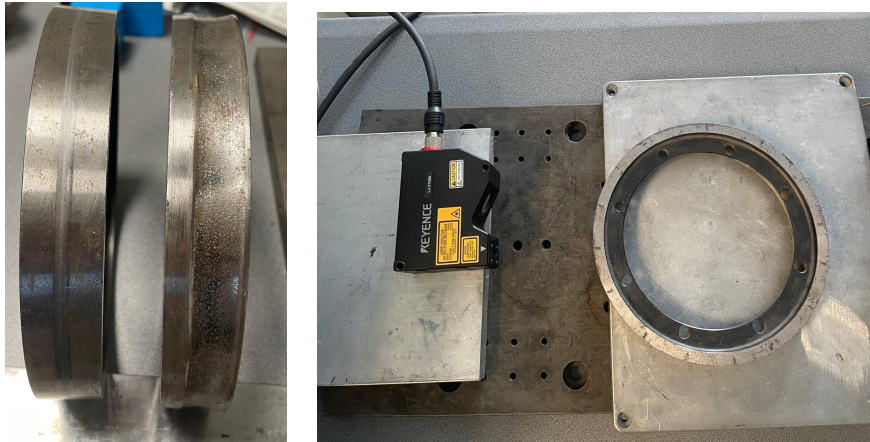


Figura 2.35: Profili dei rulli a confronto (sx) e impostazione degli strumenti utilizzati per il test (dx)

Il test, condotto in egual modo per entrambi, consiste nell'acquisizione di 15 profili, cercando di mantenere un passo angolare costante tra le varie acquisizioni, per riportare i dati su Excel ed utilizzare il metodo grafico iterativo, come per le prove su rullo e ruota, ricavando così Δx , Δy e θ . In questo modo si ottengono i rispettivi valori di X e Y per tutti i profili. Partendo dal caso di usura gravosa, si riportano ora i grafici ottenuti dalla prova numero 4 e dalla prova numero 13, seguiti dal profilo medio ricavato dalla media tra tutte le 15 prove.

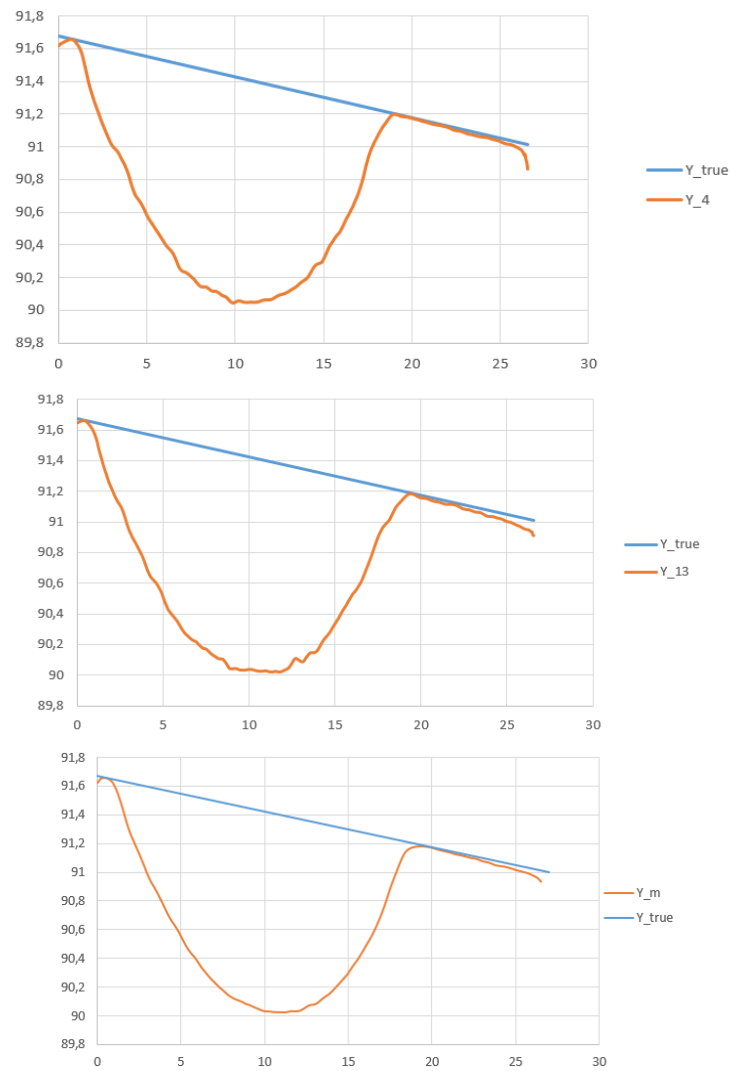


Figura 2.36: Prove sul rullo gravemente usurato, numero 4 e 13 seguite dal profilo medio

In tabella i valori significativi del processo iterativo per ciascuna prova.

