

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Sviluppo teorico e sperimentale  
di un perturbatore automatico  
per l'analisi del controllo posturale**



RELATORE:  
**Prof. Carlo Ferraresi**

CANDIDATO:  
**Oliviero Walter Pica**

CORRELATORI:  
**Prof.ssa Daniela Maffiodo**  
**Dr.Ing. Giovanni Gerardo Muscolo**  
**Ing. Carlo De Benedictis**

LUGLIO 2019



# Sommario

Il controllo dell'equilibrio del corpo è una abilità necessaria allo svolgimento delle attività quotidiane dell'uomo. Indipendentemente dallo stato di salute, un'alterazione di una posizione stabile può avere diverse cause e soprattutto diversi effetti. Per poter comprendere il comportamento e le reazioni del sistema di controllo posturale, diventa necessario individuare delle metodologie capaci di fornire misure quantitative che consentano di indagare in modo approfondito il controllo dell'equilibrio.

In letteratura si propongono diverse soluzioni che non riescono a rispondere in modo esaustivo alle innumerevoli questioni che emergono sullo studio della posizione dell'uomo, soprattutto se si vuole osservare il comportamento a sollecitazioni inaspettate e improvvise.

In questo scenario si inserisce un progetto ancora in corso nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino, in collaborazione con il Dipartimento di Neuroscienze dell'Università di Torino e il Dipartimento di Terapia Fisica dell'Università di Tel Aviv, che ha l'obiettivo di sviluppare un sistema di perturbazione che apra nuove strade di analisi, ovviando ai principali limiti delle altre soluzioni esistenti, proponendo un perturbatore impugnabile capace di impartire sollecitazioni imprevedibili e scalabili in qualunque parte del corpo del soggetto.

Il primo prototipo sviluppato era un dispositivo completamente manuale, economico e facilmente manovrabile con ridotta ripetibilità e controllabilità del colpo. Successivamente è stato realizzato un secondo prototipo, costituito da un cilindro pneumatico controllato in forza, che ha permesso di recuperare i limiti evidenziati dalla prima soluzione. Di contro, i profili di forza ottenuti con questo dispositivo sono influenzati dalla distanza dispositivo-bersaglio, dalla variabilità delle cedevolezza di operatore e soggetto e mostrano una bassa accuratezza.

Tutte queste considerazioni hanno evidenziato la necessità di individuare componenti più performanti e leggi di controllo più complesse.

Il seguente lavoro di tesi ha riguardato la realizzazione di un banco prova costituito dal dispositivo di perturbazione, da respingenti, creati su misura in laboratorio, che simulano le cedevolezze di operatore e paziente, e delle masse campioni che rappresentano il soggetto colpito.

In parallelo all'analisi sperimentale è stato sviluppato un modello in Matlab-Simulink che simulasse in maniera fedele quanto riprodotto dal sistema reale. Si è indagato su tre diverse tipologie di controllo: in anello aperto, in anello chiuso con controllo in forza e in anello chiuso con controllo in posizione; consentendo un primo confronto tra i diversi modelli. Quindi si è analizzato il comportamento di due tipologie di attuatori pneumatici a basso attrito, di valvole più compatte e con una tecnologia diversa da quelle del secondo prototipo, per concludere con la valutazione di differenti configurazioni del sistema e differenti distanze tra dispositivo e bersaglio.

A partire dal modello teorico sono stati svolti dei test sul banco per verificare i risultati simulati e individuare la soluzione ottimale da applicare al dispositivo di perturbazione nelle prove su soggetti. L'analisi di diverse configurazioni sul banco ha consentito anche di indagare sulla differenza tra un dispositivo vincolato ad una struttura, tipico delle soluzioni presentate in letteratura, e una versione imbracciata dall'operatore, che garantisce maggiore flessibilità e facilità di utilizzo.



# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>IX</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Stato dell'arte</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione generale . . . . .	1
1.2 Sistemi di controllo posturale . . . . .	2
1.3 Perturbatore PGAS . . . . .	4
<b>2 Dispositivo automatico per l'applicazione di forze impulsive</b>	<b>9</b>
2.1 Apparato sperimentale . . . . .	9
2.1.1 Attuatore pneumatico . . . . .	12
2.1.2 Guide lineari . . . . .	14
2.1.3 Cella di carico . . . . .	15
2.1.4 Trasduttori di posizione . . . . .	16
2.1.5 Sensore Laser . . . . .	16
2.1.6 Respingenti . . . . .	17
2.1.7 Valvole proporzionali in flusso . . . . .	20
2.1.8 Banco prova . . . . .	24
<b>3 Modello teorico del banco sperimentale</b>	<b>26</b>
3.1 Modello SIMULINK versione 1 . . . . .	26
3.2 Primo sviluppo del modello teorico, sistema vincolato . . . . .	35
3.2.1 Modello teorico del sistema svincolato . . . . .	47
3.3 Modello SIMULINK versione 2 . . . . .	51
3.3.1 Fase di approccio controllata in forza . . . . .	51

3.3.2	Modello del sistema svincolato con controllo in forza della fase di approccio . . . . .	61
3.3.3	Fase di approccio controllata in posizione . . . . .	73
3.3.4	Modello del sistema svincolato con controllo in posizione della fase di approccio . . . . .	83
3.4	Risultati modello teorico con cilindro SMC . . . . .	88
3.5	Variazione distanza perturbatore massa campione . . . . .	94
3.6	Analisi conclusiva del modello teorico . . . . .	100
<b>4</b>	<b>Sistema sperimentale</b>	<b>103</b>
4.1	Sistema di controllo sperimentale . . . . .	103
4.2	Sistema sperimentale con fase di approccio controllata in anello aperto	105
4.2.1	Sistema fisso . . . . .	105
4.2.2	Cilindro fisso e massa mobile . . . . .	118
4.2.3	Cilindro e massa mobile . . . . .	128
4.3	Sistema sperimentale con fase di approccio controllata in anello chiuso	136
4.3.1	Risultati controllo in forza . . . . .	136
4.3.2	Risultati controllo in posizione . . . . .	144
4.4	Individuazione dei valori di cedevolezza dei respingenti . . . . .	150
4.5	Analisi conclusiva del sistema sperimentale . . . . .	158
	<b>Conclusioni</b>	<b>162</b>
	<b>Appendice A Equazioni modello analitico e caratteristiche sensori</b>	<b>164</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>171</b>

# Elenco delle figure

1.1	Sistema di perturbazione con ostacolo . . . . .	2
1.2	Sistema di perturbazione con cavi . . . . .	3
1.3	Sistema di perturbazione multidirezionale . . . . .	4
1.4	Perturbatore manuale . . . . .	4
1.5	Prototipo PGAS . . . . .	6
1.6	Sistema di controllo prototipo PGAS . . . . .	7
2.1	Segnale di forza sviluppato dal sistema (a sinistra configurazione fissa, a destra configurazione impugnata) [7]. . . . .	10
2.2	Modello del pendolo inverso . . . . .	11
2.3	Schema banco prova . . . . .	12
2.4	Cilindro MetalWork ISO 15552 ULTRA-LOW FRICTION . . . . .	13
2.5	Cilindro SMC MQMLB25TFH-100D . . . . .	14
2.6	Guide lineari con carrello . . . . .	15
2.7	Cella di carico . . . . .	16
2.8	Potenziometro GEFran PZ-34-A-100 . . . . .	16
2.9	Sensore laser di distanza Banner Q4XTULAF300-Q8 . . . . .	17
2.10	Schema respingente . . . . .	18
2.11	Vista esplosa respingente . . . . .	19
2.12	Respingente . . . . .	20
2.13	Sezione valvola CKD 3AF . . . . .	21
2.14	Valvola LRWD2-34-2-A-00 . . . . .	22
2.15	Anello chiuso circuito elettrico/pneumatico . . . . .	22
2.16	Schermata LRxD Configurator . . . . .	23
2.17	CAD banco prova . . . . .	24
2.18	Banco prova reale . . . . .	25

3.1	Prima versione modello simulink . . . . .	27
3.2	Grafcet descrittivo . . . . .	28
3.3	Risultati modello teorico versione 1 . . . . .	31
3.4	Andamenti al variare del kp per sistema vincolato e soggetto ad onda quadra . . . . .	33
3.5	Andamenti errori al variare del kp, per riferimento ad onda quadra	33
3.6	Andamenti errori al variare del kp, per riferimento sinusoidale . . .	34
3.7	Risultati modello versione 1 rif. onda quadra, con nuove valvole . .	35
3.8	Risultati modello versione 1 rif. onda sinusoidale, con nuove valvole	36
3.9	Andamento impulso al variare del kp, modello con valvole CAMOZZI	37
3.10	Andamenti al variare del kp per il modello con valvole CAMOZZI .	38
3.11	Andamenti errore al variare del kp per il modello con valvole CAMOZZI	38
3.12	Fitting errore di tracking sul profilo di forza . . . . .	39
3.13	Risultato ottimale fitting errore di tracking . . . . .	39
3.14	Andamenti impulso al variare del kp per il modello con valvole CAMOZZI, riferimento sinusoidale . . . . .	40
3.15	Errore al variare del kp con valvole CAMOZZI, rif. sinusoidale . . .	41
3.16	Risultati fitting su errore di tracking con profilo di forza sinusoidale	41
3.17	Confronto tra diverse tensioni di alimentazione valvola posteriore (rif.onda quadra), fase di approccio . . . . .	42
3.18	Confronto tra diverse tensioni di alimentazione valvola posteriore (rif.sinusoidale), fase di approccio . . . . .	43
3.19	Impulso ed errore di tracking per diverse tensioni di alimentazione .	43
3.20	Diverse tensioni di comando valvola anteriore, fase di approccio . .	44
3.21	Diverse tensioni di comando valvola anteriore, fase di approccio . .	44
3.22	Particolare dell'overshoot che si ottiene per diverse tensioni di co- mando valvola . . . . .	45
3.23	Curva sinusoidale traslata . . . . .	46
3.24	Confronto tra diverse tensioni di comando della valvola posteriore, fase di approccio, con diversi segnali di riferimento . . . . .	46
3.25	Andamento impulso e durata per diversi valori di rigidità della massa impattata . . . . .	48
3.26	Risposta modello teorico al variare della rigidità della massa im- pattata . . . . .	48

3.27 Andamento impulso e durata per diversi valori di smorzamento della massa impattata . . . . .	49
3.28 Risposta modello teorico al variare dello smorzamento della massa impattata . . . . .	49
3.29 Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidezza della massa impattata . . . . .	50
3.30 Risposta modello teorico al variare delle cedevolezza . . . . .	50
3.31 Ramo del modello simulink per il controllo della forza . . . . .	52
3.32 Andamento errore per modello con approccio controllato in forza . .	52
3.33 Andamento errore per modello con approccio controllato in anello aperto . . . . .	53
3.34 Risultato modello teorico versione 2, fase di approccio controllata in forza . . . . .	53
3.35 Particolare picco di primo contatto, fase di approccio controllata in forza . . . . .	54
3.36 Confronto tra le due versioni del modello teorico . . . . .	54
3.37 Fitting per ridurre il max picco . . . . .	55
3.38 Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sul valore massimo .	56
3.39 Fitting $k_p$ e $k_i$ . . . . .	57
3.40 Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sui valori di $k_p$ e $k_i$ .	57
3.41 Risultato modello teorico versione 2 con riferimento sinusoidale . .	58
3.42 Confronto tra le due versioni del modello teorico, rif. sinusoidale . .	59
3.43 Andamento errore per le due versioni del modello con riferimento sinusoidale . . . . .	59
3.44 Andamento durata e impulso per diversi valori di smorzamento della massa impattata, modello con controllo forza . . . . .	61
3.45 Andamento durata e impulso per diversi valori di rigidezza della massa impattata, modello con controllo forza . . . . .	62
3.46 Risposta modello versione 2 al variare dello smorzamento e della rigidezza della massa impattata . . . . .	62
3.47 Andamento durata al variare della rigidezza della massa impattata .	63
3.48 Andamento impulso al variare della rigidezza della massa impattata	63
3.49 Risposta al variare della rigidezza della massa impattata . . . . .	64
3.50 Andamento durata al variare dello smorzamento della massa impattata	64

3.51	Andamento impulso al variare dello smorzamento della massa impattata . . . . .	65
3.52	Risposta al variare dello smorzamento della massa impattata . . . .	65
3.53	Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidità della massa impattata . . . . .	66
3.54	Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidità della massa impattata, rif. sinusoidale . . . . .	66
3.55	Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidità della massa impattata, riferimento sinusoidale, fase di approccio controllata in anello aperto . . . . .	67
3.56	Risposta al variare delle cedevolezza, riferimento ad onda quadra, fase di approccio controllata in forza . . . . .	67
3.57	Andamento risposta al variare delle cedevolezza, riferimento sinusoidale	68
3.58	Andamento tensioni per riferimento ad onda quadra per i due modelli	69
3.59	Confronto tra diversi $k_p$ del PID della fase di approccio . . . . .	70
3.60	Andamenti risposta per diversi $k_p$ del PID della fase di approccio .	71
3.61	Confronto tra diversi $k_i$ del PID della fase di approccio . . . . .	71
3.62	Andamenti risposta per diversi $k_i$ del PID della fase di approccio . .	72
3.63	Confronto tra diversi $k_p$ e $k_i$ del PID della fase di approccio . . . .	72
3.64	Andamenti risposta per diversi $k_p$ e $k_i$ del PID della fase di approccio	73
3.65	Ramo del modello simulink per il controllo della posizione . . . . .	74
3.66	Spostamento ideale stelo . . . . .	74
3.67	Andamento movimento stelo . . . . .	75
3.68	Fitting movimento stelo . . . . .	76
3.69	Spostamento stelo per diversi $k_p$ . . . . .	76
3.70	Spostamento stelo per diverse velocità . . . . .	77
3.71	Risultato modello teorico con controllo in posizione della fase di approccio . . . . .	77
3.72	Confronto tra le tre versioni del modello teorico . . . . .	78
3.73	Curva di primo tentativo e ottimale sul $k_p$ , con controllo in posizione	79
3.74	Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sul valore massimo, con controllo in posizione . . . . .	80
3.75	Curva di primo tentativo e ottimale del fitting su $k_p$ e $k_i$ . . . . .	81

3.76 Risultato modello teorico con riferimento sinusoidale e controllo in posizione in apporccio . . . . .	81
3.77 Confronto tra i tre diversi modelli con riferimento sinusoidale . . . .	82
3.78 Curva ottimale del fitting sul kp, controllo posizione e riferimento sinusoidale . . . . .	83
3.79 Andamenti impulso e durata al variare della rigidezza $k_2$ , con riferi- mento ad onda quadra . . . . .	83
3.80 Risposta al variare di $k_2$ , con riferimento onda quadra . . . . .	84
3.81 Andamenti impulso e durata al variare dello smorzamento $\beta_2$ , con riferimento ad onda quadra . . . . .	84
3.82 Risposta al variare di $\beta_2$ , con riferimento onda quadra . . . . .	85
3.83 Andamenti impulso e durata al variare della rigidezza $k_2$ , con riferi- mento sinusoidale . . . . .	85
3.84 Risposta al variare di $k_2$ , con riferimento sinusoidale . . . . .	85
3.85 Andamenti impulso e durata al variare dello smorzamento $\beta_2$ , con riferimento sinusoidale . . . . .	86
3.86 Risposta al variare di $\beta_2$ , con riferimento sinusoidale . . . . .	86
3.87 Andamenti impulso e durata al variare di $\beta_2$ e $k_2$ , con riferimento ad onda quadra . . . . .	87
3.88 Andamenti impulso e durata al variare di $\beta_2$ e $k_2$ , con riferimento sinusoidale . . . . .	87
3.89 Andamento risposta al variare delle cedevolezzae, fase di approccio controllata in forza . . . . .	88
3.90 Risposta del modello con fase di approccio controllata in anello aperto, riferimento ad onda quadra (250ms, $k_p=5$ ) . . . . .	89
3.91 Risposta del modello con fase di approccio controllata in anello aperto, riferimento sinusoidale ( $k_p=5$ ) . . . . .	90
3.92 Risposta del modello con fase di approccio controllata in forza, rife- rimento ad onda quadra (250ms, $k_p=2.9$ , $k_i=24.2$ ) . . . . .	91
3.93 Risposta del modello con fase di approccio controllata in forza, rife- rimento sinusoidale ( $k_p=5$ ) . . . . .	92
3.94 Risposta del modello con fase di approccio controllata in posizione, riferimento ad onda quadra (250ms, $k_p=3.1$ , $k_i=23.9$ , $k_{pOS}=0.7$ ) .	93

3.95	Risposta del modello con fase di approccio controllata in posizione, riferimento sinusoidale ( $k_p=5$ ) . . . . .	94
3.96	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra, $k_p=5$ , controllo anello aperto . . . . .	95
3.97	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale, $k_p=5$ , controllo anello aperto . . . . .	96
3.98	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra, $k_p=2.9$ $k_i=24.2$ , controllo in forza . . . . .	97
3.99	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale, $k_p=6.8$ , controllo in forza . . . . .	97
3.100	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra, $k_p=3.1$ $k_i=23.9$ , controllo in posizione . . . . .	98
3.101	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale, $k_p=6.5$ , controllo in posizione . . . . .	98
3.102	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra, $k_p=3.1$ $k_i=23.9$ , controllo in posizione, cilindro SMC . . . . .	99
3.103	Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale, $k_p=6.5$ , controllo in posizione, cilindro SMC . . . . .	100
4.1	Schema di controllo . . . . .	103
4.2	Schema di acquisizione dei segnali . . . . .	104
4.3	Configurazione sistema fisso . . . . .	106
4.4	Colpi con $k_p=5$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	106
4.5	Media 4 colpi $k_p=5$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	107
4.6	Risposta instabile con $k_p=5$ . . . . .	108
4.7	Colpi con $k_p=4.4$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	108
4.8	Media 8 colpi $k_p=4.4$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	109
4.9	Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale . . . . .	110
4.10	Colpi con $k_p=3.5$ e $k_i=35$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	110
4.11	Media 8 colpi $k_p=3.5$ e $k_i=35$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . . .	111
4.12	Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale e integrativo . . . . .	112
4.13	8 colpi con $k_p=5$ per onda sinusoidale . . . . .	112



4.14	Media 8 colpi $k_p=5$ per onda sinusoidale . . . . .	113
4.15	Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale per riferimento sinusoidale . . . . .	114
4.16	Colpi con $k_p=7$ per onda sinusoidale . . . . .	114
4.17	Media 8 colpi $k_p=7$ per onda sinusoidale . . . . .	115
4.18	Confronto risposta simulata e sperimentale con $k_p=7$ per riferimento sinusoidale . . . . .	116
4.19	Colpi con $k_p=6$ e $k_i=16$ per onda sinusoidale . . . . .	116
4.20	Media 8 colpi $k_p=6$ $k_i=16$ per onda sinusoidale . . . . .	117
4.21	Confronto risposta simulata e sperimentale con $k_p=6$ e $k_i=16$ per riferimento sinusoidale . . . . .	118
4.22	Configurazione con massa mobile . . . . .	118
4.23	Colpi con $k_p=3.5$ e $k_i=35$ per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile . . . . .	119
4.24	Media 7 colpi, $k_p=3.5$ e $k_i=35$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile . . . . .	119
4.25	Spostamento stelo e massa durante il colpo . . . . .	120
4.26	Colpi con $k_p=4$ e $k_i=40$ per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile . . . . .	121
4.27	Media 8 colpi, $k_p=4$ e $k_i=40$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile . . . . .	121
4.28	Somma algebrica movimento stelo e massa . . . . .	122
4.29	Colpi con $k_p=3.6$ e $k_i=40$ per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile, distanza 6cm . . . . .	123
4.30	Media 8 colpi, $k_p=3.6$ e $k_i=40$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile, distanza 6cm . . . . .	123
4.31	Confronto movimento massa per configurazione con massa mobile .	124
4.32	Risposta modello in configurazione con massa mobile, $k_p=6$ e $k_i=16$	125
4.33	Risposta modello in configurazione con massa mobile, $k_p=7$ e $k_i=16$	126
4.34	Risposta modello in configurazione con massa mobile, $k_p=6.5$ e $k_i=16$ , distanza 6cm . . . . .	126
4.35	Confronto movimento massa per configurazione con massa mobile e riferimento sinusoidale . . . . .	127
4.36	Cilindro svincolato . . . . .	128

4.37 Colpi con $k_p=3.5$ e $k_i=35$ per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato . . . . .	129
4.38 Media 8 colpi, $k_p=3.5$ e $k_i=35$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato . . . . .	129
4.39 Spostamento stelo e massa durante il colpo, terza configurazione . .	129
4.40 Spostamento cilindro e massa per onda quadra con $k_p=3.5$ e $k_i=35$	130
4.41 Colpi con $k_p=3.5$ e $k_i=35$ , distanza $dx=6cm$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato . . . . .	131
4.42 Media 8 colpi, $k_p=3.5$ e $k_i=35$ , distanza $dx=6cm$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato . . . . .	131
4.43 Spostamento stelo e massa durante il colpo, terza configurazione, distanza stelo-massa 6cm . . . . .	132
4.44 Spostamento cilindro e massa per onda quadra con $k_p=3.5$ e $k_i=35$ e distanza $dx=6cm$ . . . . .	132
4.45 Risposta sperimentale terza configurazione, riferimento sinusoidale .	133
4.46 Risposta media sperimentale terza configurazione, riferimento sinusoidale . . . . .	133
4.47 Somma algebrica spostamento cilindro e massa durante il colpo, terza configurazione, riferimento sinusoidale . . . . .	134
4.48 Confronto spost. cilindro e massa, terza configurazione, rif. sinusoidale	135
4.49 Spostamento massa, terza configurazione, riferimento sinusoidale . .	135
4.50 Spostamento cilindro, terza configurazione, riferimento sinusoidale .	135
4.51 Colpi con $k_p=5.8$ e $k_i=52$ per onda quadra da 250ms e 50N . . . .	137
4.52 Media 8 colpi $k_p=5.8$ e $k_i=52$ per onda quadra da 250ms e 50N . .	137
4.53 Confronto risposta sperimentale e teorica, per onda quadra con $k_p=5.8$ e $k_i=52$ . . . . .	138
4.54 Colpi con $k_p=15$ e $k_i=30$ per onda sinusoidale . . . . .	139
4.55 Media 8 colpi $k_p=12$ e $k_i=30$ per onda sinusoidale . . . . .	139
4.56 Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra, $k_p=6$ e $k_i=5$ . . . . .	140
4.57 Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra, $k_p=6.5$ e $k_i=31$ e distanza $dx=6cm$ . . . . .	141
4.58 Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale, $k_p=12$ e $k_i=30$ . . . . .	142

4.59 Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale, $k_p=12$ e $k_i=30$ e $dx=6\text{cm}$ . . . . .	143
4.60 Spostamento stelo . . . . .	144
4.61 Colpi con $k_p=6$ e $k_i=75$ per riferimento ad onda quadra . . . . .	145
4.62 Media 8 colpi $k_p=6$ e $k_i=75$ per riferimento ad onda quadra . . . . .	145
4.63 Colpi con $k_p=14$ e $k_i=70$ per riferimento sinusoidale . . . . .	146
4.64 Media 8 colpi $k_p=14$ e $k_i=70$ per riferimento sinusoidale . . . . .	147
4.65 Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra, $k_p=5.5$ e $k_i=55$ e distanza $dx=6\text{cm}$ . . . . .	148
4.66 Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale, $k_p=5.5$ e $k_i=55$ e distanza $dx=6\text{cm}$ . . . . .	149
4.67 Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in anello aperto . . . . .	151
4.68 Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in forza . . . . .	151
4.69 Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in posizione . . . . .	152
4.70 Confronto andamento spostamento massa al variare della distanza .	153
4.71 Confronto diretto sperimentale-simulato . . . . .	153
4.72 Confronto impulso sperimentale-simulato . . . . .	154
4.73 Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato . . . . .	154
4.74 Confronto spostamento massa al variare della distanza, contr.forza .	155
4.75 Confronto impulso sperimentale-simulato, contr.forza . . . . .	155
4.76 Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato, contr.forza . .	155
4.77 Confronto impulso sperimentale-simulato, contr.posizione . . . . .	156
4.78 Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato, contr.posizione	156
4.79 Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento cilindro . . . . .	157
4.80 Confronto impulso sperimentale-simulato, sistema svincolato . . . .	157
4.81 Risposte per diversi cilindri . . . . .	158
4.82 Risposte per differenti valvole . . . . .	159
4.83 Risposte per differenti tipologie di controllo, configurazione con mas- sa libera . . . . .	160
4.84 Risposte per differenti distanze con controllo in anello aperto . . . .	161
4.85 Risposte per differenti distanze con controllo in posizione . . . . .	161

