

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un Calotester



Relatore

Prof. Andrea Mura

Co-relatore

Ing. Edoardo Goti

Candidato

Flavio Vitulli

Dicembre 2021

Abstract

Lo studio delle proprietà meccaniche e tribologiche dei materiali e dei rivestimenti è fondamentale per progettare l'applicazione e prevederne il comportamento in fase di esercizio. Per un risparmio di risorse, la determinazione sperimentale di queste proprietà è effettuata in primo luogo su provini meccanici di ridotte dimensioni: per questo motivo esistono in commercio diversi strumenti che hanno lo scopo di riprodurre un danno da usura abrasiva sulla superficie dei provini permettendo di misurare il coefficiente di attrito, determinare il tasso di usura e, in presenza di un rivestimento, misurarne lo spessore. Lo spessore riveste infatti un ruolo molto importante sulle proprietà meccaniche dei rivestimenti.

L'argomento della presente Tesi è di realizzare un Calotester che usura per abrasione i provini meccanici attraverso una sfera metallica collegata ad un motore elettrico che ne impone la rotazione; inoltre, il provino è soggetto ad una forza di compressione dovuta a dei pesi inseriti in un apposito vano, in modo da studiarne il comportamento al variare di questi.

SOMMARIO

ELENCO DELLE FIGURE	7
ELENCO DELLE TABELLE	9
1. ATTRITO E USURA	7
1.1. SUPERFICI A CONTATTO	7
1.2. ATTRITO	13
1.3. USURA	15
1.4. USURA ABRASIVA	17
1.5. EQUAZIONE DI ARCHARD	22
2. PRINCIPIO DI MISURA DEL CALOTESTER	23
2.1. LINEE GUIDA PER LA MISURAZIONE	24
2.2. LAYOUT POSSIBILI	29
3. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL MOTORE DC E REGOLAZIONE	31
3.1. MOTORE ELETTRICO	31
3.1. CONTROLLO AD ANELLO APERTO: TECNICA PWM	40
3.2. CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO: TECNICA PID	42
4. DEFINIZIONE DEL LAYOUT MECCANICO	46
4.1. TRASMISSIONE DEL MOTO	46
4.2. SISTEMA DI SERRAGGIO	47
4.3. ALBERI	49
4.4. DIMENSIONAMENTO DEI CUSCINETTI	53
4.5. SISTEMA PORTA-PROVINO	56
4.6. SISTEMA DI APPLICAZIONE DEL PESO	60
4.7. FISSAGGIO DEL MOTORE E DEI COMPONENTI ELETTRONICI	61
4.8. CARCASSA DEL CALOTESTER	63
4.9. DISEGNO DELL'ASSIEME	66
5. CIRCUITO ELETTRONICO DI CONTROLLO	71
5.1. SCHEDA DI CONTROLLO	72
5.2. ENCODER	73
5.3. CELLA DI CARICO	75
5.4. ELEMENTI DI INTERFACCIA UTENTE	77
6. CODICE ARDUINO	79
6.1. DEFINIZIONE DELLE LIBRERIE E DELLE VARIABILI	79
6.2. VOID SETUP	80
6.3. FUNZIONE CALCOLO DELLA VELOCITÀ	80
6.4. VOID LOOP	81
6.5. SETTAGGIO DELLA VELOCITÀ E DEL TEMPO	83
6.6. CONTROLLO MOTORE	83
6.7. ACQUISIZIONE INPUT DA CELLA DI CARICO	85
7. CONCLUSIONI	86

Elenco delle figure

FIGURA 1 - CONTATTO CONFORME (A-B) E NON CONFORME (C) – GIOVANNI STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR: METHODOLOGIES FOR DESIGN AND CONTROL”, PAG. 2	8
FIGURA 2 - DISTRIBUZIONE DI PRESSIONE	8
FIGURA 3 - AREA DI CONTATTO	9
FIGURA 4 - DISTRIBUZIONE PRESSIONE SFERA-PIANO	10
FIGURA 5 - ANDAMENTO DELLE TENSIONI NEI CORPI	10
FIGURA 6 - CONTATTO ELASTO-PLASTICO – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG. 7	11
FIGURA 7 - COMPORTAMENTO FRAGILE – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG. 7	11
FIGURA 8 - SUPERFICIE DI CONTATTO NOMINALE E REALE – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG. 14	12
FIGURA 9 - EQUILIBRIO DELLE FORZE – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.22	13
FIGURA 10 - ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE DI ATTRITO – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.22	14
FIGURA 11 - INFLUENZA DELL'ATTRITO NEL CONTATTO TRA DUE CORPI – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.22	14
FIGURA 12 - ESEMPI DI TIPI DI MOTO RELATIVO TRA CORPI A CONTATTO E RELATIVI PROCESSI DI USURA: A. USURA DA SCORRIMENTO; B. USURA DA ROTOLAMENTO; C. USURA DA SFREGAMENTO; D. PARTICELLE DURE TRASPORTATE DA UN FLUIDO: USURA EROSIVA – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.86	15
FIGURA 13 - USURA ABRASIVA – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.46	18
FIGURA 14 - TIPI DI ABRASIONE: (A) MICOTAGLIO, (B) MICRO-ARATURA – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.96	18
FIGURA 15 - DIPENDENZA DEL PARAMETRO Φ CON LA DUREZZA DI DIVERSI MATERIALI PER ALTI E BASSI ANGOLI DI ATTACCO – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.98	20
FIGURA 16 - TASSO DI USURA DI ALCUNI MATERIALI IN FUNZIONE DELLA DUREZZA DEI MINERALI ABRASIVI – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.143	21
FIGURA 17 - RESISTENZA ALL'USURA ABRASIVA DEI VARI TIPI DI MATERIALI – G. STRAFFELINI, “FRICTION AND WEAR”, PAG.145	22
FIGURA 18 - DIMENSIONI PRINCIPALI USATE NELLA NORMATIVA PER LA DEFINIZIONE DEL CRATERE – BS EN ISO 26423 – 2016, “FINE CERAMICS (ADVANCED CERAMICS, ADVANCED TECHNICAL CERAMICS) – DETERMINATION OF COATING THICKNESS BY CRATER-GRINDING METHOD”, PAG. 2	23
FIGURA 19 - ESEMPIO DI BANCO PROVA: 1. SFERA, 2. PROVINO – BS EN ISO 26423-2016, PAG.4	24
FIGURA 20 - CRATERI PRODOTTI DA TEST A DURATA CRESCENTE SU UN CAMPIONE DI ACCIAIO PER UTENSILI RIVESTITO DI TiN – M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.17	25
FIGURA 21 - MISURE DEI DIAMETRI DEI CRATERI DI UNA SERIE DI TEST A DURATA CRESCENTE DI UN PROVINO IN ACCIAIO RIVESTITO DI TiN - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.18	26
FIGURA 22 - EFFETTO DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELLA SFERA SUL VOLUME USURATO SU PROVINI IN ACCIAIO PER UTENSILI - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.35	27
FIGURA 23 - SPESSORE DI USURA VALUTATO IN TRE TEST SU SFERE IN SILVER STEEL CON ABRASIVO IN SiC: A) TEST CON SFERE NUOVE; B) TEST CON SFERE USATE - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.37	28
FIGURA 24 - CALOTESTER A SINGOLO ALBERO - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.11	29
FIGURA 25 - CALOTESTER A DOPPIO ALBERO - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.11	30
FIGURA 26 - CALOTESTER CON BRACCIO IMPERNIATO - M G GEE, A GANT, I HUTCHINGS, R BETHKE, K SCHIFFMANN, K VAN ACKER, S POULAT, Y GACHON AND J VON STEBUT, “BALL CRATERING OR MICRO-ABRASION WEAR TESTING OF COATINGS”, PAG.11	30
FIGURA 27 - PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO MACCHINA A CORRENTE CONTINUA	31
FIGURA 28 - FORZE INDOTTE NEL ROTORE	32
FIGURA 29 – VERSO DELLE FORZE INDOTTE	32
FIGURA 30 - COMMUTATORE A LAMELLE	33
FIGURA 31 - MACCHINA CC A MAGNETI PERMANENTI CON 2 PAIA POLI	33
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO MOTORE-GENERATORE	33
FIGURA 33 - CARATTERISTICHE ELETTROMECCANICHE MOTORE A CORRENTE CONTINUA	34

FIGURA 34 - PUNTO DI FUNZIONAMENTO	35
FIGURA 35 - REGOLAZIONE DELLA TENSIONE DI ARMATURA	36
FIGURA 36 - REGOLAZIONE DI CAMPO	36
FIGURA 37 - MOTORE AD ECCITAZIONE SERIE	37
FIGURA 38 - MOTORE AD ECCITAZIONE SEPARATA	37
FIGURA 39 - MOTORE A MAGNETI PERMANENTI	37
FIGURA 40 - MOTORE DC DELLA SANMEN TAILI MOTOR CO.	38
FIGURA 41 - MOSFET IRF740	39
FIGURA 42 - TRANSISTOR PN222	40
FIGURA 43 - SCHEMA DI CONTROLLO AD ANELLO APERTO	40
FIGURA 44 - TECNICA PWM	41
FIGURA 45 - VARIAZIONE DELLA CORRENTE AL VARIARE DELL'IMPULSO	41
FIGURA 46 - SCHEMA DI CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO	42
FIGURA 47 - LOGICA DI FUNZIONAMENTO DEL CONTROLLO PID	43
FIGURA 48 - SCHEMA DEL CONTROLLO PID	44
FIGURA 49 - AZIONE PROPORZIONALE	44
FIGURA 50 - AZIONE INTEGRALE	45
FIGURA 51 - AZIONE DERIVATIVA	45
FIGURA 52 - SISTEMA DI TRASMISSIONE DEL MOTO	46
FIGURA 53 - SISTEMA DI SERRAGGIO	47
FIGURA 54 - VISTA IN SEZIONE: PARTICOLARE DELLA COMPRESSIONE DELLE BOCCOLE SULLA SFERA	47
FIGURA 55 - SEZIONE DEL SISTEMA DI SERRAGGIO: PARTICOLARE DELLO SCORRIMENTO ASSIALE DELLE BOCCOLE DI SERRAGGIO	48
FIGURA 56 - VISTA IN SEZIONE: SISTEMA DI SERRAGGIO PER SFERE DI DIAMETRO RIDOTTO	48
FIGURA 57 - MESSA IN TAVOLA DELL'ALBERO COLLEGATO AL MOTORE	49
FIGURA 58 - MESSA IN TAVOLA DELL'ALBERO COLLEGATO ALL'ENCODER	49
FIGURA 59 - COLLEGAMENTO MOTORE-GIUNTO-ALBERO	50
FIGURA 60 - GIUNTO ELASTICO COMINTEC GAS/SG-ST-M1-M1L	50
FIGURA 61 - COLLEGAMENTO ALBERO-ENCODER	51
FIGURA 62 - DEFORMAZIONE DELL'ALBERO COLLEGATO AL MOTORE (A) E DELL'ALBERO COLLEGATO ALL'ENCODER (B)	51
FIGURA 63 - SFORZO DI TAGLIO (A) E MOMENTO FLETTENTE (B) DELL'ALBERO COLLEGATO AL MOTORE E SFORZO DI TAGLIO (C) E MOMENTO FLETTENTE (D) DELL'ALBERO COLLEGATO ALL'ENCODER	52
FIGURA 64 - TENSIONE MASSIMA EQUIVALENTE NELL'ALBERO COLLEGATO AL MOTORE (A) E NELL'ALBERO COLLEGATO ALL'ENCODER (B)	53
FIGURA 65 - CUSCINETTI A SFERA D/W ER1634-2ZS DELLA SKF - CATALOGO SKF	54
FIGURA 66 - CARATTERISTICHE DIMENSIONALI CUSCINETTO D/W ER1634-2ZS - CATALOGO SKF	54
FIGURA 67 - SUPPORTO CUSCINETTI	55
FIGURA 68 - APPLICAZIONE DELLA FORZA PER L'INSERIMENTO DEL CUSCINETTO - CATALOGO SKF	55
FIGURA 69 - PARTICOLARE DEI SUPPORTI DEI CUSCINETTI: ANELLO SEEGER, ELEMENTO VOLVENTE E SPALLAMENTO	56
FIGURA 70 - GUIDA PROFILATA LINEARE 411N15AODES1 DELLA THOMSON LINEAR	56
FIGURA 71 - PARTICOLARE DEL SISTEMA DI GUIDE ORIZZONTALE E VERTICALI E DELL'APPLICAZIONE DELLA CELLA DI CARICO	57
FIGURA 72 - PIASTRA CELLA DI CARICO, TENSIONI EQUIVALENTI	58
FIGURA 73 - PIASTRA CELLA DI CARICO, DEFORMAZIONE	58
FIGURA 74 - DIVERSO POSIZIONAMENTO DELLA MORSA PORTA-CAMPIONE	59
FIGURA 75 - SISTEMA DI APPLICAZIONE DEL PESO	60
FIGURA 76 - FISSAGGIO MOTORE ELETTRICO	61
FIGURA 77 - FISSAGGIO ENCODER	61
FIGURA 78 - FISSAGGIO JOYSTICK E DISPLAY	62
FIGURA 79 - SISTEMA DI FISSAGGIO DELL'ARDUINO (A), DEI PERNI (B) E SEZIONE DEL SISTEMA (C)	62
FIGURA 80 - PIASTRA SUPERIORE	63
FIGURA 81 - PIASTRA INFERIORE	63
FIGURA 82 - PIEDINI DI APPOGGIO (A) E FISSAGGIO SULLA BASE INFERIORE (B)	64
FIGURA 83 - DISPOSIZIONE DEI PIEDINI SULLA BASE INFERIORE	64
FIGURA 84 - MONTAGGIO PIASTRA SUPERIORE E INFERIORE AI BLOCCHETTI	64
FIGURA 85 - MONTAGGIO PIASTRE LATERALI	65
FIGURA 86 - PARTICOLARE: FERITOIE E PRESA DI ALIMENTAZIONE	65

FIGURA 87 - SCHEMA CIRCUITALE	71
FIGURA 88 - SCHEDA ARDUINO UNO R3	72
FIGURA 89 - ENCODER MINIROD 421	73
FIGURA 90 - SCHEMA DI FUNZIONAMENTO ENCODER	74
FIGURA 91 - DISCO CON TACCHE NERE E BIANCHE	74
FIGURA 92 - SFASATURA SEGNALE A E B	74
FIGURA 93 - CELLA OFF CENTER PA3 DELLA FLINTEC – CATALOGO FLINTEC	75
FIGURA 94 - APPLICAZIONE DELLA CELLA DI CARICO	76
FIGURA 95 - SCHEMA CIRCUITALE CELLA DI CARICO - CATALOGO FLINTEC	76
FIGURA 96 - COLLEGAMENTO CELLA DI CARICO, MODULO HX711 E ARDUINO	77
FIGURA 97 - LCD CON INTERFACCIA I2C	77
FIGURA 98 – JOYSTICK	78
FIGURA 99 - CODICE ARDUINO: INTRODUZIONE DELLE LIBRERIE E DELLE VARIBILI	79
FIGURA 100 - CODICE ARDUINO: VOID SETUP	80
FIGURA 101 - CODICE ARDUINO: CALCOLO VELOCITÀ	80
FIGURA 102 – CODICE ARDUINO: VOID LOOP, PARTE 1	81
FIGURA 103 - CODICE ARDUINO: VOID LOOP, PARTE 2	82
FIGURA 104 - CODICE ARDUINO: ACQUISIZIONE VELOCITÀ	83
FIGURA 105 - CODICE ARDUINO: ACQUISIZIONE TEMPO	
FIGURA 106 - CODICE ARDUINO: CONTROLLO MOTORE	84
FIGURA 107 - ELABORAZIONE DEL SEGNALE DELLA CELLA DI CARICO	85

Elenco delle tabelle

TABELLA 1 - DATI DI TARGA MOTORE DC	38
-------------------------------------	----

1. Attrito e Usura

Nelle applicazioni meccaniche, la conoscenza delle proprietà dei materiali è fondamentale per prevedere il comportamento durante l'utilizzo. È necessario conoscere la resistenza, la duttilità, la resilienza, tutte quelle caratteristiche utili alla scelta del materiale più appropriato in base all'applicazione.

Qualora ci sia qualche proprietà che necessita di essere migliorata per una specifica esigenza, si può ricorrere all'uso di trattamenti termici o chimici oppure all'utilizzo di rivestimenti.

Per valutare il comportamento del rivestimento in diverse circostanze, come ad esempio quando soggetto a forze di attrito, si ricorre allo studio sperimentale su provini meccanici in scala ridotta, per poi dedurre il comportamento che avrà il componente meccanico reale.

1.1. Superfici a contatto

L'attrito e l'usura che si generano con l'accoppiamento di due superfici dipende fondamentalmente dalle caratteristiche del materiale di cui sono composte, però sono molto rilevanti anche altri fattori, come la rugosità delle superfici, l'ambiente in cui vengono a contatto, tutti quei fattori che influiscono il fenomeno. Pertanto, le caratteristiche dei materiali a contatto fondamentalmente determinano la natura dell'interazione, che ha carattere meccanico, poiché si genera un campo di tensioni e deformazioni nella zona di contatto, e carattere chimico-fisico, poiché si instaurano legami fisici o chimici.

Per valutare quantitativamente le sollecitazioni di contatto e le deformazioni che si generano, si ricorre alla teoria di Hertz, sviluppata utilizzando le ipotesi di superfici idealmente lisce e corpi lineari elastici. La teoria, però, ha il solo scopo di partire da un fondamento, poiché un'altra ipotesi di essa è la mancanza totale di attrito tra i corpi.

Il contatto può essere conforme, cioè quando le superfici combaciano quasi tra loro, e non conforme, cioè quando i profili sono diversi e il contatto avviene in un punto oppure lungo una linea.

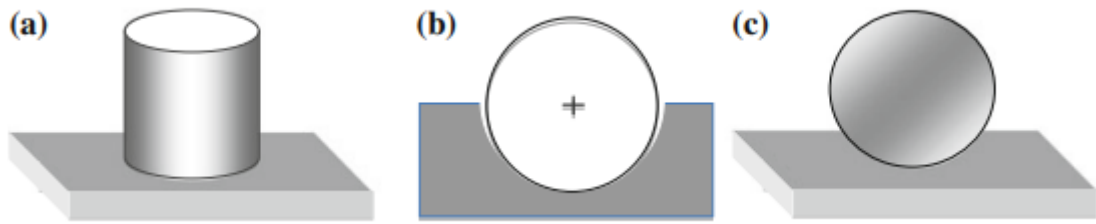


Figura 1 - Contatto conforme (a-b) e non conforme (c) – Giovanni Straffellini, “Friction and wear: Methodologies for Design and Control”, pag. 2

Nel caso di contatto conforme, l’area nominale di contatto A_n è facilmente determinabile; per il contatto non conforme, è necessario relazionare i raggi di curvatura delle superfici e le loro proprietà meccaniche quali modulo elastico ‘E’ e modulo di Poisson ‘ ν ’.

Hertz è arrivato quindi alla definizione di una distribuzione di pressione nella zona di contatto, definita dalla relazione:

$$p = 1.5 \frac{F}{\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

Dove F è la forza normale che preme un corpo sull’altro e ‘a’ e ‘b’ sono i semiassi dell’ellisse della zona di contatto.

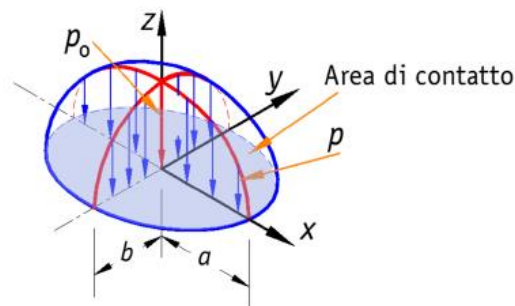


Figura 2 - Distribuzione di pressione

La zona di contatto è una superficie di forma ellittica:

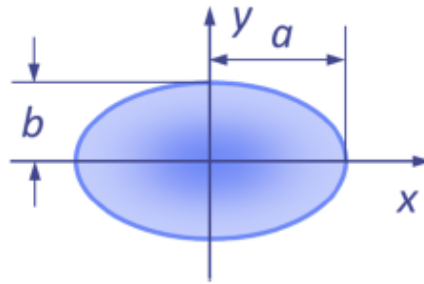


Figura 3 - Area di contatto

Mentre i semiassi 'a' e 'b' dipendono dalle equazioni:

$$a = \alpha q$$

$$b = \beta q$$

$$q = \sqrt[3]{\frac{3}{8} F \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{\sum \rho}}$$

Dove:

F = forza che preme i corpi

$$\vartheta_i = 4 \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$$

$$\sum \rho = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}$$

R_{i1} = raggio di curvatura principale massimo

R_{i2} = raggio di curvatura principale minimo

In base alla geometria delle superfici, è possibile ricondurre ogni caso a una sua determinata equazione.

Il Calotester prevede come superfici a contatto una sfera e un piano, per cui, considerando che:

$$R_{11} = R_{12} = R_1 \quad (\text{sfera})$$

$$R_{21} = R_{22} = \infty \quad (\text{piano})$$

Si ottiene una zona di contatto circolare, con una pressione massima nel punto centrale pari a:

$$p_{max} = \frac{3 F}{2 \pi a^2}$$

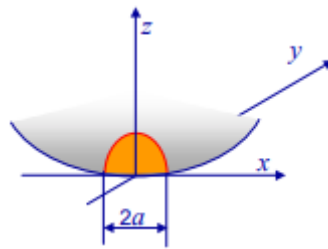


Figura 4 - Distribuzione pressione sfera-piano

Mentre la tensione all'allontanarsi dalla zona di contatto ha un andamento così riportato:

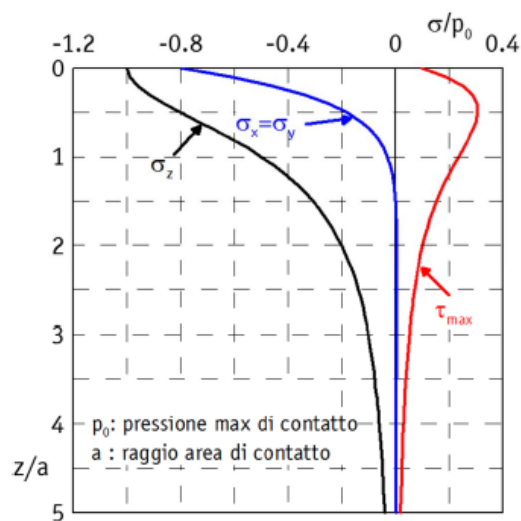


Figura 5 - Andamento delle tensioni nei corpi

La teoria è applicata quando i materiali a contatto hanno un andamento idealmente elastico.

Se un materiale si comporta in modo duttile, la forza di contatto applicata induce a deformazione plastica localizzata se la sollecitazione interna che si genera supera il carico di snervamento del materiale. In questo caso, il comportamento non sarà più elastico, ma elasto-plastico.

Se il carico applicato aumenta, aumenta anche la dimensione della zona plastica.

Se poi il carico applicato è elevato a tal punto che la zona plastica raggiunge la superficie dell'elemento, allora il contatto diventa completamente plastico e rimuovendo il carico applicato, la superficie rimane deformata.

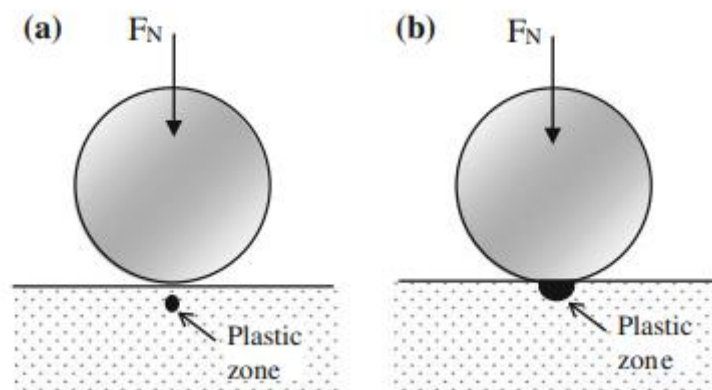


Figura 6 - Contatto elasto-plastico – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag. 7

Nel caso in cui il materiale abbia un comportamento fragile, il carico di snervamento è elevato, ma si avrà una propagazione delle micro-cricche interne molto rapida che porta alla frattura del componente.

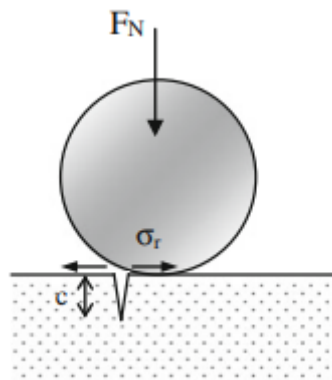


Figura 7 - Comportamento fragile – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag. 7

I materiali costituenti i corpi a contatto possono deformarsi in modo diverso in base alle sollecitazioni applicate, poiché il tipo di risposta dipende dalle loro proprietà meccaniche, come modulo di elasticità, coefficiente di Poisson, carico di snervamento, durezza, tenacità alla frattura.

Nel contatto è necessario considerare comunque che le superfici reali hanno una certa rugosità superficiale a livello microscopico, al contrario della teoria di Hertz che considera superfici idealmente lisce. Questa rugosità influisce sull'attrito tra i materiali e conseguentemente sull'usura di essi, infatti la superficie di contatto reale è diversa dalla superficie di contatto nominale:

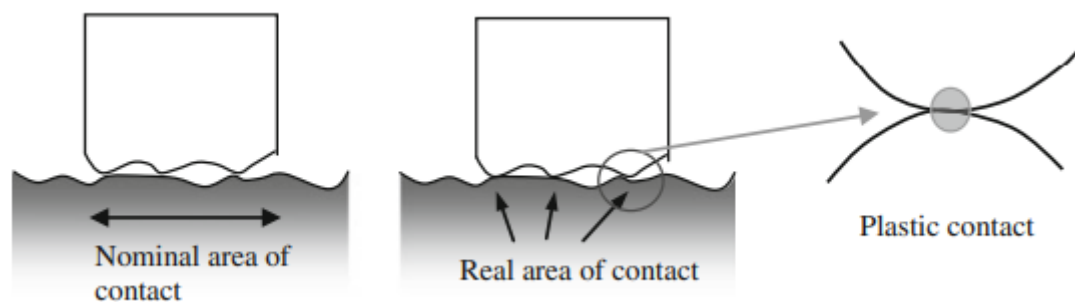


Figura 8 - Superficie di contatto nominale e reale – G. Straffelini, "Friction and wear", pag. 14

Quindi, la reale area di contatto A_r è data dalla sommatoria di N singole aree A_i che si formano in ogni punto di contatto:

$$A_r = \sum_{i=1}^N A_i$$

1.2. Attrito

Per generare il moto relativo tra due corpi tenuti a contatto tra loro tramite una forza normale F_N , è necessaria una forza tangenziale F_T , applicata ad uno dei corpi oppure ad entrambi. Nel Calotester, la forza tangenziale è generata dalla rotazione della sfera, imposta dall'albero calettato al motore elettrico.