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	
Δx	16.99	16.97	16.66	17.05	17.2	17.4	19.95	17.07	mm
Δy	95.94	95.81	97.6	98.24	97.43	96.64	96.62	97.38	mm
θ	0.15	0.13	-0.06	0.18	0.28	0.35	0.1	0.19	°

Tabella 2.10: Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 1-8 - usura elevata

	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_m	
Δx	16.97	17.09	17,07	17	16.95	17.05	16.6	16.99	mm
Δy	98.06	97.73	97.74	97.23	97.23	97.37	98.52	97.31	mm
θ	0.13	0.21	0.2	0.13	0.12	0.14	-0.11	0.15	°

Tabella 2.11: Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 9-15 seguite dal profilo medio - usura elevata

Per quanto riguarda il rullo lievemente si riportano di seguito i grafici i dati riassuntivi. Si noti che nel grafico di Y_3 è presente, nell'estremità di destra, un picco, probabilmente dovuto a qualche effetto di riflessione o imprecisione di misurazione.

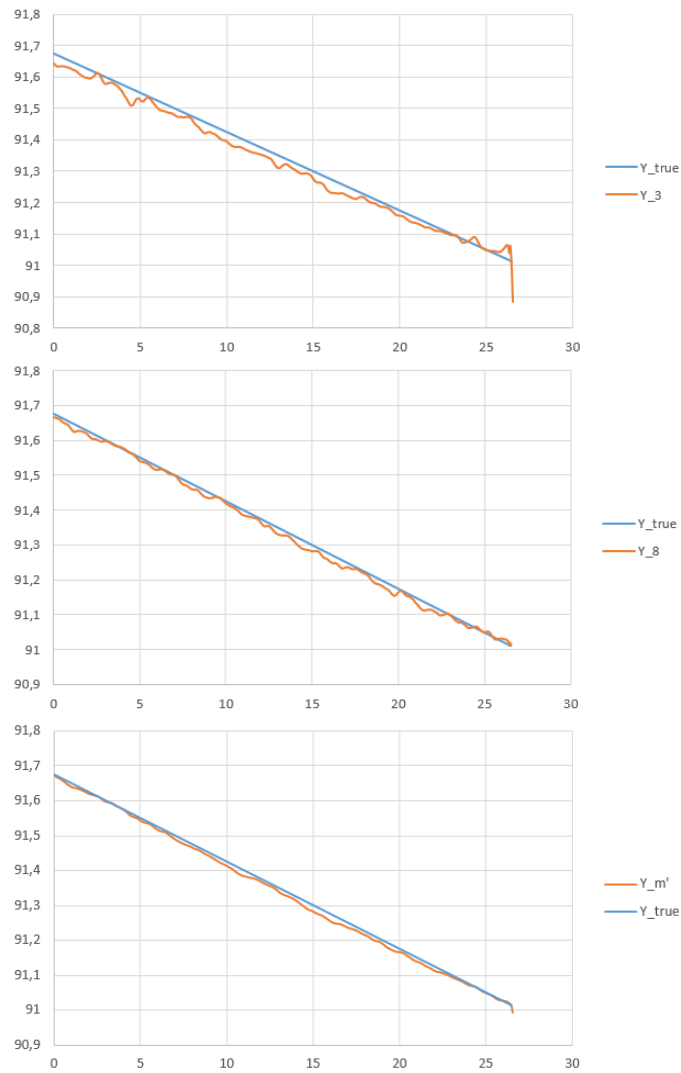


Figura 2.37: Prove sul rullo lievemente usurato, numero 3 e 8 seguite dal profilo medio

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	
Δx	17.44	17.35	17.4	17.36	17.3	17.35	17.36	17.4	mm
Δy	99.015	98.715	98.83	97.805	97.558	98.074	98.466	98.055	mm
θ	0.4	0.36	0.37	0.34	0.31	0.34	0.35	0.37	°

Tabella 2.12: Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 1-8 - usura lieve

	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_m	
Δx	17.41	17.38	17.43	17.41	17.5	17.48	17.51	17.4	mm
Δy	98.99	97.931	98.176	98.095	98.341	97.115	98.084	98.12	mm
θ	0.38	0.36	0.39	0.38	0.43	0.39	0.44	0.36	°

Tabella 2.13: Valori riassuntivi del procedimenti iterativo - prove 9-15 seguite dal profilo medio - usura lieve