A.1	Equilibrio stelo (A.11)	167
A.2	Equilibrio cilindro (A.12)	167
A.3	Calcolo forza esterna (A.13)	168
A.4	Equilibrio massa impattata	169
A.5	Caratteristica lineare Potenziometro	169
A.6	Caratteristica sensore laser	170
A.7	Caratteristica cella di carico	170

# Elenco delle tabelle

2.1	Componenti Cilindro MetalWork . . . . .	13
2.2	Componenti Cilindro SMC . . . . .	14
2.3	Componenti respingente . . . . .	19
2.4	Componenti valvola 3AF . . . . .	21
2.5	Componenti banco prova . . . . .	25
3.1	Parametri modello simulink . . . . .	30
3.2	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking del modello Versione 1	32
3.3	Parametri modificati delle valvole . . . . .	35
3.4	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.7 .	36
3.5	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.8 .	37
3.6	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta ottimale Figura 3.13 . . . . .	40
3.7	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.16 .	41
3.8	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.17 .	44
3.9	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking con segnale sinusoidale modificato, $k_p=5$ . . . . .	47
3.10	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.34 .	55
3.11	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.38 . . . . .	56
3.12	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.40 . . . . .	58
3.13	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva di Figura 3.41a . . . . .	60
3.14	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per $k_p$ ottimale, mo- dello ver.2 . . . . .	60

3.15	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.71 .	78
3.16	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale rispetto al $k_p$ migliore . . . . .	79
3.17	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.74 . . . . .	80
3.18	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.75 .	81
3.19	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.76 .	82
3.20	Calcolo impulso per Figura 3.78 . . . . .	83
3.21	Caratteristiche attuatori pneumatici . . . . .	88
4.1	Parametri sistema sperimentale vincolato, approccio controllato in anello aperto . . . . .	105
4.2	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.5 . . . . .	107
4.3	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.8 . . . . .	109
4.4	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.11 . . . . .	111
4.5	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.14 . . . . .	113
4.6	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.17 . . . . .	115
4.7	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.20 . . . . .	117
4.8	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.24 . . . . .	120
4.9	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.27 . . . . .	122
4.10	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.30 . . . . .	123
4.11	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.32 . . . . .	125
4.12	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per differenti contributi e distanza stelo-massa . . . . .	127

4.13	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per diversa distanza stelo-massa, per riferimento ad onda quadra e cilindro svincolato . .	131
4.14	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per diversa distanza stelo-massa e contributi PID, riferimento sinusoidale, terza configurazione . . . . .	134
4.15	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.52 . . . . .	138
4.16	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.55 . . . . .	140
4.17	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.57 . . . . .	141
4.18	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.58 . . . . .	142
4.19	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.59 . . . . .	143
4.20	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.62 . . . . .	146
4.21	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.64 . . . . .	147
4.22	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.65 . . . . .	148
4.23	Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.66 . . . . .	149
4.24	Valori di rigidezza e smorzamento per i tre differenti controlli . . . .	152
A.1	Parametri modello matematico . . . . .	164

# Capitolo 1

## Stato dell'arte

### 1.1 Introduzione generale

Il movimento umano è strettamente legato al controllo posturale e alla capacità corretta di gestire un disequilibrio. Porre l'attenzione sulle modalità con le quali un soggetto risponde ad eventuali variazioni rispetto ad una posizione stabile diventa di fondamentale importanza per la naturale vita del soggetto, ma anche per dare supporto allo specialista nella definizione di una giusta terapia riabilitativa per il paziente. Le cause che determinano una alterazione del comportamento posturale possono essere legate a patologie, traumi o alla vecchiaia; queste rendono difficoltose le attività quotidiane più semplici ma determinano un inevitabile aumento del rischio di cadute e probabilità di essere esposti a nuovi possibili traumi. Questi motivi sottolineano la necessità di poter conoscere il comportamento del soggetto quando viene alterata la sua condizione di equilibrio, per riuscire ad indagare in maniera dettagliata le sue reazioni e quantificare le prestazioni del sistema di controllo posturale.

Lo studio di dispositivi di controllo posturale nasce dall'esigenza di voler individuare delle tecniche nuove che possano sopperire ai limiti emersi dai classici approcci sperimentali esistenti. Innanzitutto vi sono pochi protocolli standardizzati (SOT, MCT, ADT [3]) che investigano sul comportamento del sistema di controllo posturale dell'uomo soggetto a stimoli esterni, e tutti offrono come unica tipologia di disturbo l'oscillazione della base di appoggio, determinata da una pedana di forza sulla quale è posizionato il paziente, e attraverso una alterazione visiva o una



traslazione/rotazione della base si perturba la condizione di equilibrio del soggetto. Quindi pensando alle cause più comuni che, nella quotidianità, alterano l'equilibrio del soggetto: urti, ostacoli sul percorso, ecc.; questi sistemi non risultano perfettamente rispondenti alle necessità reali, inoltre si è evidenziata la volontà di limitare gli ingombri e di rendere imprevedibile il punto di applicazione della perturbazione.

## 1.2 Sistemi di controllo posturale

La volontà di osservare il comportamento umano in presenza di eventi più comuni ha portato ad individuare e sperimentare nuovi metodi. Oltre alla possibile presenza di un ostacolo viene valutata anche una posizione del soggetto diversa da quella eretta in fase di inizio moto, o ancora l'azione di una perturbazione esterna.

Per quanto riguarda la presenza di ostacoli in condizioni di movimento, il sistema considerato è quello presentato in Figura 1.1, il soggetto è in movimento e lo studio si focalizza sull'atterraggio e l'appoggio del piede predisponendo in maniera nascosta diversi ostacoli. Per evitare la perdita dell'equilibrio, la persona deve correggere il movimento di recupero da un inciampo, modificando la traiettoria del piede. Queste risposte vengono valutate in termini di posizione dei piedi e di movimento angolare del corpo durante il recupero [4]

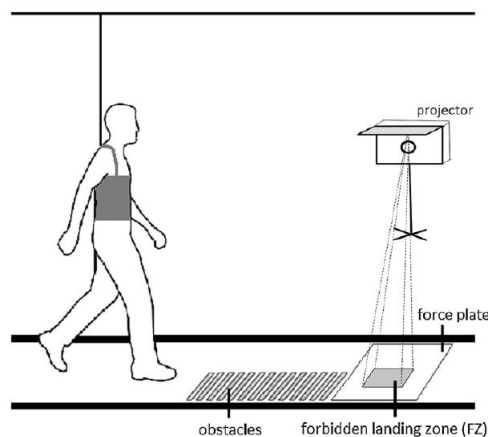


Figura 1.1: Sistema di perturbazione con ostacolo

Un'altra tipologia di prova ha introdotto come elemento aggiuntivo delle improvvise perturbazioni, posizionando il soggetto in posizione non eretta (Figura 1.2).

L'attenzione in questo caso viene posta proprio sull'effetto che urti improvvisi possano generare sull'equilibrio dell'utente, e di conseguenza la sua capacità di recuperare in termini di cinematica del tronco e attivazione dei muscoli della schiena.

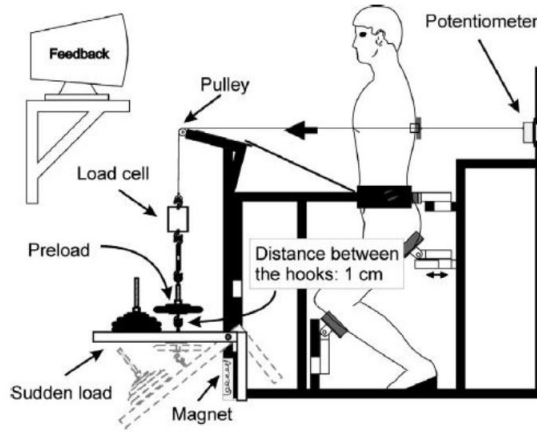


Figura 1.2: Sistema di perturbazione con cavi

Il soggetto è tenuto in posizione semi-seduta mediante opportune imbragature, all'interno di un sistema di perturbazione costituito da un sistema di cavi collegati a dei pesi che vengono rilasciati da chi esegue la prova per alterare la condizione di equilibrio. Attraverso una cella di carico ed un potenziometro connesso alla schiena si misura lo spostamento del soggetto [5].

L'applicazione di una perturbazione su un utente deve tenere in conto la variabilità legata ai diversi metodi con il quale può essere applicata, senza trascurare la prevedibilità del colpo. Quindi altri studi hanno cercato di sfruttare dei sistemi che consentissero degli spostamenti della superficie di appoggio in più direzioni e non predeterminabili (attraverso la pedana di forza). Un esempio è visibile in Figura 1.3 dove anche questo dispositivo è caratterizzato da un'imbragatura collegata a dei sistemi di pulegge, e attraverso il movimento di pesi consente di generare perturbazioni, ma questa rete di cavi è disposta in maniera tale da rendere imprevedibile la direzione della forza [6].

Gli approcci sperimentali proposti, come già anticipato, mostrano dei limiti in termini di ingombri e di applicazione di perturbazioni non prevedibili. Quest'ultimo aspetto è rilevante se si considera il rischio che il soggetto possa adottare delle strategie di controllo preventive che andrebbero ad alterare i risultati del test. Proprio sulla base di queste considerazioni si è voluto sviluppare un dispositivo capace di

impartire al soggetto una perturbazione con punto di applicazione, direzione ed intensità variabili dall'operatore.

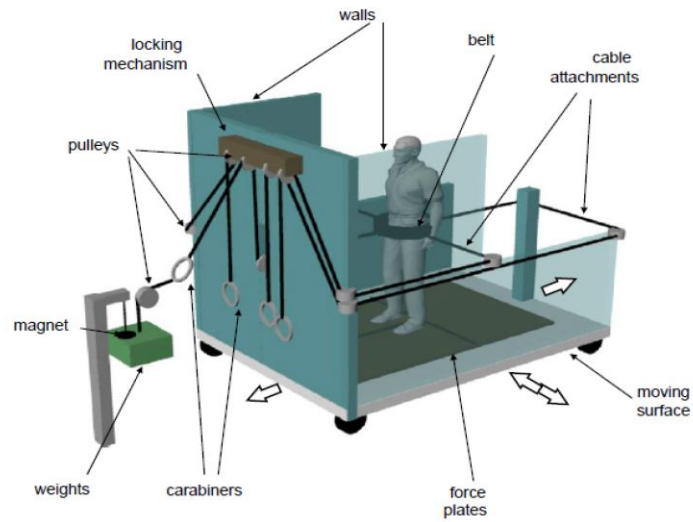


Figura 1.3: Sistema di perturbazione multidirezionale

### 1.3 Perturbatore PGAS

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino, in collaborazione con l'Università degli studi di Torino, e il Dipartimento di Terapia Fisica dell'Università di Tel Aviv, ha sviluppato un primo prototipo manuale: **Perturbation Generation Analysis System - PGAS** (Figura 1.4).



Figura 1.4: Perturbatore manuale

Questo è impugnato dall'operatore che, grazie alle ridotte dimensioni e alla sua maneggevolezza, riesce a scegliere autonomamente e liberamente il punto di applicazione del colpo, potendo variare anche la sua direzione e la sua intensità.

Il perturbatore manuale permette di ovviare alle criticità individuate negli altri sistemi analizzati, ma essendo comunque una soluzione economica, semplice e intuitiva per l'operatore, diventa difficoltoso ottenere un colpo ripetibile all'interno di un range definito. Di fatti analizzando i risultati delle prove sperimentali eseguite su soggetti con questo dispositivo, si è osservato come la sensibilità maggiore fosse legata alla variazione dell'impulso e non alla variazione di intensità del colpo. Per inciso con impulso si intende l'area sottesa dal segnale registrato durante il colpo, e con intensità si considera il massimo valore di perturbazione raggiunto.

Dal perturbatore manuale si è sviluppato un prototipo semiautomatico che garantisce la ripetibilità di colpi in termini di impulso e intensità, in modo da poter confrontare le diverse risposte alla sollecitazione, ed indagare in maniera approfondita l'entità del disturbo e la sua variazione in seguito ad interventi di correzione [7]. L'operatore continua a scegliere liberamente il punto di applicazione e direzione del colpo, considerando come unica sollecitazione esterna sul soggetto la forza di contatto tra dispositivo e corpo. Quindi tutti gli altri stimoli, come quelli visivi o uditivi, vengono eliminati per evitare delle variazioni dei risultati del test.

La durata, l'ampiezza e la direzione del colpo generato dal dispositivo possono essere variati a seconda del soggetto, agendo sulla forma d'onda del profilo di forza da imprimere e quindi sul valore di picco e di impulso.

Il dispositivo automatico può lavorare in due configurazioni diverse:

- **Fisso:** il perturbatore è connesso in maniera rigida ad un telaio, quindi è solidale con l'ambiente;
- **Impugnato:** l'operatore impugna il dispositivo attraverso opportune maniglie, introducendo un vincolo visco-elastico con l'ambiente;

La seconda configurazione se da un lato ha una maggiore semplicità di utilizzo, introduce delle incertezze sulla caratterizzazione del dispositivo andando ad influenzare negativamente le prestazioni del sistema di controllo e i risultati delle analisi.

In Figura 1.5 si osserva il prototipo PGAS composto da:

1. **Cilindro a doppio effetto**, MetalWork ISO 6432, diametro 25mm, corsa 120 mm;
2. **Due valvole proporzionali in flusso**, CKD, 3AF2, output analogico 0-10V, range di pressione 0-0.97Mpa e relative schede di controllo (CKD APC-23);
3. **Cella di carico uniassiale**, Dacell UMM, 1kN, condizionatore DEWETRON, DEWE-RACK-4;
4. **Interfaccia** ricoperta da uno strato di 20mm di materiale sintetico (polietilene);
5. **Due impugnature in alluminio** per manovrare il dispositivo;
6. **Pulsante di azionamento**;

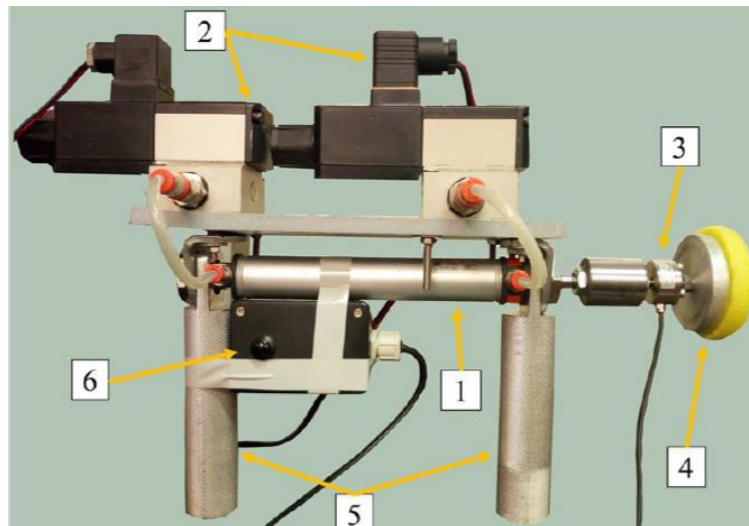


Figura 1.5: Prototipo PGAS

Il sistema è completato da un compressore d'aria ed un riduttore di pressione, un sistema real-time (dSPACE), una scheda multicanale A/D DS2002 per l'acquisizione dei segnali e una scheda D/A DS2001 per la generazione del controllo. Le schede vengono programmate in ambiente Matlab-Simulink e tramite il software ControlDesk (dSPACE).

Il dispositivo automatico, come detto, consente di controllare la perturbazione, quindi si definiscono delle specifiche che il profilo di forza generato deve avere: una

durata dell'ordine di 250-500ms, e una ampiezza sui 50N. Data la correlazione migliore tra la risposta del soggetto e l'impulso di forza rispetto al picco di forza, è stato scelto l'impulso insieme alla sua durata come parametri di interesse nel controllo del dispositivo.

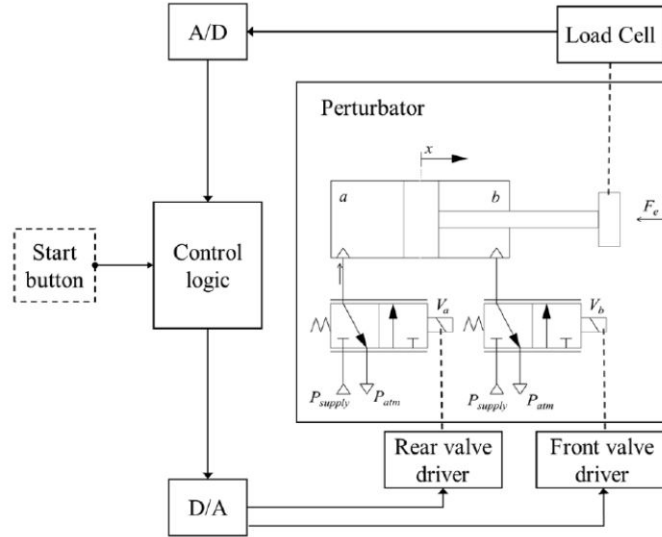


Figura 1.6: Sistema di controllo prototipo PGAS

Lo schema di controllo realizzato gestisce il comando delle due valvole a tre vie connesse con le camere del cilindro. Le valvole proporzionali in flusso consentono di migliorare la precisione, abbassando il livello di rumore e vibrazione durante l'operazione e permettendo un accurato controllo della perturbazione. Le valvole scelte sono appropriate all'utilizzo, considerando anche le ridotte dimensioni dell'attuatore e le dinamiche richieste dal sistema. Per ottimizzare la dinamica del circuito pneumatico le valvole sono state posizionate su una base solidale all'attuatore, riducendo la lunghezza dei tubi di collegamento. Per rendere più stabile la cella si è utilizzato un supporto metallico fissato allo stelo. La cella non è multiassiale al fine di semplificare l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, ma è necessario evitare la flessione dello stelo della cella di carico durante l'applicazione della sollecitazione. All'estremità dello stelo è stato posto un cilindro di alluminio ed un interfaccia di polietilene per aumentare la superficie di contatto e ridurre i possibili fastidi al soggetto colpito. Le prestazioni sono limitate dall'utilizzo di un cilindro pneumatico

non a basso attrito, il che determina il fenomeno dello stick-slip tra stelo e camicia, inficiando sulle prestazioni e sul tracciamento del profilo di forza.

## Capitolo 2

# Dispositivo automatico per l'applicazione di forze impulsive

### 2.1 Apparato sperimentale

Il prototipo PGAS ha consentito di ovviare ai diversi aspetti limitanti che gli altri metodi di analisi del comportamento del sistema posturale avevano mostrato. Questo dispositivo, testato anche su pazienti, consente di scegliere un qualsiasi punto di applicazione, riuscendo ad avere un controllo real-time dello stimolo. Si ha la possibilità di applicare diversi profili di forza, ponendo quindi l'attenzione sull'intensità piuttosto che la durata dell'impulso. I risultati mostrano una buona ripetibilità del colpo e un inseguimento accettabile del profilo di forza ottenuto rispetto al riferimento, benché si evidenzia una dinamica non molto veloce. Inoltre nel caso del sistema imbracciato si ha anche una dipendenza dalla distanza iniziale del soggetto. La maggior parte degli aspetti negativi emersi suggeriscono di individuare un sistema di controllo più robusto che possa ad esempio controllare la velocità del pistone nelle diverse fasi che caratterizzano il ciclo di lavoro.

Proprio sulla base di questi elementi riscontrati sul prototipo è iniziata una attività di studio su un banco sperimentale che potesse replicare in maniera fedele quanto accade nel test clinico, ma con l'intento di poter testare la capacità di ottenere un profilo di forza adeguato, e riuscire a studiare il valore e la durata di un impulso, quindi cercare di ottimizzare gli aspetti critici dello studio biomedico.



Il primo aspetto considerato è la presenza di un operatore e di un soggetto colpito, questi introducono due cedevolezza che influiscono inevitabilmente sulla giusta esecuzione della prova, e in effetti i risultati ottenuti mostrano una sostanziale differenza di comportamento tra le due configurazioni (Figura 2.1).

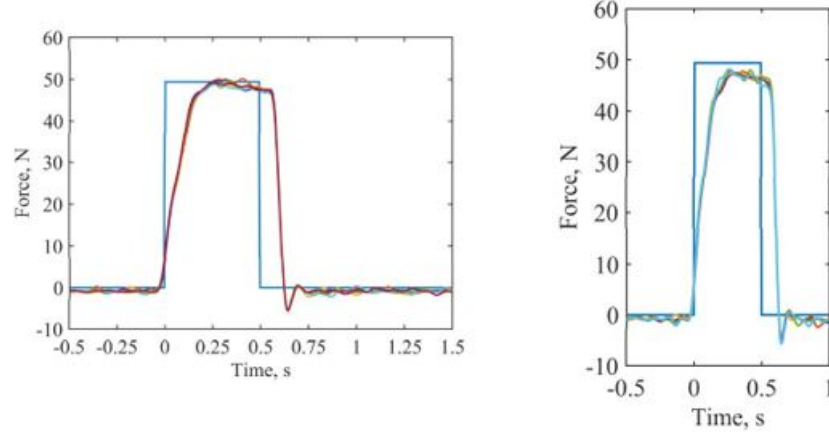


Figura 2.1: Segnale di forza sviluppato dal sistema (a sinistra configurazione fissa, a destra configurazione impugnata) [7].

Le due cedevolezza introducono delle variabilità nel modello, cedevolezza che variano anche al variare dell'operatore e del soggetto. Quindi nell'ottica di oggettivare la prova rendendola il meno dipendente da chi esegue il test, risulta necessario tener conto nel banco di questi elementi.

Sicuramente l'apparato sperimentale non considera tutte le variabili che si evidenziano nell'applicazione pratica. In primo luogo il movimento è ridotto alla sola traslazione orizzontale, questo non è tanto limitante nella parte dell'operatore, considerando che la stessa cella di carico richiede un posizionamento perfettamente ortogonale al corpo impattato, per evitare flessioni dello stelo e alterare la misura di forza, ma è molto più restrigente nella modellazione del corpo impattato.

In prima approssimazione, la biomeccanica di un corpo in posizione eretta viene modellata come un *pendolo inverso* a singolo segmento, incernierato alla caviglia. In questo modo si riduce un complesso sistema di controllo a più gradi di libertà ad un problema ad un solo grado di libertà. Questa semplificazione consente di avere un modello gestibile analiticamente, in Figura 2.2 la massa  $m$  è concentrata nel centro di massa  $G$  (CoM), a distanza  $l$  dal centro articolare della caviglia e

inclinato in avanti di un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale. Sul corpo agiscono la forza di gravità, che tende a far cadere il corpo, la forza di inerzia e la reazione vincolare con il terreno che invece tentano di ripristinare l'equilibrio.

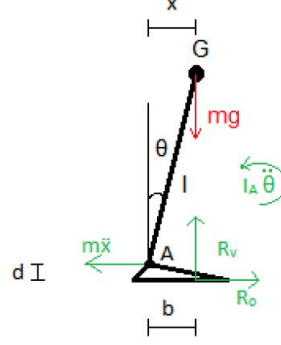


Figura 2.2: Modello del pendolo inverso

Dal sistema di equazioni risolutive (vedi Appendice A) si ricava che l'accelerazione del CoM è proporzionale alla distanza tra la proiezione del CoM ed il centro di pressioni. Il sistema risulta in equilibrio statico solo se  $x = b$ , quindi se la coordinata anteroposteriore dei centri di massa e quella del punto di applicazione della reazione vincolare al terreno (CoP) coincidono.

Un'ulteriore semplificazione consiste nel valutare una risposta puramente passiva della reazione dell'uomo al disturbo esterno. Il corpo viene considerato come una massa traslante lungo la direzione della forza applicata dal cilindro.