Inoltre, si genera anche una forza che si oppone alla forza tangenziale, detta forza di attrito F_f .

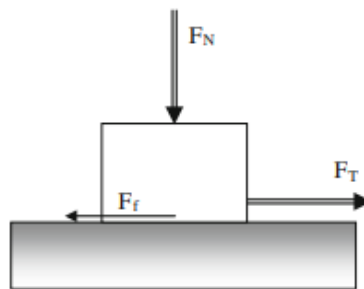


Figura 9 - Equilibrio delle forze – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag.22

Nel caso i corpi siano inizialmente fermi, si tratta di una forza di attrito statico F_s ; qualora i corpi siano inizialmente in movimento, si tratta di forza di attrito dinamico F_d .

Queste forze sono caratterizzate da un coefficiente che le caratterizza:

$$\frac{F_T}{F_N} = \mu \quad \text{coefficiente di attrito}$$

che può essere statico ‘ μ_s ’ oppure dinamico ‘ μ_d ’.

Generalmente, il coefficiente è indipendente dall’area nominale di contatto, mentre dipende dalla forza normale applicata e dalle proprietà dei materiali delle superfici accoppiate e, per l’attrito dinamico, anche dalla velocità di scorrimento.

Spesso il coefficiente di attrito statico è maggiore di quello dinamico; di conseguenza, la forza tangenziale, per permettere un avanzamento costante, necessita di una prima intensità maggiore, per permettere l'inizio del moto relativo, e proseguire con una intensità minore:

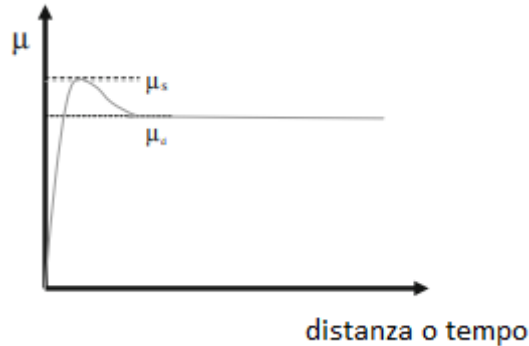


Figura 10 - Andamento del coefficiente di attrito – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag.22

La presenza di attrito tra due superfici in contatto e in moto relativo cambia il campo di sollecitazione nell'area di contatto rispetto alla situazione ideale senza attrito descritta nella teoria di Hertz.

Considerando il caso elastoplastico di una sfera a contatto con un piano e che si sposta da sinistra verso destra, si nota che la presenza di attrito comporta due conseguenze:

- Induce uno sforzo di taglio τ_{zy} , proporzionale all'andamento della pressione di contatto;
- Genera una sollecitazione lungo la direzione y (nulla nel punto centrale di contatto, di compressione dove inizia il contatto e di trazione nell'ultimo punto di contatto);

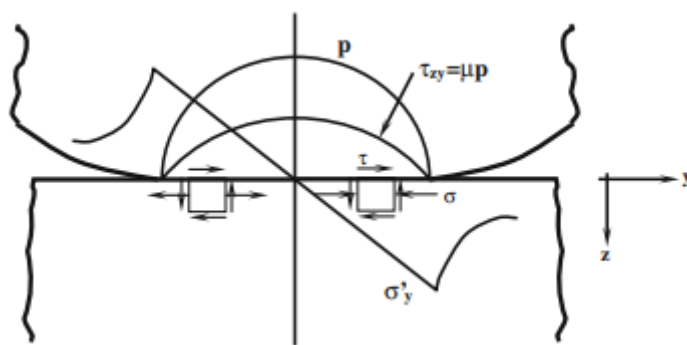


Figura 11 - Influenza dell'attrito nel contatto tra due corpi – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag.22

Perciò il campo tensionale è implementato dall'azione dell'attrito.

L'attrito è anche protagonista del fenomeno abrasivo, in quanto due corpi a contatto reciprocamente scorrevoli causano deformazioni plastiche; tale interazione avviene quando un corpo con durezza maggiore dell'altro esercita un'azione di scanalatura o di aratura sulla superficie dell'altro corpo.

Il fenomeno dell'abrasione interpone delle particelle dure tra i corpi che aumentano l'attrito tra essi e perciò si amplifica il suo effetto.

Le particelle dure hanno forma angolare, perciò penetrano nel materiale con durezza inferiore a seguito dell'applicazione del carico normale; successivamente, a causa delle forze tangenziali in gioco, generano uno stato tensionale di taglio lungo la superficie, provocando l'usura della superficie.

1.3. Usura

L'usura è un meccanismo di danneggiamento di una superficie a contatto con un'altra che provoca la formazione di frammenti e detriti. Essa può causare guasti diretti, ridurre le tolleranze e modificare la finitura superficiale oppure può indurre un danno superficiale responsabile di un futuro guasto del componente.

I processi di usura sono influenzati dalle caratteristiche del moto relativo tra i due corpi a contatto.

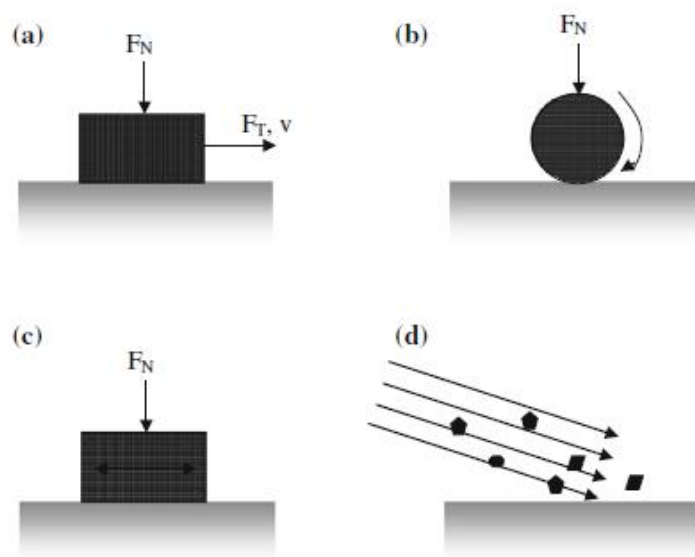


Figura 12 - Esempi di tipi di moto relativo tra corpi a contatto e relativi processi di usura: a. usura da scorrimento; b. usura da rotolamento; c. usura da sfregamento; d. particelle dure trasportate da un fluido: usura erosiva – G. Straffelini, "Friction and wear", pag.86

Se i corpi scorrono l'uno sull'altro, si verifica l'**usura da scorrimento**; se i corpi rotolano uno sull'altro, l'usura relativa è l'**usura da rotolamento**; quando è presente uno scorrimento alternato con spostamento molto piccolo, si verifica l'**usura per sfregamento**; quando uno dei corpi è costituito da una o più particelle dure che abradono la superficie più morbida, l'usura è detta **abrasione da materiale duro e granulare**; se un fluido trasporta tali particelle abrasive, l'usura è chiamata **erosione**.

Nonostante siano presenti diversi processi di usura riscontrati nella pratica, l'indagine sui danni da usura è facilitato dal fatto che ci siano quattro processi di usura predominanti:

- **Usura adesiva:** si verifica quando si generano delle forze di adesione tra le asperità di contatto che esercitano un ruolo predominante nella formazione dei frammenti di usura. È necessario distinguere questo tipo di usura in base ai corpi a contatto.

L'usura tra materiali duttili consiste nella formazione di giunzioni plastiche nelle asperità di contatto e l'adesione avviene in corrispondenza delle giunzioni; durante lo scorrimento, le ripetute deformazioni plastiche delle asperità possono indurre un danno da fatica locale a basso numero di cicli oppure un accumulo di deformazione plastica, coinvolgendo aree estese nella regione di contatto sotto la superficie e portando alla formazione di frammenti di usura una volta raggiunto il danno critico. L'intensità delle sollecitazioni applicate è proporzionale alle forze di adesione locali.

L'usura adesiva nei contatti fragili è causata da uno sforzo di trazione superficiale durante lo scorrimento, che provoca la formazione di frammenti di usura per contatto fragile.

- **Usura tribo-ossidativa:** è dovuta all'interazione delle superfici con un ambiente contenente ossigeno e quindi l'usura è data dalla combinazione di azioni ossidative e meccaniche nelle asperità di contatto; in generale, è accompagnata dalla formazione di scaglie superficiali di ossidi, che evita il contatto metallo-metallo nelle asperità e può agire come un lubrificante solido, riducendo quindi attrito e usura.
- **Usura abrasiva:** durante il contatto tra i corpi, si interpongono delle particelle dure, che possono essere introdotte dall'esterno oppure possono provenire da uno dei due corpi; l'usura è causata dalle particelle dure che solcano la superficie meno dura e deforma il materiale plasticamente.

- **Usura per fatica da contatto:** applicando un carico ciclico, si genera una cricca che si propaga fino alla frattura finale; nella maggior parte dei casi, l'usura per fatica da contatto si verifica nei contatti non conformi, quando almeno uno dei due corpi rotola sull'altro; l'usura è indotta dalle sollecitazioni hertziane di contatto ciclico principalmente, ma è anche influenzata da altri fattori, come lubrificazione, scorrimento, proprietà del materiale, tensioni residue.

1.4. Usura abrasiva

Due corpi a contatto, in reciproco scorrimento, generano un'interazione abrasiva: accoppiando due superfici striscianti, si interpongono delle particelle dure tra esse, che possono derivare da uno dei due corpi oppure introdotte dall'esterno.

Se ne possono distinguere due tipi:

- **Abrasiona a due corpi:** le particelle dure, oppure delle protuberanze, sono fissate saldamente su un corpo e deformano plasticamente la superficie del materiale a contatto, scavando una scanalatura su di essa;
- **Abrasiona a tre corpi:** le particelle dure non sono in grado di fissarsi su uno dei corpi, vengono intrappolate tra essi e sono relativamente libere di muoversi, strisciando o rotolando.

Le particelle dure abrasive possono essere intrinseche della microstruttura di uno dei materiali, come ad esempio negli acciai o ghise contenenti carburi, oppure nei composti rinforzati con ceramica, oppure possono essere inserite dall'ambiente circostante.

L'usura abrasiva si verifica quando la durezza delle particelle dure è almeno il 20-30 % maggiore di quella della superficie più debole.

Il fenomeno dell'abrasione nei materiali duttili può essere rappresentato come in figura 14:

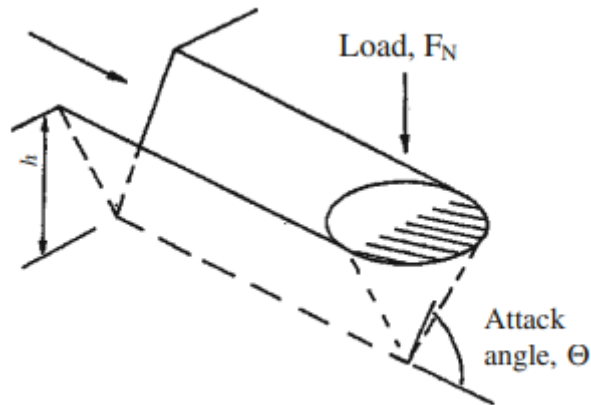


Figura 13 - Usura abrasiva – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag.46

Il cono rappresenta la particella dura abrasiva che solca plasticamente la superficie durante il suo movimento; se tutto il materiale deformato plasticamente viene rimosso, allora l’usura è massima e si ha un “microtaglio”; se invece il materiale deformato fluisce verso i lati della scanalatura, allora l’usura è per “micro-aratura” ed è nulla, anche se la superficie risulta essere deformata plasticamente e quindi danneggiata.

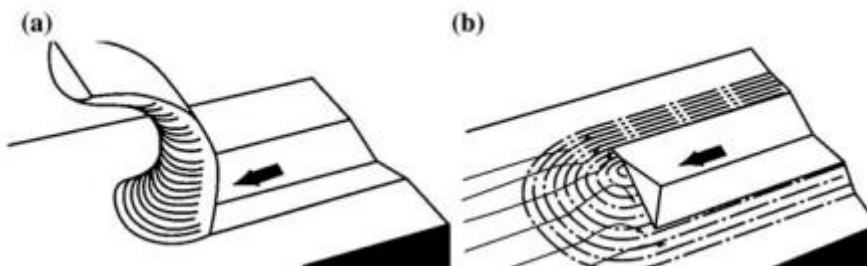


Figura 14 - Tipi di abrasione: (a) micotaglio, (b) micro-aratura – G. Straffelini, “Friction and wear”, pag.96

Dalla schematizzazione del microtaglio in fig. 15, considerando la sezione della scanalatura generata dal cono nella direzione di scorrimento:

$$A_p = r^2 \operatorname{tg} \Theta$$

E considerando che solo la parte frontale del cono supporta il carico, si ha l’equilibrio:

$$F_N = \frac{H\pi r^2}{2}$$

Perciò è possibile ottenere il tasso di usura:

$$W = \frac{2tg\theta}{\pi} \cdot \frac{F_N}{H}$$

Generalmente, microtaglio e micro-aratura avvengono simultaneamente e la prevalenza di un meccanismo rispetto all'altro dipende da diversi fattori, come l'angolo di attacco delle particelle, la dimensione di queste, la loro durezza rispetto al materiale abraso, la presenza di lubrificante; inoltre, le particelle abrasive possono frantumarsi e generare nuove particelle abrasive più piccole, ma più taglienti.

Quindi si può rielaborare la precedente relazione con:

$$W = K_{abr} \cdot \frac{F_N}{H}$$

Dove K_{abr} è il 'coefficiente di usura abrasiva', dato da:

$$K_{abr} = \Phi \cdot \frac{2tg\theta}{\pi}$$

Dove Φ è compreso tra 1 e 0. Quando Φ è pari a 1, l'usura è idealmente dovuta al solo microtaglio e il coefficiente di usura abrasiva è elevato; quando Φ è nullo, l'usura è causata dalla sola micro-aratura e il coefficiente di usura abrasiva è pari a 0.

Maggiore è l'irregolarità delle particelle dure, maggiore è l'angolo di attacco θ . Questo aumenta anche all'aumentare delle dimensioni delle particelle, poiché particelle di grandi dimensioni possono frantumarsi durante il contatto e produrre particelle abrasive con bordi taglienti. In generale, si raggiunge comunque un plateau massimo di dimensione delle particelle oltre il quale l'angolo di attacco non aumenta ulteriormente.

Bisogna considerare anche la durezza del materiale in opposizione, poiché se si ha una durezza sufficientemente elevata, è molto probabile che si verificano degli arrotondamenti ai bordi delle particelle, riducendo l'angolo di attacco.

Il lubrificante può svolgere un ruolo importante per ridurre il fenomeno abrasivo, poiché rimuove i frammenti di materiale usurato, evitandone l'accumulo. Inoltre, il lubrificante riduce l'attrito tra le particelle dure e la superficie abrasa, favorendo quindi l'usura per microtaglio.

La costante Φ dipende principalmente dalla geometria delle particelle dure, poiché è direttamente proporzionale all'angolo di attacco, e dalle proprietà del materiale usurato, in particolare dalla sua duttilità: ogni interazione abrasiva è caratterizzata da una deformazione plastica molto intensa, che può essere accumulata se l'interazione è ripetuta, e può portare alla formazione di un frammento dovuto a frattura duttile se la duttilità è relativamente bassa. Generalmente, la duttilità è inversamente proporzionale alla durezza, perciò si può relazionare la costante Φ alla durezza del materiale:

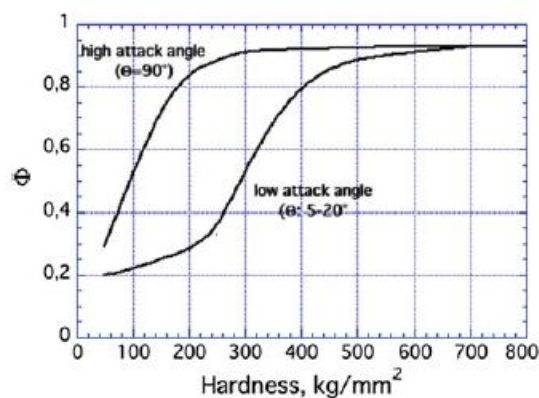


Figura 15 - Dipendenza del parametro Φ con la durezza di diversi materiali per alti e bassi angoli di attacco – G. Straffelini, "Friction and wear", pag.98

In generale, per bassi valori di Θ , il coefficiente Φ è poco dipendente dalla durezza; perciò in questa regione il tasso di usura specifico, W/F_N , diminuisce all'aumentare della durezza, ma aumenta fortemente nella regione intermedia tra 250-400 kg/mm², perciò si ha quasi una indipendenza del tasso di usura specifico rispetto alla durezza. Inoltre, se si ha una durezza elevata, il tasso di usura specifico rimane ancora poco dipendente dalla durezza, poiché dovrebbe diminuire e invece rimane costante.

L'usura abrasiva causata da materiale granulare duro risulta essere dannosa in alcuni casi, ad esempio come nelle parti volventi dei motori, oppure nei cuscinetti, poiché le particelle di polvere provenienti dall'ambiente esterno si interpongono tra le superfici in moto relativo; altre volte, le particelle dure sono introdotte volutamente per favorire il fenomeno, ad esempio nei mulini di macinazione, oppure nelle macchine movimento terra.

In generale, l'usura abrasiva causata da materiale granulare duro dipende dal rapporto tra la durezza del materiale abrasivo e quella della superficie abrasa e dalla grandezza e quantità di materiale abrasivo:

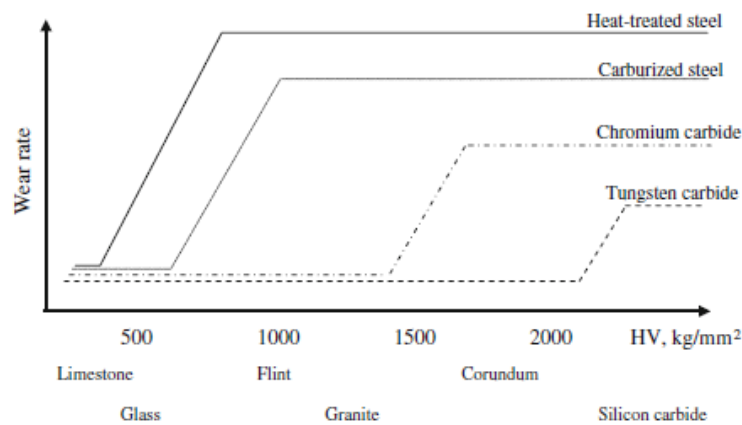


Figura 16 - Tasso di usura di alcuni materiali in funzione della durezza dei minerali abrasivi – G. Straffelini, "Friction and wear", pag.143

Il tasso di usura inizia ad aumentare quando la durezza delle particelle abrasive è sufficientemente elevata e diminuisce con l'aumentare della durezza della superficie abrasa.

Attraverso un microscopio ottico, è possibile valutare la grandezza media delle particelle dure e quindi valutare il 'coefficiente di rotondità' k:

$$k = \frac{4\pi A}{p^2}$$

Dove 'A' è l'area e 'p' il perimetro della proiezione delle particelle; 'k' aumenta con l'aumentare della rotondità della particella e assume il valore di 1 quando questa ha una forma sferica.

In generale, si può affermare che l'usura abrasiva dipende fortemente dalla durezza dei materiali abrasivi, ma dipende anche dal loro comportamento una volta deformati plasticamente, poiché materiali con durezza uguale possono comportarsi in maniera diversa in base alla loro duttilità:

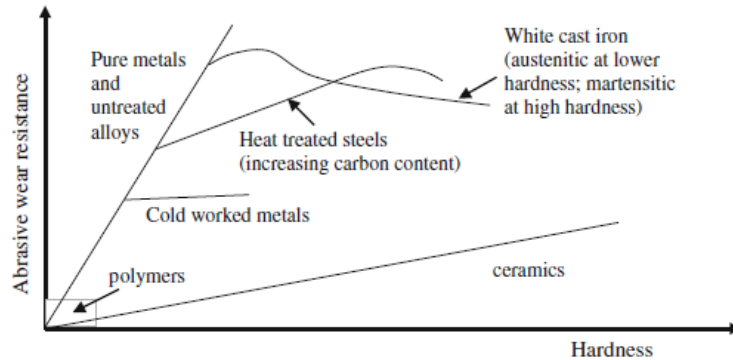


Figura 17 - Resistenza all'usura abrasiva dei vari tipi di materiali – G. Straffelini, "Friction and wear", pag.145

1.5. Equazione di Archard

Il fenomeno dell'usura può essere modellizzato tramite l'**equazione di Archard** che verifica il volume asportato a causa dell'usura. La sua semplicità di applicazione ha reso questa legge matematica molto utilizzata nell'ambito tribologico:

$$Q = \frac{k \cdot N \cdot L}{H}$$

Dove:

Q = volume asportato [m³]

k = coefficiente adimensionale sperimentale

N = carico applicato [N]

L = lunghezza del contatto [m]

H = durezza del materiale [Pa]

Il coefficiente 'k' è ricavato da prove sperimentali e varia in funzione dei materiali a contatto.

2. Principio di misura del Calotester

La normativa BS EN ISO 26423-2016 regola la procedura di determinazione dello spessore di rivestimenti ceramici mediante la misura di un cratere di usura da abrasione a forma di calotta sferica; la normativa è definita per i rivestimenti ceramici, ma può essere applicata anche ad altri tipi di rivestimenti. A causa delle incertezze che possono presentarsi durante la misurazione del cratere, la prova non è adatta quando la rugosità superficiale del rivestimento e il substrato superficiale eccedono del 20% rispetto allo spessore del rivestimento.

Per la valutazione del cratere, la normativa definisce le dimensioni principali necessarie alla valutazione di questo che devono essere misurate mediante microscopia ottica:

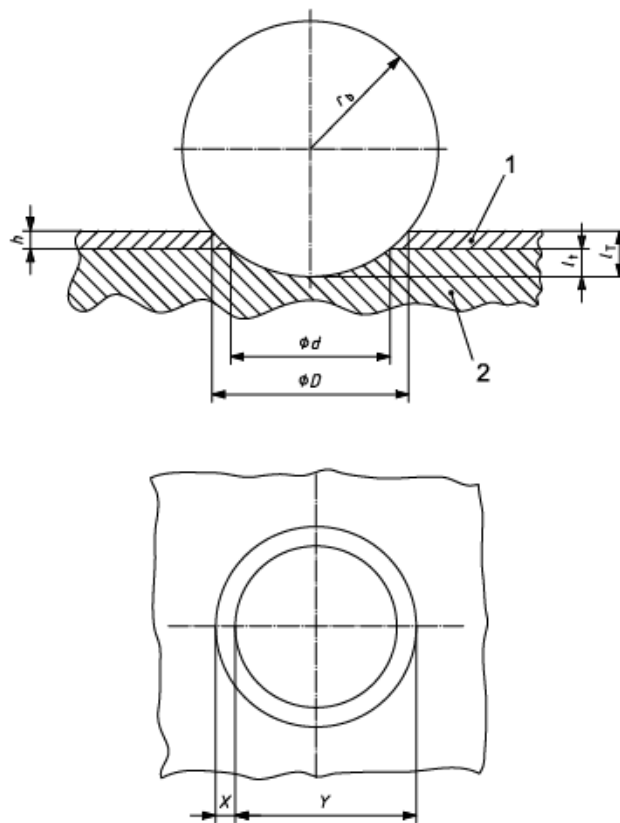


Figura 18 - Dimensioni principali usate nella normativa per la definizione del cratere – BS EN ISO 26423 – 2016, “Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of coating thickness by crater-grinding method”, pag. 2

Dove:

D = migliore stima del diametro esterno del cratere sulla superficie del rivestimento [μm]

D = migliore stima del diametro interno del cratere, sulla parte inferiore del rivestimento [μm]

h = spessore del rivestimento [μm]

r_b = raggio della sfera [μm]

l_T = profondità totale della penetrazione della sfera [μm]

l_t = profondità della penetrazione della sfera nel sottostrato [μm]

X = distanza tra la periferia del cratere esterno e un punto diametralmente equivalente sullo stesso lato del cratere interno, valutato su una proiezione complanare dei due crateri [μm]

Y = distanza tra la periferia del cratere esterno e un punto diametralmente equivalente sul lato opposto del cratere interno, valutato su una proiezione complanare dei due crateri [μm]

1 = rivestimento

2 = substrato superficiale

2.1. Linee guida per la misurazione

Il metodo descritto dalla normativa si basa sull'usura abrasiva del rivestimento causata dalla sfera rotante premuta sulla superficie del provino, producendo un cratere sferico. Il test risulta terminato quando la profondità di penetrazione è maggiore dello spessore del rivestimento, quindi lo spessore del rivestimento è correlato al diametro esterno e interno del cratere e al diametro della sfera.

Le configurazioni del banco di prova possono essere di diverso tipo; la tipologia più semplice consiste nella rotazione libera della sfera posta su un albero motore e la sua massa produce il carico di contatto, oppure può essere bloccata sull'asse dell'albero motore e il provino è caricato attraverso un sistema in modo da essere premuto contro la sfera.