A questo punto, per ottimizzare il procedimento, è fondamentale costruzione di due matrici aventi rispettivamente come colonne tutti i vettori X_i e Y_i . Grazie a questa matrice è possibile impostare un ciclo *for* su Matlab ed effettuare la procedura per la determinazione del volume asportato a causa dell'usura. In particolare, una volta acquisita la matrice, si eseguono i seguenti passaggi per ciascun vettore:

- creazione di uno spazio X_{norm} dato dall'unione di X_{true} e X_i ;
- interpolazione di Y_{true} e Y_i nello spazio appena generato;
- apertura di un ulteriore ciclo *for*, interno al primo, che consenta di agire sulle singole celle;
- calcolo del valore $\Delta r(j) = Y_i(j) - Y_{true}(j)$;
- calcolo della circonferenza sulla quale applicare la sottrazione di volume:

$$crf(j) = \frac{2}{15} * \pi * \min(Y_i(j), Y_{true}(j)) \quad (2.15)$$

viene utilizzato il minimo tra i due valori per prevedere possibili errori visivi per mezzo dei quali il profilo usurato superi il profilo teorico, riferendosi alla quota Y . In questo modo si applicherebbe un contributo negativo Δr associandolo al raggio Y_{true} ;

- calcolo del contributo in perdita di volume

$$\Delta V_i(j) = crf_i(j) * \Delta x_v(j) * \Delta r(j) \quad (2.16)$$

considerando $\Delta x_v = X_{norm}(j) - X_{norm}(j - 1)$ la porzione di profilo da considerare per il calcolo del volume j -esimo.

- aggiornamento del totale di volume perso.

La soluzione trovata viene poi confrontata con quella ottenuta considerando un livello medio di usura su tutta la circonferenza. Si comincia con la determinazione di un profilo medio di usura dato dalla media tra tutte e 15 le acquisizioni. Una volta ricavato il profilo si otterrà il volume asportato mediante lo stesso procedimento, ma senza la necessità di utilizzare il ciclo *for* esterno. Di seguito il codice utilizzato per confrontare il volume asportato a seconda del procedimento utilizzato.

Listing 2.3: Codice Matlab per la determinazione del volume asportato con entrambi i procedimenti - usura lieve

```

%% caso con il profilo medio
% acquisizione dati da Excel
[X_m]=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','DV3:DV533');
[Y_m]=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','DW3:DW533');
[X_true]=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','DQ3:DQ533');
[Y_true]=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','DR3:DR533');
% creazione di un dominio comune e successiva
    interpolazione
X_norm=union(X_m,X_true);
Y_m_norm=interp1(X_m,Y_m,X_norm,'spline');
Y_true_norm=interp1(X_true,Y_true,X_norm,'spline');
delta_V=0;
% ciclo for per il calcolo del volume
for i= 2:length(X_norm)
    delta_X_norm=(X_norm(i)-X_norm(i-1));
    delta_r=(Y_m_norm(i)-Y_true_norm(i));
    crf=2*pi*min(Y_m_norm(i),Y_true_norm(i));
    delta_V=delta_V+(delta_X_norm*delta_r*crf);
end
%% caso con 15 prove
% acquisizione dei dati e inserimento nelle rispettive
    matrici
X_matrix=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','LN3:MB533');
Y_matrix=xlsread('Prove su profili usurati.xlsx','Usura
    lieve','ME3:MS533');
% ciclo for per il calcolo del volume, con all'interno la
    creazione del dominio comune e la successiva
    interpolazione
delta_V_15=0;
for i = 1:15
    X_i = X_matrix(:, i);
    Y_i = Y_matrix(:, i);
    X_norm = union(X_i, X_true);
    Y_i_norm = interp1(X_i, Y_i, X_norm, 'spline');

```

```

Y_true_norm = interp1(X_true, Y_true, X_norm, 'spline
');
val_esclusi=find(X_norm <= 3 | X_norm >= 24);
X_norm(val_esclusi)=[];
Y_i_norm(val_esclusi)=[];
Y_true_norm(val_esclusi)=[];
for j=2:length(X_norm)
    delta_X_norm=X_norm(j)-X_norm(j-1);
    delta_r_15 =(Y_i_norm(j) - Y_true_norm(j));
    crf_15 = (2/15) * pi * min(Y_i_norm(j),Y_true_norm(j)
);
    delta_V_15=delta_V_15+(delta_X_norm*delta_r_15*crf_15
);
end
end

```

È risultato che, nel caso di usura grave, il volume asportato fosse $\Delta V = 9.785 \text{ mm}^3$, mentre nel caso delle 15 prove considerate in maniera indipendente si è ottenuto $\Delta V_{15} = 9.906 \text{ mm}^3$. Tali risultati sono buoni, perchè l'errore risulta essere di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla misura effettiva.