La realizzazione del sistema è consistita nella scelta dei componenti più adeguati, con un occhio alla possibilità di sfruttarli su una successiva versione del perturbatore automatico, qualora mostrino effettivi miglioramenti di funzionamento. Il sistema rappresentato in Figura 2.3 è composto da un cilindro pneumatico  $M_1$  comandato da due elettrovalvole proporzionali in flusso ( $V_a$  e  $V_b$ ). La cedevolezza dell'operatore è realizzata mediante un'impedenza meccanica ( $k_1$  e  $\beta_1$ ), consentendo la traslazione del cilindro attraverso dei carrelli su due guide lineari parallele. La massa  $M_2$  simula il soggetto impattato, anch'essa viene vincolata al terreno mediante un carrello scorrevole e un'impedenza meccanica ( $k_2$  e  $\beta_2$ ). Si osserva una terza impedenza meccanica, questa considera l'interfaccia stelo-massa, le cui caratteristiche sono legate al materiale plastico utilizzato (polietilene).

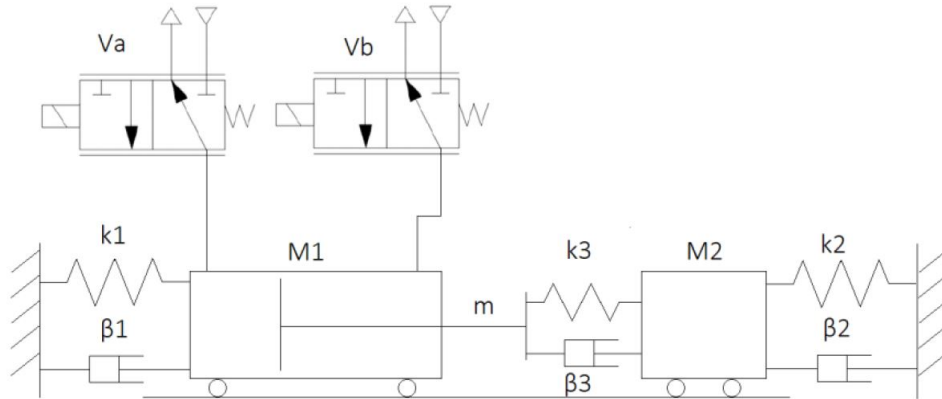


Figura 2.3: Schema banco prova

### 2.1.1 Attuatore pneumatico

La scelta dei componenti ha considerato sempre l'applicazione clinica, quindi anche a livello dimensionale si è ragionato su un rapporto di scala, che consentisse di estendere i risultati al caso reale. La scelta di utilizzare un attuatore pneumatico è legato principalmente al funzionamento semplice e affidabile, alla possibilità di raggiungere velocità di movimento lineare elevate (fino a  $4 \frac{m}{s}$ ) e alla semplice regolazione di forza e di velocità [9]. Per migliorare ulteriormente il funzionamento si è pensato di integrare un cilindro a basso attrito, questi si differenziano dai cilindri classici perché realizzano un moto privo di forze di attrito. Si è optato per due diverse tipologie, entrambi riducono al minimo l'attrito tra pistone e camicia, ma con due tecnologie differenti. La prima soluzione è un cilindro a doppio effetto MetalWork ISO 15552 ultra-low friction, nel quale il pistone è a contatto con la camicia tramite una guarnizione in NBR (Nitrile Butadiene Rubber), uno dei materiali più comuni nelle guarnizioni, e un anello guida in tecnopolimero speciale.

Le dimensioni principali sono:

- **Corsa:**  $120mm$ ;
- **Diametro stelo:**  $12mm$ ;
- **Diametro pistone:**  $32mm$ ;

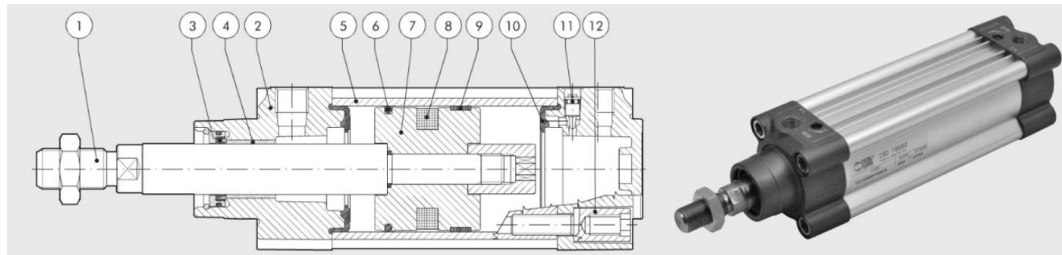


Figura 2.4: Cilindro MetalWork ISO 15552 ULTRA-LOW FRICTION

N°	COMPONENTI
1	STELO PISTONE
2	TESTA CILINDRO
3	GUARNIZIONE STELO: NBR
4	BOCCOLA
5	CILINDRO
6	GUARNIZIONE PISTONE: NBR
7	PISTONE
8	MAGNETE
9	ANELLO GUIDA
10	BUFFER + O-rings statico: NBR
11	AMMORTIZZO INTERNO
12	VITI DI MONTAGGIO

Tabella 2.1: Componenti Cilindro MetalWork

La seconda soluzione riguarda il cilindro SMC MQMLB25TFH-100D la cui struttura con tenuta metallo su metallo garantisce un'ulteriore riduzione della forza di attrito, i valori di azionamento sono prossimi a pressioni di 0.005 MPA. Le dimensioni principali sono:

- **Corsa:** 100mm;
- **Diametro stelo:** 10mm;
- **Diametro pistone:** 25mm;

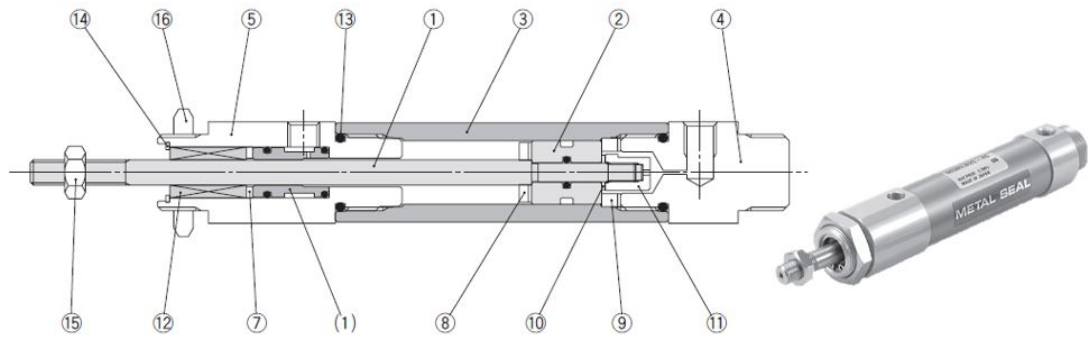


Figura 2.5: Cilindro SMC MQMLB25TFH-100D

N°	COMPONENTI
1	STELO
2	PISTONE
3	TUBO
4	TESTA POSTERIORE
5	TESTA ANTERIORE
6	STELO
7	SEDE
8	PARACOLPI A
9	PARACOLPI B
10	PARACOLPI C
11	DADO
12	GUIDA A SFERE
13	O-ring
14	SEEGER
15	DADO D'ESTREMITA' STELO
16	DADO DI MONTAGGIO

Tabella 2.2: Componenti Cilindro SMC

### 2.1.2 Guide lineari

Per consentire la movimentazione del cilindro e della massa impattata e simulare le loro cedevolezza sono state predisposte delle opportune guide lineari sulle quali, attraverso dei carrelli, potessero scorrere liberamente. Naturalmente la cedevolezza viene introdotta anche attraverso una rigidità e uno smorzamento relativi ai soggetti coinvolti. Il grado di libertà che viene concesso permette di osservare il

movimento che scaturisce dal contatto tra i due elementi.

Il banco è provvisto di due guide lineari di lunghezza pari a 1000mm disposte su un profilo in alluminio, la scelta è ricaduta sul modello C-SHR28-1000-B4, specifico per carichi pesanti. Il componente scelto è capace di sostenere carichi dinamici dell'ordine dei 5kN, così da permettere l'utilizzo di masse di diversa entità. I carrelli sono provvisti di un sistema di lubrificazione, così da poter garantire sempre il giusto grado di resistenza allo scorrimento.



Figura 2.6: Guide lineari con carrello

Per ognuna delle due guide vi sono 4 carrelli, sui quali vengono disposte delle piastre in acciaio che permettono una corretta collocazione degli elementi mobili del banco. Un ulteriore vantaggio è dato dal sistema a ricircolo di sfere che garantisce un elevato rendimento e durata grazie all'elevata resistenza all'usura, senza trascurare la significativa riduzione dell'attrito fra le parti in contatto.

### 2.1.3 Cella di carico

La cella di carico utilizzata è della stessa tipologia presente nel perturbatore PGAS, è un modello da 50kgf. Questa è un trasduttore di tipo resistivo e nel banco rileva la forza esercitata dallo stelo sulla massa impattata durante l'urto. Attraverso questo sensore viene realizzato il controllo forza in anello chiuso.

il guadagno statico ottenuto in seguito a caratterizzazione con alcune masse note è di  $94.33 \frac{N}{V}$ .



Figura 2.7: Cella di carico

### 2.1.4 Trasduttori di posizione

La realizzazione di questo banco prova vuole poter analizzare in maniera approfondita tutto ciò che accade durante la fase di perturbazione, monitorando anche le altre fasi che costituiscono il completo ciclo di lavoro. Quindi oltre alla cella di carico che rileva il valore di forza applicato, si vogliono conoscere i diversi spostamenti che si determinano. In particolare le traslazioni che nascono in seguito all'impatto vengono rilevate mediante due trasduttori rettilinei di posizione potenziometrici a corpo cilindrico. Il modello individuato è il PZ-34-A-100 prodotto da GEFRAN, con corsa di 100mm e uscita analogica.



Figura 2.8: Potenzimetro GEFRAN PZ-34-A-100

Da prove di caratterizzazione si è ottenuto un valore di guadagno statico pari a  $0.1 \frac{V}{mm}$ . In appendice A è visibile la caratteristica lineare ottenuta.

### 2.1.5 Sensore Laser

Il sistema è stato provvisto anche di un sensore di distanza senza contatto per misurare la distanza tra l'attuatore ed il soggetto e la posizione dello stelo durante le fasi del colpo. Questo sensore permette di mantenere sempre la stessa posizione



Questo è stato scelto sulla base dei ridotti tempi di risposta in uscita (1.5ms) e del range di rilevamento coerente con l'applicazione (25 - 300mm), in particolare attraverso la modalità di teach è stato possibile impostare la distanza minima e massima di rilevamento a cui associare l'uscita analogica in volt nel range 0-10V. Date anche le caratteristiche di versatilità e robustezza, nonché la capacità di fornire una misurazione continua di obiettivi diversi, da oggetti scuri a riflettenti, il suo utilizzo può estendersi anche all'applicazione clinica. È stato necessario applicare all'estremità dello stelo un disco di diametro 10cm come riferimento per il sensore, vincolato alla piastra dell'attuatore.

Anche per il sensore laser è stata effettuata una caratterizzazione, il valore di guadagno statico ottenuto è di  $0.1 \frac{V}{mm}$ .

Le cedevolezzae introdotte nel sistema, rappresentate nel modello analitico (Figura 2.3) da due coppie di molle e smorzatori in parallelo, sono state riprodotte nel sistema reale con due respingenti. Questi sono stati realizzati su misura nel laboratorio del dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, per rispondere alle



caratteristiche richieste dall'applicazione. In particolare, a partire dalle prove sui pazienti, si è considerato uno spostamento massimo del centro di massa di 3cm e di conseguenza si è assunto questo come specifica di progetto del respingente, al quale si deve garantire una corsa massima in compressione e trazione per consentire questo spostamento. Inoltre si è predisposto un sistema di regolazione manuale per avere la possibilità di variare rigidità e smorzamento.

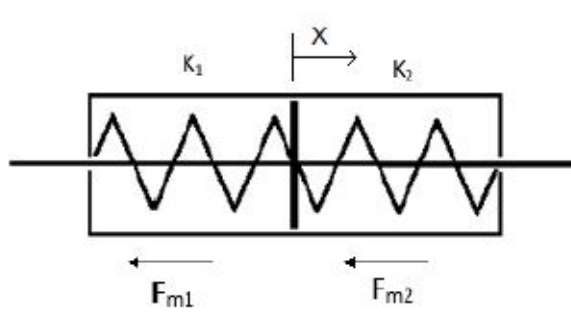


Figura 2.10: Schema respingente

Dallo schema di Figura 2.10 si osserva la presenza di due molle in parallelo ( $K_1$  e  $K_2$ ), sottoposte alla stessa deformazione determinata dallo spostamento  $x$  del pistoncino interno. Le forze elastiche esplicitate dalle due molle soggette allo spostamento  $x$  agiscono nel verso riportato in figura, quindi la molla 1 è in trazione e la 2 in compressione, determinando lo stesso verso delle forze. Per assicurare il continuo contatto tra le molle e gli elementi del respingente è necessario precomprimerle prima di inserirle nel componente, quindi significa che la differenza tra la lunghezza della molla a riposo e la sua lunghezza in condizioni precomprese deve essere maggiore del movimento previsto dallo stelo. In caso contrario si potrebbero verificare condizioni di perdita di contatto, ad esempio nel momento in cui la molla allungandosi oltre il suo stato di compressione raggiunga la lunghezza a riposo, perderebbe il contatto con il pistoncino interno, e non verrebbe più esercitata nessuna forza di reazione.

Considerando l'utilizzo di due molle uguali, la rigidità complessiva è data da  $K = K_1 + K_2$  e di conseguenza  $K_1 = K_2 = \frac{K}{2}$ . In Figura 2.11 si mostra una vista esplosa del modello CAD del respingente realizzato:

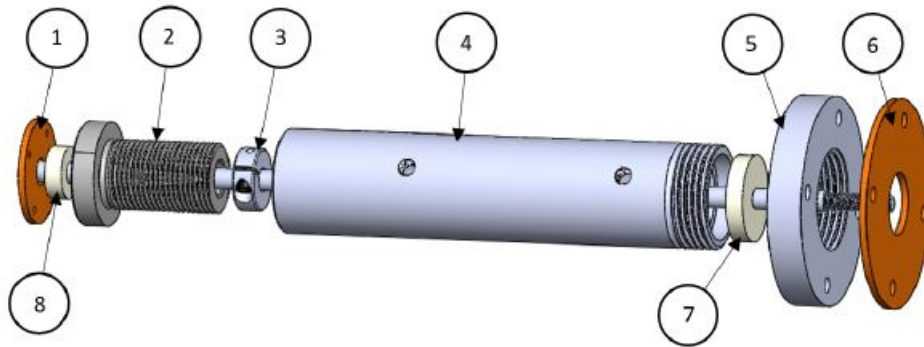


Figura 2.11: Vista esplosa respingente

N°	COMPONENTI
1	COPERCHIO VITE
2	VITE DI REGOLAZIONE
3	GHIERA
4	CORPO CILINDRICO
5	FLANGIA
6	COPERCHIO FLANGIA
7	RONDELLA DI NYLON CILINDRO
8	RONDELLA DI NYLON VITE

Tabella 2.3: Componenti respingente

Le due molle si trovano all'interno del corpo cilindrico (4) e sono separate dalla ghiera (3) che funge da pistone interno e tenute da un lato dalla vite di regolazione (2) e dall'altro dalla rondella di nylon del cilindro (7). La vite, oltre ad evitare la fuoriuscita della molla, consente di regolare la rigidità del respingente modificando il precarico applicato alle molle. Il cilindro, infatti, è filettato per permettere l'avvitamento della vite per tutta la sua lunghezza. Sul corpo cilindrico di lunghezza pari a 130mm, sono presenti due fori M5 che consentono il collegamento di due tubi e una resistenza pneumatica tra essi, per regolare lo smorzamento dell'aria creato dallo scorrimento dello stelo. Lo stelo ha una lunghezza tale da consentire lo spostamento di 3cm, sia in fase di uscita che di rientro, senza mai perdere il contatto con le due boccole in nylon. La sua estremità è stata filettata in modo da permettere il collegamento con le piastre ad L solidali al piano del cilindro e della massa impattata.

Le rondelle in nylon sono necessarie per mantenere in posizione corretta lo stelo e

ridurre al minimo l'attrito durante lo strisciamento. La loro sede è stata ottenuta tramite tornitura delle superfici interne del corpo cilindrico e della vite di regolazione, realizzando uno spallamento su cui mandarle in battuta, mentre dall'altro lato vengono bloccate tramite dei coperchi (1,6) avvitati sulla vite e sulla flangia (5). Questa viene avvitata sul corpo cilindrico, e consente di fissare il respingente alle piastre newport, solidali al profilo di base.

Per studiare il banco in diverse condizioni di impedenza meccanica, quindi per osservare gli effetti al variare dell'operatore e del soggetto impattato, sono state prese in considerazione tre diverse tipologie di molle:

- $K = 0.72 \frac{N}{mm}$ , lunghezza libera  $94mm$  ;
- $K = 1.34 \frac{N}{mm}$ , lunghezza libera  $93.5mm$ ;
- $K = 3.61 \frac{N}{mm}$ , lunghezza libera  $85.5mm$ ;



Figura 2.12: Respingente

### 2.1.7 Valvole proporzionali in flusso

Le valvole utilizzate nel prototipo PGAS sono delle valvole proporzionali in flusso modello 3AF della CKD, già presenti in laboratorio. Queste elettrovalvole, di cui si riporta una sezione in Figura 2.13, sono a tre vie e due posizioni, funzionano con una tensione di comando da 0 a 10V per cui si individua una condizione di valvola chiusa per un valore di tensione di 5V e un comportamento in scarico da 0 a 5V e

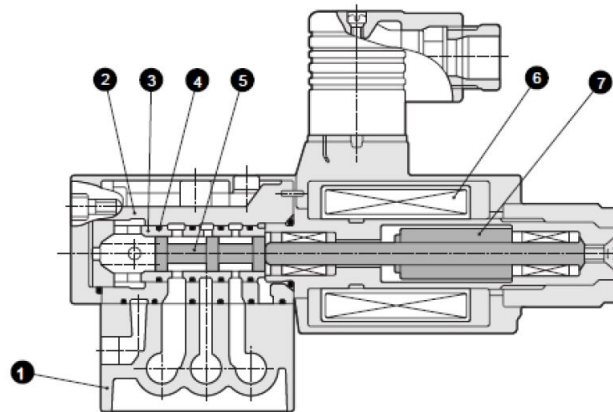


Figura 2.13: Sezione valvola CKD 3AF

in carico da 5 a 10V. La scheda di condizionamento è esterna e permette di regolare i valori di zero e gain tramite viti di regolazione.

N°	COMPONENTI
1	SUB-PLATE
2	CORPO
3	INVOLUCRO
4	O-RING
5	CASSETTO
6	BOBINA STAMPATA
7	ARMATURA

Tabella 2.4: Componenti valvola 3AF

In una prima versione del banco sono state poste queste stesse valvole ma per migliorare il funzionamento e facilitare anche la manovrabilità del sistema imbracciato si è optato per delle nuove valvole. Il modello scelto è la serie LR della CAMOZZI, in particolare il modello LRWD2-34-2-A-00, queste sono servovalvole 3/3 vie ad azionamento diretto per il controllo della portata. Presentano un design molto compatto, che consente di ridurre notevolmente gli ingombri.

La scheda elettronica di controllo è integrata direttamente nel corpo della valvola, e la sua configurazione può essere effettuata con una connessione USB. La caratteristica più interessante è legata all'elemento che definisce la condizione di lavoro della valvola, nello specifico presenta un sistema basato sul principio della spola rotante a tenuta metallo su metallo, con controllo elettronico della posizione



Figura 2.14: Valvola LRWD2-34-2-A-00

a circuito chiuso. Il controllo è realizzato mediante un PID che regola un controllo in PWM, il segnale di feedback necessario a chiudere l'anello può essere acquisito e utilizzato per conoscere la posizione angolare della spola.

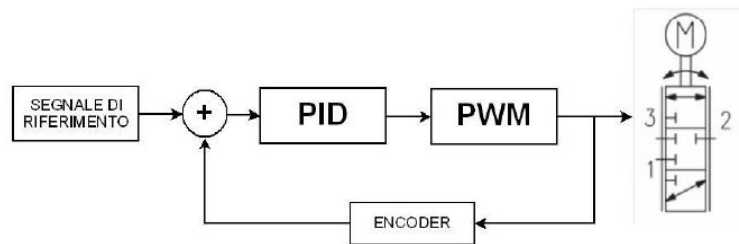


Figura 2.15: Anello chiuso circuito elettrico/pneumatico

Attraverso la configurazione eseguibile tramite PC è possibile agire su diversi aspetti di funzionamento della valvola (Figura 2.16), oltre ad effettuare alcune impostazioni si ha la possibilità di ricevere informazioni dalla valvola stessa.

Il primo parametro di interesse è il formato del segnale, questo viene scelto come nel caso della valvola 3AF pari a 0-10V, e rispetto a questo, in maniera proporzionale, viene fornita anche la posizione angolare della spola. Anche in questo caso si ha un comportamento di valvola aperta per un segnale superiore al 50% del f.s. e quindi si realizza il caricamento della camera del pistone, e un collegamento a scarico con un segnale inferiore al 50% del f.s., con segnale pari al 50% del f.s. le tre vie sono chiuse escludendo tutti i passaggi di aria dalla valvola.

Per la servovalvola serie LRWD non è possibile modificare il tipo di PID dell'anello chiuso di controllo della posizione della spola, dato di default come PID medio. Un altro importante frame sul quale si può agire è quello reattivo alla posizione

che deve assumere la valvola in condizioni di mancata alimentazione, questa non deve intendersi come una funzione di sicurezza, ma consente di mettere a scarico la valvola o chiudere ogni via. È possibile impostare il comportamento assunto nel caso di errore termico, quindi in presenza di un valore di temperatura che può danneggiare il motore della servovalvola. Naturalmente una condizione di questo tipo può determinare un deterioramento delle prestazioni in termini di portata. La soluzione scelta è **permanent** in modo tale da mantenere la limitazione anche per valori al disotto del limite impostato e disattivare la protezione unicamente togliendo l'alimentazione.

I frame più rilevanti sono sicuramente quelli relativi all'impostazione del range della grandezza regolata e del set point. Attraverso "**Setting Set Point Range**" è possibile limitare la portata della valvola ad un valore inferiore al massimo, pur controllandola con un segnale di riferimento analogico che copre l'intero range. Discorso analogo può essere effettuato per il "**Setting Flow Range**", in questo caso è possibile limitare il range del segnale di riferimento rispetto al range nominale pur continuando a comandare l'intero range dell'angolo della spola.

Definite le diverse impostazioni di funzionamento attraverso il collegamento USB si inviano i vari settaggi alla servovalvola. Una fondamentale possibilità che il software offre è la capacità di identificare guasti o situazioni eccezionali che si verificano durante il funzionamento. Dalla finestra DATALOGGER si ha un feedback che spiega la causa dell'accensione del led rosso DIA sul pannello superiore.

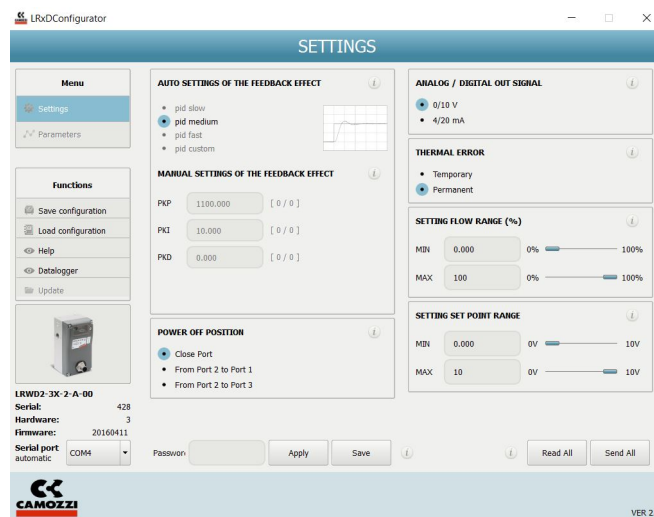


Figura 2.16: Schermata LRxD Configurator

### 2.1.8 Banco prova

Il sistema completo è stato in un primo momento modellato attraverso il software SolidWorks (Figura 2.17), per valutare gli ingombri e identificare eventuali problemi di assemblaggio. Questa fase è servita anche per definire le diverse piastre di collegamento tra i componenti.