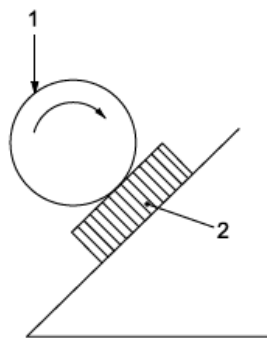


Figura 19 - Esempio di banco prova: 1. sfera, 2. Provino – BS EN ISO 26423-2016, pag.4

È possibile inoltre applicare una sospensione abrasiva per favorire il contatto tra la sfera e il provino.

È necessario distinguere il test senza perforazione e il test con perforazione.

Per quanto concerne il test senza perforazione, il volume del cratere è dato da:

$$V = \pi \frac{D^2}{64r_b}$$

La relazione assume che la forma del cratere è conforme alla forma della sfera.

Dall'equazione di Archard, si può valutare il coefficiente di usura del rivestimento 'K_c':

$$K_c = \pi \frac{D^4}{64 r_b L N}$$

Il test con perforazione consiste nel generare due crateri, uno esterno, che giace sulla superficie del rivestimento, e uno interno, che giace su un substrato superficiale non appartenente al rivestimento, poiché appunto è stato perforato e quindi attraversato.

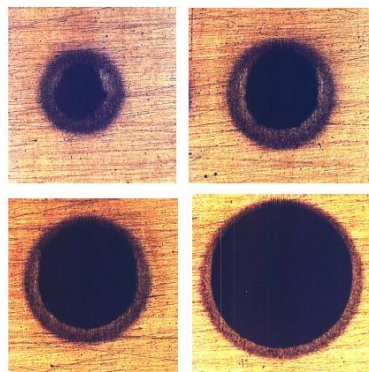


Figura 20 - Crateri prodotti da test a durata crescente su un campione di acciaio per utensili rivestito di TiN – M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.17

La misurazione deve essere effettuata sia sul diametro esterno che su quello interno:

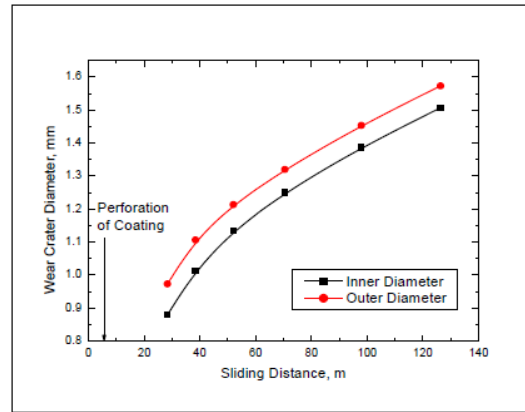


Figura 21 - Misure dei diametri dei crateri di una serie di test a durata crescente di un provino in acciaio rivestito di TiN - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.18

L'equazione di Archard è considerata anche per questo tipo di test, ma necessita di essere modificata:

$$LN = \left(\frac{V_c}{K_c} + \frac{V_s}{K_s} \right)$$

Dove 'L' è la distanza di strisciamento all'interfaccia, 'N' il carico normale, 'V_c' il volume di rivestimento rimosso, 'V_s' il volume di substrato rimosso, 'K_s' è il coefficiente di usura del substrato e 'K_c' il coefficiente di usura per il rivestimento; il volume di rivestimento rimosso è determinato da:

$$V_c = \pi t \left(\frac{D^2}{4} - r_b t \right)$$

Dove 't' è lo spessore del rivestimento, valutato come:

$$t = \left(r_b^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(r_b^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Il volume usurato, a distanza di scorrimento costante, è indipendente dalla velocità di scorrimento, ma aumenta leggermente per velocità molto basse:

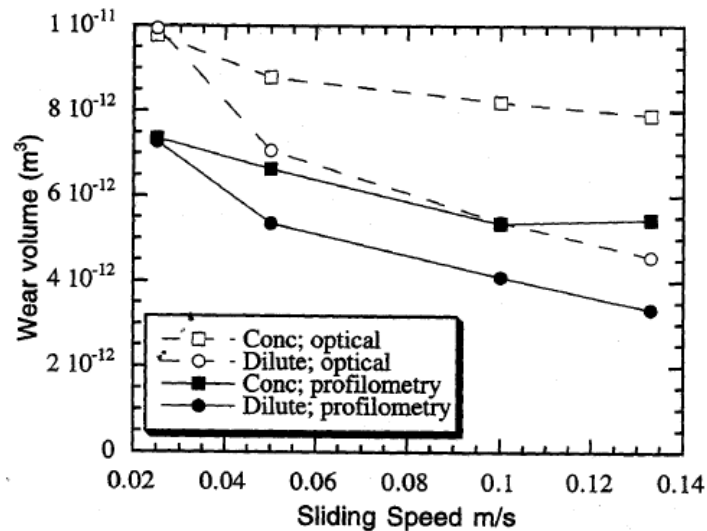


Figura 22 - Effetto della velocità di rotazione della sfera sul volume usurato su provini in acciaio per utensili - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.35

La sfera utilizzata deve essere necessariamente di una durezza maggiore rispetto al provino, poiché bisognerebbe considerare che la sfera si deforma sotto carico applicato, quindi l'area di contatto sarebbe molto più ampia di quanto ci si aspetterebbe, e perciò si renderebbe l'analisi dei risultati molto più complessa.

Generalmente, a meno di casi particolari, la sfera rotante deve essere in acciaio temprato.

È importante considerare anche l'usura della sfera: in base a prove sperimentali, si è notato che le sfere usate sono più performanti rispetto alle sfere nuove, questo perché le sfere nuove hanno più difficoltà nell'intrappolare le particelle abrasive, al contrario di quelle usate; infatti, man mano che il test procede, la sfera aumenta la sua rugosità superficiale e le particelle abrasive rimangono intrappolate tra le sue asperità:

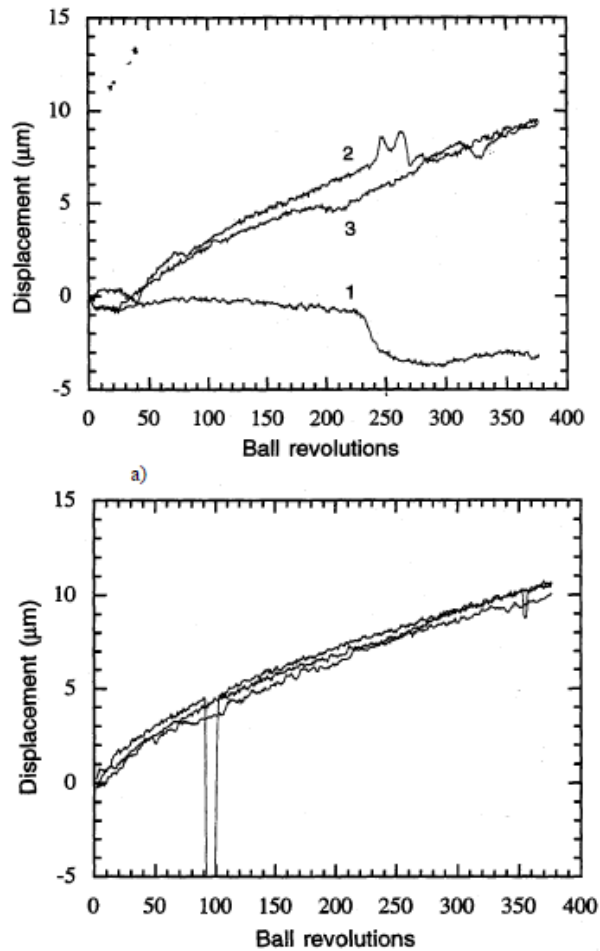


Figura 23 - Spessore di usura valutato in tre test su sfere in silver steel con abrasivo in SiC: a) test con sfere nuove; b) test con sfere usate - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.37

Per queste ragioni, è necessario effettuare una procedura di rodaggio delle nuove sfere su una parte sacrificale del provino.

Per rivestimenti con spessore maggiore di 10 µm, il test senza perforazione risulta essere più idoneo perché la perforazione per questi rivestimenti richiederà molto tempo.

I rivestimenti sottili (inferiori a 1 µm) vengono perforati molto rapidamente e perciò il test di perforazione risulta essere l'unica via possibile. Tuttavia, man mano che il rivestimento diventa più sottile, diventa sempre più difficile misurare e differenziare le dimensioni relative dei crateri interni ed esterni, quindi la precisione è un problema.

Nonostante qualche limite, entrambi i tipi di test e la loro validità varia con i materiali che vengono testati.

2.2. Layout possibili

La normativa BS EN ISO 26423-2016 non impone una specifica configurazione per i Calotester: questi possono essere realizzati in base alle esigenze di applicazione e in funzione delle metodologie di misurazione.

Generalmente, il modello più diffuso è quello con la sfera poggiata su un singolo albero.

Questo sistema utilizza una sfera libera che è mossa per attrito al contatto con un albero motore dentellato, collegato al motore elettrico. Dato che la sfera non è guidata direttamente, è presente una certa incertezza sull'effettiva velocità di rotazione, che però può essere migliorata applicando inserti in gomma sull'albero in modo da avere una tenuta maggiore. Il carico normale è generato dal peso della sfera poggiata sul provino e varia al variare dell'inclinazione della piastra porta campione. Tuttavia, si riscontra una tendenza della sfera a scivolare verso la parte alta del campioncino cambiando l'inclinazione della sede del provino per aumentare la forza normale. Infine, il carico massimo applicato è relativamente piccolo.

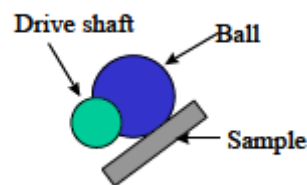


Figura 24 - Calotester a singolo albero - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Siebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.11

Un altro modello utilizzabile sfrutta due alberi rotanti e la sfera, sempre libera, è supportata da scanalature. Il provino è bloccato da un braccio imperniato e un peso è applicato direttamente sopra la sfera. La superficie del provino è premuta contro la parte superiore della sfera e il carico applicato può essere regolato, quindi anche la forza d'attrito è variabile. Inoltre, con la presenza del doppio albero, si evita l'errore sul carico applicato dovuto all'attrito che si presentava nella configurazione ad albero singolo. Anche con questa variante, però, è presente una incertezza nella reale rotazione della sfera.

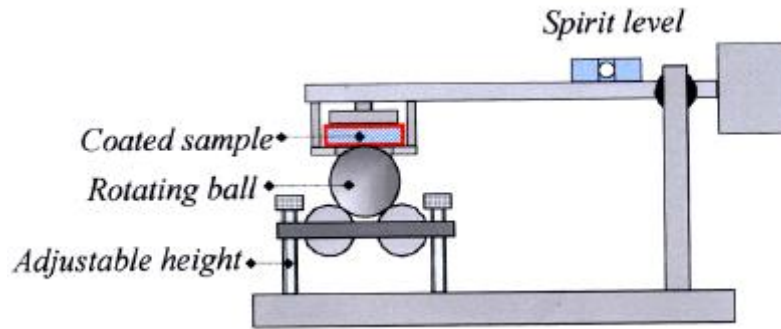


Figura 25 - Calotester a doppio albero - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.11

Una ulteriore configurazione è possibile vincolando rigidamente la sfera all'albero motore. Il provino è premuto sulla sfera rotante attraverso un sistema con braccio imperniato e con pesi calibrati posti su un piatto. Questa configurazione consente l'applicazione di carichi elevati rispetto alla sola massa della sfera e permette di ottenere una velocità di rotazione della sfera equivalente a quella desiderata.

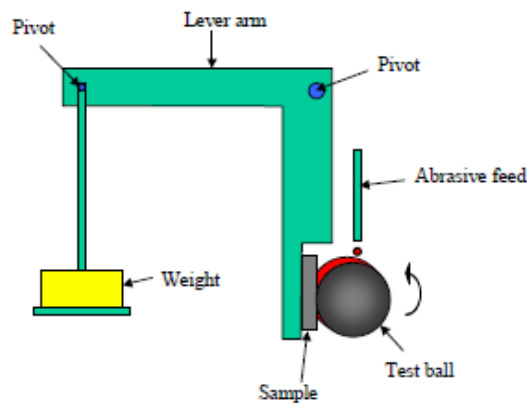


Figura 26 - Calotester con braccio imperniato - M G Gee, A Gant, I Hutchings, R Bethke, K Schiffmann, K Van Acker, S Poulat, Y Gachon and J von Stebut, "Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings", pag.11

3. Principio di funzionamento del motore DC e regolazione

Il funzionamento del Calotester è strettamente legato alla rotazione della sfera, e quindi è indispensabile un elemento che fornisca la potenza necessaria per permettere la rotazione al sistema.

3.1. Motore elettrico

L'elemento che fornisce la potenza necessaria alla rotazione è il motore elettrico.

Una macchina a corrente continua permette di convertire l'energia elettrica, fornita da una sorgente di corrente continua, in energia meccanica oppure l'energia meccanica, fornita da un motore che trascina la macchina, in energia elettrica; nel primo caso, la macchina funge da motore, mentre nel secondo caso la macchina svolge il compito di generatore di corrente.

La macchina a corrente continua è costituita da uno statore, che è la parte fissa, e da un rotore, la parte mobile, al quale è calettato un collettore a lamelle.

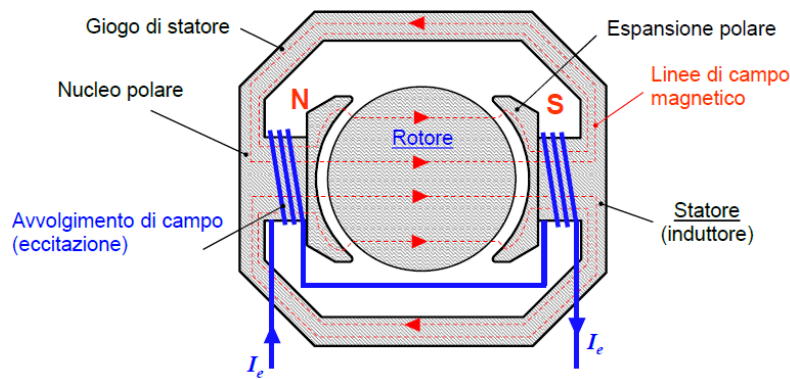


Figura 27 - Principio di funzionamento macchina a corrente continua

Il principio di funzionamento da motore si basa sulla formazione di un campo magnetico stazionario che si genera al traferro dello statore: esso, infatti, presenta degli avvolgimenti che, se percorsi da una corrente di eccitazione, inducono la formazione di due polarità, generando il campo magnetico.

Il rotore, che è posizionato nel traferro dello statore e presenta a sua volta degli avvolgimenti, è immerso nel campo magnetico stazionario; quando i suoi avvolgimenti sono percorsi da corrente, per

la forza di Lorentz, si inducono delle forze mozionali sui conduttori del rotore che ne permettono la rotazione.

Le forze indotte, però, non sono sempre costanti, poiché dipendono dalla loro inclinazione rispetto alle linee di campo magnetico: saranno massime se perpendicolari alle linee di campo, nulle se parallele.

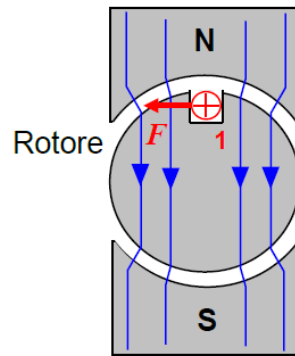


Figura 28 - Forze indotte nel rotore

Il verso della forza indotta dipende anche dal verso della corrente che percorre il conduttore; quando cambia la polarità magnetica, se il verso della corrente è costante, cambia anche il verso della forza, che provocherebbe un cambio di rotazione del rotore, ottenendo quindi una coppia alternata.

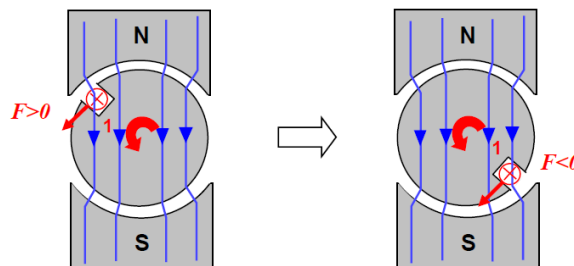


Figura 29 – Verso delle forze indotte

Perciò è utilizzato un collettore a lamelle: delle spazzole fisse distribuiscono la corrente di alimentazione alle lamelle del collettore che ruotano solidali al rotore; le lamelle non sono continue tra loro e sono collegate direttamente agli avvolgimenti del rotore, in modo tale che le correnti commutano e rimangano sempre nel verso giusto sotto i poli magnetici; le forze indotte, in questo modo, sono sempre dello stesso segno, ottenendo così una coppia costante.

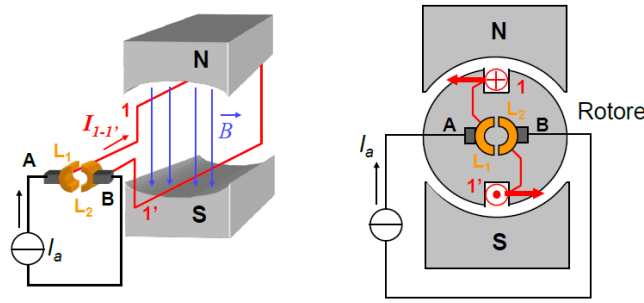


Figura 30 - Commutatore a lamelle

È possibile realizzare il campo magnetico stazionario anche utilizzando dei magneti permanenti; in questo caso, lo statore non è avvolto dai conduttori, ma ospiterà le coppie polari, che possono essere anche di diverso numero, per aumentarne l'estensione angolare e quindi avere una continuità di rotazione costante.

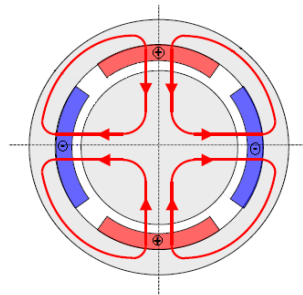


Figura 31 - Macchina CC a magneti permanenti con 2 paia poli

Il funzionamento della macchina a corrente continua come generatore si basa sempre sulla legge di Lorentz per cui un conduttore in movimento, immerso in un campo magnetico stazionario, genera una forza elettromotrice ai suoi estremi; se ad essi è applicato un carico resistivo, viene generata corrente e quindi il carico può essere alimentato.

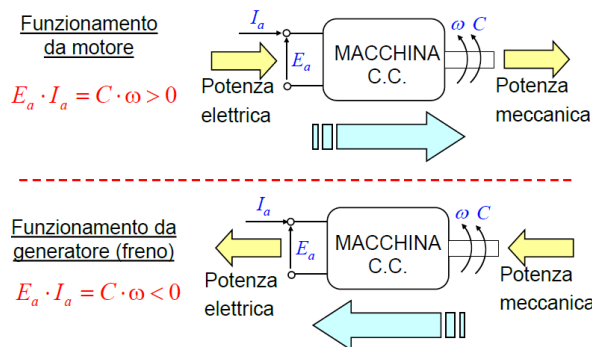


Figura 32 - Comportamento motore-generatore

Conoscendo la tensione di alimentazione di armatura V_a e la tensione del circuito di eccitazione V_{ecc} e data la velocità angolare ω del rotore, si possono ottenere le caratteristiche elettromeccaniche, cioè la corrente di alimentazione e la coppia erogata:

$$I_a = \frac{V_a}{R_a} - \frac{k \cdot \phi_u}{R_a} \omega$$

$$C = k \cdot \phi_u \cdot I_a = k \cdot \phi_u \cdot \frac{V_a}{R_a} - \frac{(k \cdot \phi_u)^2}{R_a} \omega$$

Si nota che le curve caratteristiche sono delle rette:

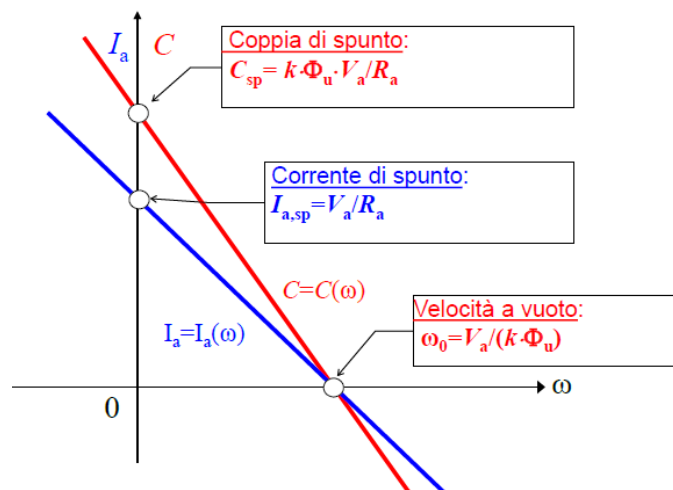


Figura 33 - Caratteristiche elettromeccaniche motore a corrente continua

Applicando un carico all'albero in uscita del motore, considerando la caratteristica interna della coppia erogata e incrociando con la caratteristica esterna della coppia resistiva, che dipende dall'inerzia del carico applicato, si ottiene il punto di funzionamento del motore:

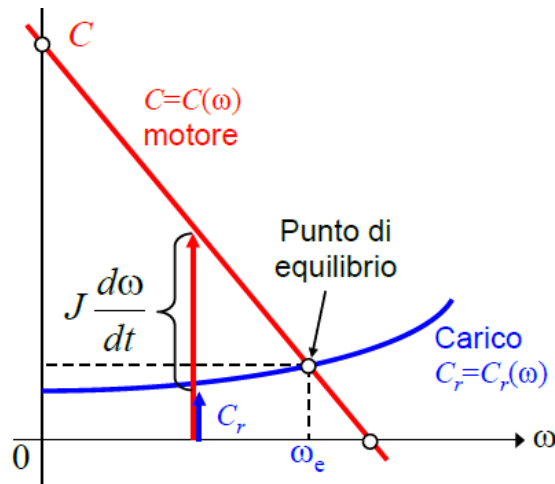


Figura 34 - Punto di funzionamento

La regolazione del motore a corrente continua è strettamente legata alla regolazione della velocità di rotazione.

Rielaborando le equazioni caratteristiche elettromeccaniche, è possibile ottenere l'equazione della velocità angolare in funzione degli altri parametri:

$$\omega = \frac{V_a}{k \cdot \phi_u} - \frac{R_a \cdot C}{(k \cdot \phi_u)^2}$$

La regolazione di velocità del motore avviene in due modi:

- **Regolazione della tensione di armatura:** la variazione di V_a modifica in proporzione la corrente, la coppia e la velocità, traslando la caratteristica di coppia

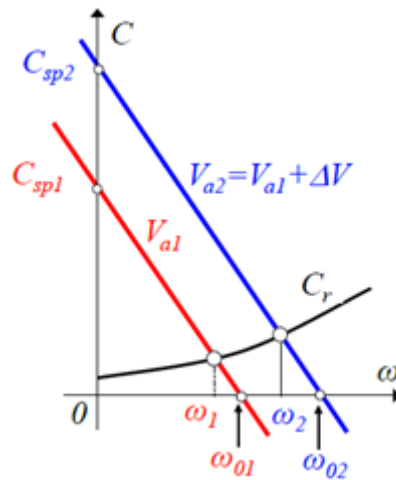


Figura 35 - Regolazione della tensione di armatura

- **Regolazione di campo:** la variazione del flusso di eccitazione variando la tensione di eccitazione, provoca la roto-traslazione della caratteristica di coppia

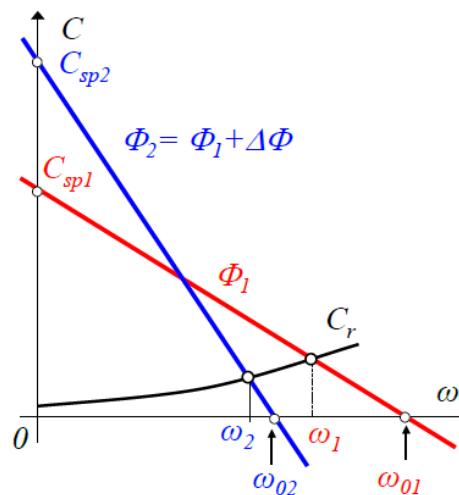


Figura 36 - Regolazione di campo

In base alla generazione del campo magnetico stazionario, i motori a corrente continua sono suddivisibili in tre categorie:

- **Motori ad eccitazione serie:** il circuito di eccitazione è percorso dalla corrente di alimentazione:

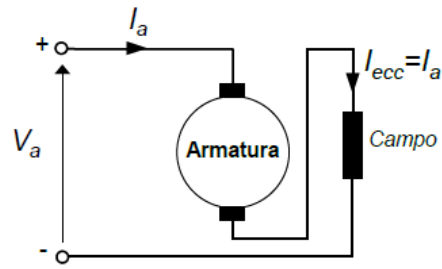


Figura 37 - Motore ad eccitazione serie

- **Motori ad eccitazione separata:** il circuito di eccitazione è separato dal circuito di alimentazione; la regolazione avviene variando la tensione di armatura oppure il flusso magnetico, variando la corrente di eccitazione:

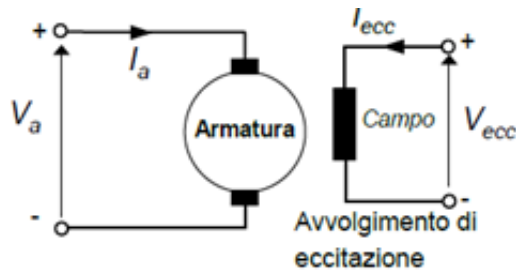


Figura 38 - Motore ad eccitazione separata

- **Motore a magneti permanenti:** il campo magnetico stazionario è prodotto da magneti permanenti; non è possibile regolare il flusso magnetico, ma solamente la tensione di armatura:

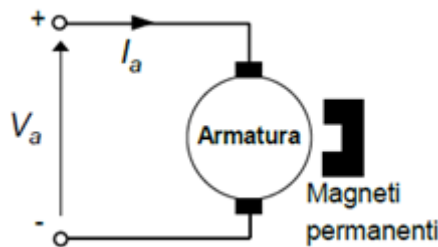


Figura 39 - Motore a magneti permanenti

Il motore elettrico scelto per questo progetto di Calotester è un motore a corrente continua a magneti permanenti; di seguito, sono indicati i dati di targa nominali.