Il caso dell'usura lieve, come si può vedere dal codice, ha reso necessaria l'esclusione di alcuni valori agli estremi del dominio, in particolare sono stati esclusi dal conteggio 3 mm per lato. In questo modo è stato possibile ricontrollare i valori dei parametri utilizzati nelle iterazioni e ridefinire così l'allineamento; ciò è visibile nella prova 3 in figura 2.37: si nota infatti che la porzione più a destra presenta un massimo anomalo che oltrepassa il profilo e che si è deciso di non considerare durante l'allineamento. Tale soluzione è stata necessaria a causa del pronunciato scostamento tra i due valori di volumi ottenuti; probabilmente tale differenza è dovuta al fatto che nel profilo medio i vari contributi di usura si compensano permettendo, durante il procedimento iterativo, di allineare e avvicinare maggiormente il profilo ottenuto a quello teorico. In quest'ultimo caso i risultati ottenuti sono stati $\Delta V = 140 \text{ mm}^3$ e $\Delta V_{15} = 214.274 \text{ mm}^3$. L'errore non è piccolo, considerando che i volumi asportati sono ridotti, ma non è stato possibile ridurlo ulteriormente. In tabella vengono riportati i valori dei volumi asportati, in mm^3 nei casi standard e con l'esclusione di punti (contrassegno "ep").

	Usura grave	usura lieve
ΔV	9784.7	154.4
ΔV_{15}	9906.4	248.8
$\Delta V(ep)$	9312.0	140.3
$\Delta V_{15}(ep)$	9411.1	214.3

Tabella 2.14: Valori riassuntivi dei volumi asportati per entrambe le situazioni sui due rulli

Tramite l'esclusione dei punti più esterni si è potuta osservare una lieve riduzione dell'errore sui volumi calcolati per il caso ad usura pronunciata, i risultati rimangono comunque buoni anche nel caso senza esclusione. Per quanto riguarda il caso ad usura lieve la riduzione del volume asportato, determinata dall'esclusione dei punti non necessari, è stata di maggior entità nel caso delle 15 prove, riducendo quindi l'errore, ma non in maniera particolarmente elevata. Va considerato, come si può leggere dalle tabelle 2.12 e 2.13, che la precisione utilizzata nel metodo iterativo è stata di 10^{-3} mm. Nel caso di usura elevata non è stata necessaria una tale precisione per via dei buoni risultati ottenuti e di un livello di danneggiamento molto più pronunciato. Vengono proposti i grafici riassuntivi dei valori di usura riscontrati durante le prove sui rulli.

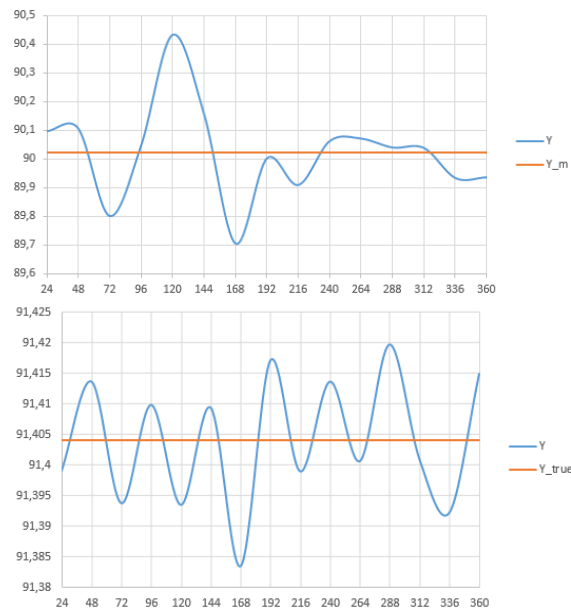


Figura 2.38: Diagrammi cartesiani per la schematizzazione dei vari livelli di usura, elevata (in alto) e lieve (in basso)