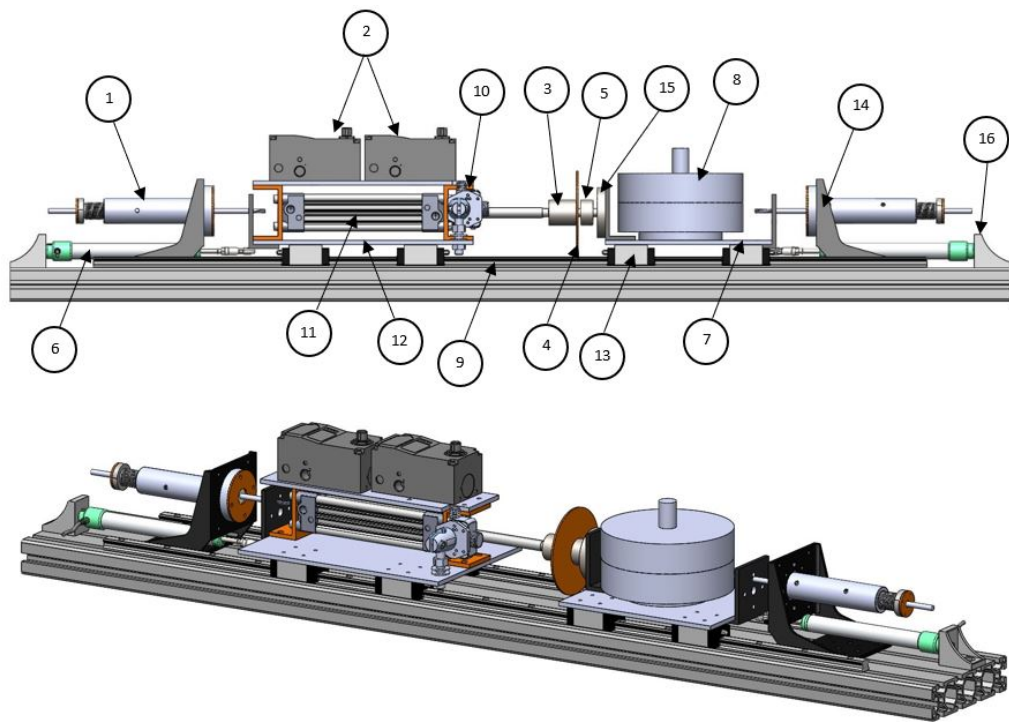


Figura 2.17: CAD banco prova

Il cilindro (11) e la massa(8) sono poste su due piastre (12,7) vincolate a dei carrelli (13) che scorrono sulle due guide lineari (9). Una terza piastra montata al di sopra del cilindro consente il posizionamento delle due valvole (2), che si muovono solidalmente ad esso. I respingenti (1) sono collegati all'ambiente attraverso le due piastre newport (14). I due potenziometri(6) sono fissati alla base attraverso delle piastre ad L (16), e al cilindro e alla massa con dei perni. Il sensore laser (10) è posto, tramite uno specifico supporto, sulla piastra del cilindro; il target del sensore (4) è posto tra la cella di carico (5), avvitata al supporto(3), e l'interfaccia (15) che entra in contatto con la massa.

N°	COMPONENTI
1	RESPINGENTE (x2)
2	VALVOLE CAMOZZI LRWD2-34-2-A-00 (x2)
3	SUPPORTO CELLA DI CARICO
4	PUNTATORE SENSORE OTTICO
5	CELLA DI CARICO Banner Q4XTULAF300-Q8
6	POTENZIOMETRO Gefran PZ-34-A-100(x2)
7	PIASTRA DI SUPPORTO MASSA IMPATTATA
8	MASSA IMPATTATA
9	GUIDA LINEARE C-SHR28-1000-B4(x2)
10	SENSORE LASER Banner Q4XTULAF300-Q8
11	CILINDRO MetalWork ISO 1552
12	PIASTRA DI SUPPORTO CILINDRO
13	CARRELLO (x8)
14	PIASTRA NEWPORT (x2)
15	INTERFACCIA
16	PIASTRA SUPPORTO POTENZIOMETRI

Tabella 2.5: Componenti banco prova

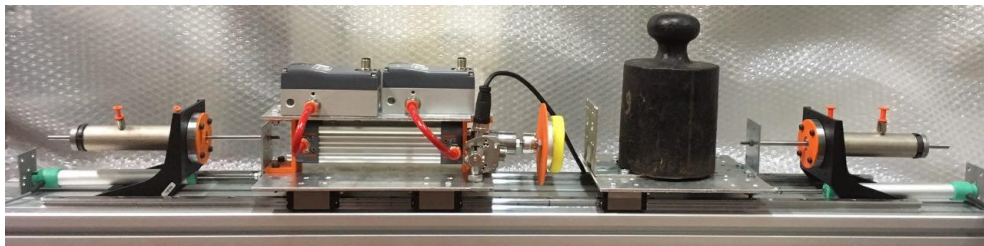


Figura 2.18: Banco prova reale

Il sistema, come per il prototipo PGAS, comprende il compressore, il riduttore di pressione e il sistema di acquisizione del segnale, costituito dalla macchina real-time(dSPACE) dalle schede multicanale A/D DS2002 e D/A DS2101 rispettivamente per l'acquisizione e generazione del controllo.



## Capitolo 3

# Modello teorico del banco sperimentale

### 3.1 Modello SIMULINK versione 1

Il banco prova descritto nel capitolo 2 viene modellato in ambiente SIMULINK per poter analizzare in maniera dettagliata diverse condizioni di funzionamento o tipologie di controllo da poter applicare al sistema reale. La necessità di studiare approfonditamente il funzionamento del banco nasce dalla volontà di oggettivare il test clinico, cioè riuscire ad ottenere nello specifico un sistema robusto, che non sia particolarmente influenzato dall'operatore ma anche dall'utilizzo di componenti diversi.

Il lavoro in oggetto si fonda su una prima versione di banco nel quale sono state utilizzate le valvole 3AF della CKD (Figura 2.13), le stesse del prototipo PGAS, che ha evidenziato delle criticità di studio rendendo necessario l'introduzione delle valvole CAMOZZI LRWD2-34-2-A-00 (Figura 2.14).

A partire dallo schema del banco prova mostrato in Figura 2.3 sono state individuate le diverse equazioni che governano ogni singolo componente e i fenomeni che si presentano durante il funzionamento [2] (vedi Appendice A).

Sviluppato il modello analitico, è stato modellato in simulink un sistema che simulasse il funzionamento del banco prova [2].

Macroscopicamente si può osservare che il modello presenta quattro sottosistemi principali:

1. Controllo delle fasi
2. Controllo del profilo di forza desiderato
3. Fasi operative
4. Sistema dinamico

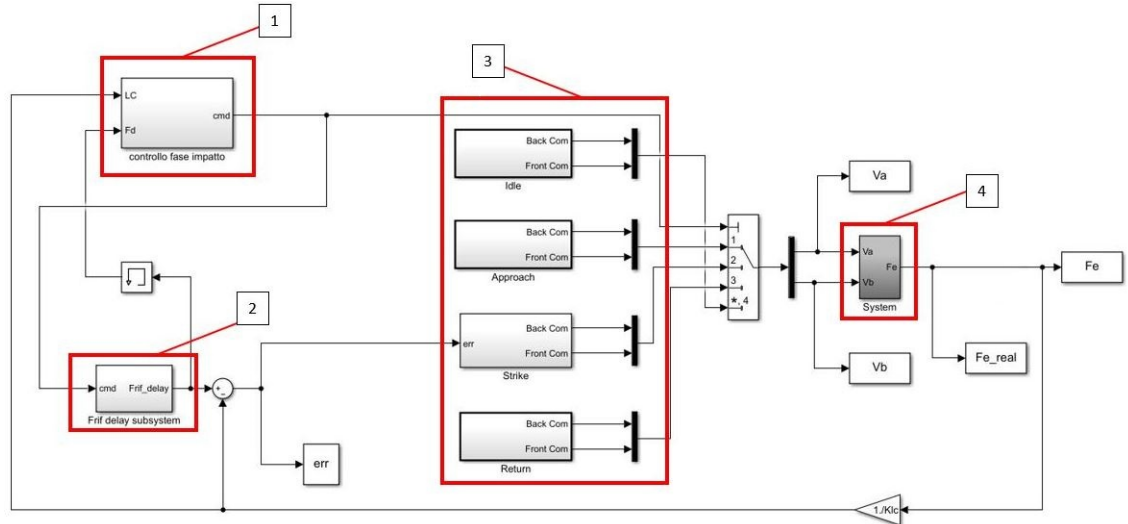


Figura 3.1: Prima versione modello simulink

Innanzitutto il sistema, sia reale che teorico, si basa sulla successione di quattro diverse fasi che realizzano l'intero processo di perturbazione. Il sistema, in questa versione, lavora in anello aperto in tutte le fasi a meno di quella di strike, corrispondente all'applicazione della perturbazione alla massa. Ognuna di queste fornisce una specifica tensione alle valvole che influenzano il funzionamento del sistema fisico vero e proprio. Le tensioni definiscono, in base alla dinamica della valvola, la sua conduttanza che attraverso le equazioni presenti in appendice A permette di ottenere il valore di portata che dalle valvole entra nelle camere del cilindro. Il flusso di aria varia la pressione nelle camere con conseguente spostamento dello stelo.

Le fasi operative che si realizzano sono:

- *Idle* - le tensioni di entrambe le valvole vengono poste pari a zero. Corrisponde alla fase di riposo nella quale il sistema deve tornare, e la condizione in cui si trova prima di ricevere il segnale di start.

- *Approach* - in questa condizione il comando alle valvole è tale da riempire la camera posteriore del cilindro e scaricare la camera anteriore, in modo da far fuoriuscire lo stelo.
- *Strike* - questa è l'unica fase realizzata in anello chiuso, è presente un controllore PID che sulla base del segnale di errore, ottenuto come differenza tra segnale di set e segnale di feedback rilevato dalla cella di carico, definisce dei valori di tensione tali da ridurlo.
- *Return* - la fase di rientro dello stelo è realizzata come nel caso della fuoriuscita gestendo opportunamente le tensioni delle valvole: alimentando la camera anteriore e mettendo a scarico la camera posteriore.



Figura 3.2: Grafcat descrittivo

Per determinare la fase che deve attuarsi si utilizza il pacchetto stateflow di Simulink. La logica di controllo di fatti si basa sul concetto di macchina a stati, che permette alla macchina di trovarsi in un determinato istante solo in una specifica condizione. Lo stato consiste nelle diverse fasi descritte, il passaggio o la transizione da una all'altra è definita dal soddisfacimento di una specifica condizione. Il sottosistema che controlla le fasi si basa su tre input:

- *Segnale cella di carico;*
- *Segnale di set;*

- *Clock*;

I tre input corrispondono alle transizioni che avvenendo determinano il passaggio da una fase ad un'altra, in uscita dal sistema si ha un valore di comando corrispondente numericamente alle fasi da realizzare.

Nello specifico le transizioni si hanno a partire dal segnale di start sia per la simulazione che per il modello reale, che pone nella condizione di approach. Rilevata una forza superiore ad una soglia definita si ha il passaggio alla fase di strike, dove si applica il profilo di forza desiderato che il sottosistema *controllo del profilo di forza* fa in modo da sviluppare proprio in corrispondenza dell'inizio della fase di impatto. Il passaggio alla fase di ritorno si ha quando il segnale di riferimento scende al disotto di una soglia, e quando il clock supera un certo intervallo di tempo le due valvole sono poste a zero e si torna ad una condizione di riposo.

I parametri necessari al modello sono stati ricavati da documentazioni tecniche o specifiche caratterizzazioni dei componenti [2]. Nello specifico i valori utilizzati sono:

PARAMETRO	VALORE
Forza di picco	$50N$
Diametro stelo	$0.12m$
Diametro stantuffo	$0.32m$
Sezione camera posteriore	$8.04 \cdot 10^{-4}m^2$
Sezione camera anteriore	$6.91 \cdot 10^{-4}m^2$
Massa traslante	$0.18kg$
Massa cilindro	$3kg$
Massa impattata	$10kg$
Corsa cilindro	$0.12m$
Pressione di alimentazione	$3 \cdot 10^5 Pa$
Forza di aderenza limite	$20N$
Forza di attrito dinamico	$15N$
Velocità limite	$1 \cdot 10^{-6}$
Conduttanza valvole	$1.97 \cdot 10^{-8} \frac{Nm^3}{sPa}$
Costante di tempo valvola	$10ms$

PARAMETRO	VALORE
Banda morta	0.5V
Smorzamento interfaccia ( $\beta_3$ )	$0 \frac{Ns}{m}$
Rigidità interfaccia ( $k_3$ )	$10000 \frac{N}{m}$
Rigidità operatore ( $k_1$ )	$30000 \frac{N}{m}$
Smorzamento operatore ( $\beta_1$ )	$1000 \frac{Ns}{m}$
Rigidità soggetto ( $k_2$ )	$30000 \frac{N}{m}$
Smorzamento soggetto ( $\beta_2$ )	$1000 \frac{Ns}{m}$
Distanza estremità stelo-massa	0.08m
Tensione valvola posteriore APPROCCIO	5.6V
Tensione valvola anteriore APPROCCIO	4V
Tensione valvola posteriore RITORNO	0V
Tensione valvola anteriore RITORNO	6.2V

Tabella 3.1: Parametri modello simulink

Quello che si osserva dalle prime simulazioni (Figura 3.3) è una ridotta prontezza e accuratezza nel seguire in maniera fedele il profilo di forza desiderato. Una causa è sicuramente da attribuire alle valvole, le quali seppur caratterizzate sperimentalmente, si presentavano sicuramente usurate dal lungo utilizzo e dalla complessità di variazione dei valori di gain o zero specifici del controllo, influenzando i parametri considerati nel modello. Il comportamento negativo non è tanto da attribuire ai parametri del controllore PID della fase di strike. Infatti, considerando la durata ridotta dell'impulso, in questa prima fase di analisi, la variazione dei contributi integrativo e derivativo risulta inefficace, poiché il sistema tende a lavorare in una condizione transitoria.

Si deve sottolineare la mancata modellazione delle resistenze pneumatiche del circuito, che inevitabilmente condizionano i risultati.

È necessario tenere in considerazione anche i parametri di rigidità degli smorzatori, anch'essi caratterizzati sperimentalmente, ma che vanno valutati considerando il funzionamento reale per eliminare la loro incertezza. In Figura 3.3 si hanno i risultati del sistema teorico rispetto ad un segnale di riferimento ad onda quadra e sinusoidale.

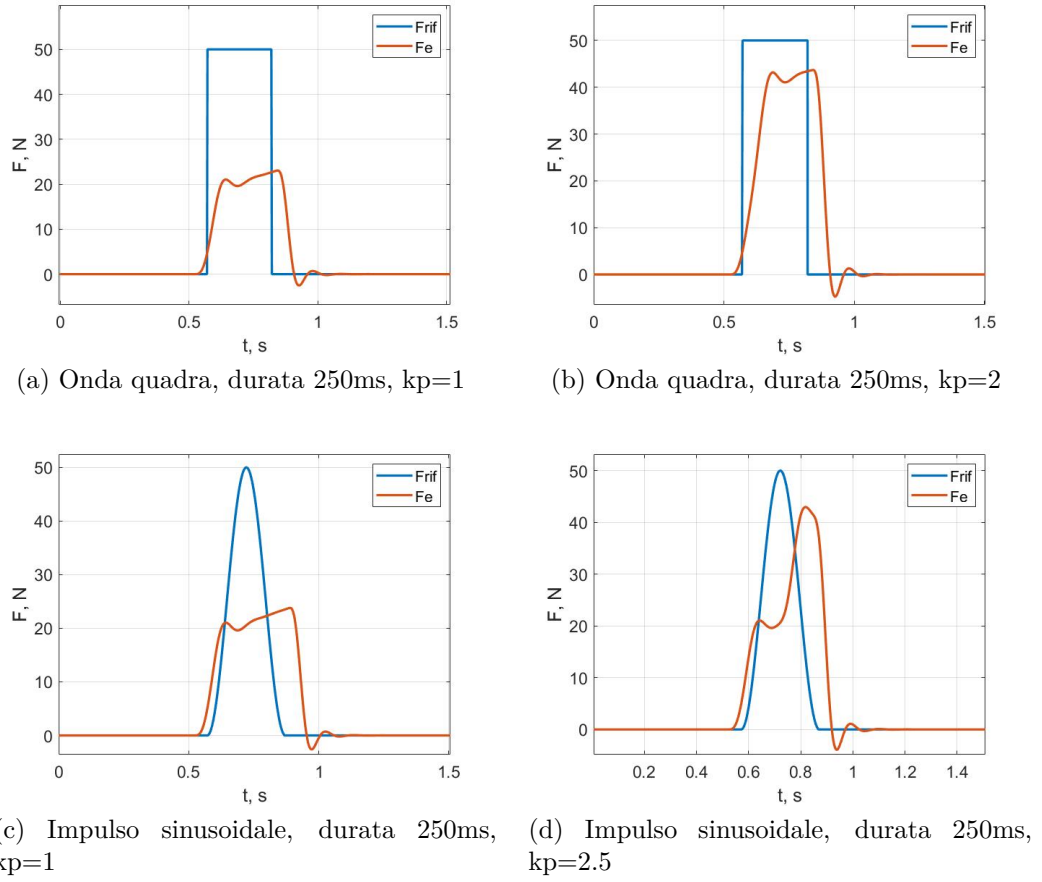


Figura 3.3: Risultati modello teorico versione 1

Una valutazione più accurata si ottiene considerando tre parametri identificativi del comportamento del sistema:

- *Entità impulso;*
- *Errore di accuratezza;*
- *Errore di tracking;*

L'impulso considera l'area sottesa alla curva, quindi l'integrale della forza nel tempo. Questa grandezza permette di confrontare in prima battuta il segnale ottenuto con il profilo di forza desiderato, quindi capire se il sistema riesce a fornire al soggetto l'impulso voluto. Il confronto si definisce attraverso l'errore di accuratezza: in valori percentuali si osserva la differenza tra l'impulso ottenuto e quello desiderato.

L'errore di tracking cerca di osservare la capacità del modello di seguire la forma del profilo, viene valutato come il rapporto tra l'integrale del valore assoluto della differenza tra curva ideale e reale, e l'impulso ideale:

$$\frac{\int |curva_{ideale} - curva_{registrata}|}{impulso_{ideale}} \%$$

In questo modo si superano i limiti dell'errore di accuratezza, che potrebbe avere valori bassi ma a fronte di una forma d'onda completamente diversa da quella di riferimento. Insieme, questi tre parametri consentono di avere una immagine più chiara e definita del comportamento del modello. In tabella 3.2 si evidenzia, oltre ai parametri descritti, anche la durata dell'impulso che si ottiene:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	12.5Ns
Impulso FB	6.23Ns
Durata ID	0.25s
Durata FB	0.32s
Errore ACC	-50.1%
Errore TCK	73.9%

(a) Risultati Figura 3.3a

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	12.5Ns
Impulso FB	11.28Ns
Durata ID	0.25s
Durata FB	0.33s
Errore ACC	-9.7%
Errore TCK	54.0%

(b) Risultati Figura 3.3b

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	7.5Ns
Impulso FB	7.33Ns
Durata ID	0.24s
Durata FB	0.37s
Errore ACC	-2.3%
Errore TCK	81.0%

(c) Risultati Figura 3.3c

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	7.5Ns
Impulso FB	8.77Ns
Durata ID	0.24s
Durata FB	0.34s
Errore ACC	16.88%
Errore TCK	90.45%

(d) Risultati Figura 3.3d

Tabella 3.2: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking del modello Versione 1

Dai risultati si nota l'aumento dell'impulso in funzione del kp, raggiungendo valori più vicini all'ideale. L'onda quadra mostra un aumento dell'errore di accuratezza e una diminuzione dell'errore di tracking all'aumentare del kp, diametralmente opposto il comportamento dell'onda sinusoidale, a testimonianza dell'aleatorietà dei risultati, e quindi del modello realizzato. I valori presentati fanno riferimento

ad un  $k_p$  pari a 2 ma dalle figure successive si osserva come la risposta del modello migliori con dei  $k_p$  superiori che influenza però l'aumento dell'overshoot, e quindi del picco max trasmesso al soggetto.

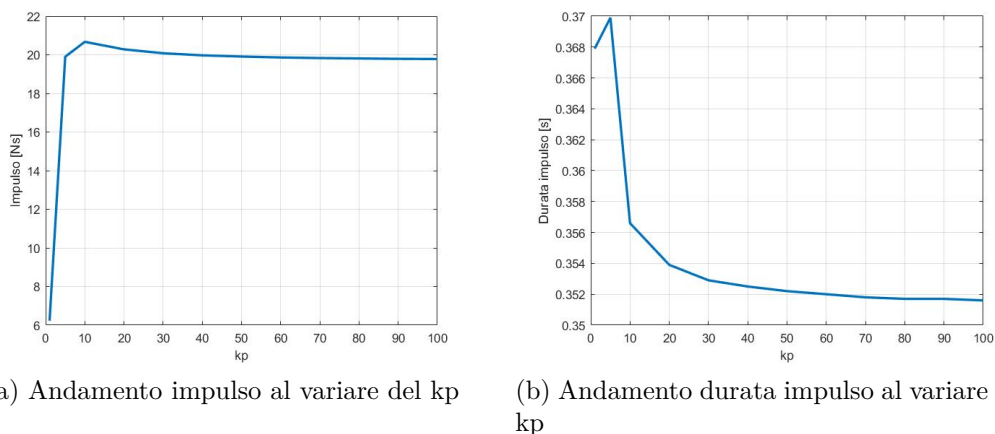


Figura 3.4: Andamenti al variare del  $k_p$  per sistema vincolato e soggetto ad onda quadra

La durata mostra una riduzione dell'ordine del millisecondo. Andamento simile all'impulso si osserva per l'accuratezza e il tracking che si mantengono rispettivamente al 60% e 175% per  $k_p$  superiori a 10.

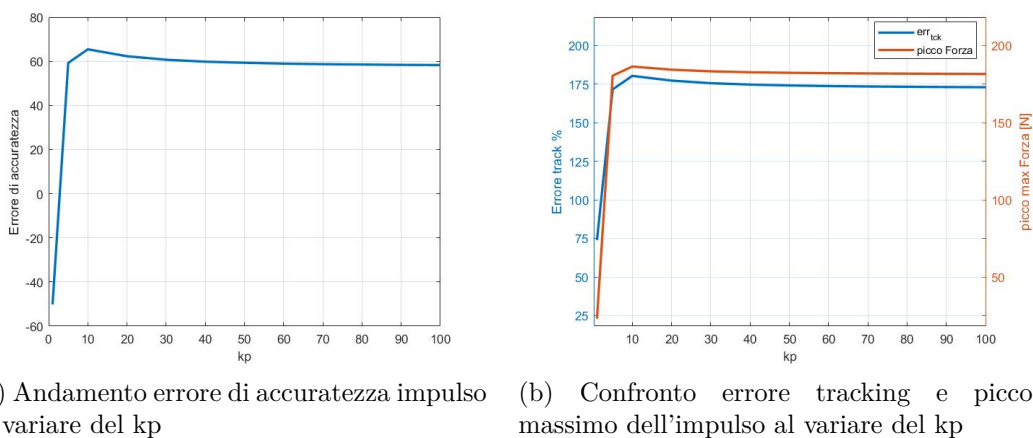
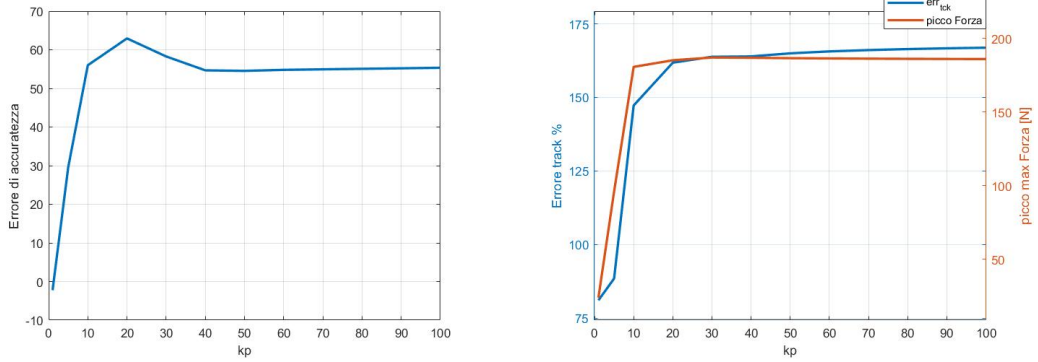


Figura 3.5: Andamenti errori al variare del  $k_p$ , per riferimento ad onda quadra



Per un riferimento di tipo sinusoidale l'errore di accuratezza si mantiene su valori del 60% al crescere del  $k_p$ , ottenendo un errore di tracking alto influenzando il picco max che si attesta su valori di  $180N$ .