Figura 40 - motore DC della Sanmen Taili Motor Co.

Potenza	120	W
Velocità	3200	rpm
Alimentazione di armatura	24	V

Tabella 1 - Dati di targa motore DC

Il motore è composto anche da un elettrofreno che blocca la rotazione quando il blocco non è collegato alla corrente.

L'elettrofreno è costituito da un magnete e un disco che premono sul rotore in condizioni statiche; quando il freno è alimentato, il magnete viene eccitato e fa allontanare il disco dal rotore, permettendo la rotazione del rotore e quindi la rotazione dell'albero in uscita. Nella figura 2, l'elettrofreno è rappresentato tramite un led.

Dal momento che la linea di potenza richiede una tensione e una corrente più elevate della linea di comando e controllo, è necessaria un'alimentazione separata, cioè un trasformatore a parte, in modo da fornire una tensione nominale da 24V per alimentare correttamente il motore; l'elettrofreno è collegato anch'esso alla linea di potenza.

L'alimentazione del motore avviene attraverso la linea di potenza da 24V, quindi, non essendo collegato direttamente alla scheda di comando, necessita di un intermediario che si interfacci tra il motore e l'Arduino.

L'elemento che svolge questa funzione è il TRANSISTOR, cioè un componente elettronico che ha il compito di controllare il segnale di azionamento ad elevata e corrente attraverso segnali di comando a bassa tensione.

Sia per il motore che per l'elettrofreno si utilizzano transistor, ma sono differenti tra loro poiché hanno esigenze diverse.

Il motore è controllato da un transistor di tipo MOSFET IRF740: esso è composto da 3 pin, GATE, DRAIN e SOURCE.

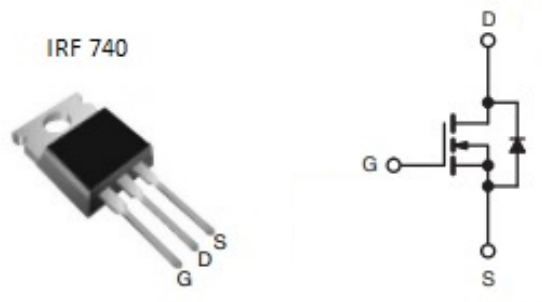


Figura 41 - MOSFET IRF740

1. Il pin G è collegato ad un pin digitale della scheda Arduino attraverso una resistenza in serie da 220 ohm;
2. Il pin D è collegato direttamente al polo negativo del motore elettrico;
3. Il pin S è collegato al polo negativo della scheda Arduino.

Questo MOSFET consente il passaggio di corrente fino a 10A, con un voltaggio massimo di 400V e una potenza massima di 125W.

Infine, è necessario inserire anche un diodo (diodo rettificatore 1N4007) in parallelo al motore, che permette il passaggio della corrente in una sola direzione, in modo da evitare un ricircolo delle sovracorrenti che si potrebbero generare in fase di decelerazione del rotore e che potrebbero danneggiare la componentistica.

Dal momento che anche l'elettrofreno è alimentato dalla linea di potenza con tensione più alta, si utilizza un transistor PN2222.

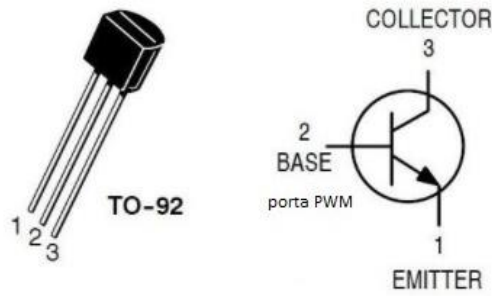


Figura 42 - transistor PN222

Sono presenti 3 pin:

- Emettore (1), collegato al polo negativo, quindi alla massa;
- Base (2), collegato al pin digitale dell'Arduino attraverso una resistenza in serie di 220 ohm;
- Collettore (3), collegato al polo negativo dell'elettrofreno.

I poli positivi del motore e dell'elettrofreno sono collegati direttamente al polo positivo della linea di potenza.

3.1. Controllo ad anello aperto: tecnica PWM

Per poter variare la tensione di alimentazione di armatura è necessario comandare l'apertura del TRANSISTOR e del MOSFET tramite la scheda Arduino: questa invia il segnale di comando al componente che permette l'erogazione della corrente verso il motore e l'elettrofreno.

Il controllo del motore avviene tramite un controllo ad anello aperto, nel quale la scheda di controllo invia il segnale relativo alla velocità angolare a cui deve ruotare il motore, in modo che quest'ultimo cominci a ruotare alla velocità desiderata.



Figura 43 - schema di controllo ad anello aperto

Tuttavia, essendo componenti digitali, non è possibile variare l'ampiezza del segnale, perciò il segnale sarà ON oppure OFF, quindi si avrà 0V oppure 24V. Ma è necessario regolare la velocità di rotazione del motore anche per valori intermedi. Perciò si ricorre alla tecnica PWM, integrata per alcuni pin dell'Arduino.

La tecnica PWM si basa sulla modulazione della larghezza di impulso e consiste nell'ottenere una tensione media variabile dipendente dal rapporto tra la durata dell'impulso positivo e dell'intero periodo, detto "duty cycle".

La durata di ciascun impulso è espressa in rapporto al periodo di due impulsi successivi: se il lavoro utile è pari a 0%, si avrà un impulso di durata nulla, mentre un lavoro utile del 100% implica che l'impulso dura tutto il ciclo di lavoro e quindi termina nel momento in cui ha inizio in successivo impulso. Quando si ha l'impulso, la corrente è erogata; quando cessa l'impulso, la corrente decresce.

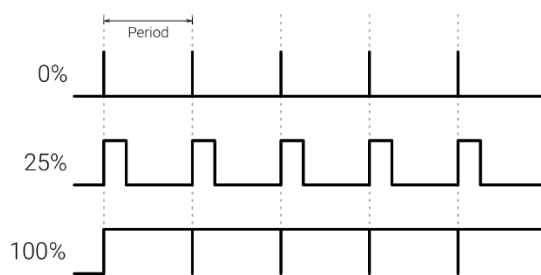


Figura 44 - tecnica PWM

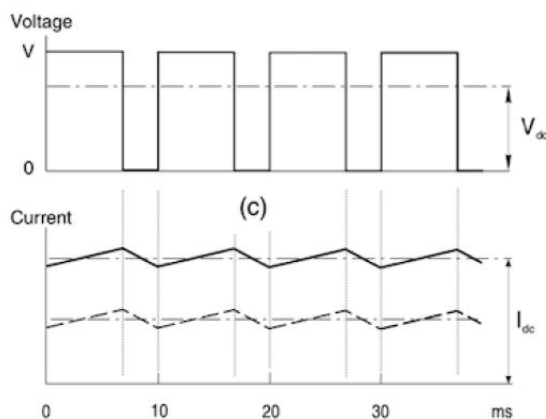


Figura 45 - variazione della corrente al variare dell'impulso

In questo modo è possibile impostare una tensione media proporzionale alla velocità desiderata che sarà elaborata dal microcontrollore che permetterà l'alimentazione del motore.

Questa tecnica è utilizzata per evitare sprechi di energia che si avrebbero nel controllare transistor analogici.

Per quanto riguarda l'elettrofreno, dal momento che richiede una corrente esigua, il duty cycle è impostato al 100%.

3.2. Controllo ad anello chiuso: tecnica PID

Il controllo del motore elettrico ad anello aperto non garantisce una completa affidabilità nell'ottenere la velocità di rotazione voluta. Infatti, la velocità impostata si ottiene fin quando il motore gira a vuoto; non appena si applica un carico resistente, la velocità reale non sarà più quella impostata. Questo perché il motore ottiene una potenza in uscita all'albero che è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione e alla coppia: se la coppia è nulla, o comunque molto ridotta, dovuta solo all'inerzia del motore, allora la velocità di rotazione potrebbe corrispondere a quella voluta; ma se la coppia aumenta e la potenza rimane costante, allora necessariamente la velocità deve diminuire.

Bisogna quindi applicare una soluzione che permetta di conoscere in tempo reale la velocità di rotazione, in modo tale da intervenire sulla tensione di alimentazione per garantire la velocità voluta.

Quindi viene applicato un controllo ad anello chiuso, cioè, una volta impostata la velocità, serve un elemento che legga la velocità istantanea. Questo compito lo svolge l'encoder, che ruota solidalmente all'albero motore e invia impulsi ogniqualvolta effettua una rotazione completa. Dalla scheda di controllo, in base al tempo impiegato ad effettuare una rotazione, si può ottenere la velocità istantanea.

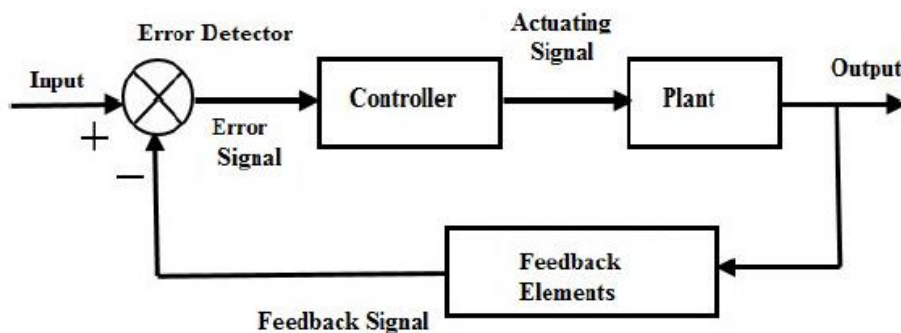


Figura 46 - schema di controllo ad anello chiuso

In questo modo, se il valore letto non corrisponde al valore ottenuto, la scheda di controllo corregge il valore della tensione di alimentazione in ingresso in modo da ottenere la velocità corretta.

L'elaborazione per ottenere il corretto valore di alimentazione viene ricavato tramite la tecnica PID.

Il regolatore PID è un algoritmo che ha il compito di correggere l'errore tra il valore teorico voluto e il valore reale misurato, in modo da ottenere realmente il valore voluto.

La variabile in uscita $u(t)$ viene generata in base al contributo di tre termini:

- Il primo termine è proporzionale all'errore tra il riferimento $r(t)$ e la variabile da controllare $y(t)$;
- Il secondo termine è proporzionale all'integrale dell'errore $e(t)$, quindi dipende dal valore medio dell'errore;
- Il terzo termine è proporzionale alla derivata dell'errore nel tempo, cioè risente della velocità di variazione dell'errore stesso.

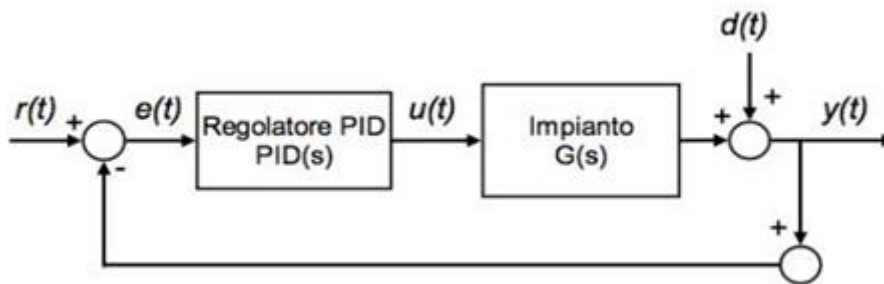


Figura 47 - Logica di funzionamento del controllo PID

La legge di controllo del sistema PID è definita dall'equazione:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Dove:

K_p = guadagno proporzionale (P)

K_i = guadagno integrale (I)

K_d = guadagno derivativo (D)

ottenendo quindi la funzione di trasferimento che lega $e(t)$ con $u(t)$:

$$PID(s) = P(s) + I(s) + D(s)$$

Perciò si ricava l'output come somma dei tre contributi:

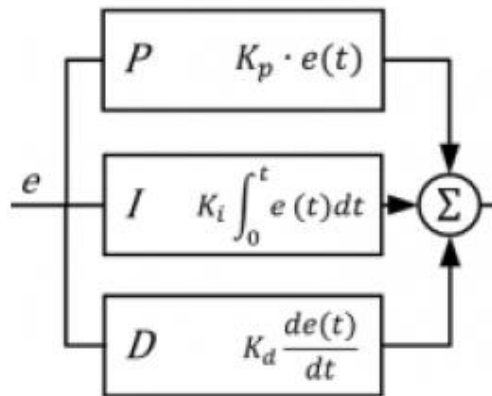


Figura 48 - schema del controllo PID

Con l'**azione proporzionale** si produce una differenza tra il valore richiesto e quello effettivamente ottenuto, che può essere ridotta aumentando il guadagno proporzionale del controllore. Però questo aumento del guadagno potrebbe innescare un aumento delle oscillazioni, generate a causa di rapidi transitori. Bisogna quindi tarare correttamente il valore K_p in base all'esigenza dell'applicazione:

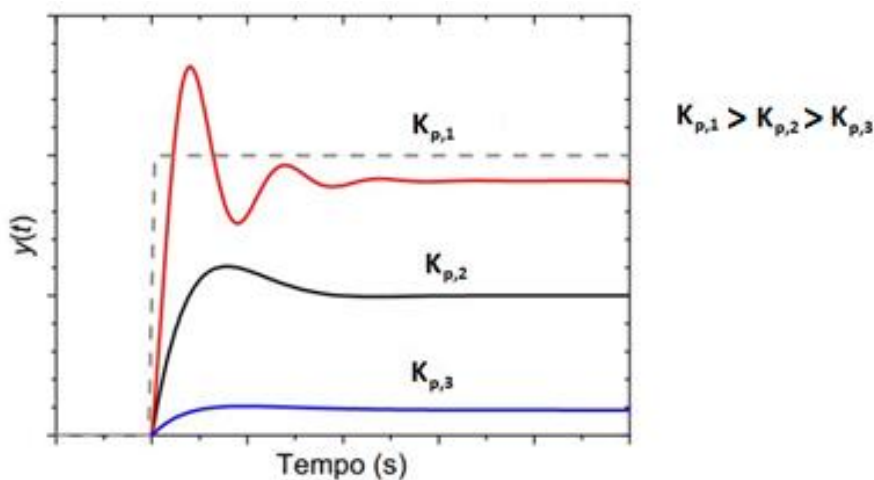


Figura 49 - Azione proporzionale

L'**azione integrale** ha il compito di fare in modo che a regime la variabile controllata assuma il valore richiesto; garantisce una maggiore precisione senza peggiorare la stabilità del sistema.

Anche in questo caso è necessario tarare correttamente K_i in funzione dell'applicazione del controllo:

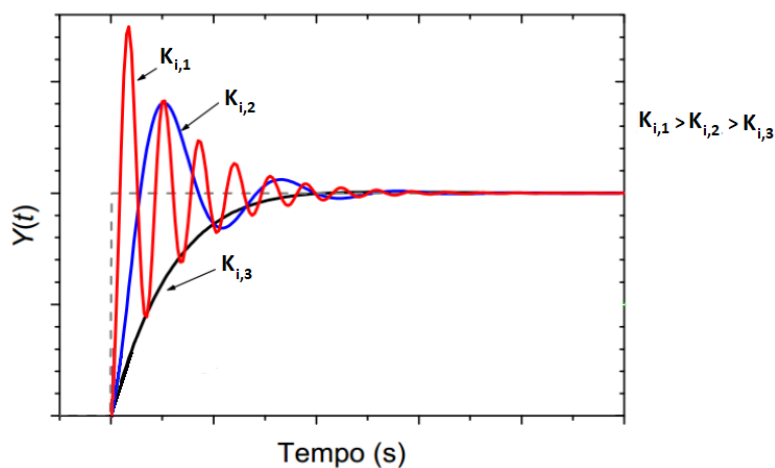


Figura 50 - Azione integrale

Lo scopo dell'**azione derivativa** è quello di migliorare la stabilità; essa fornisce in output la derivata dell'errore rispetto al tempo: per valutare una variazione sensibile della variabile controllata, è necessario un certo tempo; però, dal momento che si valuta la velocità di variazione dell'errore nel tempo, è possibile prevederne l'andamento attraverso la tangente della curva dell'errore, in modo tale da ottenere un valore di output che è proporzionale all'errore stimato nell'istante di tempo successivo. La stima è ottenuta attraverso un'estrapolazione lineare. Anche in questo caso, è necessario tarare correttamente il valore K_d per ottenere una stima dell'errore più precisa:

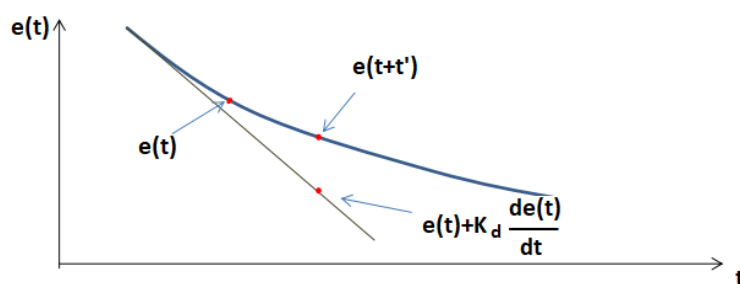


Figura 51 - Azione derivativa

4. Definizione del layout meccanico

La scelta del layout del Calotester si basa principalmente su una configurazione che consideri ogni bisogno utile alla realizzazione del cratere in diverse condizioni, in particolare si è considerata la possibilità di testare diverse misure del provino con varie dimensioni della sfera, variando la forza normale applicata e diversificando anche i punti di applicazione sul provino.

4.1. Trasmissione del moto

La potenza necessaria a generare la rotazione della sfera e a fornire la coppia utile per la creazione del cratere è erogata dal motore elettrico e trasmessa ad un albero a sezione variabile attraverso un giunto elastico. L'albero presenta alla sua estremità un alloggiamento dove è inserita una boccola di serraggio che è a contatto con la sfera.

Per tenere ben serrata la sfera in modo che ruoti coassialmente all'albero motore, è presente un'altra boccola di serraggio diametralmente opposta alla precedente; quest'ultima è fissata all'estremità di un secondo albero, al quale è collegato l'encoder necessario per avere il controllo ad anello chiuso.

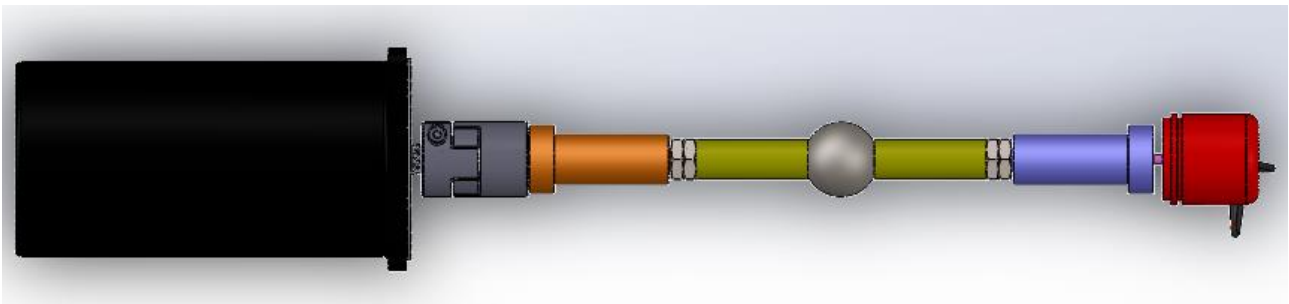


Figura 52 - Sistema di trasmissione del moto

4.2. Sistema di serraggio

Il sistema di serraggio ha il compito di far ruotare la sfera solidalmente agli elementi coassiali e quindi evitare che si verifichi lo slittamento durante la rotazione.

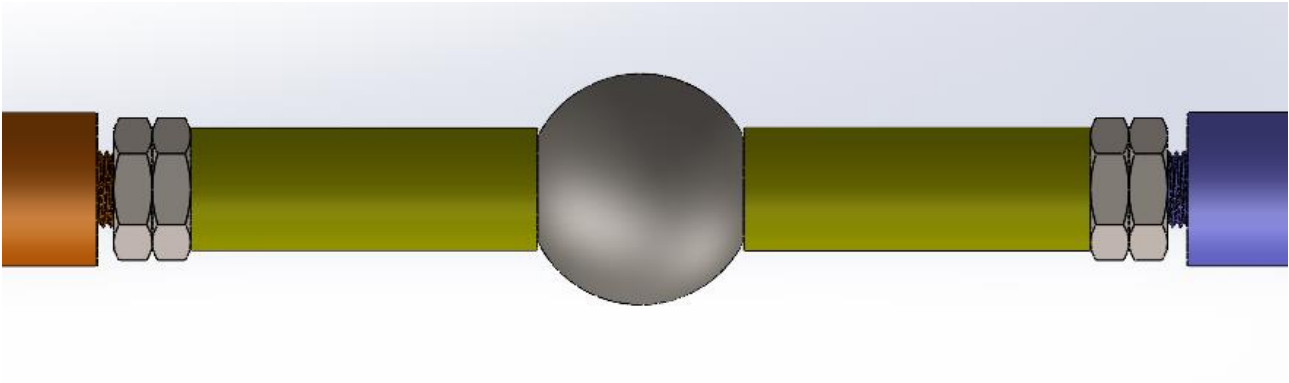


Figura 53 - Sistema di serraggio

Il sistema si compone di due boccole di serraggio, che premono sulla sfera grazie a due coppie di dadi posti in un tratto filettato degli alberi: per ogni lato, un dado ha il compito di posizionare la boccola, mentre l'altro blocca questa e ne evita lo spostamento, ponendola in compressione sulla sfera.

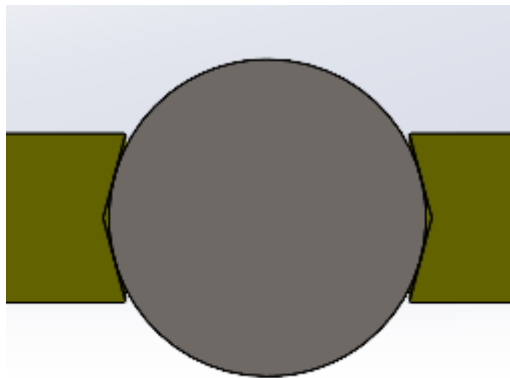


Figura 54 – Vista in sezione: particolare della compressione delle boccole sulla sfera

Ognuna delle boccole presenta un alloggiamento interno che permette loro di scorrere assialmente lungo l'albero, in funzione del diametro della sfera:

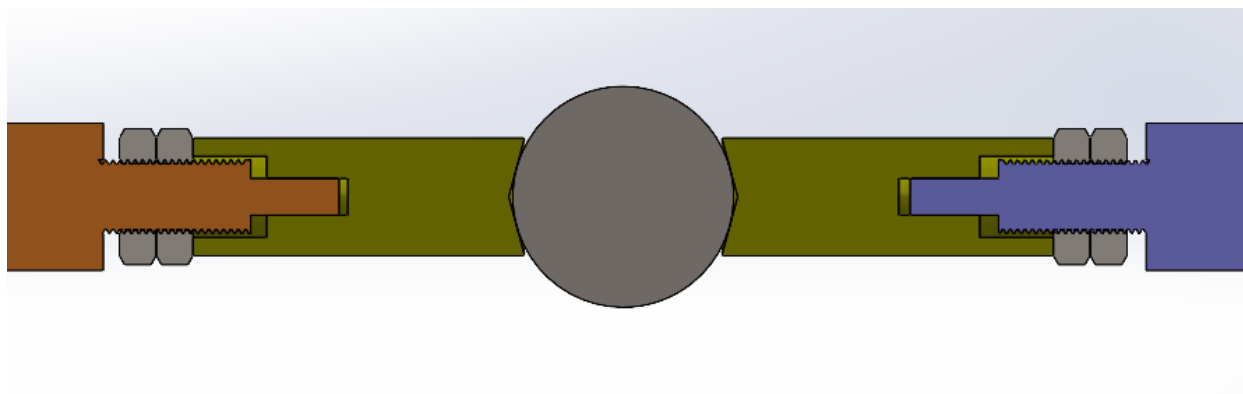


Figura 55 – Sezione del sistema di serraggio: particolare dello scorrimento assiale delle boccole di serraggio

Dal momento che il diametro della sfera può variare da 10 mm a 30 mm, è possibile sostituire le boccole di serraggio in funzione del diametro della sfera, rendendo adattabile il Calotester per ogni evenienza:

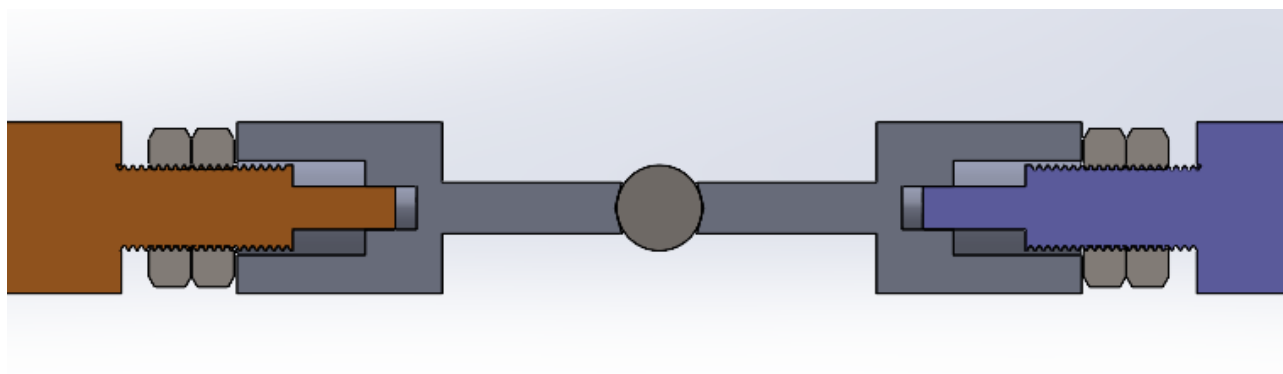


Figura 56 - Vista in sezione: sistema di serraggio per sfere di diametro ridotto

4.3. Alberi

I due alberi centrali del Calotester sono quasi identici tra loro, per simmetria della linea di trasmissione.