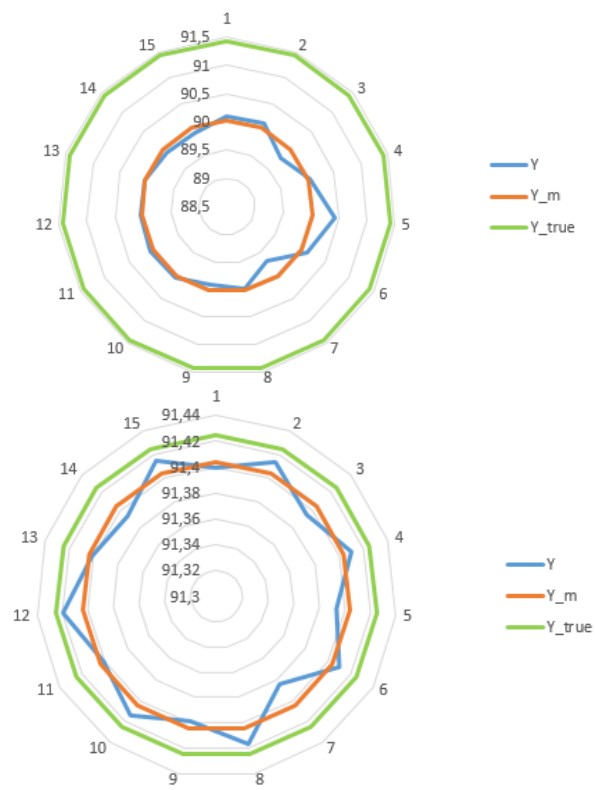


Figura 2.39: Diagrammi polari per la schematizzazione dei vari livelli di usura, elevata (in alto) e lieve (in basso)

Capitolo 3

Conclusioni

3.1 Discussione dei risultati ottenuti e considerazioni finali

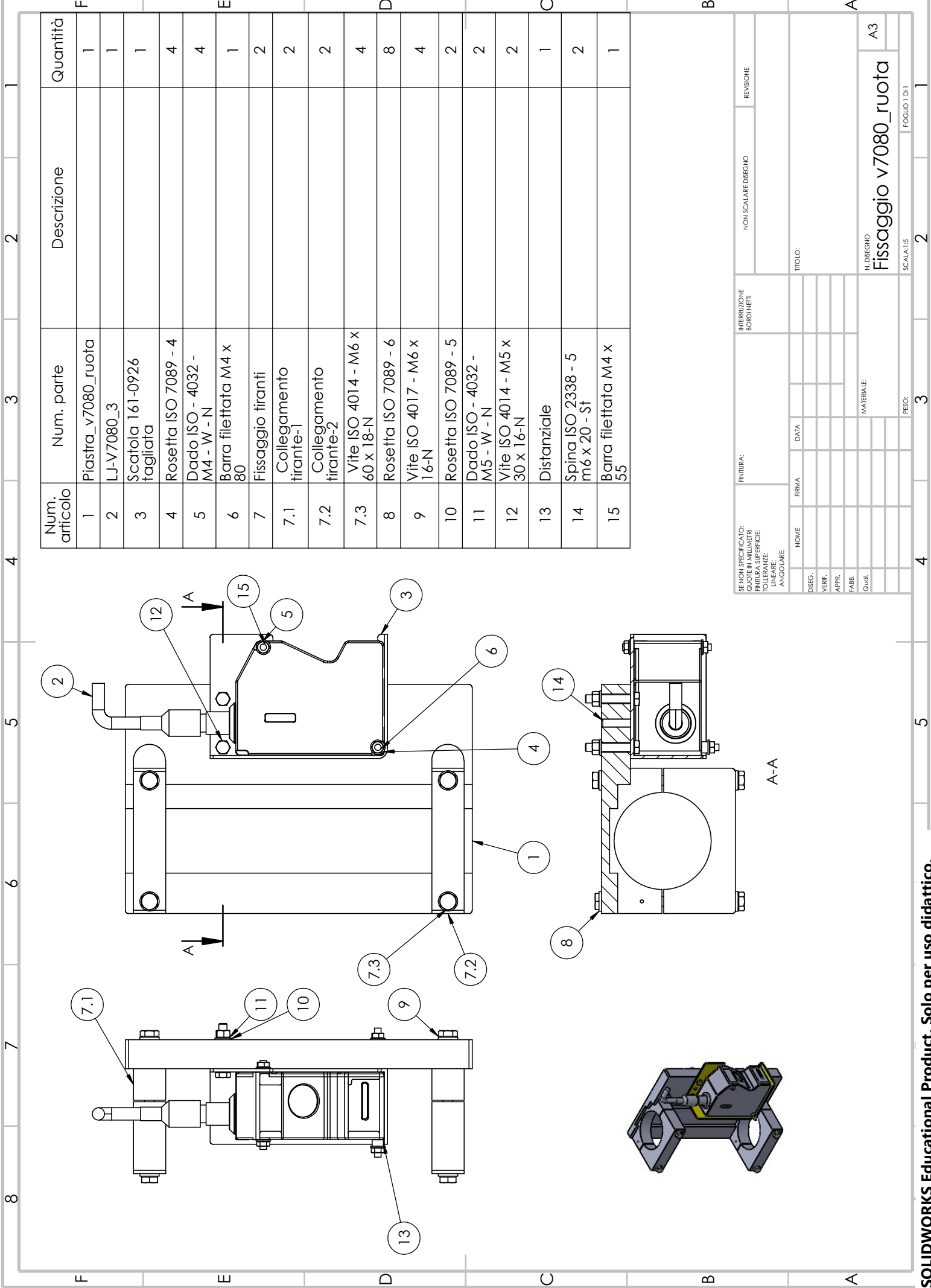
Per il corretto svolgimento delle prove con i sensori sono necessari molti accorgimenti, specialmente nella fase di allineamento e centraggio. Tali errori devono essere ridotti al minimo per garantire una misura precisa e non possono essere trascurati, specialmente considerando che per questa tipologia di prove la precisione richiesta è molto alta. Un adeguato sistema di fissaggio è quindi indispensabile per la stabilità durante i test. Durante il metodo iterativo si è potuto osservare come variazioni di Δx e Δy dell'ordine di 10^{-2} mm potessero influire significativamente sui risultati, lo stesso discorso vale per piccoli $\Delta\theta$ (0.01°). Le prove sono state condotte in maniera preliminare, senza un sistema di fissaggio, pertanto è normale che i risultati di una correzione apportata manualmente siano meno affidabili dei risultati che potrebbero essere acquisiti sul banco prova vero e proprio, senza contare che in questo caso le misurazioni non sono state svolte in maniera continua, come avverrà sul banco prova, ma in modo discreto, considerando vari punti della circonferenza. I test condotti sono stati comunque molto importanti per poter comprendere il funzionamento di un profilometro, la sua sensibilità agli errori di montaggio o alle riflessioni, e il corretto trattamento dei dati ottenuti dalle prove.