(a) Andamento errore di accuratezza impulso al variare del  $k_p$ , per riferimento sinusoidale (b) Confronto errore tracking e picco massimo dell'impulso al variare del  $k_p$ , per riferimento sinusoidale

Figura 3.6: Andamenti errori al variare del  $k_p$ , per riferimento sinusoidale

## 3.2 Primo sviluppo del modello teorico, sistema vincolato

A partire dal modello presentato, si è cercato di affinare il risultato agendo sui parametri più critici. Innanzitutto sono state introdotte le nuove valvole modificando i parametri caratteristici nel modello.

PARAMETRO	VALORE
CONDUTTANZA	$1.97 \cdot 10^{-8} \frac{Nm^3}{sPa}$
RAPP. CRITICO	0.14
TEMPO RISPOSTA	$10^{-3}s$
BANDA MORTA	$0.5V$

(a) Parametri valvola CKD 3AF

PARAMETRO	VALORE
CONDUTTANZA	$1.68 \cdot 10^{-8} \frac{Nm^3}{sPa}$
RAPP. CRITICO	0.36
TEMPO RISPOSTA	$7 \cdot 10^{-3}s$
BANDA MORTA	$0.2V$

(b) Parametri valvola CAMOZZI LRWD2

Tabella 3.3: Parametri modificati delle valvole

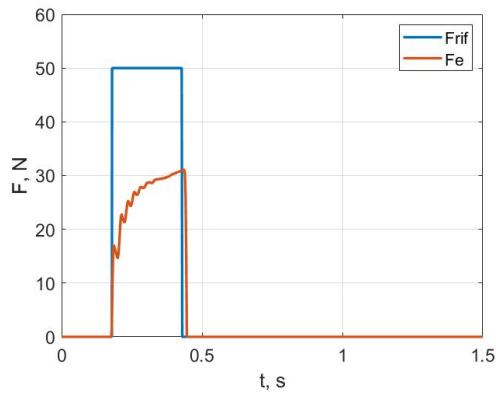
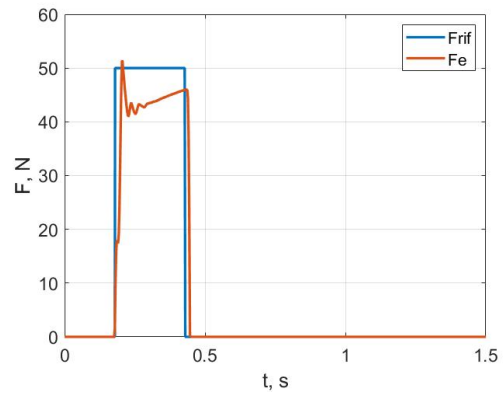
(a) Onda quadra, durata 250ms,  $k_p=1$ (b) Onda quadra, durata 250ms,  $k_p=3$ 

Figura 3.7: Risultati modello versione 1 rif. onda quadra, con nuove valvole

Con queste modifiche (tabella 3.3) si recupera sia in prontezza che in accuratezza, riuscendo ad ottenere un ricoprimento migliore del profilo di riferimento, in Figura 3.3b la risposta non tende al profilo ad onda quadra, a differenza della Figura 3.7b.

Sicuramente si osserva come la perturbazione si generi ad un istante di tempo più

ridotto rispetto al caso precedente (Figura 3.7), questo dovuto ai tempi di risposta e banda morta inferiori. A livello numerico i miglioramenti sono:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$7.04Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-43.66\%$
Errore TCK	$50.56\%$

(a) Risultati Figura 3.7a

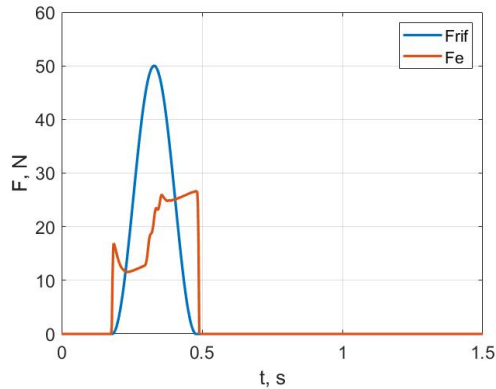
PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.2Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-10.36\%$
Errore TCK	$20.7\%$

(b) Risultati Figura 3.7b

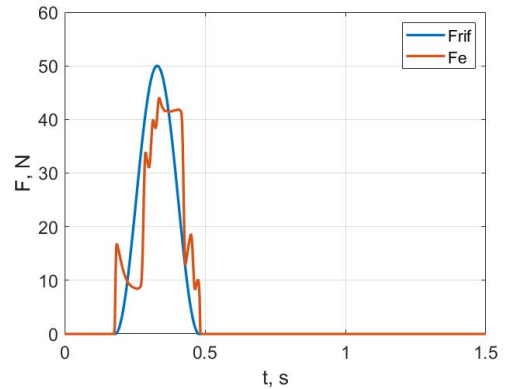
Tabella 3.4: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.7

Si nota come con le nuove valvole si abbia una tendenza decrescente sia in accuratezza che in tracking all'aumentare del  $k_p$ , raggiungendo già per un guadagno 3 risultati accettabili.

Con il riferimento sinusoidale il comportamento è analogo al precedente, il miglioramento non è semplicemente qualitativo come si evidenzia dalla tabella 3.5.



(a) Impulso sinusoidale, durata 250ms,  $k_p=1$



(b) Impulso sinusoidale, durata 250ms,  $k_p=3$

Figura 3.8: Risultati modello versione 1 rif. onda sinusoidale, con nuove valvole

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$6.05Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.31s$
Errore ACC	$-19.33\%$
Errore TCK	$70.96\%$

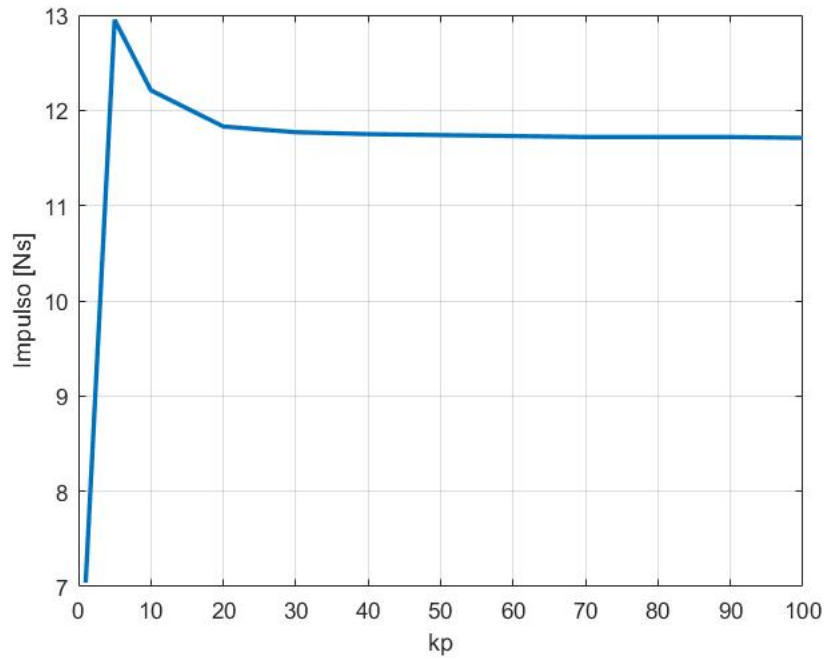
(a) Risultati Figura 3.8a

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.51Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.30s$
Errore ACC	$0.13\%$
Errore TCK	$41.38\%$

(b) Risultati Figura 3.8b

Tabella 3.5: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.8

Valutando il comportamento al variare del  $k_p$  si nota un diverso andamento delle curve. Innanzitutto per l'entità dell'impulso (Figura 3.9), osservando l'asse delle ascisse, è evidente come la variabilità più significativa si realizzi tra i valori di  $k_p$  compresi tra 1 e 20.

Figura 3.9: Andamento impulso al variare del  $k_p$ , modello con valvole CAMOZZI

Per questa ragione si è posta l'attenzione su questo intervallo ridotto, in modo da osservare in maniera più attenta la variazione ottenuta.

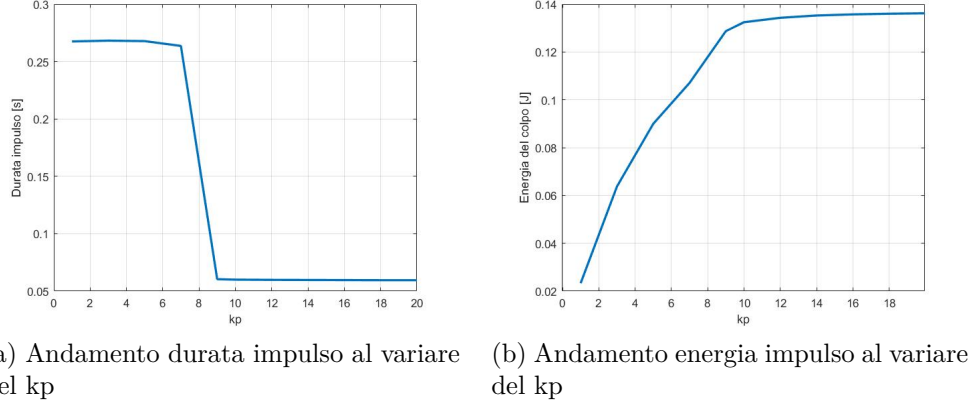


Figura 3.10: Andamenti al variare del kp per il modello con valvole CAMOZZI

La durata dell'impulso è vicina al valore di 250ms desiderati, per un kp superiore a 8, la durata si riduce notevolmente, pur mantenendo un valore di impulso vicino ai 12Ns ideali.

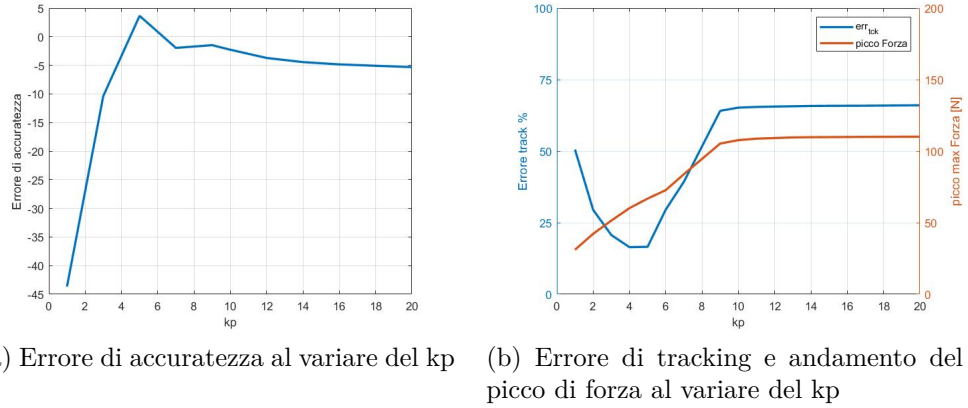


Figura 3.11: Andamenti errore al variare del kp per il modello con valvole CAMOZZI

L'errore di accuratezza raggiunge valori ottimali per kp compresi tra 4 e 6, raggiungendo un  $-5\%$  costante su valori maggiori, pur rimanendo al disotto del 20% ottenuto con lo stesso segnale di riferimento ma con la precedente configurazione. Confrontando l'errore di tracking e l'andamento del picco di forza raggiunto, è evidente come nell'intervallo tra 4 e 6 di kp si abbia una configurazione ottimale, cioè un giusto compromesso tra l'errore nel ricoprimento della curva voluta e il

massimo picco raggiunto.

A sostegno di questa considerazione si è attuato un processo iterativo che potesse individuare il  $k_p$  ottimale per ridurre al minimo l'entità dell'errore di tracking, in questo caso non è stato preso in considerazione il massimo picco che si sarebbe raggiunto ma unicamente il profilo ottenuto.

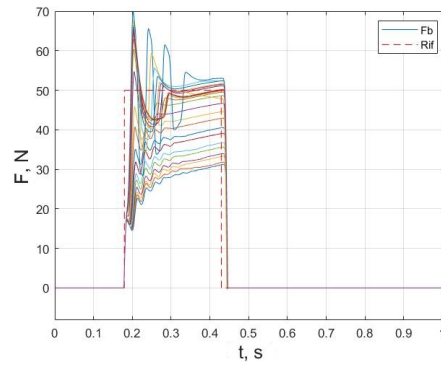


Figura 3.12: Fitting errore di tracking sul profilo di forza

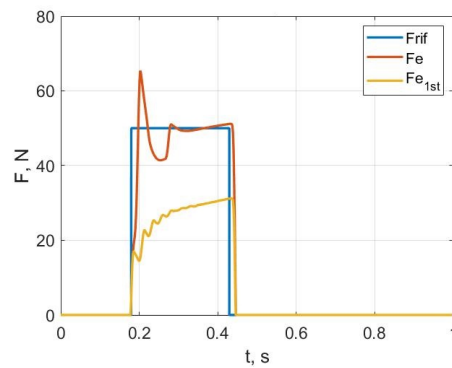


Figura 3.13: Risultato ottimale fitting errore di tracking

Come risultato dagli andamenti dell'errore di tracking, il valore ottenuto di  $k_p$  è di 5, che permette di determinare un errore del 14,63%.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.94Ns$
Durata ID	$0.25s$

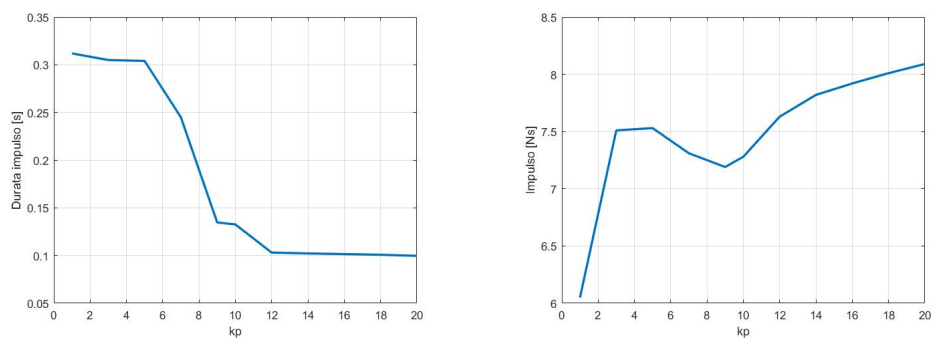
Durata FB	0.27s
Errore ACC	3.56%
Errore TCK	14.63%

Tabella 3.6: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta ottimale Figura 3.13

Il valore ottimale di  $k_p$  migliora il risultato non solo per quanto riguarda il tracking, che scende al disotto del 15%, ma anche nell'entità dell'impulso, molto vicino al desiderato. La durata raggiunge i 270ms, e anche l'errore di accuratezza si mantiene basso, non superando il 4%.

Un comportamento analogo lo si osserva anche per il riferimento sinusoidale, con il  $k_p$  pari a 3 si ottiene una buona accuratezza della risposta, perdendo leggermente nella durata (300ms) ma permette di realizzare un impulso di 7.51Ns. La dipendenza della durata dal  $k_p$  è meno forte del caso ad onda quadra, l'impulso rimane ottimale per  $k_p$  inferiori a 10, e in particolare per valori compresi tra 2.5 e 5, l'errore di accuratezza è molto vicino a zero.

Nel confronto tra tracking e picco massimo raggiunto, si ha un valore minimo sempre vicino a  $k_p=5$ , con picchi di forza più vicini ai 50N rispetto ad un riferimento ad onda quadra.



(a) Andamento durata impulso al variare del  $k_p$  (b) Andamento impulso al variare del  $k_p$

Figura 3.14: Andamenti impulso al variare del  $k_p$  per il modello con valvole CAMOZZI, riferimento sinusoidale

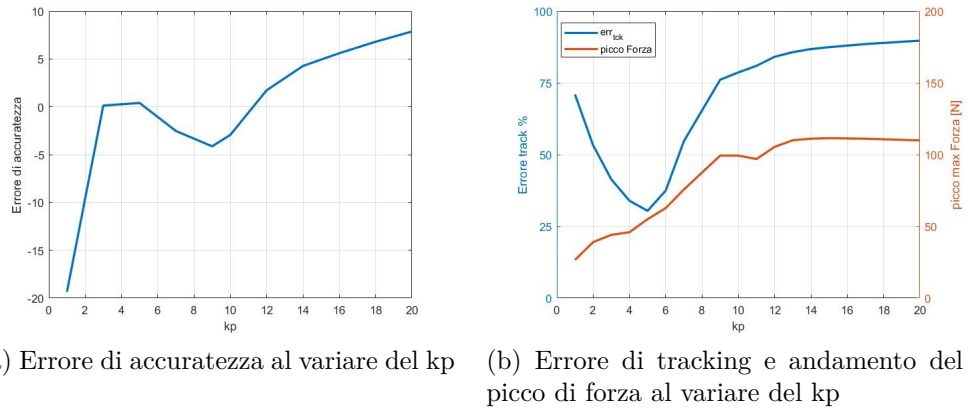


Figura 3.15: Errore al variare del  $k_p$  con valvole CAMOZZI, rif. sinusoidale

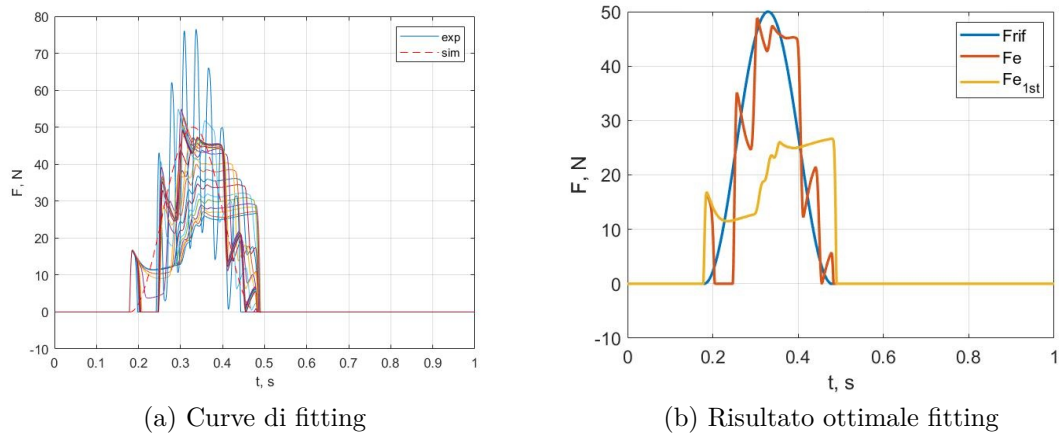


Figura 3.16: Risultati fitting su errore di tracking con profilo di forza sinusoidale

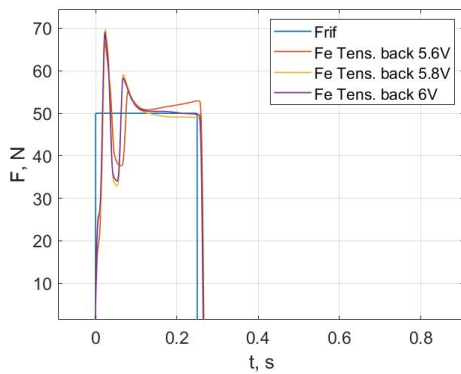
PARAMETRO	VALORE
mpulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.42Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-1.07\%$
Errore TCK	$30.25\%$

Tabella 3.7: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.16

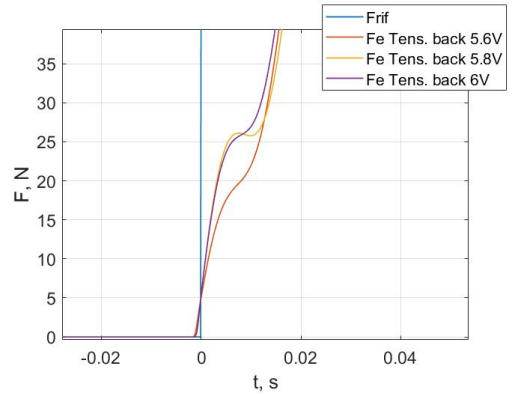


In questo caso per quanto il fitting cerchi di ridurre l'entità dell'errore di tracking, i risultati complessivi mostrano dei miglioramenti sul piano dell'impulso stesso e della durata, ma già l'errore di tracking non scende al disotto del 30%.

Il picco iniziale che si può osservare nelle prove con onda sinusoidale, che diventa sempre più marcato all'aumentare del  $k_p$ , è dovuto al modo in cui è stato sviluppato il sottosistema di calcolo della forza esterna. In particolare questo blocco si attiva solo nel momento in cui si ha il contatto tra l'estremità dello stelo e la massa campione, questa informazione al modello simulink è fornita mediante una condizione puramente matematica che restituisce il valore di forza, calcolato con le equazioni presenti in appendice, solo nel momento in cui la somma della posizione dello stelo, dello spostamento del cilindro supera la somma della distanza iniziale stelo-massa e spostamento della massa. Simulink restituisce istantaneamente il valore ottenuto in quel punto, che per il sistema fisso consiste in un valore proporzionale alla posizione dello stelo e alla sua velocità, attraverso i parametri di rigidezza e smorzamento dell'interfaccia. Nei risultati teorici diventa difficile, per come è stato pensato l'intero modello, modificare questa condizione di funzionamento. Andando ad aumentare le tensioni di riferimento alle valvole nella fase di approccio si osserva come l'intensità del picco aumenti, a testimonianza di come esso sia legato alla velocità con cui fuoriesce lo stelo.



(a) Onda quadra, durata 250ms,  $k_p=5$



(b) Onda quadra, durata 250ms,  $k_p=5$ , particolare

Figura 3.17: Confronto tra diverse tensioni di alimentazione valvola posteriore (rif.onda quadra), fase di approccio

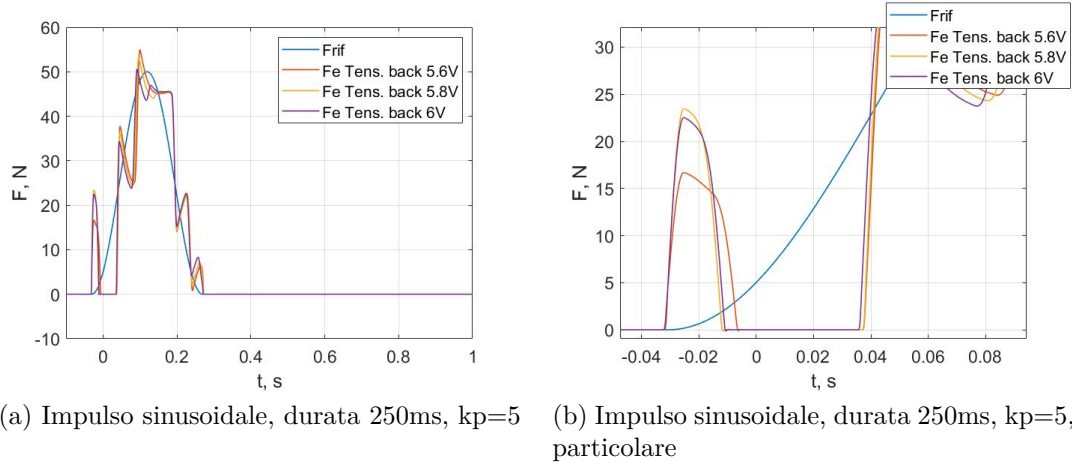


Figura 3.18: Confronto tra diverse tensioni di alimentazione valvola posteriore (rif.sinusoidale), fase di approccio

La tensione di comando della valvola posteriore è stata quindi posta pari a 6V, consentendo nel caso dell'onda quadra di ridurre l'errore tra i due segnali.