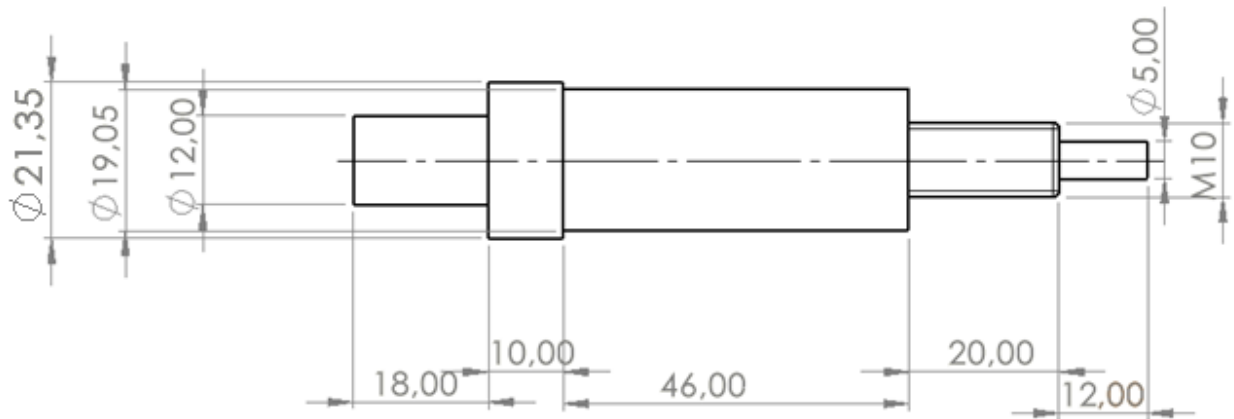


Figura 57 - Messa in tavola dell'albero collegato al motore

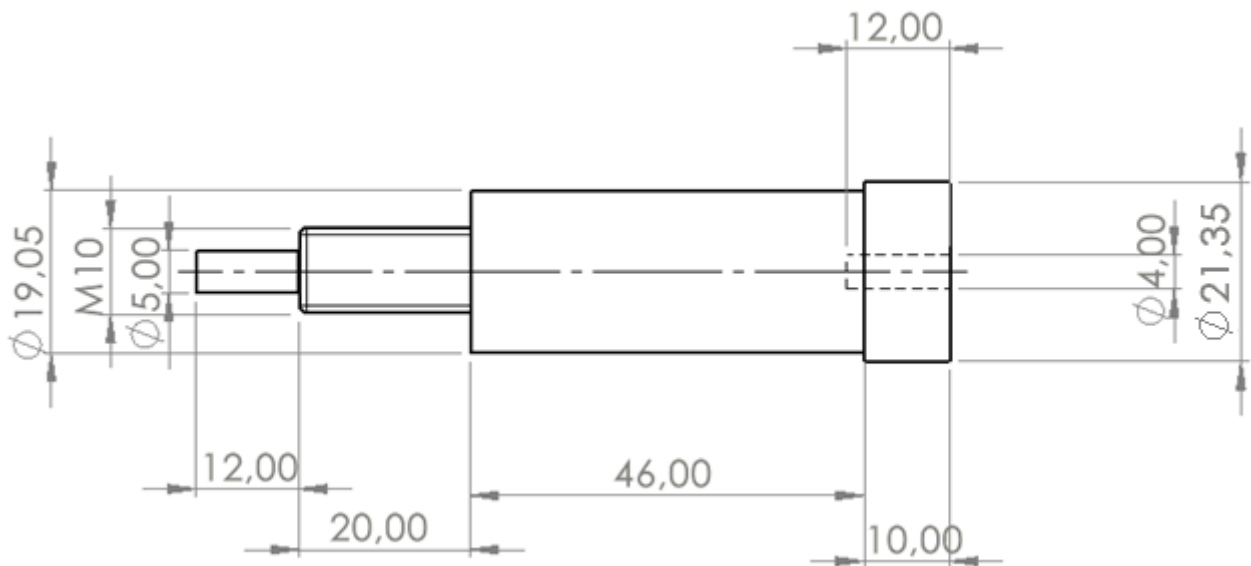


Figura 58 - Messa in tavola dell'albero collegato all'encoder

Gli alberi sono calettati nei cuscinetti lungo i tratti di diametro 19.05 mm ed è lungo questi che avviene lo scambio di forze tra albero e supporti volventi; i tratti di diametro 21.35 mm hanno lo scopo di posizionare correttamente gli alberi in fase di montaggio, poiché lo spallamento poggia sulla pista interna dei cuscinetti.

Gli alberi si differenziano soprattutto alle estremità. L'albero motore presenta un tratto aggiuntivo di diametro 12 mm, in modo tale da essere calettato in uno dei due fori del giunto elastico; nell'altro foro del giunto è calettato l'albero uscente dal motore. Il giunto utilizzato è un giunto elastico a stella e la scelta di utilizzarlo deriva dalla necessità di avere una rotazione degli elementi il più coassiale possibile ed evitare qualsiasi tipo di eccentricità.

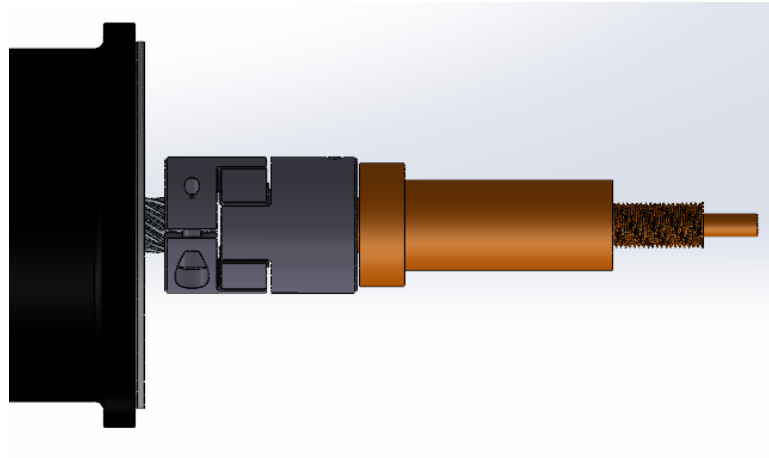


Figura 59 - Collegamento motore-giunto-albero

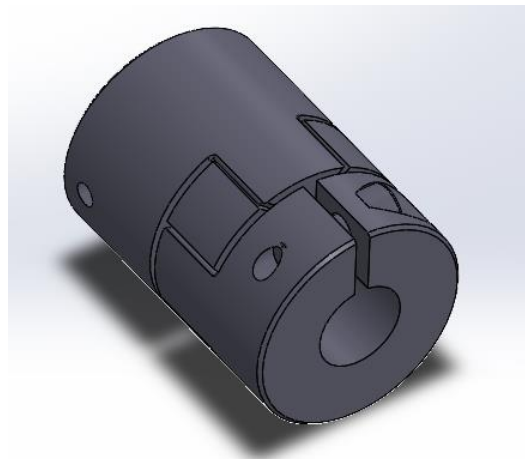


Figura 60 - Giunto elastico ComInTec GAS/SG-ST-M1-M1L

L'altro albero è differente dal primo poiché nell'ultimo tratto presenta un foro nel quale è calettato l'albero uscente dall'encoder: in questo modo, ruotando solidalmente al sistema, è possibile controllare la velocità di rotazione tramite il controllo ad anello chiuso:

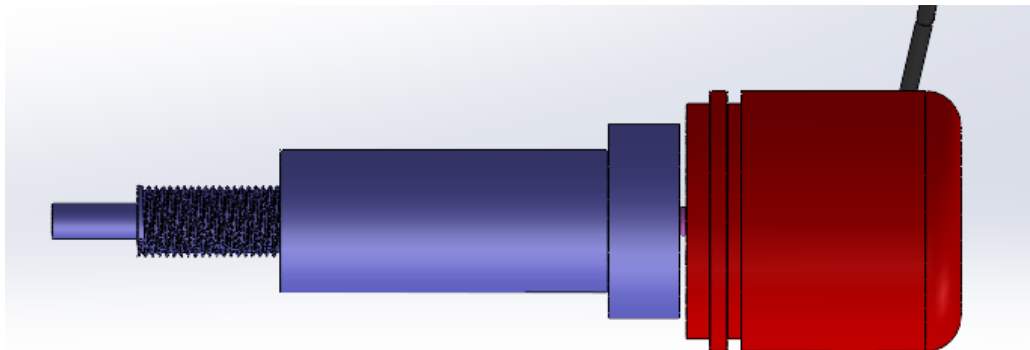


Figura 61 - Collegamento albero-encoder

La valutazione della deformazione degli alberi è fondamentale poiché il cratere che si genera sul provino meccanico ha una profondità dell'ordine dei μm , quindi un eccessivo spostamento degli alberi provocherebbe una prova non valida. Supponendo di applicare un carico massimo pari a 20 N sulla sfera, ogni albero subisce una forza sull'estremità di 10 N. Considerando che ogni albero poggia rispettivamente su due cuscinetti a sfera, si ottiene una deformazione pari a $0.16 \mu\text{m}$, valore uguale per entrambi gli alberi poiché sono uguali nelle zone più critiche.

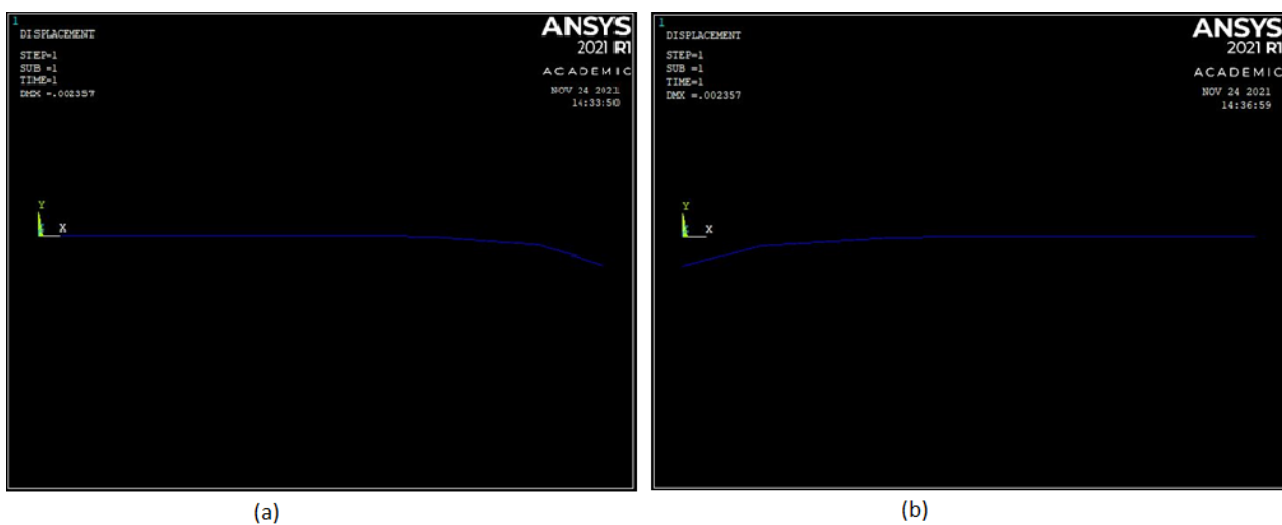


Figura 62 - Deformazione dell'albero collegato al motore (a) e dell'albero collegato all'encoder (b)

Per ottenere un'analisi completa degli alberi, è necessario valutare la resistenza allo snervamento.

Lo sforzo di taglio e il momento flettente sono gli unici carichi agenti:

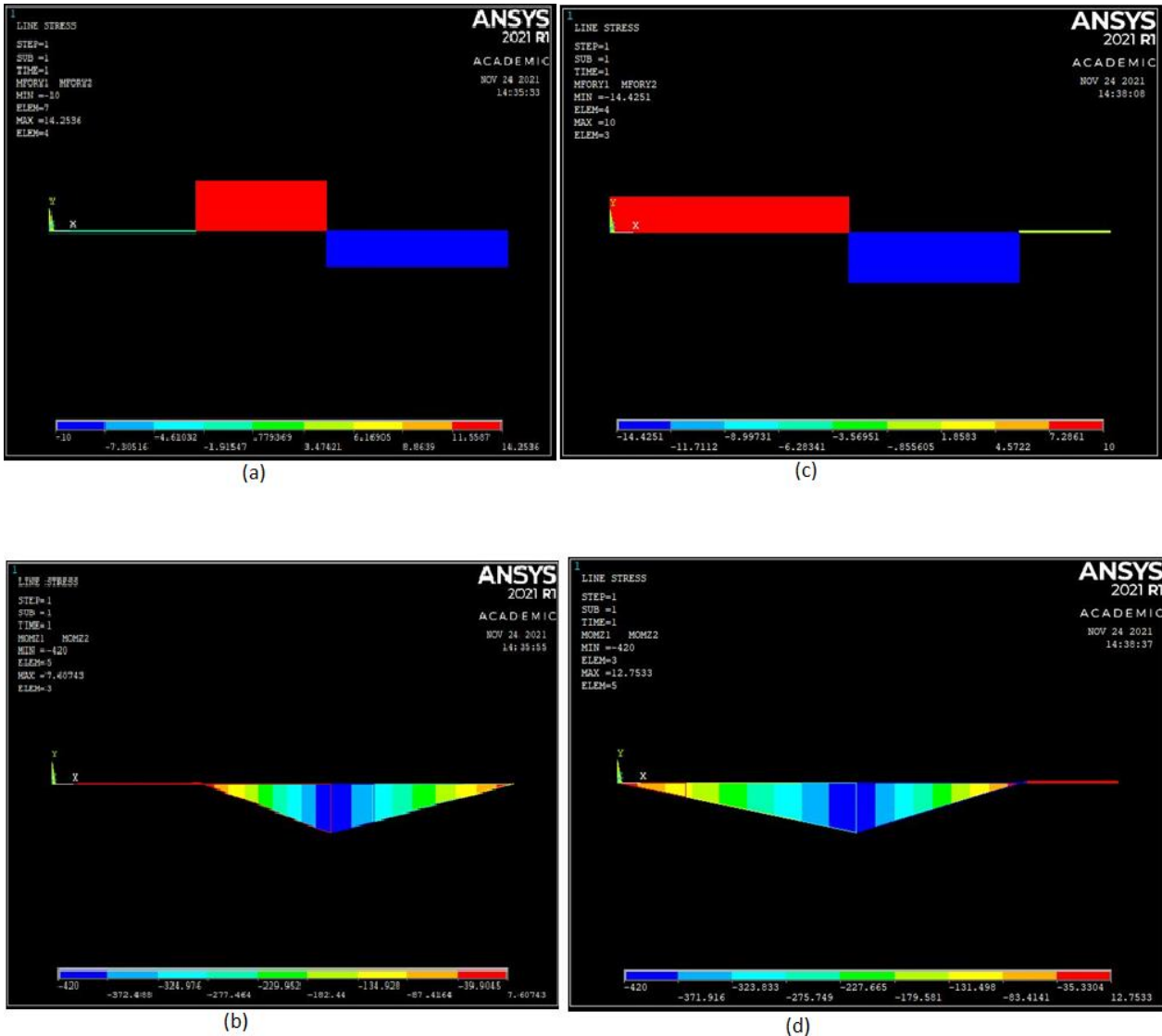


Figura 63 - Sforzo di taglio (a) e momento flettente (b) dell'albero collegato al motore e sforzo di taglio (c) e momento flettente (d) dell'albero collegato all'encoder

Considerando come materiale degli alberi un acciaio comune (acciaio C40), con una tensione di snervamento di 290 MPa, si ottiene una tensione massima equivalente nel punto più sollecitato pari a 9.78 MPa e quindi un coefficiente di sicurezza statico pari a 30.

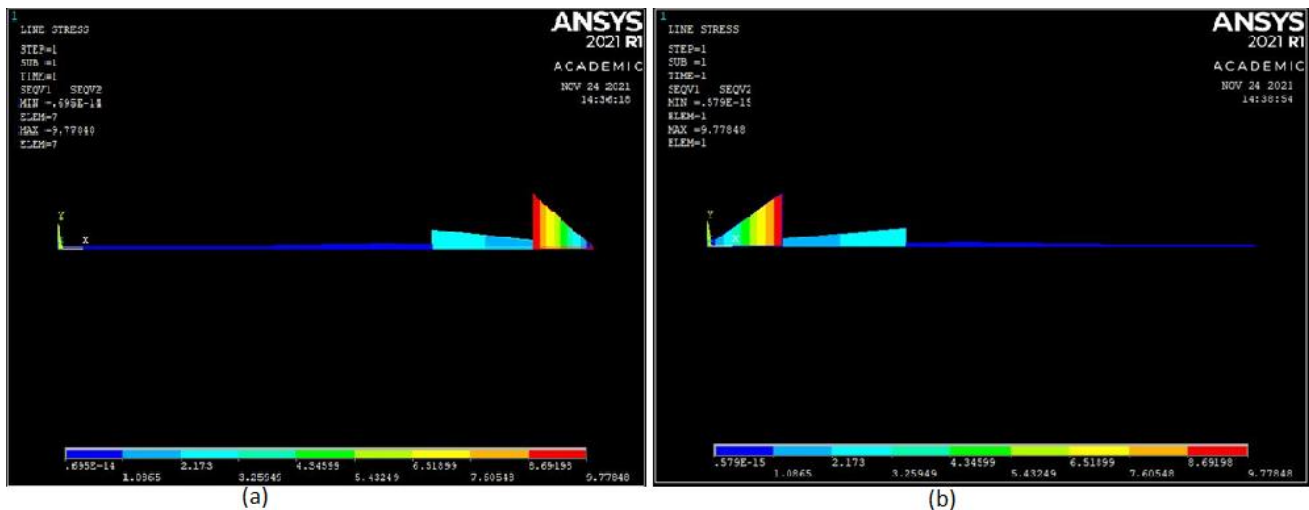


Figura 64 - Tensione massima equivalente nell'albero collegato al motore (a) e nell'albero collegato all'encoder (b)

4.4. Dimensionamento dei cuscinetti

La scelta dei cuscinetti deriva inizialmente dalle condizioni di applicazione, quali carico e velocità di esercizio e durata dei cuscinetti.

Dall'analisi statica degli alberi, il carico massimo al quale devono operare i supporti volventi è un carico radiale di circa 14 N; inoltre, supponendo che possano operare alla velocità massima continuativa del motore elettrico, cioè di 3200 rpm, l'obiettivo è di ottenere una durata di vita illimitata.

Bisogna considerare anche la lubrificazione, fondamentale per il corretto funzionamento dei cuscinetti, quindi si può optare per cuscinetti con schermatura metallica, per ridurre la manutenzione ed evitare l'inclusione di polvere e altri elementi che potrebbero comprometterne l'utilizzo.

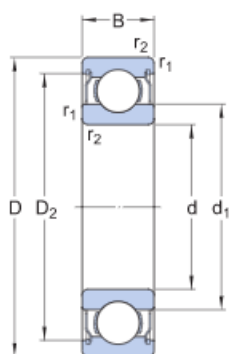
Un ulteriore fattore da considerare è la temperatura di esercizio, ma dal momento che il Calotester è una strumentazione da laboratorio utilizzata in modo intermittente e per durate di test relativamente brevi, i carichi termici non saranno eccessivi e comunque possono essere controllati.

Tenendo in considerazione le dimensioni dell'albero, i cuscinetti scelti sono i **D/W ER1634-2ZS** della SKF. Questi sono cuscinetti radiali a sfera con schermatura metallica:



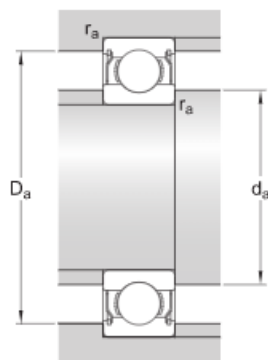
Figura 65 - Cuscinetti a sfera D/W ER1634-2ZS della SKF – catalogo SKF

Di seguito sono riportate le caratteristiche dimensionali:



DIMENSIONI

d	19.05 mm	Diametro foro
D	25.4 mm	Diametro esterno
B	3.967 mm	Larghezza
d ₁	≈ 21.35 mm	Diametro spallamento anello interno
d ₂	≈ 21.35 mm	Diametro scanalatura spallamento anello interno
D ₂	≈ 24 mm	Diametro scanalatura spallamento anello esterno
r _{1,2}	min. 0.25 mm	Dimensioni smusso anello esterno



DIMENSIONI DELLO SPALLAMENTO

d _a	min. 21 mm	Diametro spallamento albero
d _a	max. 21 mm	Diametro spallamento albero
D _a	max. 24.5 mm	Diametro spallamento alloggiamento
r _a	max. 0.25 mm	Raggio del raccordo

Figura 66 - Caratteristiche dimensionali cuscinetto D/W ER1634-2ZS – Catalogo SKF

Attraverso il tool presente sul sito della casa produttrice, è possibile ricavare la durata della vita dei cuscinetti e, in funzione delle condizioni limite a cui opera il Calotester, risulta essere vita illimitata.

L'alloggiamento dei cuscinetti è costituito da supporti forati, fissati alla base tramite viti e dadi prima del montaggio, in modo da garantire la totale coassialità:

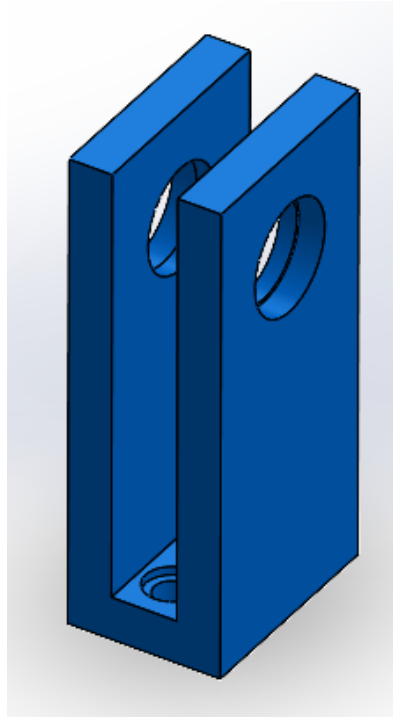


Figura 67 - Supporto cuscinetti

Le sedi dei cuscinetti sono costituite da fori cilindrici e presentano uno spallamento che ha la funzione di guida in fase di montaggio, infatti l'inserimento dei cuscinetti avviene spingendo la pista interna ed esterna nella sede fino al raggiungimento dello spallamento di quest'ultima, utilizzando una bussola adeguata:

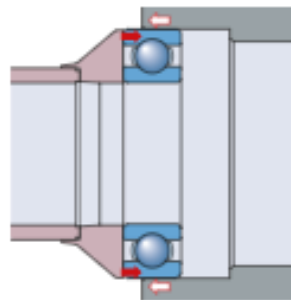


Figura 68 - Applicazione della forza per l'inserimento del cuscinetto – Catalogo SKF

Una volta inserito il cuscinetto, si utilizza un anello seeger per bloccare completamente la pista esterna nella sede:

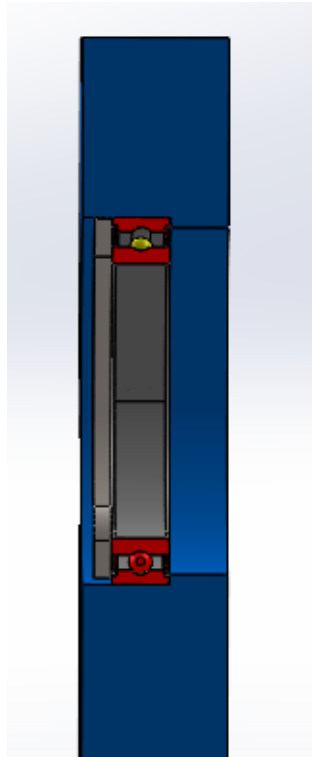


Figura 69 - Particolare dei supporti dei cuscinetti: anello seeger, elemento volvente e spallamento

4.5. Sistema porta-provino

Il provino meccanico deve poter scorrere verticalmente, per avere un punto di applicazione regolabile in altezza, e orizzontalmente, per essere premuto liberamente contro la sfera.

Il moto orizzontale e verticale è garantito da due guide lineari sulle quali scorrono rispettivamente due slitte; il sistema guida profilata e slitta è il **411N15A0DES1** della Thomson Linear.



Figura 70 - Guida profilata lineare 411N15A0DES1 della Thomson Linear

La guida orizzontale è fissata sulla base del Calotester; su di essa, è montato un supporto verticale sul quale è fissata la guida verticale dove scorre la rispettiva slitta; solamente la traslazione verticale presenta un freno, in modo da poter scegliere l'altezza desiderata.

È presente un'ulteriore guida montata sul supporto verticale: questa ha il compito di sorreggere la morsa porta-campione senza però bloccarne il movimento, poiché è collegata alla guida verticale che regola l'altezza attraverso una cella di carico. Lo spostamento relativo tra le due guide verticali, seppur molto ridotto, permette alla cella di carico di rilevare la forza tangenziale agente durante il test di abrasione.

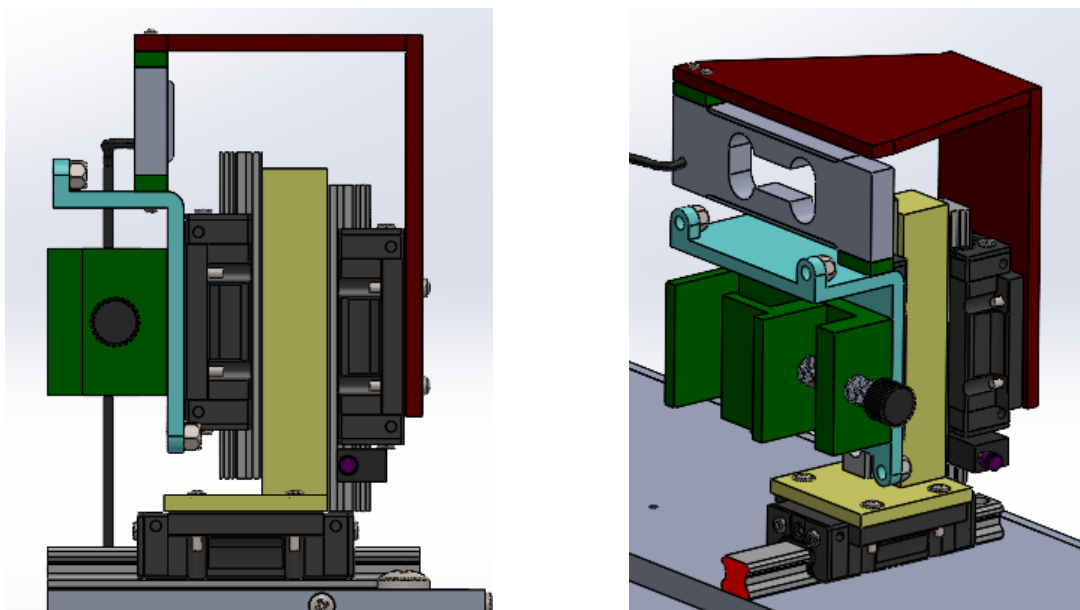


Figura 71 - Particolare del sistema di guide orizzontale e verticali e dell'applicazione della cella di carico

Poiché la cella di carico deve essere montata relativamente ad un corpo in movimento ed uno fisso, la componente fissa a cui è fissata è una piastra ad 'L'. Questa è sollecitata a flessione a causa del peso proprio dei corpi collegati.