Un altro aspetto molto importante riguarda la non uniformità dell'usura lungo la superficie dei rulli. Infatti dai grafici riportati in figura [2.39] si può notare come, specialmente nel caso di usura elevata, vi sia un picco di danneggiamento in una porzione della superficie; nel caso di usura lieve l'effetto è leggermente incrementato a causa della diversa scalatura degli assi per i due grafici.

Il fenomeno dell'usura rappresenta una grande tematica di studio in campo ferroviario, vista la sua criticità; occorre quindi prestare molta attenzione durante lo studio e le prove condotte per poterne determinare e prevedere gli effetti, garantendo così la stabilità di marcia e la sicurezza.

Bibliografia

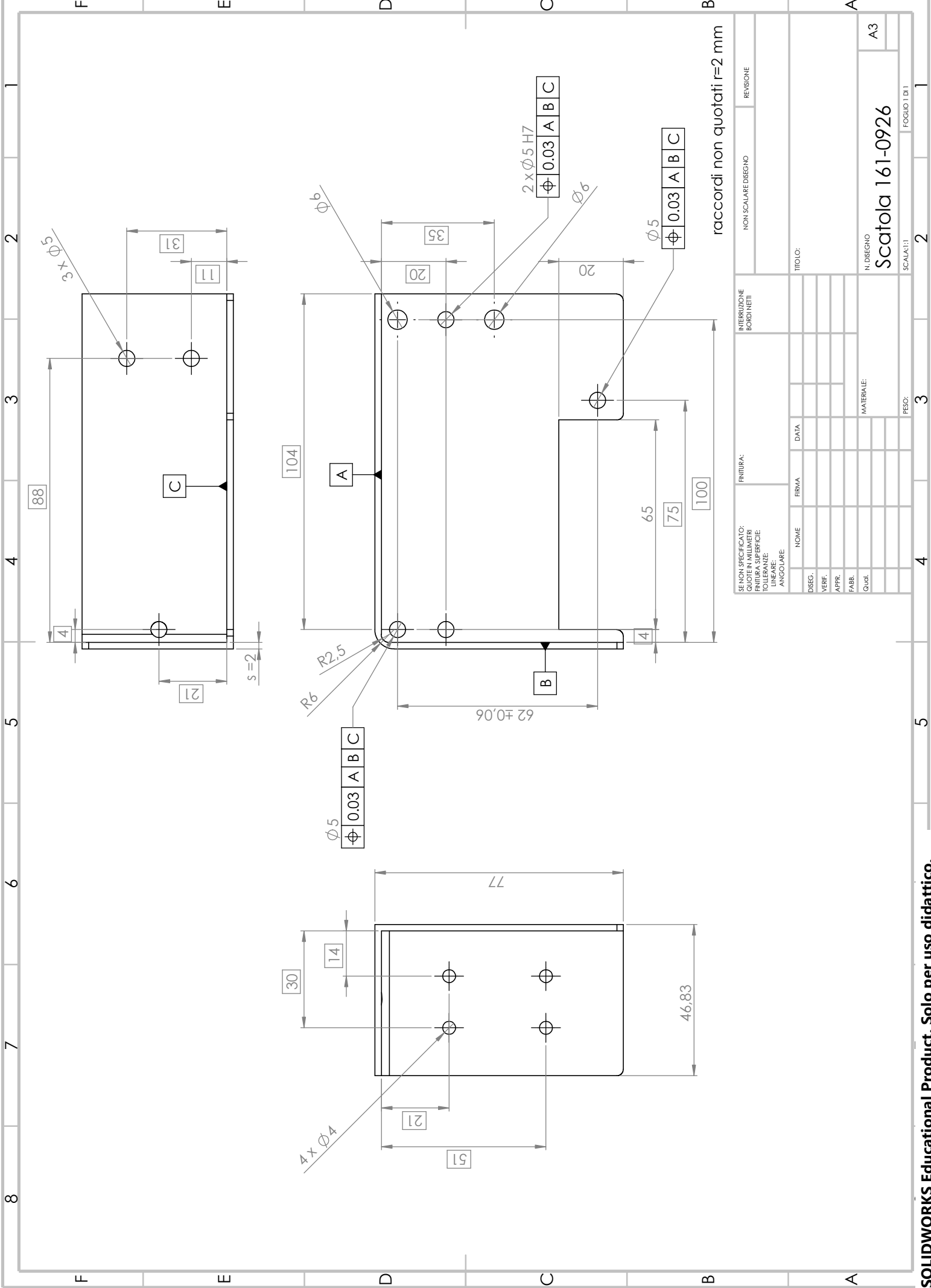
- [1] N. Bosso, M. Magelli, N. Zampieri. Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models.
- [2] M. Magelli, R. Pagano, N. Zampieri. Design of an Innovative Twin-Disc Device for the Evaluation of Wheel and Rail Profile Wear.
- [3] R. Pagano, N. Zampieri. Innovative design of a Twin Disc tribometer for wheel-rail contact analysis.
- [4] N. Bosso, M Magelli. Development of numerical and experimental tools for the simulation of train braking operations.
- [5] Borja Rodríguez-Arana, Albi San Emeterio, María Panera, Alicia Montes, David ´Alvarez. Investigation of a relationship between twin-disc wear rates and the slipping contact area on R260 grade rail.
- [6] M. Ignesti, L. Marini, E. Meli, A. Rindi. Development of a Model for the Prediction of Wheel and Rail Wear in the Railway Field.