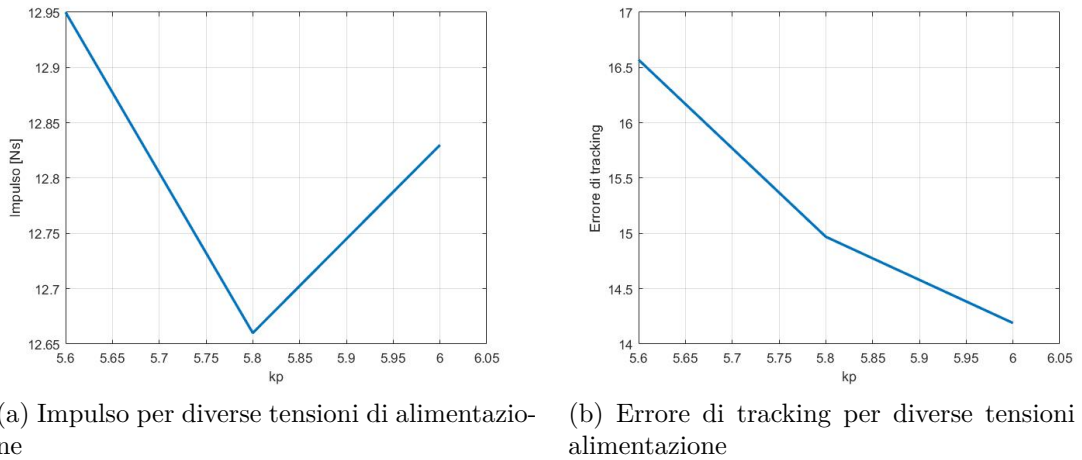


Figura 3.19: Impulso ed errore di tracking per diverse tensioni di alimentazione

I grafici di Figura 3.19 mostrano come con una tensione di 6V si abbia un valore di impulso leggermente maggiore rispetto a 5.8V ma si recuperi in termini di errore di tracking. In tabella 3.8 si nota il miglioramento dei risultati rispetto alla tabella 3.6.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.82Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26s$
Errore ACC	2.67%
Errore TCK	14.2%

Tabella 3.8: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.17

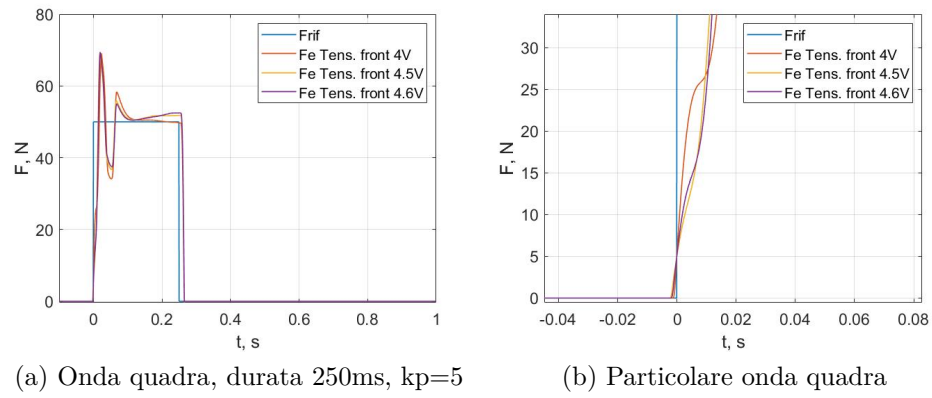


Figura 3.20: Diverse tensioni di comando valvola anteriore, fase di approccio

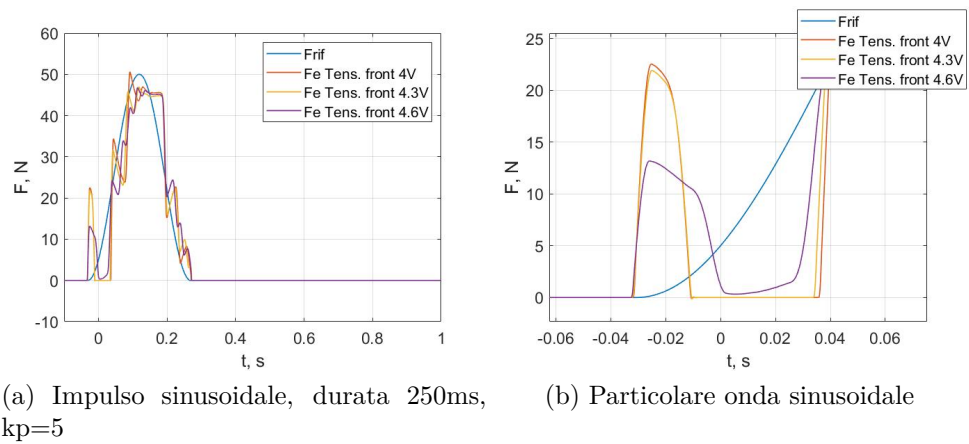


Figura 3.21: Diverse tensioni di comando valvola anteriore, fase di approccio

Agendo sulle tensioni di comando della valvola anteriore, sempre in fase di approccio, è evidente la riduzione del picco, ma con un effetto sul tempo che impiega a raggiungere il corpo da impattare. In questo caso aumentare la tensione significa rallentare l'uscita del pistone e quindi diminuire il picco iniziale.

In definitiva si nota come il sistema non sia molto robusto, applicando un riferimento ad onda quadra si ottengono delle risposte migliori con tensioni di 6V sulla valvola posteriore e 4V sull'anteriore, al contrario dell'onda sinusoidale dove il comportamento migliora facendo fuoriuscire lo stelo a velocità più bassa. Questo è da vedersi proprio nella modalità in cui si sviluppa la curva: nel caso di un impulso ad onda quadra, l'improvviso passaggio da 0 a 50 V determina un errore iniziale molto grande, che genererebbe un overshoot significativo se al primo contatto con la massa, dove si ha il passaggio alla fase di strike, si presentasse una differenza sostanziale tra set e feedback.

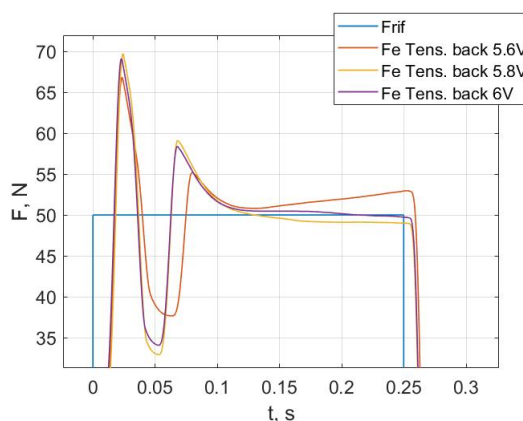


Figura 3.22: Particolare dell'overshoot che si ottiene per diverse tensioni di comando valvola

Per la sinusoide il discorso cambia per la pendenza inferiore con la quale raggiunge il valore di picco di 50N, che condiziona l'andamento dell'errore e la risposta del modello. Nello specifico, se ci si sofferma sul picco iniziale in corrispondenza del quale si ha un valore di riferimento ancora nullo, è facile intuire come l'errore tra i due segnali sia negativo con conseguente azione sulle valvole che tendono a scaricare la camera anteriore del cilindro per ridurre la forza applicata, ma questo va a discapito della forma d'onda che si vuole realizzare, visibile dall'avvallamento successivo al picco suddetto. Per limitare questo effetto si è pensato di definire una

curva sempre con andamento sinusoidale ma che sia traslata in modo da avere un errore nullo in corrispondenza dell'inizio della fase di strike, cioè in corrispondenza dei 5N imposti come soglia.

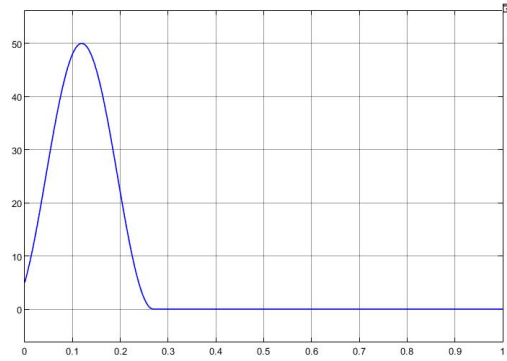


Figura 3.23: Curva sinusoidale traslata

In Figura 3.23 si può osservare come sia stata modificata la curva, questo consente di avere un errore non negativo negli istanti iniziali della fase di strike con conseguente riduzione dell'avvallamento. Dalla Figura 3.24 si nota come l'effetto di modificare la forma dell'onda influisca sull'andamento della risposta, quindi per quanto riguarda il segnale di riferimento sinusoidale è necessario applicare tensioni ridotte per ridurre il picco di primo contatto e permettere una ricoprimento più fedele del segnale di set.

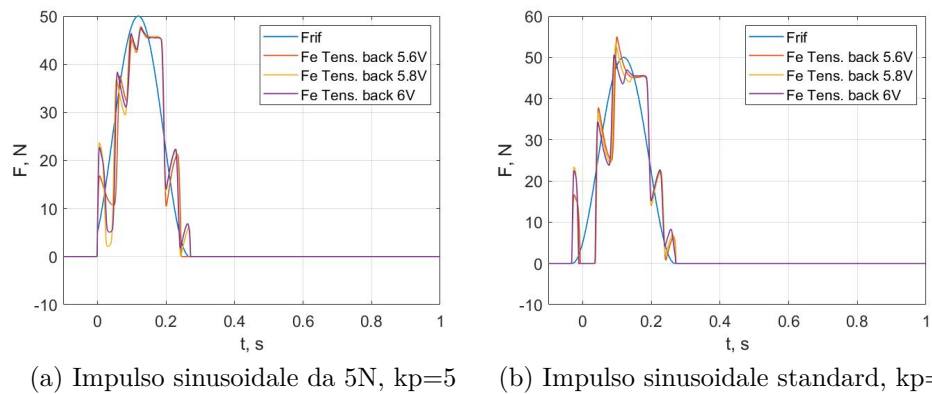


Figura 3.24: Confronto tra diverse tensioni di comando della valvola posteriore, fase di approccio, con diversi segnali di riferimento

Con la modifica della forma del segnale di riferimento si ottiene un miglioramento del picco di primo contatto, l'avvallamento che segue è meno marcato. In termini numerici il miglioramento si nota più facilmente, l'impulso aumenta del 2% circa, più sostanziale è la riduzione dell'errore di tracking che scende del 17,5%, in accuratezza si ottiene una risposta che ricopre un'area più ampia di quella ideale:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.6Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	1.51%
Errore TCK	24.9%

Tabella 3.9: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking con segnale sinusoidale modificato,  $k_p=5$

### 3.2.1 Modello teorico del sistema svincolato

Tutta l'analisi che ha portato ad individuare un  $k_p$  ottimale e soprattutto le tensioni di alimentazione alle valvole per realizzare la fase di approccio, si è soffermata esclusivamente sul sistema fisso, quindi sono stati imposti dei valori di rigidità e smorzamento tali da evitare qualsiasi movimento del corpo cilindro e del corpo impattato. Questo è stato fatto alla luce della maggior facilità di gestione della risposta del modello, quindi riuscendo a comprendere meglio ogni comportamento adottato dal sistema. La difficoltà principale è legata al non conoscere in maniera precisa la cedevolezza dei respingenti, e soprattutto la loro modellazione non può essere accurata al punto da simulare perfettamente il loro comportamento.

Nelle figure successive si mostra la risposta del modello al variare delle caratteristiche di cedevolezza dei respingenti per passare, una volta validato il modello teorico, ad un confronto diretto con la risposta reale del sistema e poter individuare a posteriori l'entità di queste grandezze. Data la maggior accuratezza nel comportamento del modello ad un riferimento ad onda quadra, ci si è soffermati su questa forma d'onda.

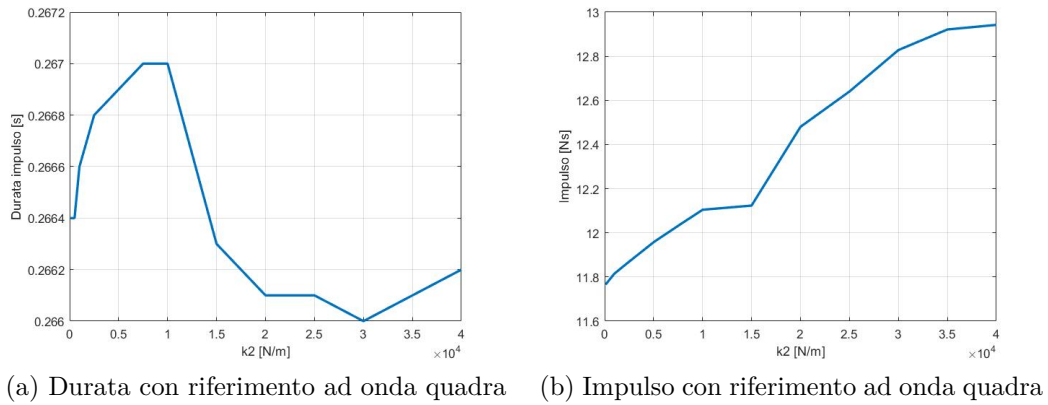


Figura 3.25: Andamento impulso e durata per diversi valori di rigidezza della massa impattata

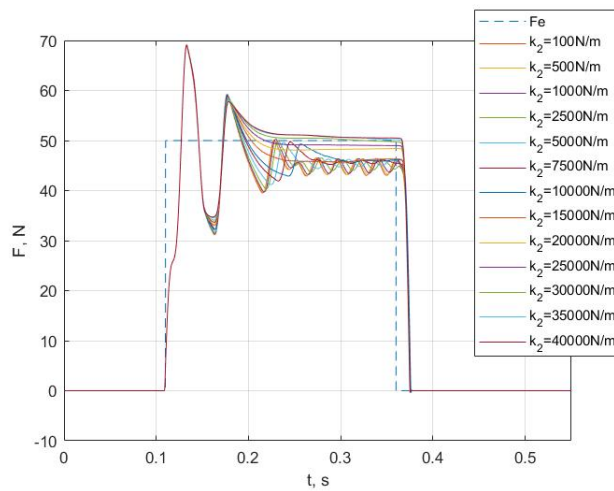


Figura 3.26: Risposta modello teorico al variare della rigidezza della massa impattata

La Figura 3.25 mostra un aumento dell'impulso in funzione della rigidezza, ma senza allontanarsi troppo dai valori desiderati. La durata dell'impulso decresce per valori superiori ai  $100 \frac{N}{m}$  infatti dalla Figura 3.26 si osserva come valori inferiori a  $5000 \frac{N}{m}$  determinino forti oscillazioni nel comportamento a regime.

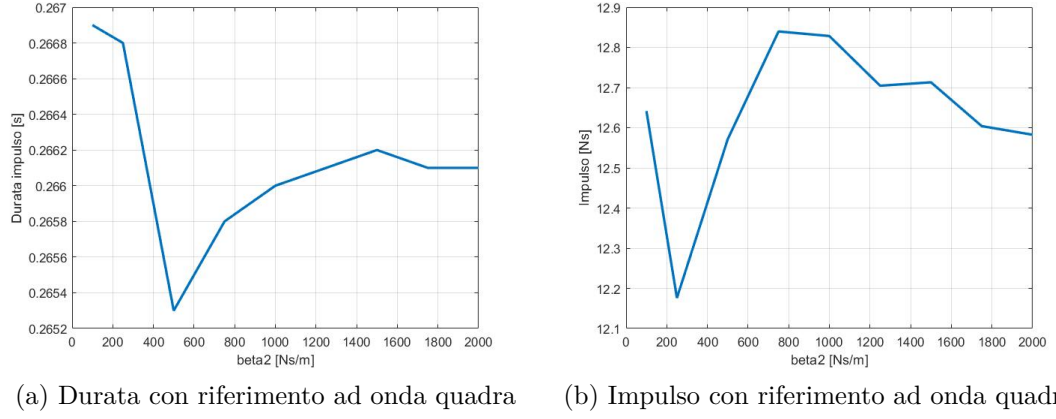


Figura 3.27: Andamento impulso e durata per diversi valori di smorzamento della massa impattata

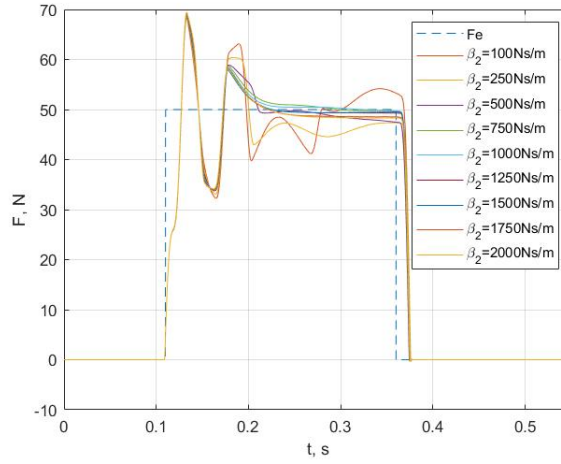
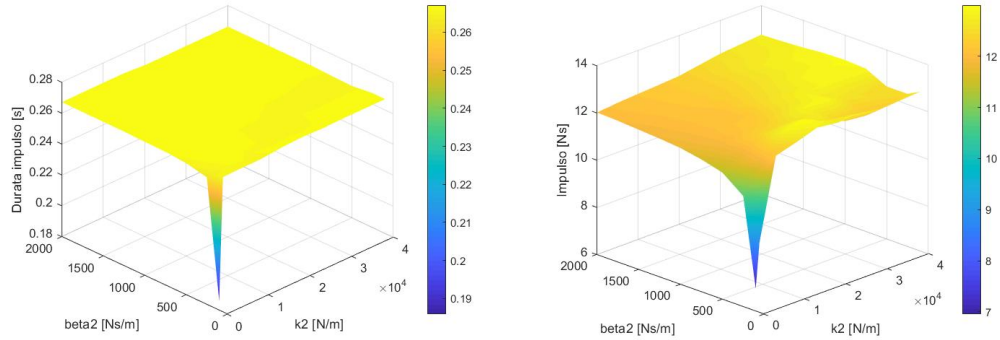


Figura 3.28: Risposta modello teorico al variare dello smorzamento della massa impattata

Valutando lo smorzamento ( $\beta_2$ ) si osserva come con valori superiori ai  $500 \frac{Ns}{m}$  l'incidenza della rigidità sia maggiore rispetto allo smorzamento. Per questo risulta utile analizzare l'andamento combinato tra la variazione di rigidità e smorzamento, quello che si osserva è una sostanziale costanza rispetto ai due parametri a meno dei valori compresi entro i  $300 \frac{Ns}{m}$  e i  $1000 \frac{Ns}{m}$ .





(a) Durata con riferimento ad onda quadra (b) Impulso con riferimento ad onda quadra

Figura 3.29: Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidità della massa impattata

La difficoltà di individuazione delle cedevolezze rende complessa un'analisi del modello completamente svincolato. In Figura 3.30 sono presenti diverse risposte al variare dei parametri di rigidità e smorzamento, per l'operatore si sono considerati valori più alti per tenere in considerazione una resistenza diversa da quella dell'operatore, del quale si considera una risposta puramente passiva.

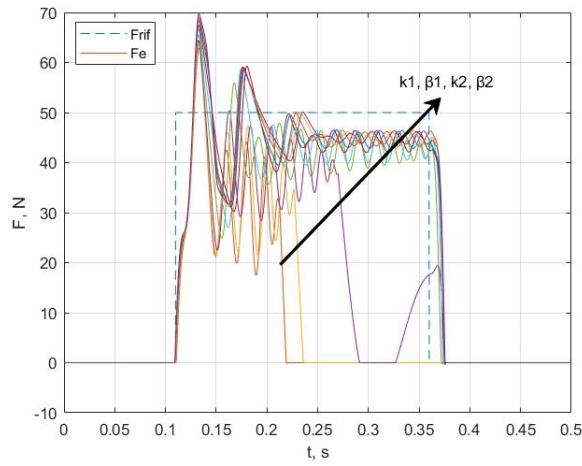


Figura 3.30: Risposta modello teorico al variare delle cedevolezze

### 3.3 Modello SIMULINK versione 2

Un ulteriore sviluppo del modello è consistito nell'individuazione di un nuovo tipo di controllo che consentisse di migliorare il funzionamento del sistema reale. L'attenzione è stata posta sulla possibilità di controllare anche la fase di approccio, questo soprattutto in riferimento all'applicazione clinica, dove sarebbe utile controllare la velocità con cui lo stelo si muove verso la massa da colpire. È necessario sempre tenere in considerazione la sicurezza del test, inoltre il movimento dello stelo nelle prime fasi di funzionamento deve essere rapido per limitare la durata complessiva della prova ma non troppo da far sorgere problemi nell'impatto; basti pensare al caso in cui si abbia una distanza ridotta tra operatore e soggetto, una eccessiva velocità può determinare perturbazioni significative, senza sviluppare il profilo desiderato. Gestendo questa fase in anello aperto, si ha la possibilità di definire delle tensioni in seguito a valutazioni sulla velocità di uscita dello stelo. Quindi sulla base di queste premesse sono state considerate due possibili soluzioni:

- *Controllo in forza della fase di approccio;*
- *Controllo in posizione della fase di approccio*

#### 3.3.1 Fase di approccio controllata in forza

Con il controllo in forza si vuole dare un riferimento di forza costante pari alla soglia imposta per passare alla fase di strike (5N). La prima considerazione da fare è sicuramente relativa alla ridotta controllabilità della fase di approccio, perché si avrebbe un errore costante per tutta la fase fino al contatto con il corpo, che implica valori costanti di tensione alle valvole. In questo caso a differenza della prima versione del modello non vengono imposte dall'utente, che le individua in seguito ad una valutazione critica sulla velocità di fuoriuscita, ma vengono definite dal controllore. Il problema principale è legato alla sicurezza dell'operazione non potendo definire le tensioni di alimentazione. Questa configurazione richiede un secondo controllore PID avendo definito anche per l'approccio uno controllo in anello chiuso.

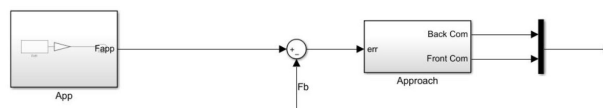


Figura 3.31: Ramo del modello simulink per il controllo della forza

L'individuazione dei parametri ottimali ha richiesto una valutazione più attenta, è stato necessario ragionare anche sulla banda morta delle valvole. La banda morta consiste nel campo di variazione dell'ingresso per cui la valvola non produce alcuna variazione significativa dell'uscita, nello specifico della fase di approccio questo parametro diventa fondamentale essendoci un errore di 0.05V, ottenuto come differenza dei 5N di riferimento e 0N letti dalla cella, divisi per la sensibilità di 100 N/V della cella. L'entità ridotta del segnale di riferimento richiede un contributo proporzionale elevato per non cadere all'interno della banda morta e non ottenere alcun risultato. Sulla base delle analisi condotte sulle valvole, è stata definita una banda morta del 2%, che richiede un  $k_p$  nel controllore della fase di approccio superiore ai 5V/V, per far lavorare il modello. I parametri del modello non sono stati modificati dalla versione precedente, si considera sempre il caso completamente fisso per semplicità di studio, e il  $k_p$  del controllo in fase di approccio è posto pari a 10V/V.

Un'altra ragione che ha indotto a percorrere la strada della definizione di un profilo di forza costante, è legata a ciò che accade nel passaggio dalla fase di approach a quella di strike, in cui si ottiene un errore negativo in ingresso al PID che si traduce in un segnale di rientro per lo stelo. Questo determina un comportamento anomalo, molto visibile nel riferimento sinusoidale (picco di primo contatto).