Considerando la morsa porta-provino, la piastra a cui è collegata la guida verticale non fissa e la cella di carico, si può valutare cautelativamente un peso complessivo di 500 g, perciò una equivalente forza verticale di 5 N. Effettuando un'analisi statica sulla piastra è possibile notare che non è raggiunto lo snervamento.

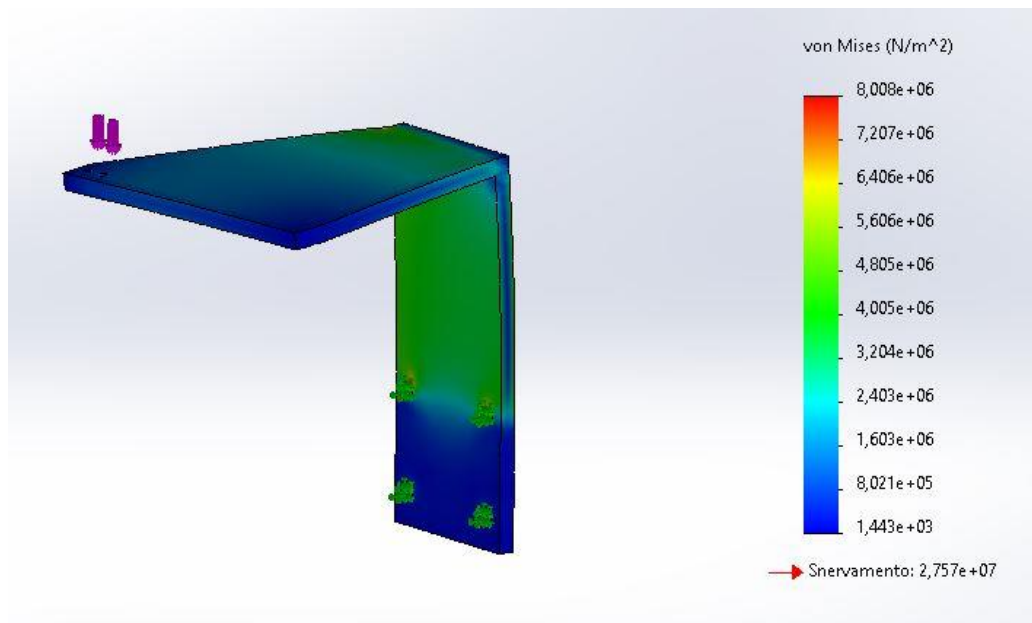


Figura 72 - piastra cella di carico, tensioni equivalenti

Valutando la deformazione, lo spostamento massimo si ottiene nel punto di montaggio della cella di carico e con un valore di 0,2375 mm.

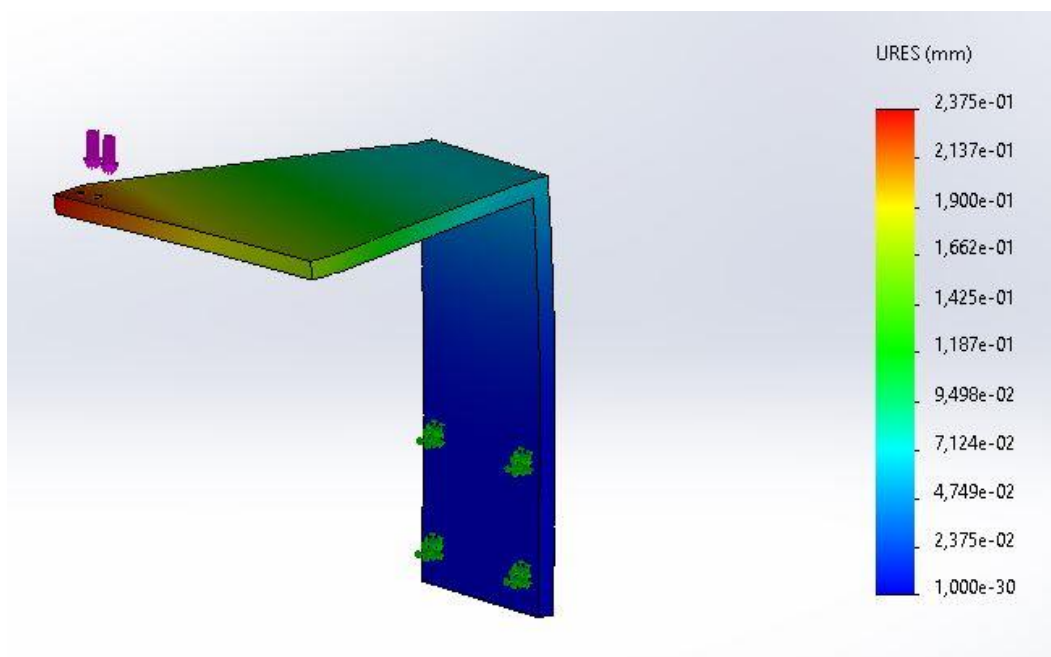
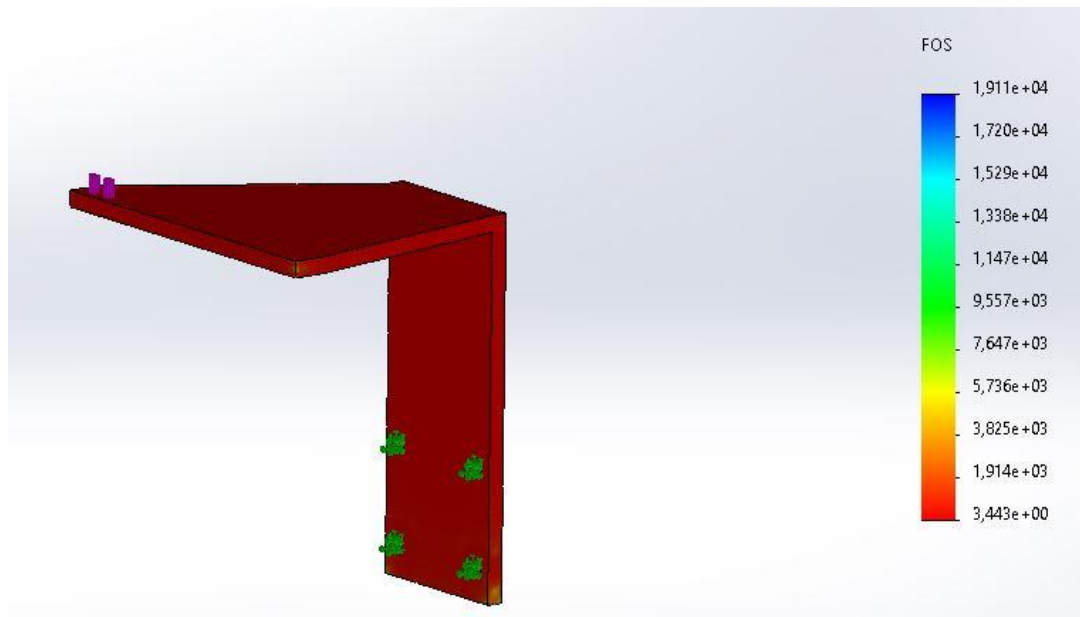


Figura 73 - Piastra cella di carico, deformazione

Si ottiene un coefficiente minimo di sicurezza statico pari a 3.5, valutato nella situazione più cautelativa possibile.



Il provino è serrato da una morsa regolabile che permette di effettuare test su campioni di diverse dimensioni; inoltre, il supporto su cui poggia la morsa presenta 6 fori grazie ai quali è possibile scegliere posizioni diverse della morsa, una centrale e due posizioni più periferiche, in modo da avere una scelta maggiore nel punto di contatto tra sfera e provino:

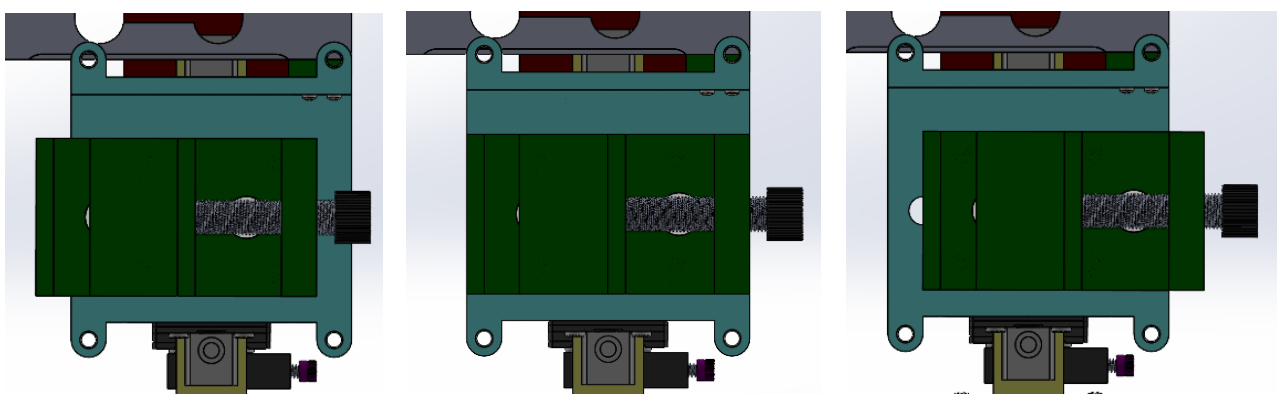


Figura 74 - Diverso posizionamento della morsa porta-campione

4.6. Sistema di applicazione del peso

Il supporto su cui è fissato il provino può traslare liberamente in direzione orizzontale per permettere che il provino venga premuto sulla sfera quando è applicato un carico.

La sede dove è montata la morsa presenta 4 fori che ospitano altrettante barre e che collegano il sistema porta-provino ad una piastra; nel suo baricentro, è legato un filo che la collega ad un cilindretto nel quale è possibile inserire il peso che si desidera: in questo modo, il peso, grazie alla forza di gravità, tende a trascinare la piastra e tutto il sistema porta-campione, permettendo l'accostamento del provino alla sfera.

Per permettere la traslazione verticale del peso, il filo che collega la piastra al cilindro porta peso percorre una puleggia calettata a sbalzo su un albero posto su un supporto.

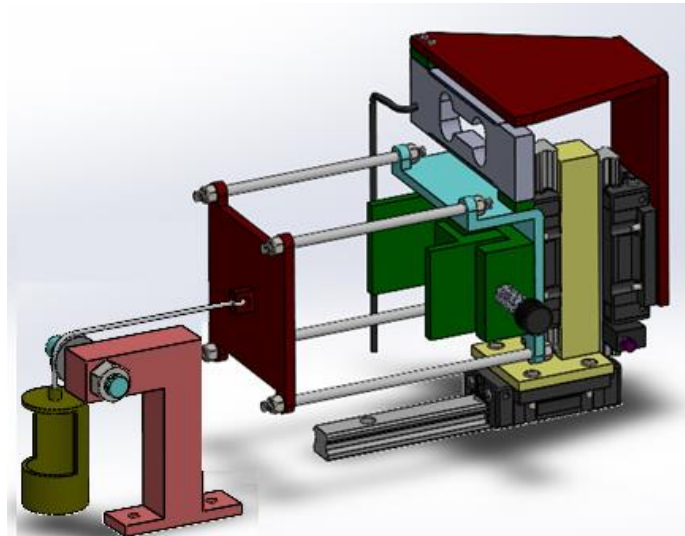


Figura 75 - Sistema di applicazione del peso

4.7. Fissaggio del motore e dei componenti elettronici

La carcassa del motore è flangiata, perciò il suo montaggio è possibile attraverso una flangia a 4 fori, fissata alla base del Calotester:

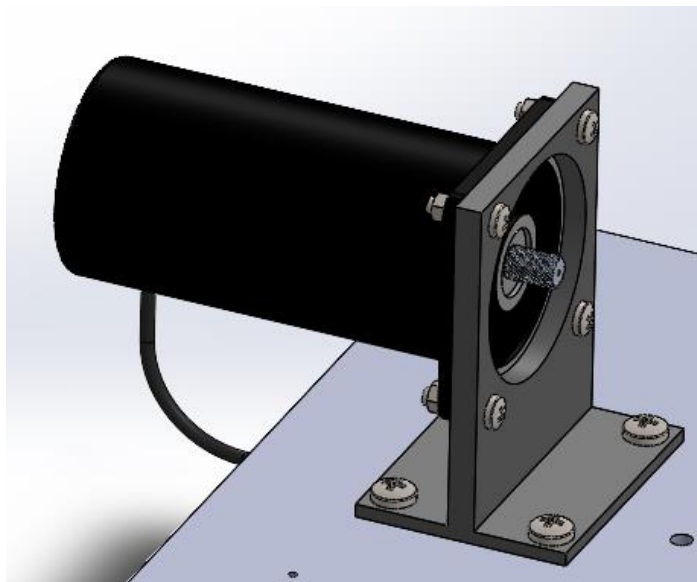


Figura 76 - Fissaggio motore elettrico

In modo simile è fissato anche l'encoder: sulla sua superficie superiore, sono presenti 4 fori appositamente adibiti al montaggio; anche la flangia sul quale è montato l'encoder è fissata alla base del Calotester:

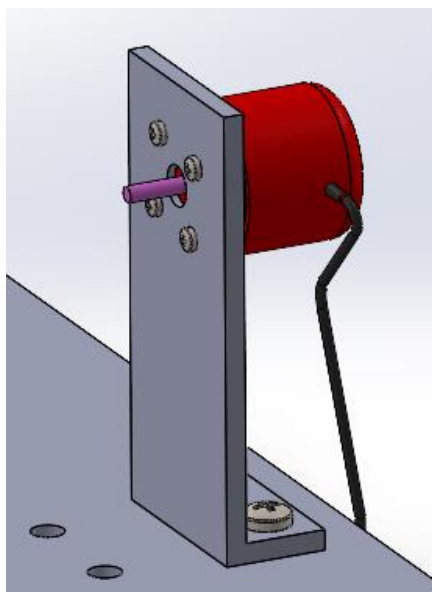


Figura 77 - Fissaggio encoder

Il joystick e il display sono fissati direttamente sulla base del Calotester:

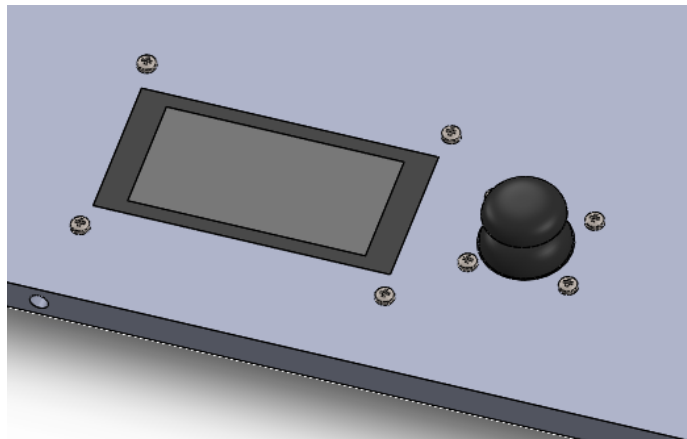


Figura 78 - Fissaggio joystick e display

La scheda di controllo Arduino e la componentistica elettronica interna al Calotester è montata su appositi alloggiamenti in modo da isolarli dal contatto con la carcassa.

In particolare, la scheda Arduino è avvitata su perni in plastica filettati internamente; questi perni sono fissati sulla base inferiore del Calotester tramite viti e rosette:

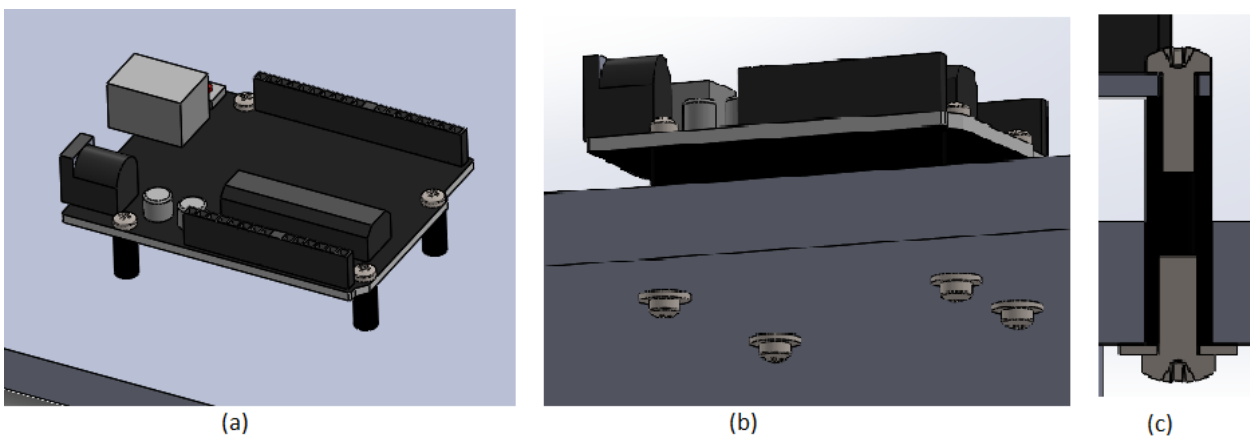


Figura 79 - Sistema di fissaggio dell'Arduino (a), dei perni (b) e sezione del sistema (c)

4.8. Carcassa del Calotester

La base del Calotester è composta da una piastra superiore dove sono fissati tutti i componenti meccanici e una piastra inferiore, montati su 4 blocchetti forati; lateralmente, sono presenti dei coperchi che hanno la funzione di chiudere la carcassa e proteggere la componentistica elettronica da eventuali inclusioni.

La piastra superiore presenta i fori dove sono fissati i supporti meccanici, il display LCD e il joystick:

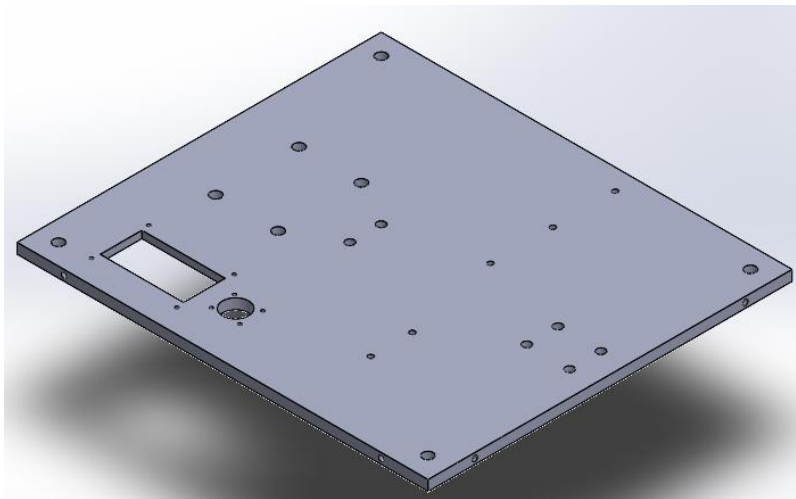


Figura 80 - Piastra superiore

La piastra inferiore presenta i fori dove alloggiano i perni che sorreggono l'Arduino e i fori dove sono montati i piedini di supporto:

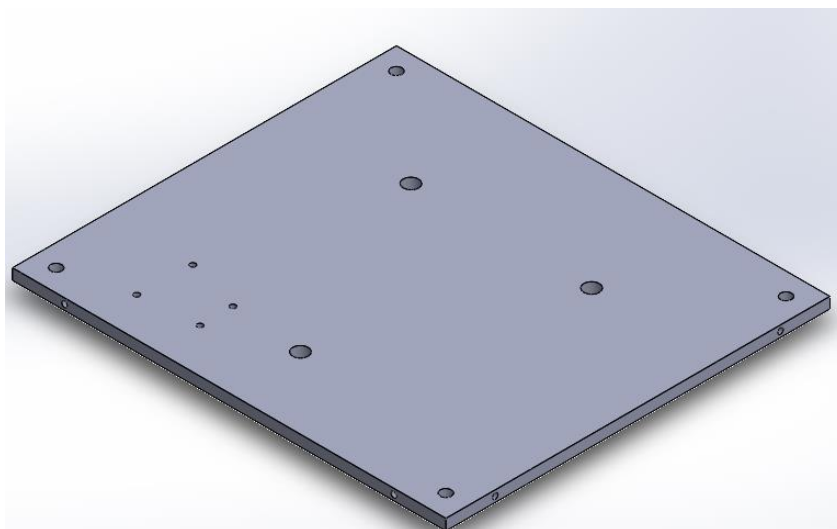


Figura 81 - Piastra inferiore

I piedini di supporto sono fissati alla piastra inferiore attraverso rosette e viti:

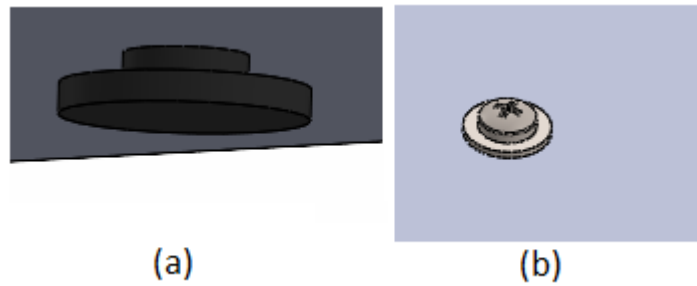


Figura 82 - Piedini di appoggio (a) e fissaggio sulla base inferiore (b)

I piedini di appoggio sono 3 per garantire la planarità ed evitare disallineamenti rispetto al piano su cui poggia lo strumento:

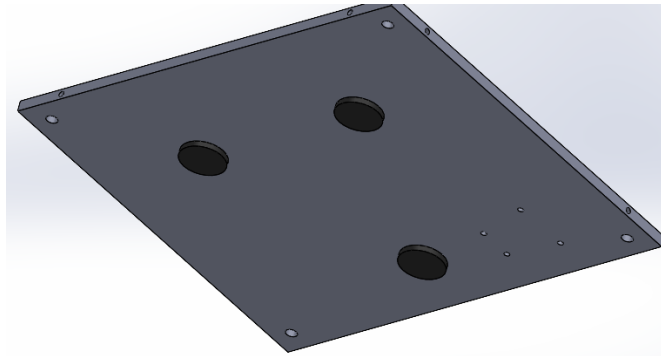


Figura 83 - Disposizione dei piedini sulla base inferiore

I blocchetti ai quali sono fissate le piastre superiore e inferiore sono dei parallelepipedi e si collocano agli angoli delle piastre:

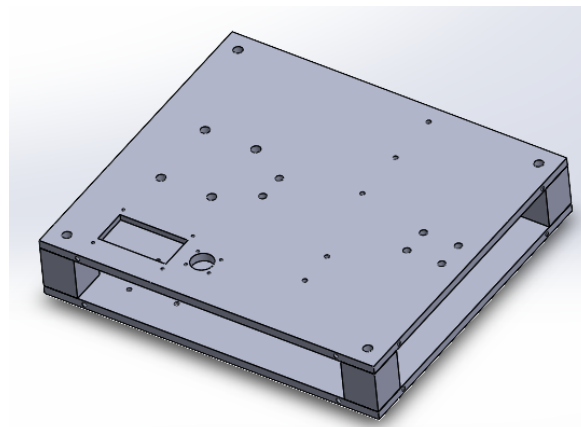


Figura 84 - Montaggio piastra superiore e inferiore ai blocchetti

Le coperture laterali sono avvitate lateralmente alle piastre superiore e inferiore, poiché non hanno una funzione strutturale, ma solo una funzione di chiusura del blocco:

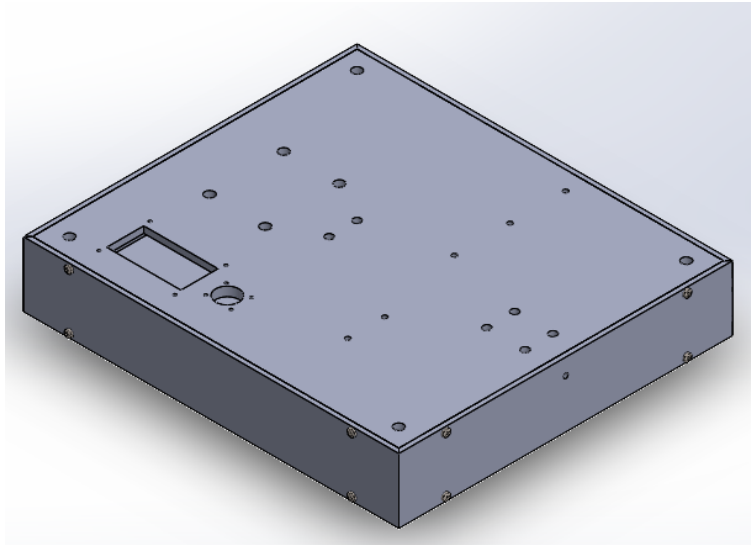


Figura 85 - Montaggio piastre laterali

La piastra posteriore presenta delle feritoie di aerazione per la dissipazione termica del circuito elettronico e ospita l'alloggio per la presa di alimentazione:

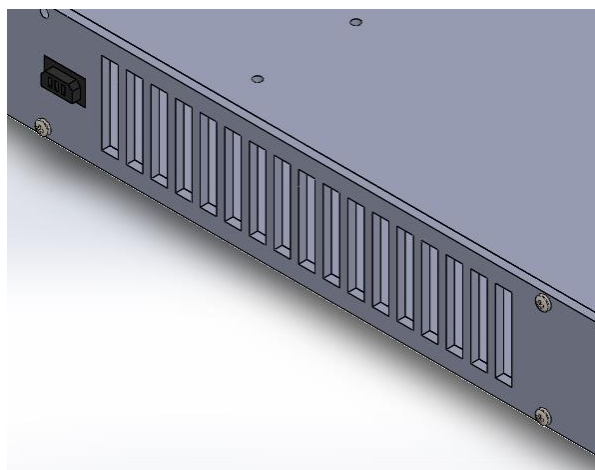
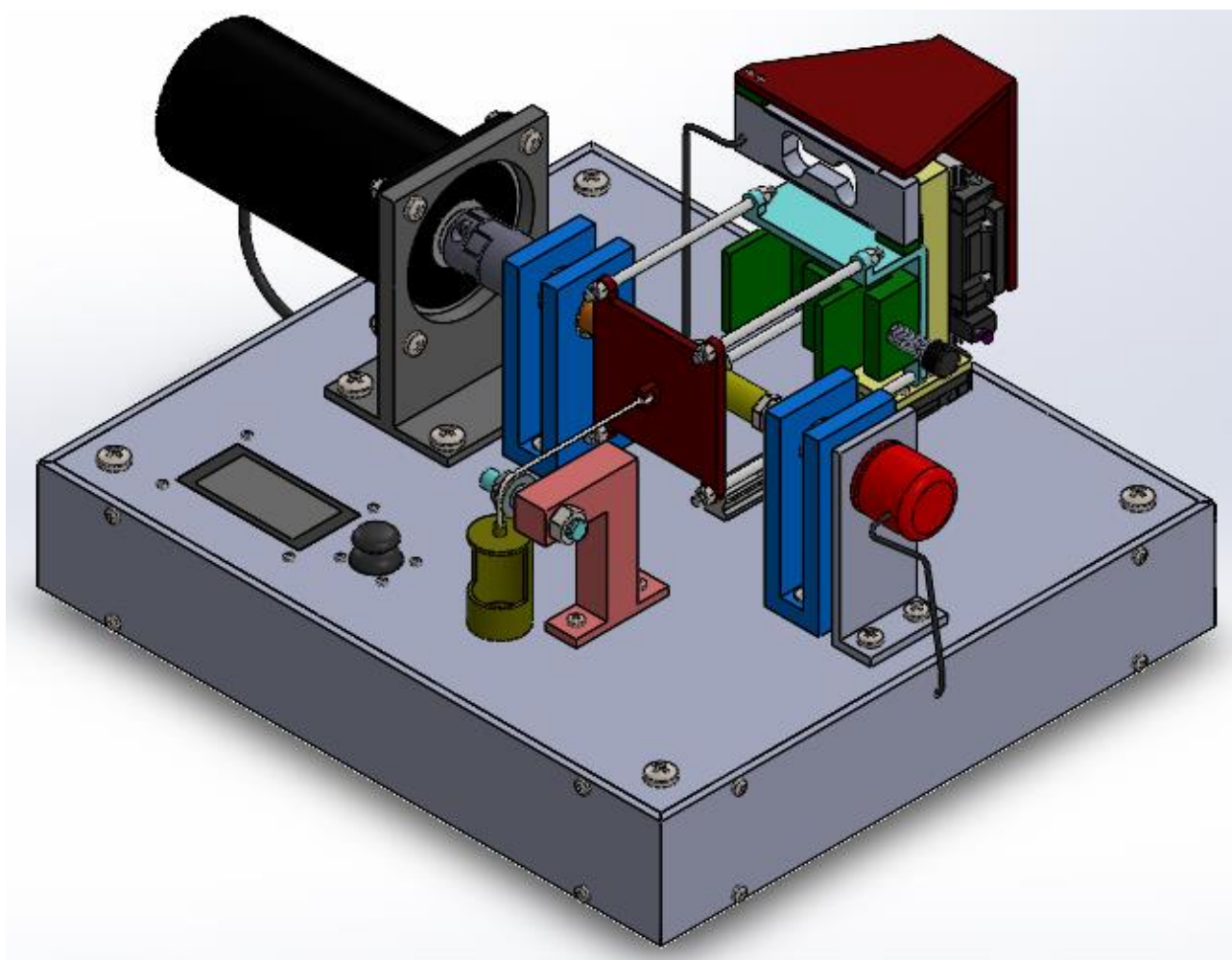
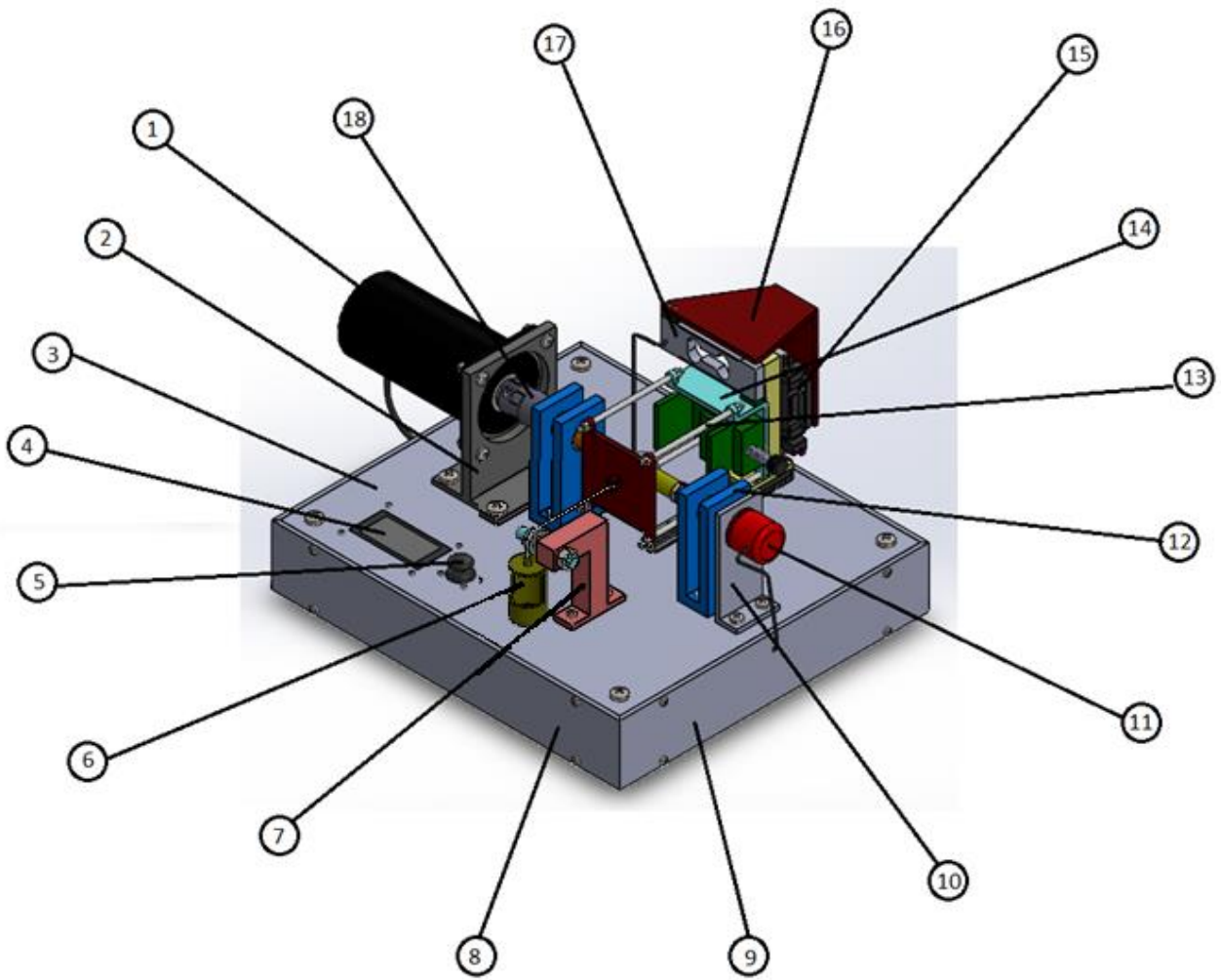
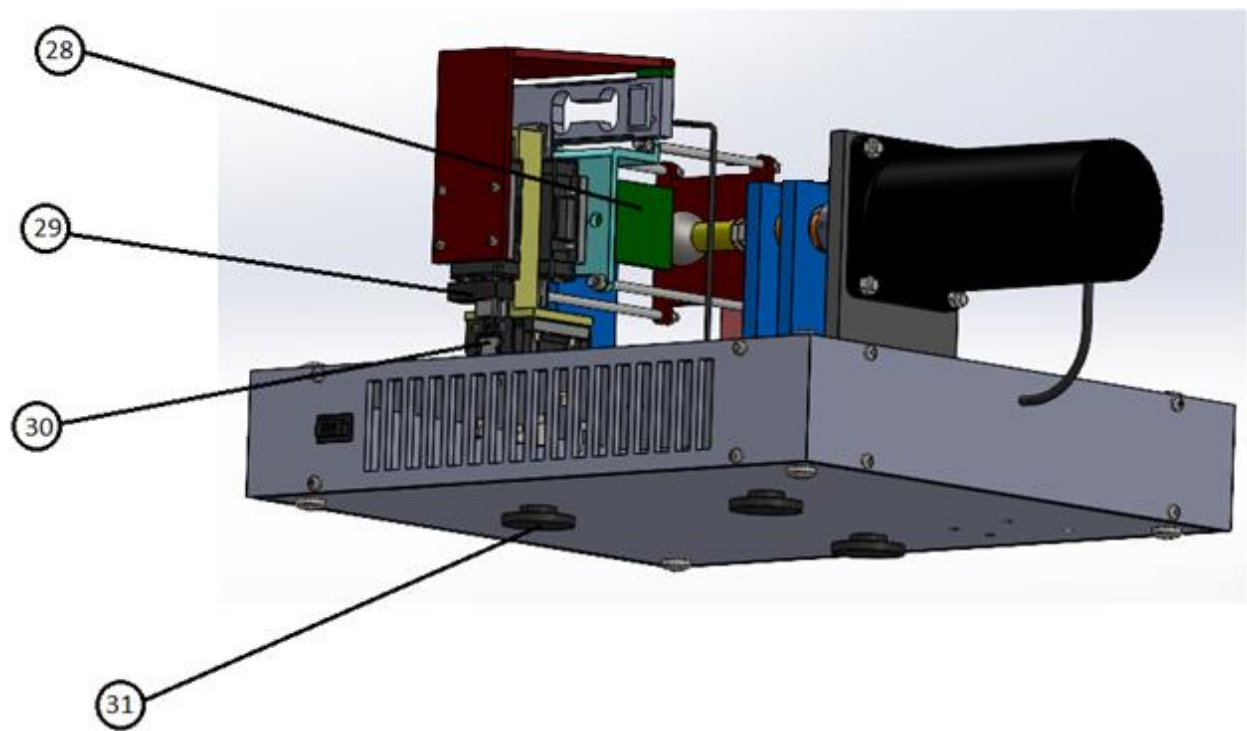
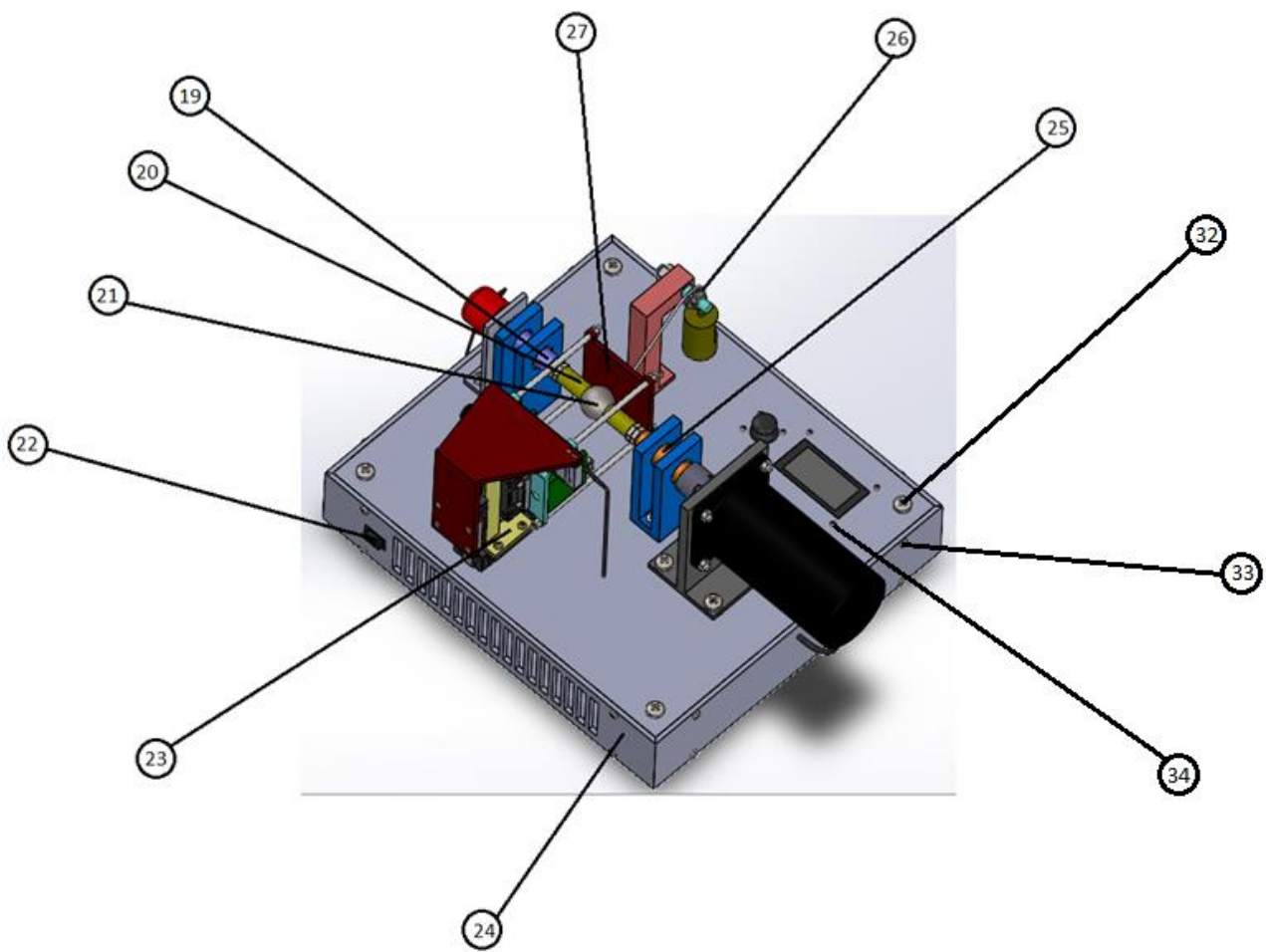


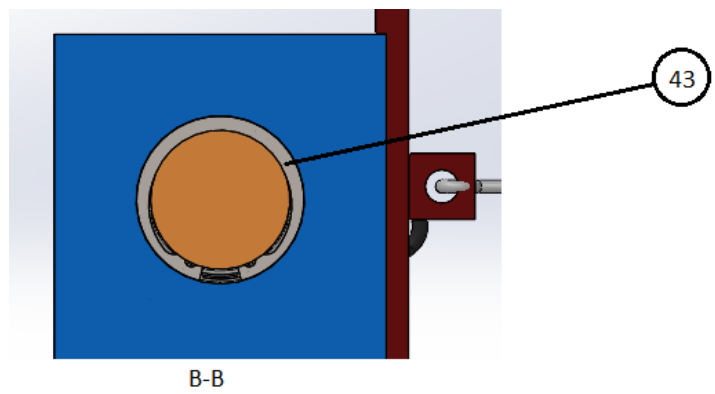
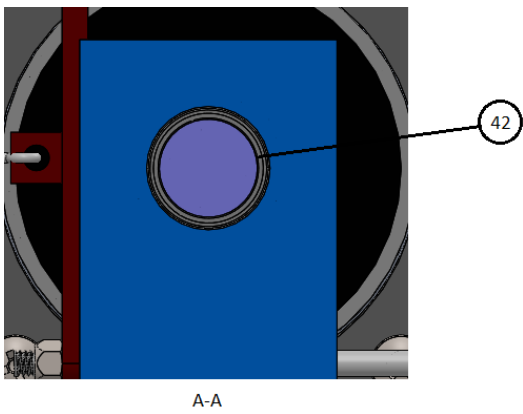
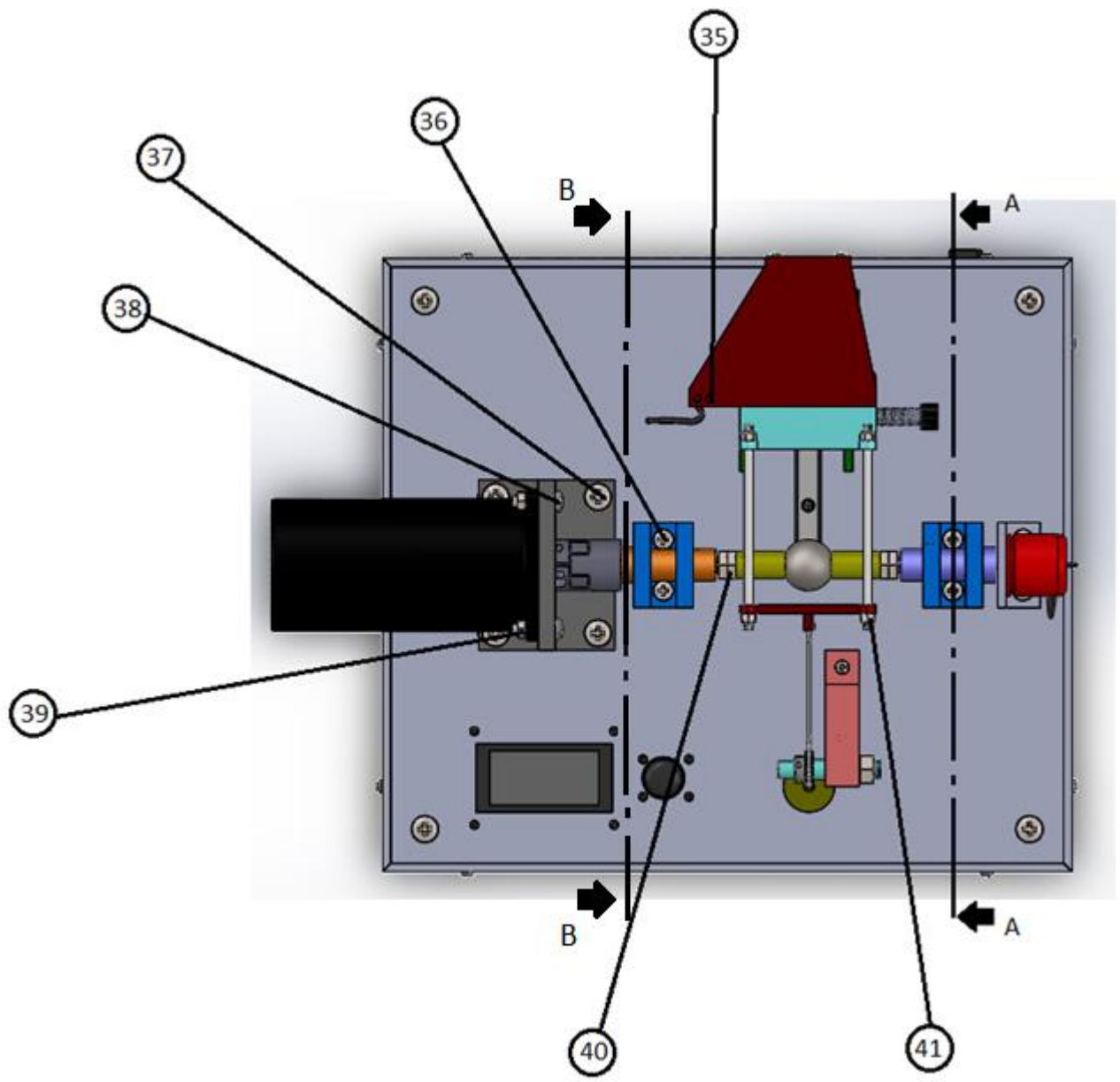
Figura 86 - Particolare: feritoie e presa di alimentazione

4.9. Disegno dell'assieme









Distinta base:

Elemento	Nome	Quantità
1	Motore elettrico	1
2	Flangia motore	1
3	Piastra superiore	1
4	Display LCD	1
5	Joystick	1
6	Alloggio peso	1
7	Supporto porta-peso	1
8	Piastra frontale	1
9	Piastra laterale	2
10	Flangia encoder	1
11	Encoder	1
12	Supporto cuscinetti	2
13	Tiranti	4
14	Supporto porta-morsa	1
15	Guida verticale	2
16	Supporto cella di carico	1
17	Cella di carico	1
18	Giunto elastico	1
19	Albero encoder	1
20	Boccola di serraggio	2
21	Sfera	1
22	Presa di alimentazione	1
23	Supporto porta-campione	1
24	Piastra posteriore	1
25	Albero motore	1
26	Puleggia	1
27	Piastra porta-peso	1
28	Morsa porta-campione	1
29	Freno guida verticale	1
30	Guida orizzontale	1
31	Piedini di appoggio	3
32	ISO 7045 - M10 x 20	4
33	ISO 7045 - M4 x 12	16
34	ISO 7045 - M2.5 x 10	8
35	ISO 7045 - M2 x 10	4
36	ISO 7045 - M6 x 20	8
37	ISO 7045 - M8 x 20	4
38	ISO 7045 - M6 x 25	6
39	ISO 4032 - M6 - W - N	10
40	ISO 4036 - M10 - N	4
41	DIN EN ISO 7719 - M5 - N	8
42	SKF D/W ER1634-2ZS	4
43	DIN 472 - 24 x 1.2	4

5. Circuito elettronico di controllo

Le componenti hardware sono fondamentali per il funzionamento del calo tester, sia per fornire l'energia elettrica che è trasformata in energia meccanica, sia per l'interfaccia utente.

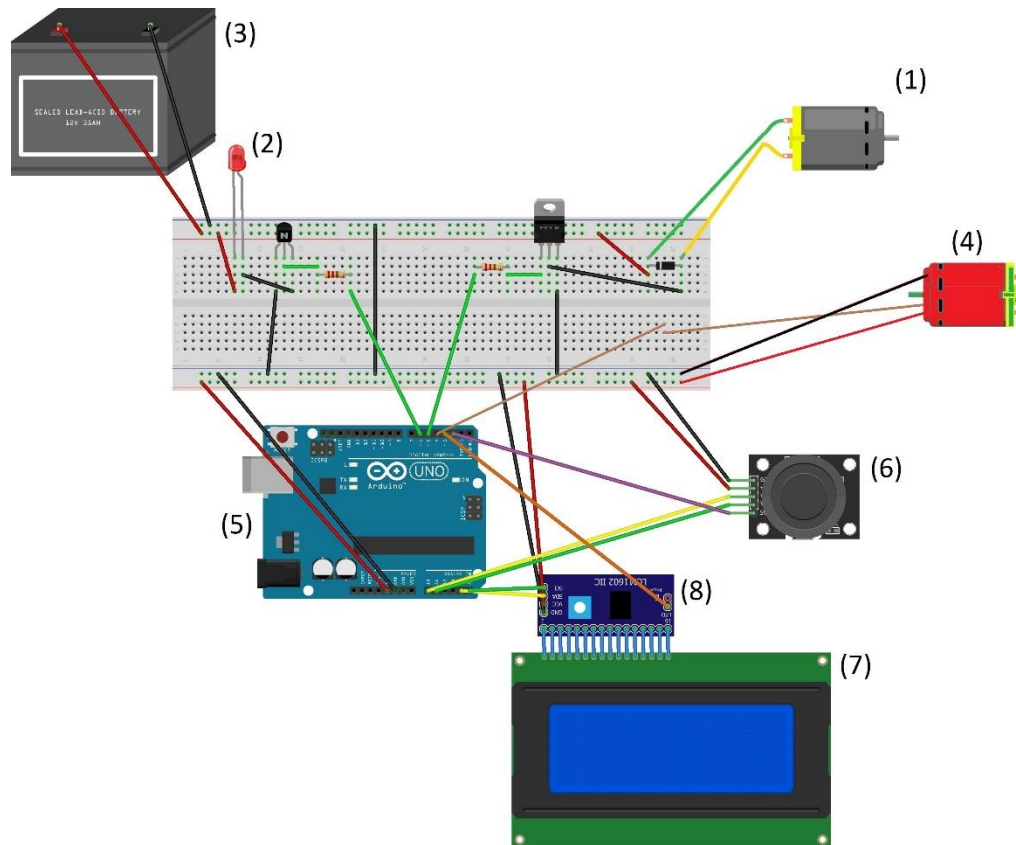


Figura 87 - Schema circuitale

L'immagine raffigura lo schema del circuito di controllo dello strumento:

- (1) motore elettrico
- (2) rappresentazione dell'elettrofreno
- (3) alimentazione della linea di potenza
- (4) encoder
- (5) scheda programmabile Arduino UNO
- (6) joystick
- (7) display
- (8) interfaccia I2C

5.1. Scheda di controllo

Per istruire il circuito a compiere determinate azioni, è necessario utilizzare una scheda di controllo, un vero e proprio “cervello” che guidi i vari componenti ad eseguire le giuste operazioni negli istanti corretti.

Una scheda di controllo molto utilizzata per applicazioni non industriali è la scheda programmabile Arduino UNO R3:



Figura 88 - scheda Arduino UNO R3

La scheda Arduino UNO è composta da un microprocessore da 16 MHz al quale sono collegati 14 pin programmabili come input o output (di cui 6 utilizzabili anche come funzione di PWM) e 6 pin dedicati all’acquisizione e all’elaborazione dei segnali analogici; è alimentata da una tensione di 5V e permette l’erogazione fino a 40 mA per ogni pin.