- [7] Roger Lewis, Naim Kuka, Caterina Ariaudo, Rob Dwyer-Joyce, Nicola Tassini, Xavier Quost. Predicting Railway Wheel Wear Starting From Multi-Body Analysis: A Preliminary Study.
- [8] <https://www.keyence.it/>
- [9] Congcong Fang, Yi Ding, Hongkai Yan, Jun Chen, Wei Zhou, Xianghui Meng. Prediction and analysis of wheel flange wear on small curved track considering wheel-rail conformal and lubricated contact.
- [10] Jiaqi Ye , Edward Stewart , Dingcheng Zhang , Qianyu Chen , Karthik Thangaraj , and Clive Roberts , Member, IEEE. Integration of Multiple Sensors for Noncontact Rail Profile Measurement and Inspection.
- [11] Yunfeng Ran, Qixin He, Qibo Feng, And Jianying Ciut. High-Accuracy On-Site Measurement of Wheel Tread Geometric Parameters by Line-Structured Light Vision Sensor.
- [12] Bolton PJ, Clayton P (1984). Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels. *Wear* 93(2):145–165
- [13] A. Roviraa, A. Rodaa, M.B. Marshallb, H. Brunskillb, R. Lewisb. Experimental and numerical modelling of wheel–rail contact and wear.



Num. articolo	Num. parte	Descrizione	Quantità
1	Piastra_v7080_ruota		1
2	LJ-V7080_3		1
3	Scatola 161-0926 tagliata		1
4	Rosetta ISO 7089 - 4		4
5	Dado ISO - 4032 - M4 - W - N		4
6	Barra filettata M4 x 80		1
7	Fissaggio tiranti		2
7.1	Collegamento tirante-1		2
7.2	Collegamento tirante-2		2
7.3	Vite ISO 4014 - M6 x 60 x 18-N		4
8	Rosetta ISO 7089 - 6		8
9	Vite ISO 4017 - M6 x 16-N		4
10	Rosetta ISO 7089 - 5		2
11	Dado ISO - 4032 - M5 - W - N		2
12	Vite ISO 4014 - M5 x 30 x 16-N		2
13	Distanziale		1
14	Spina ISO 2338 - 5 m6 x 20 - St		2
15	Barra filettata M4 x 55		1