La scheda può essere collegata direttamente al PC tramite ingresso USB, dal quale riceve il software attraverso l’ambiente di sviluppo integrato, sviluppato in linguaggio JAVA.

5.2. Encoder

L'encoder è un trasduttore di posizione angolare, cioè un dispositivo elettromeccanico in grado di convertire l'energia meccanica in codice digitale, attraverso impulsi elettrici. Esso ha il compito di misurare la posizione o il moto angolare.



Figura 89 - encoder Minirod 421

Il principio di funzionamento nasce dalla tipologia di encoder, che può essere assoluto o relativo.

L'encoder assoluto fornisce un valore numerico codificato in maniera univoca per ogni posizione meccanica dell'albero, memorizzando il valore della posizione corrente ed evitando così la perdita di informazioni.

L'encoder incrementale fornisce un segnale di tipo on/off e ha la funzione di controllare parametri quali velocità, direzione o distanza.

In entrambi i casi, l'encoder è costituito da un disco forato percorso da un fascio di luce, che viene letto da un componente fotosensibile; il disco è calettato su un albero coassiale all'elemento del quale si vuole leggere l'informazione. Quando gli organi mobili ruotano, ogni volta che il fascio ottico attraversa il disco nelle forature e colpisce il fotosensore, il microprocessore riceve un impulso elettrico. I segnali ricevuti dovranno poi essere processati a livello di software.

Bisogna distinguere anche la tipologia di trasduzione del segnale; in particolare, la metodologia più diffusa è la lettura ottica, cioè il disco, anziché essere forato, è costituito da tacche nere e bianche e ogni volta che avviene il passaggio da bianco a nero, viene inviato un segnale.

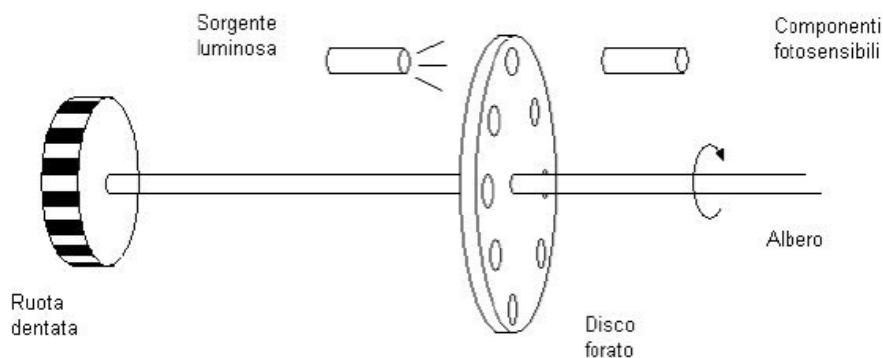


Figura 90 - Schema di funzionamento Encoder

Nel presente elaborato, è utilizzato un encoder relativo, ovvero il modello “Minirod 421” della Heidenhain.

Questo encoder ha una elevata risoluzione per applicazioni ad alta precisione, infatti presenta una risoluzione di 0.025° con 3600 linee a 4 tasche di valutazione.

Il Minirod 421 richiede un'alimentazione di 5V per la parte sensoristica, mentre in uscita presenta 3 tipi di segnali, cioè segnale A, B e Z.

I segnali A e B sono sfasati di 90° elettrici e la loro lettura permette di individuare oltre la velocità istantanea, valutando nel tempo la ricezione dei segnali, anche il verso di rotazione:

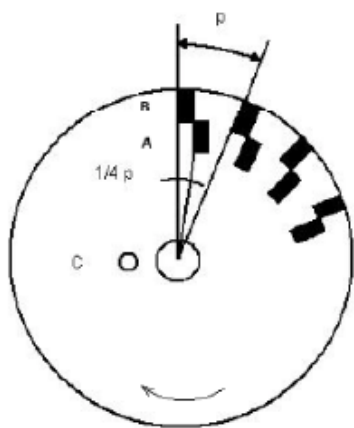


Figura 91 - disco con tacche nere e bianche

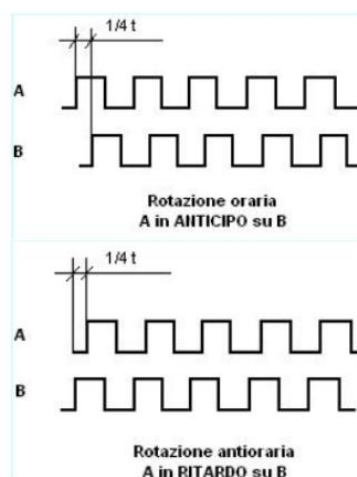


Figura 92 - sfasatura segnale A e B

Se viene letto prima il segnale A e poi il B, allora la rotazione sarà oraria, altrimenti si avrà una rotazione antioraria.

Il segnale Z, invece, manda un impulso ogni qualvolta viene effettuata una rotazione completa.

Dal momento che il microprocessore della scheda Arduino è limitato a una certa frequenza, esso potrà ricevere al massimo un determinato numero di impulsi nel tempo; di conseguenza, poiché l'esigenza è quella di ottenere la sola velocità angolare e non la direzione, si è limitato a utilizzare il solo segnale Z, con l'opportuna elaborazione di ricezione valutata nel tempo.

5.3. Cella di carico

Per permettere l'acquisizione della forza tangenziale agente sul provino meccanico è utilizzata la cella di carico **PA3** della Flintec:

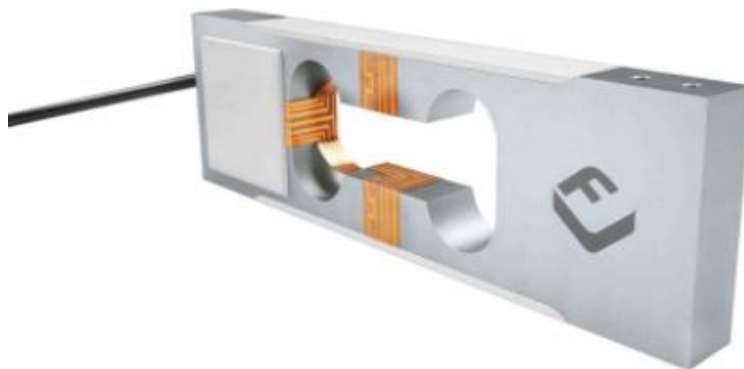


Figura 93 - Cella Off Center PA3 della Flintec – Catalogo Flintec

Il funzionamento della cella di carico consiste nell'applicare una forza su di essa e in base alla deformazione che subisce invia un segnale analogico alla scheda di controllo; il voltaggio di alimentazione è pari a 5 V e restituisce un voltaggio in output dell'ordine dei mV. Nel caso non sia applicato nessun carico, la cella invia comunque un segnale all'Arduino.

Per ottenere un valore preciso della forza tangenziale agente sul provino meccanico, il software della scheda di controllo azzerava il valore letto appena prima di avviare il test, in questo modo tutti gli errori sulla misura del coefficiente di attrito dovuto ai contributi di peso proprio dei componenti sono neutralizzati.

I piatti su cui opera la cella di carico devono avere una dimensione massima di 200 mm x 200 mm; il montaggio avviene attraverso i fori filettati presenti sulle superfici superiore e inferiore. Nel Calotester, è collegata alle superfici tra le quali opera attraverso dei distanziatori:

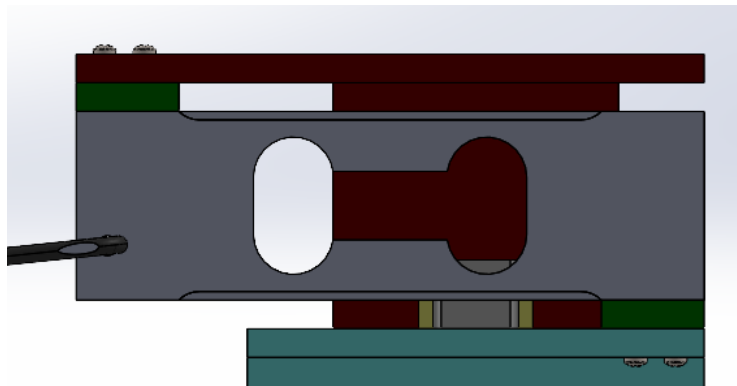


Figura 94 - Applicazione della cella di carico

La cella di carico è costituita da un ponte a 4 resistenze e 4 cavi di collegamento: 2 cavi servono per alimentarla mentre gli altri 2 servono per misurare il segnale.

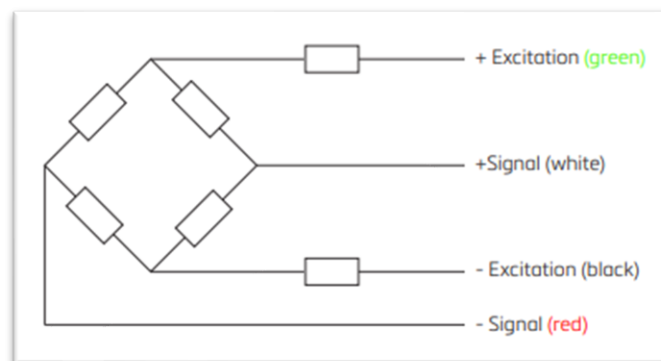


Figura 95 - Schema circuitale cella di carico - catalogo Flintec

Dal momento che l'output della cella di carico restituisce un voltaggio dell'ordine dei mV, è necessario un amplificatore di segnale, perciò si utilizza un modulo HX711 che fa da collegamento tra la cella di carico e la scheda di controllo Arduino.

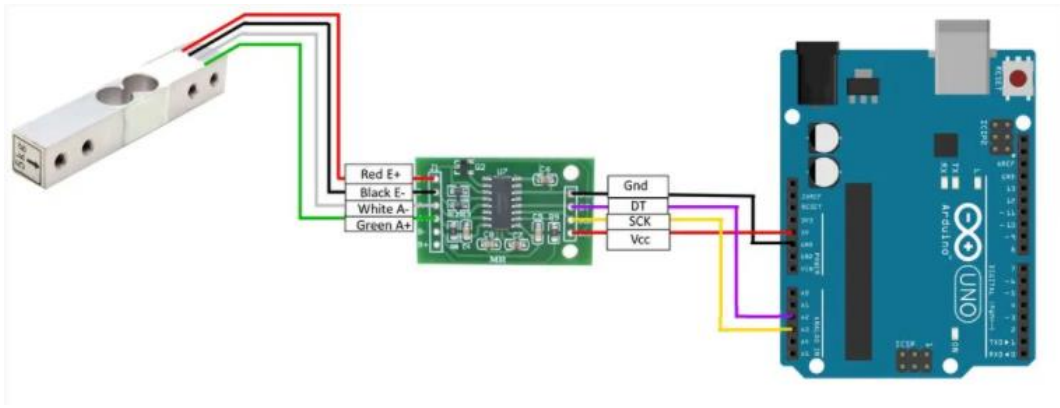


Figura 96 - Collegamento cella di carico, modulo HX711 e Arduino

5.4. Elementi di interfaccia utente

Lo strumento realizzato deve essere utilizzato da un operatore, perciò necessita di un'interfaccia di comunicazione con esso, sia in input che in output. Per questo motivo, si è utilizzato un display LCD come interfaccia output, sul quale è possibile leggere la velocità istantanea di rotazione e la coppia fornita dal motore e quindi in uscita sull'albero motore.

Si utilizza anche un'interfaccia I2C, ovvero un adattatore per il display che permette di ridurre il numero di pin da collegare alla scheda di controllo.



Figura 97 - LCD con interfaccia I2C

L'interfaccia input è caratterizzata da un joystick che permette di muoversi in un menù visualizzato sul display: l'interfaccia permette di impostare la velocità di rotazione e il tempo della durata della rotazione utilizzando la levetta analogica; il pulsante digitale, invece, permette di confermare la scelta effettuata.



Figura 98 – joystick

6. Codice Arduino

La scheda Arduino è programmata attraverso un codice scrivibile direttamente sul pc e caricato tramite USB direttamente sulla scheda.

Per avere un quadro completo del funzionamento dello strumento, risulta necessario conoscere come opera la scheda e quindi come è composto il codice.

6.1. Definizione delle librerie e delle variabili

Prima di stendere il codice, è necessario introdurre le librerie utili a facilitare l'implementazione delle funzioni.

La libreria "PID_v1.h" è dedicata alla compilazione del controllo PID, mentre la libreria "LiquidCrystal_I2C.h" serve a interfacciarsi con lo schermo LCD, collegato attraverso il modulo I2C.

Sono inoltre definite tutte le variabili necessarie per le varie funzioni.

```
1 #include <PID_v1.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16,4);
4 #include <HX711.h>
5
6 HX711 cella(A2,A3);
7
8 #define JOYSTICK_X A0
9 #define JOYSTICK_Y A1
10 #define JOYSTICK_BUTTON 4
11 #define RETROILLUMINAZIONE 3
12 #define MOTORE 5
13 #define FRENO 6
14 #define BOOT_TIME 400
15 #define encoderZ 2
16 #define PWMmax 255
17 #define PWMmin 40 //bisogna settare in base al trasformatore//
18
19
20 int contatore = 0;
21 int SPEED = 0;
22 int TIME = 0;
23 int BUTTON = LOW;
24 unsigned long startTime=0;
25 float t1=0, dt=0;
26 float rpm=0;
27 float coppia=0;
28
29 float calibrazione_cella = -403; //bisogna calibrarla prima e inserire il valore corretto
30 float peso=0;
31 float ft=0;
32
33
34 float Ra=0.23; //resistenza di armatura
35 float k_fi=0.068; //costante di flusso motore
36
37 double Setpoint, Input, Output;
38 double Kp=0.001, Ki=1, Kd=0.00001; //da provare: 0.01 0.2 0.001
39 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
40 /*** Input: velocità letta da encoder; Setpoint: velocità impostata che vogliamo raggiungere;
41 ***/
42 /**Output: cosa cambia, cioè modifica l'impulso pwm, quindi la corrente
```

Figura 99 - codice Arduino: introduzione delle librerie e delle variabili

6.2. Void Setup

A questo punto, si procede con la stesura del “Void Setup”, cioè con la parte di codice che viene eseguita solamente la prima volta. Questa sezione ha il compito di inizializzare le porte della scheda.

```
44 void setup() {
45
46   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderZ), rpmCalc, RISING);
47   t1=micros();
48
49   pinMode(JOYSTICK_BUTTON, INPUT_PULLUP);
50   lcd.begin();
51   lcd.backlight();
52   pinMode(RETROILLUMINAZIONE, OUTPUT);
53   analogWrite(RETROILLUMINAZIONE, (PWMmax+PWMmin)/2);
54   pinMode(FRENO, OUTPUT);
55   pinMode(MOTORE, OUTPUT);
56
57   myPID.SetOutputLimits(PWMmin, PWMmax);
58   myPID.SetMode(AUTOMATIC);
59
60   cella.set_scale(); //inizializza la libreria
61   cella.tare();
62   cella.set_scale(calibrazione_cella);
63 }
```

Figura 100 - Codice Arduino: Void Setup

Il comando “attachInterrupt” ha il compito di interrompere la sequenza di codice ogni qualvolta viene acquisito un impulso dal pin impostato. In questo caso, ogni volta che l’encoder riceve un impulso, viene eseguita la funzione “rpmCalc”.

Infine, viene inizializzata la funzione legata al controllo PID.

6.3. Funzione calcolo della velocità

La funzione “rpmCalc” è legata all’Encoder e valuta in quanto tempo viene percorso un giro meccanico dell’albero:

```
52 void rpmCalc() {
53
54   if ((micros()-t1)>100) {
55     dt=micros()-t1;
56
57     t1=micros();
58     rpm=60000000/dt;
59   }
60 }
```

Figura 101 - Codice Arduino: calcolo velocità

6.4. Void Loop

Questa sezione del codice esegue le righe di comando in maniera ciclica, cioè ad ogni computazione della scheda Arduino, questa parte di codice viene eseguita continuamente.

```
62 void loop() {
63
64   while (contatore==0){
65     lcd.clear();
66     lcd.setCursor(5,0);
67     lcd.print("SPEED");
68     lcd.setCursor(2,2);
69     lcd.print(SPEED);
70     lcd.setCursor(7,2);
71     lcd.print("rpm");
72     lcd.setCursor(-2,3);
73     lcd.print("max 3200 rpm");
74
75     velocit ();
76
77     if (SPEED >= 0 and SPEED <= 3200){
78       lcd.clear();
79       lcd.setCursor(5,0);
80       lcd.print("SPEED");
81       lcd.setCursor(2,2);
82       lcd.print(SPEED);
83       lcd.setCursor(7,2);
84       lcd.print("rpm");
85       lcd.setCursor(-2,3);
86       lcd.print("max 3200 rpm");
87       delay(100);
88     }
89     else {
90       SPEED=0;
91       lcd.clear();
92       lcd.setCursor(0,0);
93       lcd.print("ERROR");
94       delay(1000);
95       velocit ();
96       BUTTON = !digitalRead(JOYSTICK_BUTTON);
97       if(BUTTON == HIGH){
98         contatore=1;
99       }
100   }
101   BUTTON = !digitalRead(JOYSTICK_BUTTON);
102   if(BUTTON == HIGH){
103     contatore=1;
104     delay(500);
105   }
106 }

109   while (contatore==1){
110     BUTTON=LOW;
111     lcd.clear();
112     lcd.setCursor(5,0);
113     lcd.print("TIME");
114     lcd.setCursor(2,2);
115     lcd.print(TIME);
116     lcd.setCursor(5,2);
117     lcd.print("sec");
118
119     tempo();
120
121     if (TIME >= 0 and TIME <= 60){
122       lcd.clear();
123       lcd.setCursor(5,0);
124       lcd.print("TIME");
125       lcd.setCursor(2,2);
126       lcd.print(TIME);
127       lcd.setCursor(5,2);
128       lcd.print("sec");
129       delay(100);
130     }
131     else {
132       TIME=0;
133       lcd.clear();
134       lcd.setCursor(0,0);
135       lcd.print("ERROR");
136       delay(1000);
137       tempo ();
138       BUTTON = !digitalRead(JOYSTICK_BUTTON);
139       if(BUTTON == HIGH){
140         contatore=2;
141       }
142     }
143     BUTTON = !digitalRead(JOYSTICK_BUTTON);
144     if(BUTTON == HIGH){
145       contatore=2;
146       delay(500);
147     }
148   }
```

Figura 102 – Codice Arduino: Void loop, parte 1

```

150   while(contatore==2){
151       BUTTON = LOW;
152       lcd.clear();
153       lcd.setCursor(0,0);
154       lcd.print("SPEED: ");
155       lcd.print(SPEED);
156       lcd.print(" rpm");
157       lcd.setCursor(0,1);
158       lcd.print("TIME: ");
159       lcd.print(TIME);
160       lcd.print(" sec");
161       lcd.setCursor(2,2);
162       lcd.print("OK?");
163       lcd.setCursor(-2,3);
164       lcd.print("YES<- ->NO");
165       delay(150);
166
167       int ASSE_X = analogRead(JOYSTICK_X);
168
169       if(ASSE_X < 400){
170
171           lcd.clear();
172           lcd.setCursor(0,0);
173           lcd.print("SPEED: ");
174           lcd.print(SPEED);
175           lcd.print(" rpm");
176           lcd.setCursor(0,1);
177           lcd.print("TIME: ");
178           lcd.print(TIME);
179           lcd.print(" sec");
180           lcd.setCursor(2,2);
181           lcd.print("OK?");
182           lcd.setCursor(-2,3);
183           lcd.print("YES<- NO");
184           delay(500);
185
186           contatore=3;
187
188       }
203   if(ASSE_X > 600){
204       lcd.clear();
205       lcd.setCursor(0,0);
206       lcd.print("SPEED: ");
207       lcd.print(SPEED);
208       lcd.print(" rpm");
209       lcd.setCursor(0,1);
210       lcd.print("TIME: ");
211       lcd.print(TIME);
212       lcd.print(" sec");
213       lcd.setCursor(2,2);
214       lcd.print("OK?");
215       lcd.setCursor(-2,3);
216       lcd.print("YES ->NO");
217       delay(500);
218
219       contatore=0;
220   }
221
222   }
223
224   while (contatore==3){
225       peso = cella.get_units();
226       if (peso<0) {
227           peso=0;}
228   }
229   avvio ();
230   }
231
232   while (contatore==4) {
233       BUTTON=LOW;
234       lcd.clear();
235       lcd.setCursor(3,1);
236       lcd.print("New test?");
237       delay(100);
238       BUTTON = !digitalRead(JOYSTICK_BUTTON);
239
240       if(BUTTON == HIGH){
241           SPEED=0;
242           TIME=0;
243           contatore=0;
244           startTime=0;
245           delay(200);
246       }
247   }
248   }

```

Figura 103 - Codice Arduino: Void Loop, parte 2

In questa parte di codice, viene eseguito il menu visualizzato a display. La logica consiste nell'aver un contatore che, in base al suo valore, fa visualizzare una determinata schermata sull'LCD.

Una volta acquisito il valore richiesto, l'LCD mostra la schermata successiva e il contatore aumenta il suo valore.

Nel caso in cui si inseriscano valori non accettabili oppure non si conferma la scelta effettuata, il codice riporta il menù alla schermata iniziale, in modo da reinserire i valori corretti.

In base alla schermata in cui ci si trova, vengono richiamate alcune funzioni che servono per l'acquisizione dei valori oppure per far eseguire determinate funzioni.

6.5. Settaggio della velocità e del tempo

Per acquisire il valore della velocità di rotazione e della durata di rotazione, intervengo due funzioni che richiamano l'utilizzo della levetta analogica del joystick:

```
1 void velocit() {
2
3   int ASSE_Y = analogRead(JOYSTICK_Y);
4
5   if (ASSE_Y < 400){
6     SPEED=SPEED+100;
7   }
8
9   if (ASSE_Y > 600){
10    SPEED=SPEED-100;
11  }
12 }
```

Figura 104 - Codice Arduino: acquisizione velocità

```
16 void tempo() {
17
18   int ASSE_Y = analogRead(JOYSTICK_Y);
19
20   if (ASSE_Y < 400){
21     TIME=TIME+5;
22   }
23
24   if (ASSE_Y > 600){
25     TIME=TIME-5;
26   }
27 }
```

Figura 105 - Codice Arduino: acquisizione tempo

6.6. Controllo motore

In questa parte di codice, viene alimentato il motore elettrico.

Appena viene alimentato l'elettrofreno, è necessario impostare la massima potenza per un tempo iniziale, in modo che venga permesso l'avviamento del rotore; successivamente, l'albero motore ruota per il tempo impostato e infine è interrotta la sua alimentazione, poco prima di diseccitare l'elettrofreno.

Nella fase di regime, viene computato il controllo PID della velocità istantanea, dal momento che risulta essere necessario in questa fase avere la velocità corretta.

```

31 void avvio() {
32
33   if (TIME==0){
34     contatore=4;
35   }
36   if (SPEED==0){
37     contatore=4;
38   }
39   else{
40     analogWrite(FRENO, PWMmax); //stacco freno
41     delay(200);
42     Setpoint = SPEED;
43     startTime = millis(); //timer dall'avvio
44
45     while (TIME*1000 >= (millis()-startTime) and (millis()-startTime) < BOOT_TIME){ //fase di avvio
46       analogWrite(MOTORE, PWMmax);
47     }
48
49     while (TIME*1000 >= (millis()-startTime) and (millis()-startTime) >= BOOT_TIME){ //funzionamento normale
50       int motorSpeed = map(SPEED,100,2000,PWMmin,PWMmax); //bisogna rimettere 3200 anzichè 2000//
51       analogWrite(MOTORE, motorSpeed);
52       Input = rpm;
53       myPID.Compute();
54       analogWrite(MOTORE, Output);
55     }
56
57     ft=peso*9.81;
58     lcd.clear();
59     lcd.setCursor(2,1);
60     lcd.print("RPM: ");
61     lcd.print(rpm);
62     lcd.setCursor(0,2);
63     lcd.print("N: ");
64     lcd.print(ft);
65     delay(500);
66
67   }
68
69   if (TIME*1000 < (millis()-startTime)) { //fase di arresto
70     analogWrite(MOTORE,0);
71     delay(500);
72     analogWrite(FRENO,0);
73     delay(250);
74     contatore=4;
75
76   }
77 }
78 }

```

Figura 106 - Codice Arduino: controllo motore

6.7. Acquisizione input da cella di carico

In questa parte di codice è acquisito il valore letto dalla cella di carico ed è restituito il valore della forza tangenziale agente sul provino meccanico.

La libreria Arduino permette di facilitare l'acquisizione del dato, che elabora la tensione entrante trasformandola in grammi.

Al primo avvio del Calotester, è necessario calibrare la cella di carico applicando un carico noto a priori; una volta ottenuto, il valore di calibrazione è inserito nel codice.

Successivamente, quando la prova è avviata, il nuovo valore ricevuto dalla cella di carico è elaborato in modo da ottenere la forza d'attrito tra provino e sfera.

```
224   while (contatore==3){           57   ft=peso*9.81;
225       peso = cella.get_units();   58       lcd.clear();
226       if (peso<0) {              59       lcd.setCursor(2,1);
227           peso=0;|                60       lcd.print("RPM: ");
228       }                           61       lcd.print(rpm);
229       avvio ();                   62       lcd.setCursor (0,2);
230   }                               63       lcd.print("N: ");
                                       64       lcd.print(ft);
                                       65       delay(500);|
```

Figura 107 - Elaborazione del segnale della cella di carico

7. Conclusioni

Il Calotester permette lo svolgimento accurato dei test tribologici, generando il cratere che dovrà successivamente essere misurato.

In questo prototipo si è voluto racchiudere diversi strumenti già presenti in commercio, ma che non possiedono tutte le caratteristiche di regolazione per variare i test, quali variare il peso normale applicato e il punto di contatto tra sfera e provino meccanico.

La realizzazione non è stata possibile a causa delle tempistiche, tuttavia questo documento tecnico ha lo scopo di essere una guida per poter realizzare lo strumento.