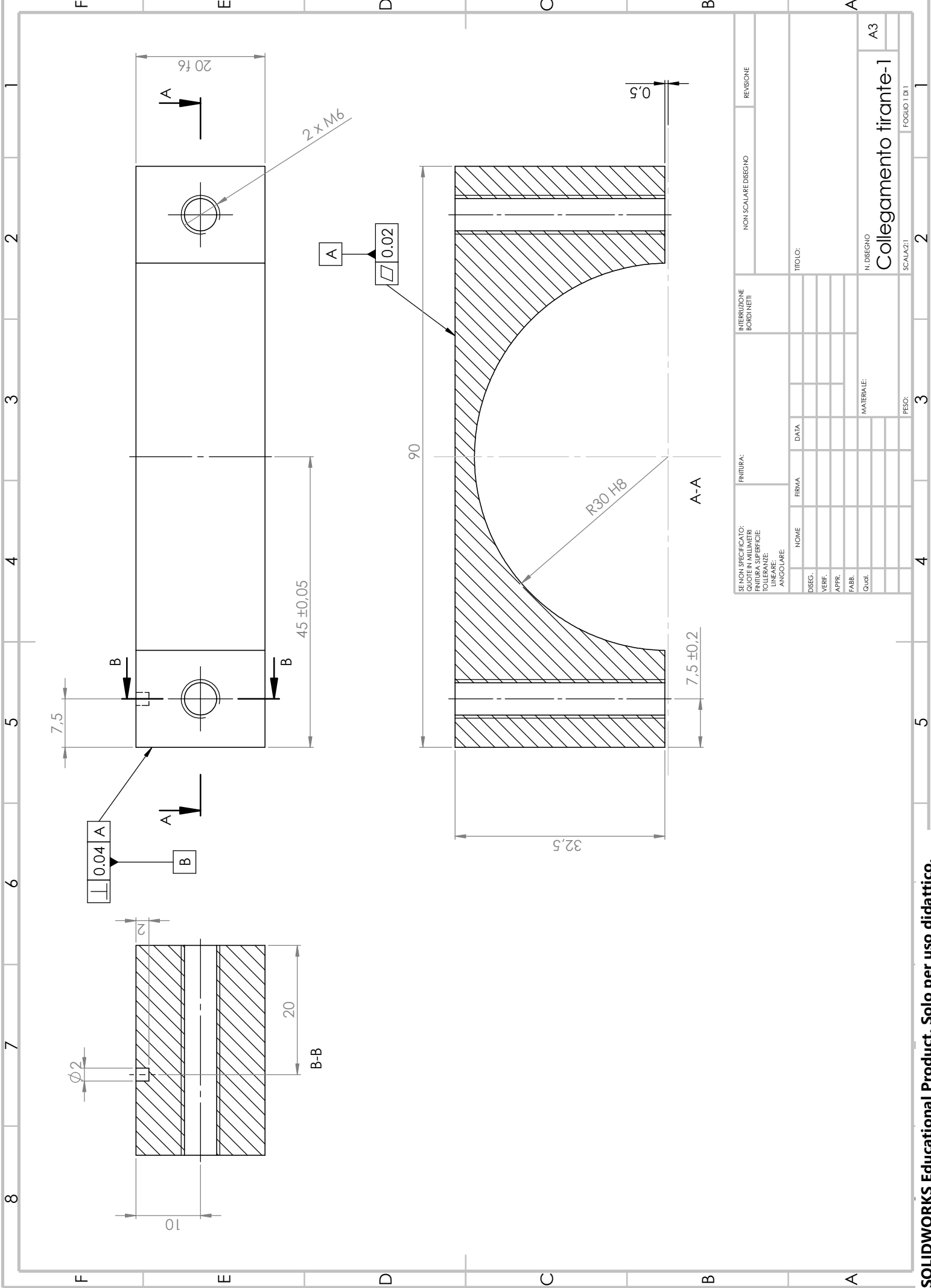
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		INTERRUZIONE BORDI NETTI		NON SCALARE DISEGNO		REVISIONE	
NOME		FIRMA		DATA		TITOLO:			
DISEG.	VERIF.	APPR.	FABB.	QUOT.					
					MATERIALE:				
					PESO:				
					SCALA: 1:5				
					FOGLIO 1 DI 1				

N. DISEGNO
Fissaggio v7080_ruota
A3



raccordi non quotati r=2 mm

SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:				FINITURA:		INTERRUZIONE BORDI NETTI		NON SCALARE DISEGNO		REVISIONE	



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE				FINITURA:		INTERRUZIONE BORDI NETTI		NON SCALARE DISEGNO		REVISIONE	
NOME	FIRMA	DATA									
DISEG.											
VERIF.											
APPR.											
FABB.											
Quot.											
MATERIALE:											