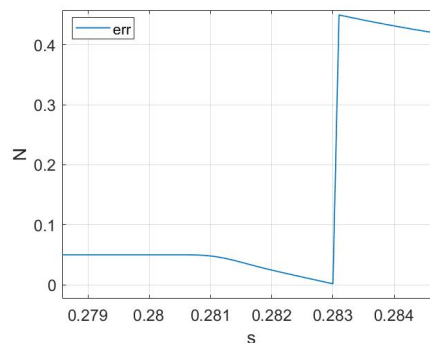


Figura 3.32: Andamento errore per modello con approccio controllato in forza

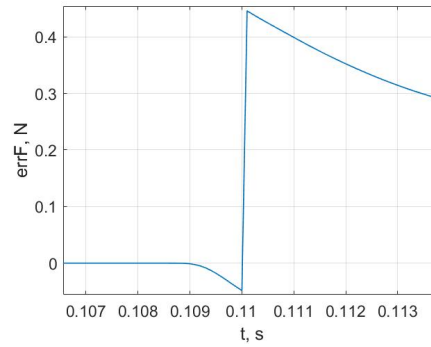


Figura 3.33: Andamento errore per modello con approccio controllato in anello aperto

Attraverso il profilo di forza costante si vuole ridurre l'effetto di variazione di tensione sulle valvole nel passaggio tra le due fase. L'errore sarà comunque decrescente, con una riduzione della tensione alle valvole, ma senza invertire il flusso nelle camere del cilindro. In Figura 3.32 si evidenzia il diverso andamento dell'errore, per un riferimento ad onda quadra.

Come ipotizzato il picco iniziale, che si visualizzava nella versione precedente, si riduce con effetti differenti a seconda del riferimento in forza fornito. Il primo caso preso in esame è il riferimento ad onda quadra, il segnale è sempre un impulso di 50N con durata di 250ms.

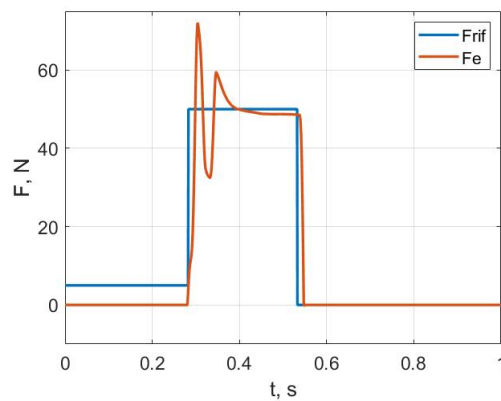


Figura 3.34: Risultato modello teorico versione 2, fase di approccio controllata in forza

Nello specifico l'avvallamento che nelle prove di figura 3.17b è marcato, in 3.35

è praticamente assente, questo influenza anche l'overshoot che si presentava nella versione 1, si raggiungono in questo caso valori di picco più alti mantenendo valori ridotti nel tratto a regime (Figura 3.36. Questa risposta si ottiene sempre mantenendo i risultati ottimali ricavati nello studio del modello precedente.

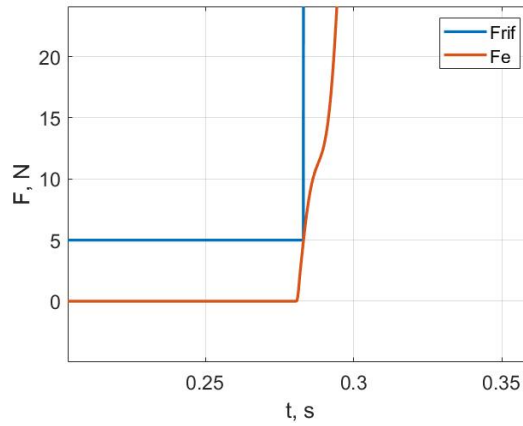


Figura 3.35: Particolare picco di primo contatto, fase di approccio controllata in forza

Le differenze tra i due modelli sono visibili in maniera più accurata in Figura 3.36 dove, oltre al primo avvallamento che si ha con valori di forza ridotti, anche l'ampiezza di oscillazione aumenta, e il valore a regime si mantiene su valori inferiori ai 50 N.

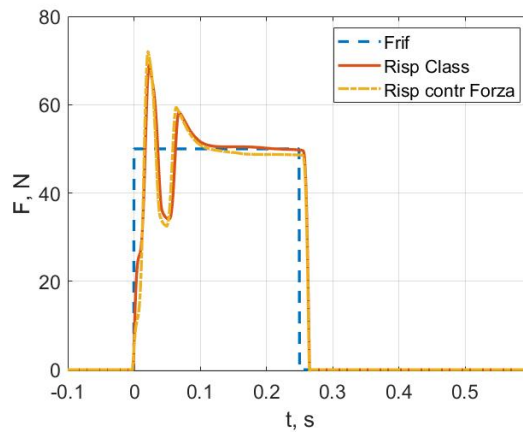


Figura 3.36: Confronto tra le due versioni del modello teorico

In termini numerici in tabella 3.10 i risultati si possono confrontare con la tabella 3.8. L'errore di accuratezza si riduce, ma a discapito dell'errore di tracking che aumenta leggermente, pur mantenendosi sul 15%. Sicuramente l'ampiezza di oscillazione che si ottiene ha un'entità significativa, nell'ottica della prova sperimentale si dovrebbe cercare di ridurre questo comportamento, accettando un errore maggiore sul tracking.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.55Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26s$
Errore ACC	0.46%
Errore TCK	15.75%

Tabella 3.10: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.34

In considerazione di ciò si è eseguito un processo iterativo che consentisse di ridurre il picco massimo raggiunto, senza soffermarsi sugli errori di accuratezza e tracking che inevitabilmente aumentano. In particolare si è imposto come valore massimo 50N, condizione molto restrittiva ma allo stesso tempo utile ad individuare il minimo valore di  $k_p$  accettabile

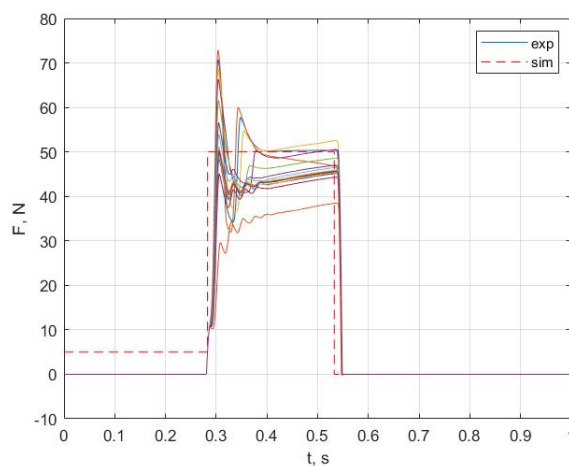


Figura 3.37: Fitting per ridurre il max picco

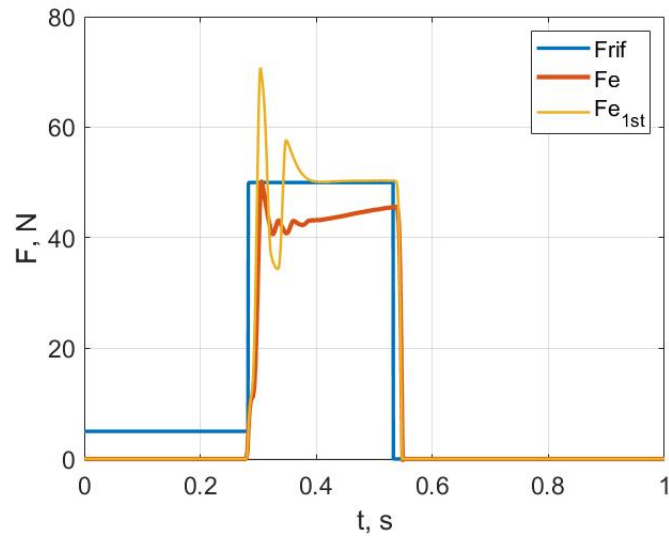


Figura 3.38: Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sul valore massimo

La curva ottimale si ottiene per un  $k_p$  di 2.9, per cui il picco max si attesta sui 50N, ma lo scostamento a regime aumenta. Dalla tabella 3.11 è evidente il peggioramento dei risultati, ma questa analisi permette di restringere il campo di variabilità del  $k_p$ , partendo proprio da un valore minimo di 2.9.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.1Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-11.43\%$
Errore TCK	$21.1\%$

Tabella 3.11: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.38

Attraverso un processo iterativo vincolato alle due variabili del PID,  $k_p$  e  $k_i$ , soffermandosi sull'errore di accuratezza si è cercata una soluzione che mantenesse lo stesso andamento di curva diminuendo il picco massimo raggiunto, non si è agito

sul contributo derivativo perché il modello si mostra molto sensibile ad una sua variazione. L'analisi mostra un risultato ottimale con  $k_p=2.9$  e  $k_i=24.2$ :

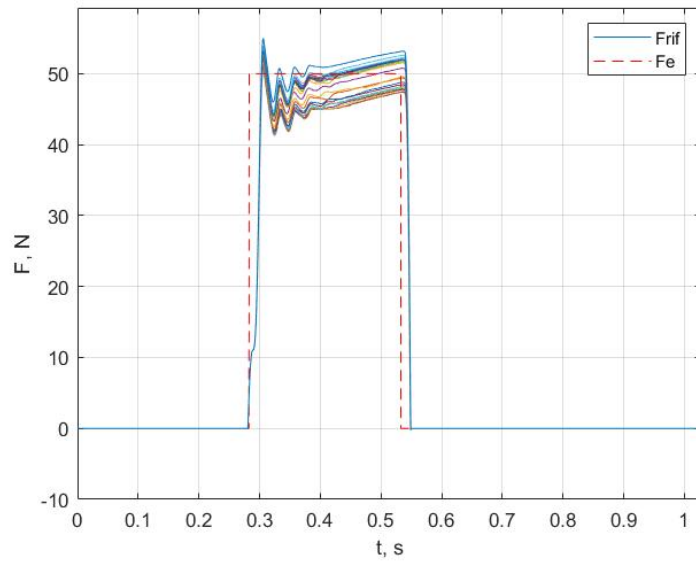


Figura 3.39: Fitting  $k_p$  e  $k_i$

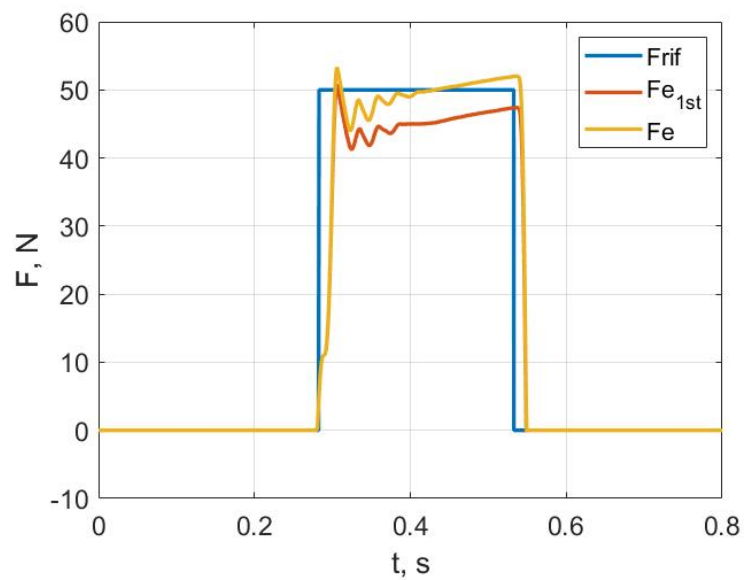


Figura 3.40: Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sui valori di  $k_p$  e  $k_i$

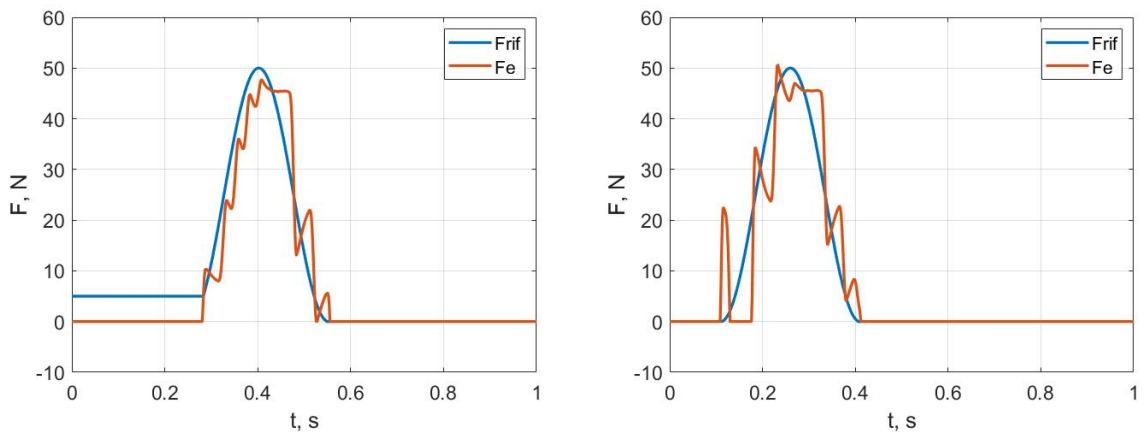


Variare anche il contributo integrativo consente di lavorare con un  $k_p$  minore, ottenendo un errore di tracking inferiore al 15%, e raggiungendo valori massimi dell'ordine dei 53N.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.5Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-0.12\%$
Errore TCK	$13.13\%$

Tabella 3.12: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.40

Il particolare andamento dell'errore influisce principalmente sulla risposta sinusoidale. Oltre al comportamento nel primo contatto, è importante considerare la diversa pendenza tra risposta del modello e riferimento. Come segnale di riferimento si considera la sinusoide modificata, dati i risultati migliori che determina.



(a) Riferimento sinusoidale, approccio contr. forza (b) Riferimento sinusoidale, approccio in anello aperto

Figura 3.41: Risultato modello teorico versione 2 con riferimento sinusoidale

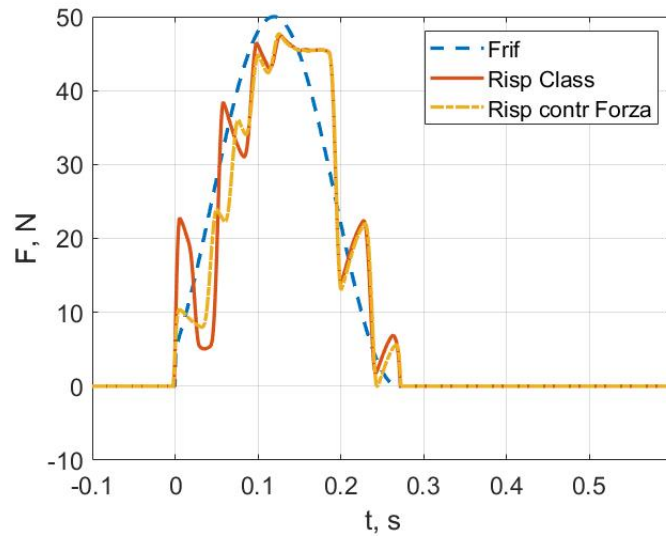
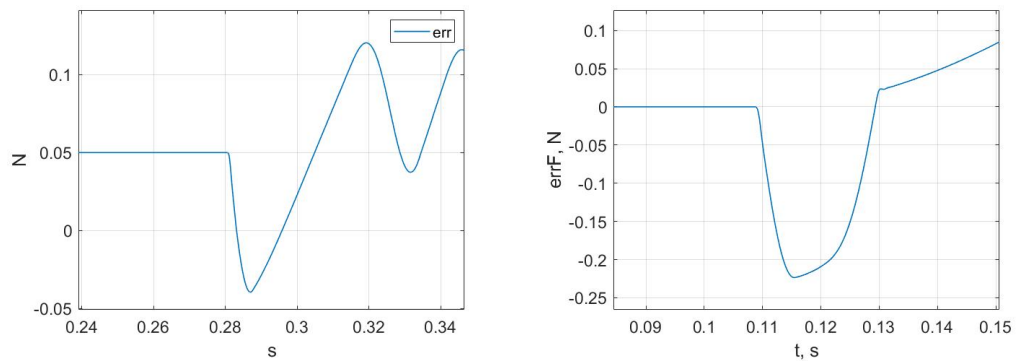


Figura 3.42: Confronto tra le due versioni del modello teorico, rif. sinusoidale

Dalla Figura 3.42 si osserva l'assenza del picco di primo contatto e un aumento delle oscillazioni, anche in questo caso il comportamento è dovuto al particolare andamento dell'errore.



(a) Modello con approccio controllato in forza

(b) Modello con approccio controllato in anello aperto

Figura 3.43: Andamento errore per le due versioni del modello con riferimento sinusoidale

Anche in questo caso l'errore scende leggermente al disotto dello zero, a causa della diversa pendenza delle due curve, ma non tanto da determinare un comando di rientro dello stelo.

In confronto ai risultati della tabella 3.9 è evidente il miglioramento del tracking, mantenendo inalterati gli altri parametri:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.3Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-2.3\%$
Errore TCK	$21.9\%$

Tabella 3.13: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva di Figura 3.41a

Il modello nella sua versione modificata, pur mantenendo lo stesso  $k_p$ , ha restituito risultati migliori. Da qui si è verificato se il minimo errore di tracking si ottenesse ancora per  $k_p = 5$ :

PARAMETRO	VALORE	PARAMETRO	VALORE
kp-ottimale	4.5	kp-ottimale	6.8
Impulso ID	$12.5Ns$	Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$12.6Ns$	Impulso FB	$7.2Ns$
Durata ID	$0.25s$	Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.27s$	Durata FB	$0.23s$
Errore ACC	$1.13\%$	Errore ACC	$-3.2\%$
Errore TCK	$15\%$	Errore TCK	$19.2\%$

(a) Risultati riferimento onda quadra

(b) Risultati riferimento sinusoidale

Tabella 3.14: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per  $k_p$  ottimale, modello ver.2

Per l'onda quadra i valori migliorano con un  $k_p$  leggermente più piccolo, ma in confronto alla tabella 3.12 si evince come con un contributo integrativo l'errore di tracking scenda al disotto del 15%.

Con il riferimento sinusoidale, maggiormente influenzato dalla modifica attuata, si

ottengono valori migliori per  $k_p=6.8$ , per il quale l'errore di tracking si riduce del 14% e la durata del 17%, con un piccolo aumento dell'errore di accuratezza rispetto al caso descritto in tabella 3.13.

In generale il valore ottimale si attesta su un intorno di 5, leggermente superiore per il riferimento sinusoidale ma senza eccedere troppo, determinando un complessivo miglioramento dei risultati.

Questo è un altro contributo che inficia la robustezza del modello, rimarcando la differenza tra il riferimento sinusoidale e ad onda quadra. Però allo stesso tempo ricercando i valori ottimali dei contributi si riesce ad omogeneizzare il risultato relativo all'impulso o alla sua durata per i diversi riferimenti.

### 3.3.2 Modello del sistema svincolato con controllo in forza della fase di approccio

Allo stesso modo del paragrafo 3.2.1 si è analizzata la seconda versione del modello variando le cedevolezza dei due componenti mobili. Il primo aspetto che si riscontra è il comportamento simile del modello rispetto al caso precedente, con un riferimento ad onda quadra.

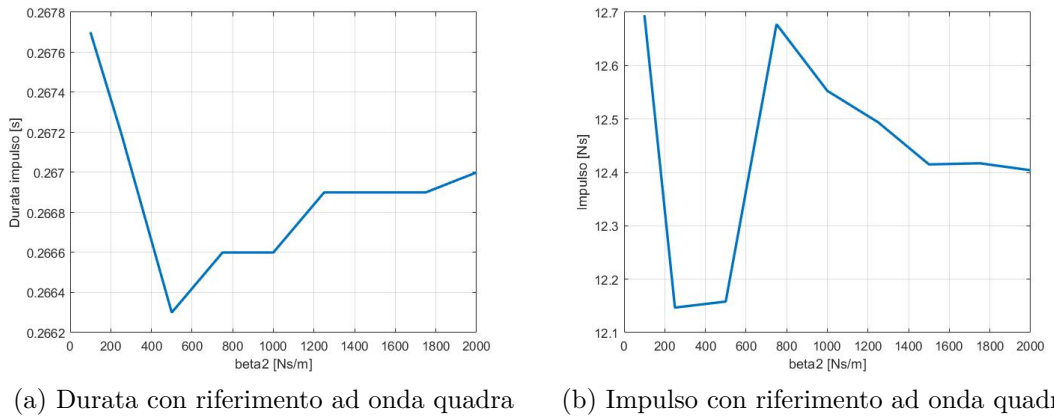
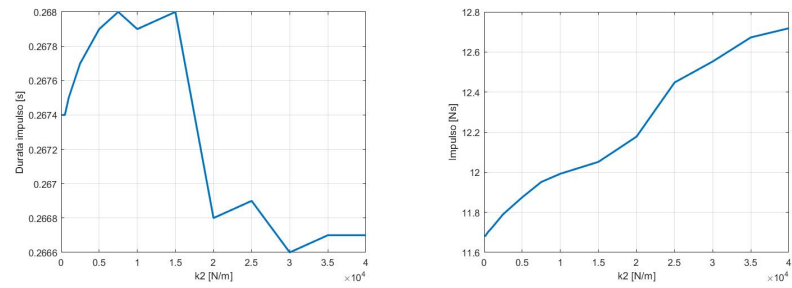
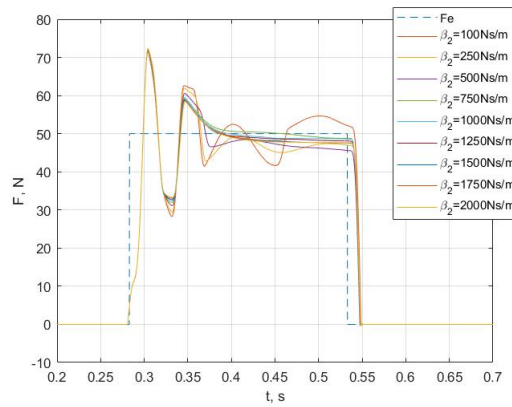


Figura 3.44: Andamento durata e impulso per diversi valori di smorzamento della massa impattata, modello con controllo forza

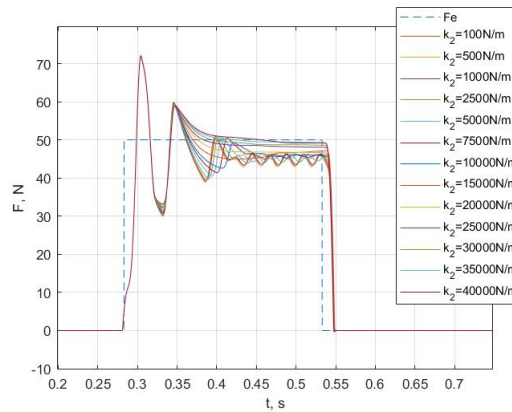


(a) Durata con riferimento ad onda quadra (b) Impulso con riferimento ad onda quadra

Figura 3.45: Andamento durata e impulso per diversi valori di rigidità della massa impattata, modello con controllo forza



(a) Risposta al variare di  $\beta$



(b) Risposta al variare di  $k$

Figura 3.46: Risposta modello versione 2 al variare dello smorzamento e della rigidità della massa impattata

Per quanto riguarda l'onda sinusoidale l'effetto è sicuramente più evidente dati gli effetti che le modifiche al controllo hanno apportato.

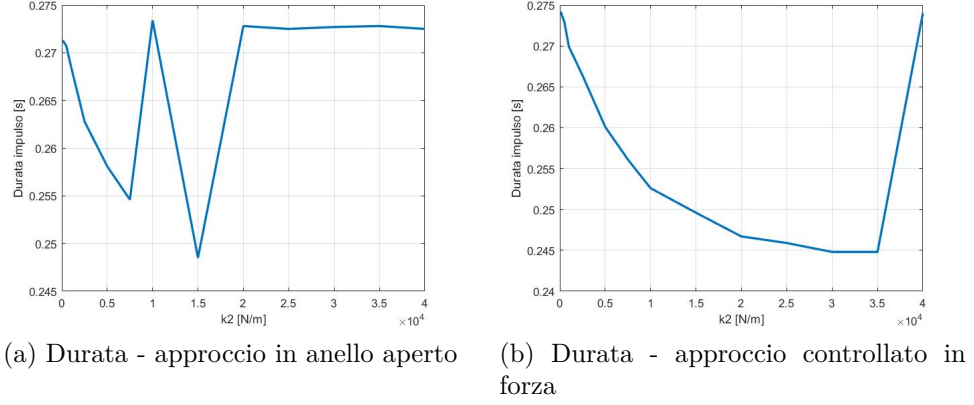


Figura 3.47: Andamento durata al variare della rigidità della massa impattata

In Figura 3.47b si ha una riduzione della durata al crescere della rigidità, fino al valore di  $35000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  che riporta a valori di 275ms. Dalla Figura 3.47a si ha un picco in corrispondenza dei  $1000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  fino al valore circa 270ms, mantenuto costante dopo i  $2000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ .

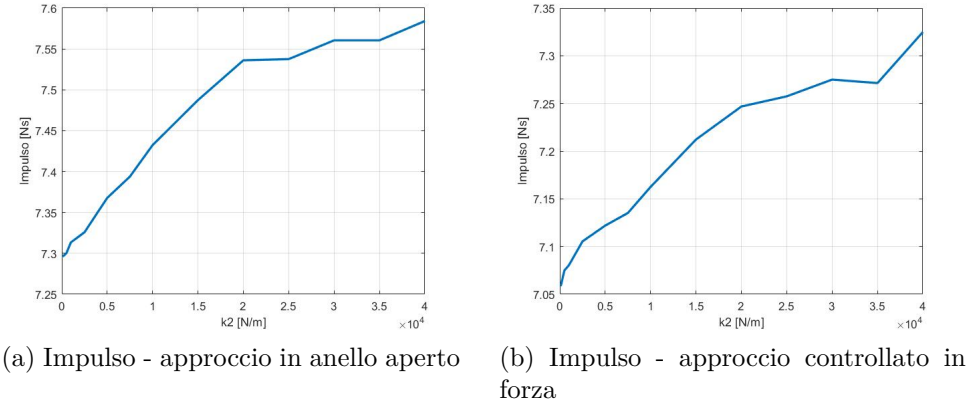
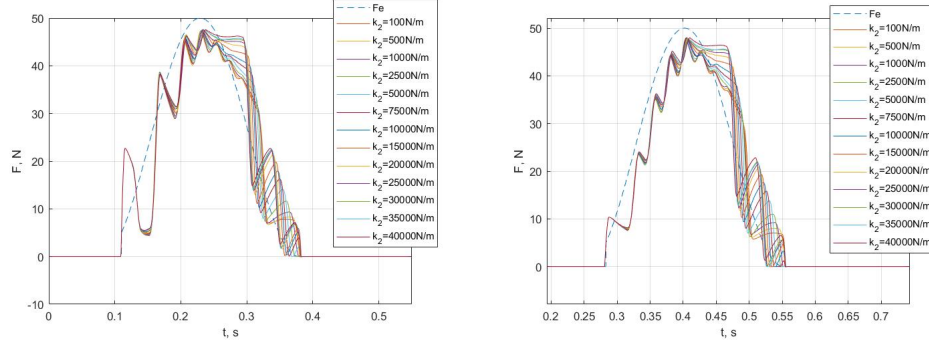


Figura 3.48: Andamento impulso al variare della rigidità della massa impattata

Per quanto riguarda l'impulso, l'andamento è crescente per entrambe le versioni del modello, si ha un valore di impulso maggiore nel sistema con fase di approccio gestita in anello aperto. Per l'intero range di rigidità l'aumento di impulso è

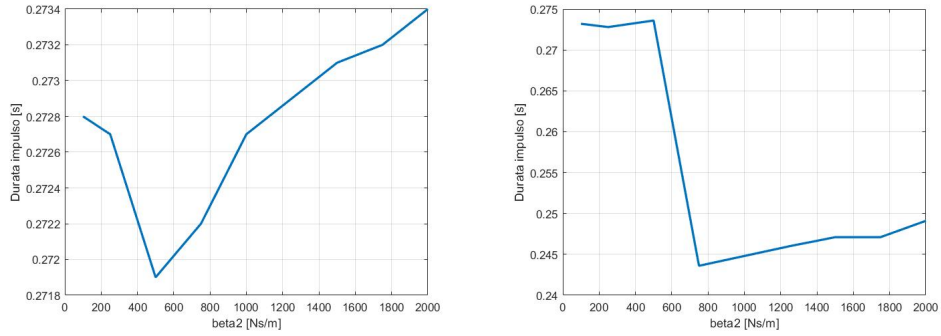
sempre dell'ordine di 0.2Ns-0.3Ns, mantenendosi su valori più vicini al valore di riferimento nel caso di Figura 3.48a.



(a) Risposta - approccio in anello aperto (b) Risposta - approccio controllato in forza

Figura 3.49: Risposta al variare della rigidità della massa impattata

Variando la rigidità  $k_2$  si osserva un comportamento anche in questo caso molto simile tra i due modelli, con una maggiore influenza nel tratto discendente della curva.



(a) Durata - approccio in anello aperto (b) Durata - approccio controllato in forza

Figura 3.50: Andamento durata al variare dello smorzamento della massa impattata

La durata dell'impulso tende, nel primo caso (Figura 3.50a), a crescere a partire dai  $500 \frac{Ns}{m}$  ma la variazione è molto ridotta perchè incide sull'ordine del millisecondo. Più significativa è la riduzione in Figura 3.50b, al di sopra dei  $750 \frac{Ns}{m}$  le durate si attestano sui 245ms.

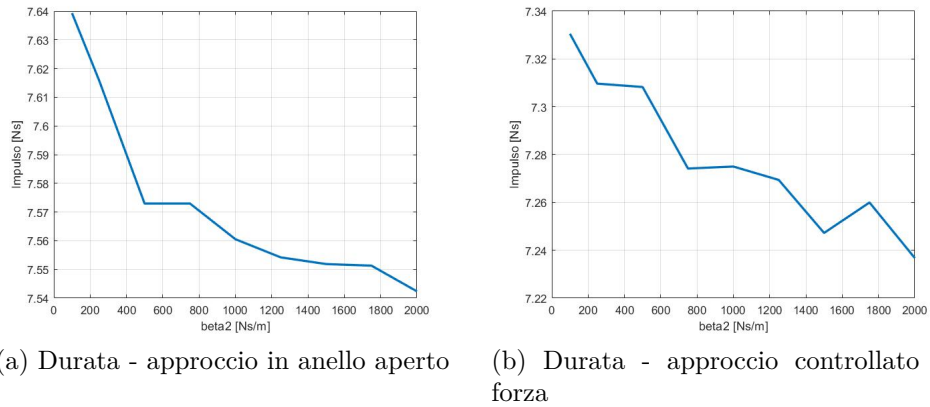


Figura 3.51: Andamento impulso al variare dello smorzamento della massa impattata

L'impulso ha una tendenza decrescente in entrambi i casi, il picco di primo contatto determina dei valori maggiori che si mantengono sui 0.3Ns superiori al caso in cui si ha il controllo in forza della fase di approccio.

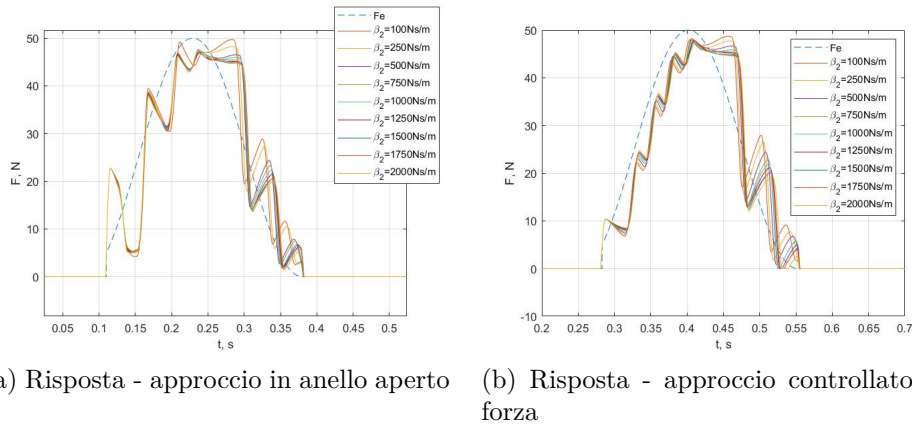


Figura 3.52: Risposta al variare dello smorzamento della massa impattata

La variazione combinata di smorzamento e rigidezza per la versione con controllo in forza dell'approccio nel caso di riferimento ad onda quadra determina risultati identici alla versione controllata in anello aperto.



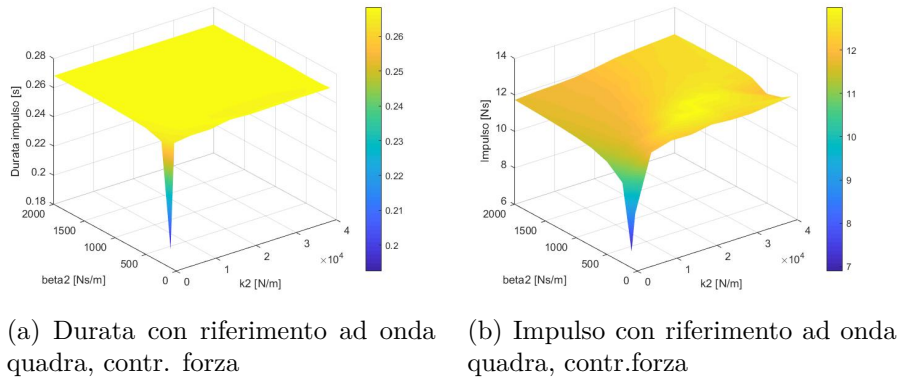


Figura 3.53: Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidezza della massa impattata

Più rilevante è il comportamento per un riferimento sinusoidale, per il quale si ottiene: un andamento costante dell'impulso eccetto l'area compresa tra  $500 \frac{Ns}{m}$  e  $5000 \frac{Ns}{m}$ ; e una variabilità più accentuata per la durata, per il quale si raggiungono valori vicini a 270ms per rigidezze e smorzamenti bassi, e si attesta su 250ms per valori superiori ai  $1000 \frac{Ns}{m}$  e i  $500 \frac{Ns}{m}$ .

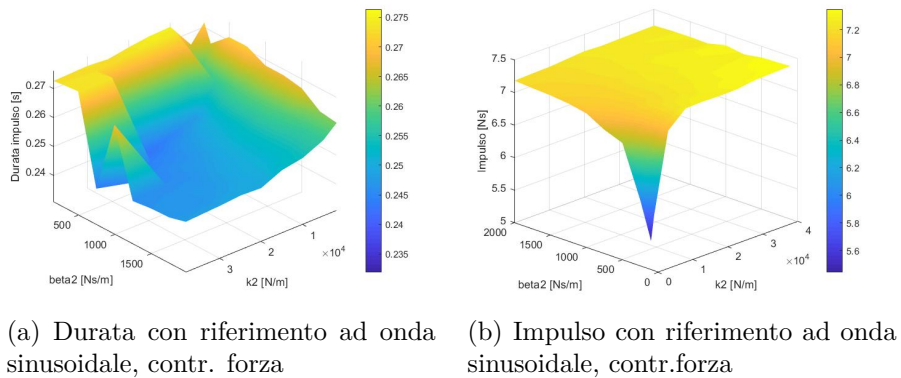


Figura 3.54: Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidezza della massa impattata, rif. sinusoidale

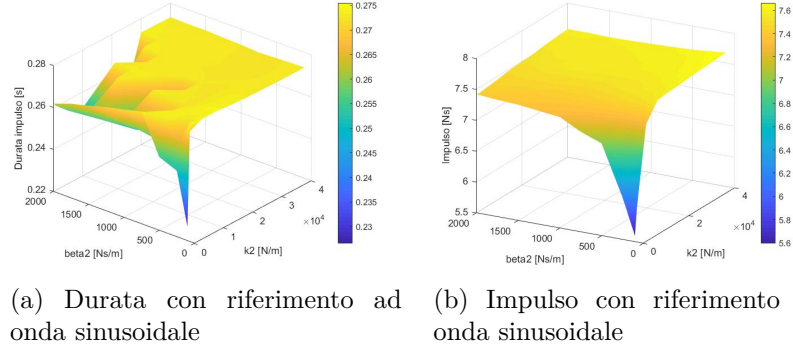


Figura 3.55: Andamento impulso e durata per valori combinati di smorzamento e rigidità della massa impattata, riferimento sinusoidale, fase di approccio controllata in anello aperto

Il controllo in anello aperto mostra un andamento della durata che si mantiene costante al variare della rigidità per valori ridotti di smorzamento e al variare dello smorzamento per valori elevati di rigidità. L'impulso ha un andamento simile al caso precedente, mantenendosi costante per un buon range di  $k$  e  $\beta$ .

In Figura 3.57 e 3.56 si mostrano le risposte per il sistema completamente svincolato per entrambe le versioni del modello. Anche in questo caso l'analisi diventa complessa considerando l'assenza di informazioni relative alle cedevolezza reali.

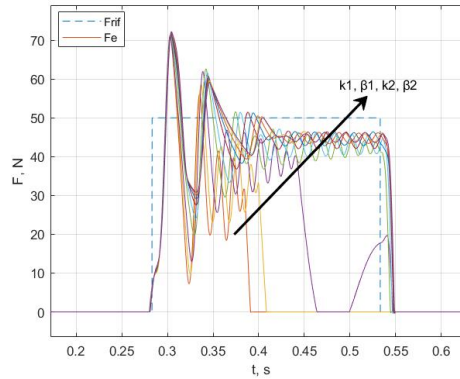
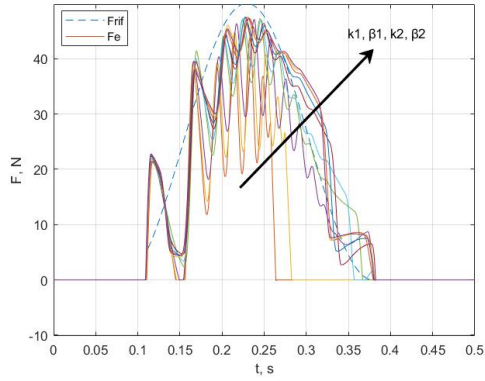


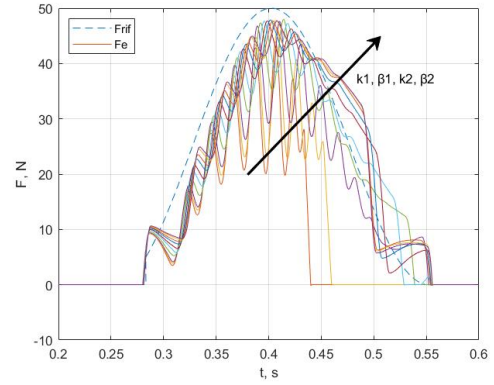
Figura 3.56: Risposta al variare delle cedevolezza, riferimento ad onda quadra, fase di approccio controllata in forza

In generale si osserva, per un riferimento sinusoidale, un variazione in termini di oscillazioni, che si riducono a partire da:  $k_1 = 4000 \frac{N}{m}$ ,  $\beta_1 = 400 \frac{Ns}{m}$ ,  $k_2 = 2000 \frac{N}{m}$ ,

$\beta_1 = 350 \frac{Ns}{m}$ ; inoltre si presenta un ulteriore avvallamento all'aumentare dei valori di cedevolezza. Altro particolare da sottolineare è come basse rigidezze implicino una durata molto ridotta del colpo a causa della perdita di contatto tra stelo e massa.



(a) Fase di approccio in anello aperto



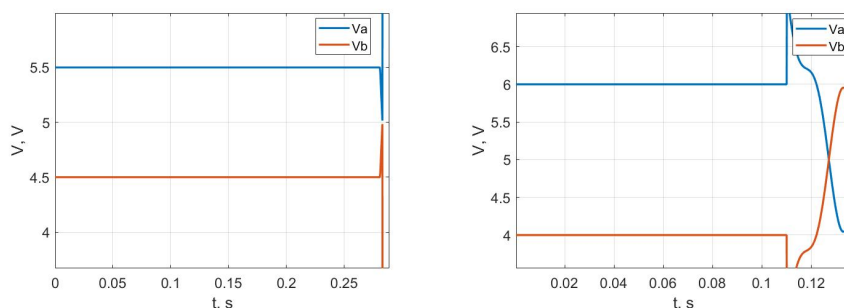
(b) Fase di approccio controllato in forza

Figura 3.57: Andamento risposta al variare delle cedevolezza, riferimento sinusoidale

Il controllo in forza della fase di approccio migliora i risultati del modello, introducendo una prima forma di gestione della fase di uscita dello stelo. Sicuramente i termini di variabilità in questo caso sono ridotti, la scelta del riferimento di forza è vincolato alla soglia imposta per il passaggio alla fase di strike, che a sua volta è condizionato dal comportamento del sistema reale. Il valore di 5N è scelto sulla base del rumore esterno che viene rilevato dalla cella di carico, una soglia inferiore rischierebbe di alterare la giusta sequenza di azioni. Questa condizione limita la possibilità di modificare l'entità di forza dell'approccio, soprattutto nel caso del riferimento sinusoidale che deve essere modificato alla luce del valore iniziale dell'onda per definire un valore nullo di errore.

Il profilo di forza durante l'approccio incide in maniera diretta sulla velocità di uscita dello stelo, con un andamento costante dell'errore si vincola la velocità di uscita dello stelo, che al contrario del caso del controllo in anello aperto non è legato al valore di tensione definito dall'utente. Sicuramente la velocità dello stelo è la grandezza che implica il diverso comportamento del modello, è utile quindi osservare l'andamento delle tensioni nella fase di uscita.

Nel caso del controllo in anello chiuso (Figura 3.58a) si hanno sempre tensioni costanti ma di entità ridotta: 5.5V e 4.5V; in Figura 3.58b i valori sono definiti dall'utente: 6V e 4V. Quindi la differenza sta nella velocità con la quale lo stelo arriva a contatto con il corpo, ma i limiti del controllo in forza rispetto al valore da attribuire rende questo metodo poco versatile e quindi di difficile applicazione pratica, a meno di modificare a seconda della prova le caratteristiche del profilo di forza.



(a) Fase di approccio controllata in forza (b) Fase di approccio in anello aperto

Figura 3.58: Andamento tensioni per riferimento ad onda quadra per i due modelli

Il comportamento delle tensioni è legato anche all'utilizzo della sola componente proporzionale del controllore PID presente nella fase di approccio. Quindi considerando che l'unico effetto su cui incide questa fase è il picco di primo contatto tra stelo e massa, viene mostrata l'influenza che  $k_p$  e  $k_i$  hanno sul modello:

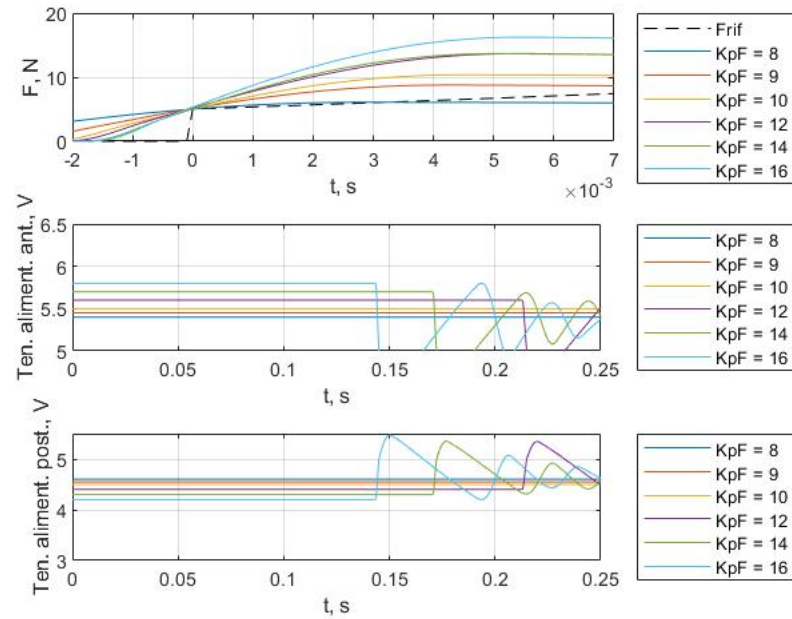


Figura 3.59: Confronto tra diversi  $k_p$  del PID della fase di approccio

Si nota in questo caso l'influenza sulla velocità di uscita dagli andamenti delle tensioni che in assenza del contributo integrativo si mantengono comunque costanti. Degli effetti si hanno anche sul comportamento in corrispondenza del contatto iniziale, per cui oltre ad iniziare prima, si ha una pendenza crescente che influisce proprio sul primo picco che aumenta, questo andamento si ottiene all'aumentare del  $k_p$ , con effetti sul tratto di salita della risposta.

In Figura 3.60 è mostrata la risposta complessiva del modello al variare del  $k_p$ , in cui si osserva la modifica del tratto iniziale della curva e come va a influenzare il prosieguo della risposta.

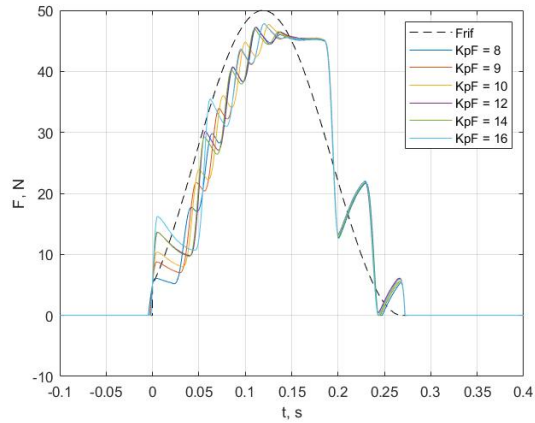


Figura 3.60: Andamenti risposta per diversi kp del PID della fase di approccio

Variando al contrario solo il contributo integrativo, si evince l'andamento crescente delle tensioni per l'accumulo dell'errore. In questo caso l'influenza che ha sul tratto iniziale di risposta è meno evidente, considerando il maggiore effetto del kp, posto in questa analisi pari a 10, per questo sono stati valutati ki di entità maggiore.

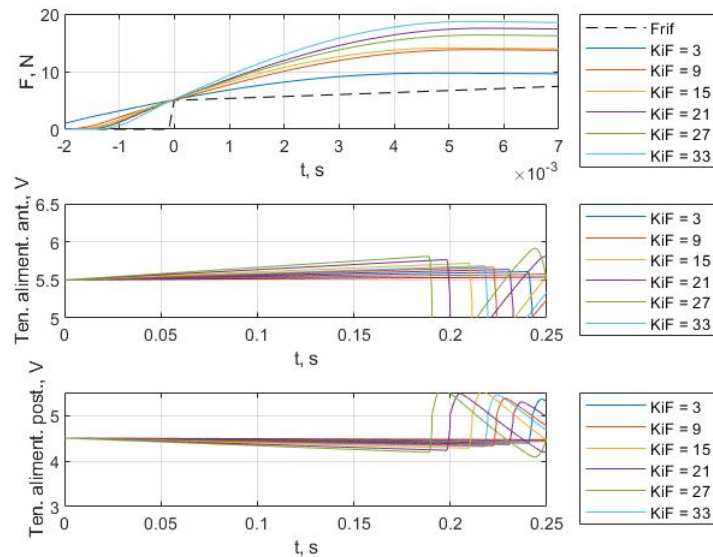


Figura 3.61: Confronto tra diversi ki del PID della fase di approccio

La risposta segue lo stesso comportamento relativo alla variazione del  $k_p$ , quindi influenzando principalmente sul tratto di salita.

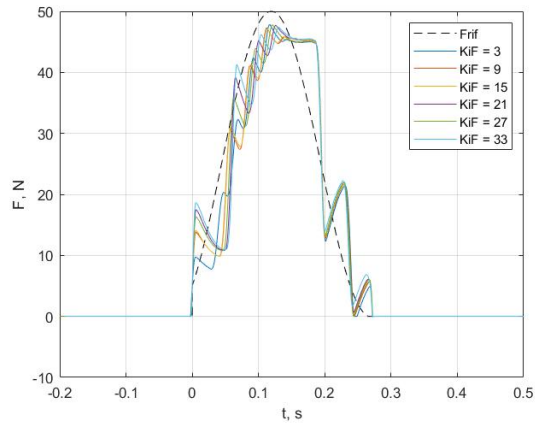


Figura 3.62: Andamenti risposta per diversi  $k_i$  del PID della fase di approccio

Un'idea qualitativa dell'andamento al variare di entrambi i parametri, permette di osservare come un aumento eccessivo determini un comportamento identico al caso privo di controllo in forza della fase di approccio.

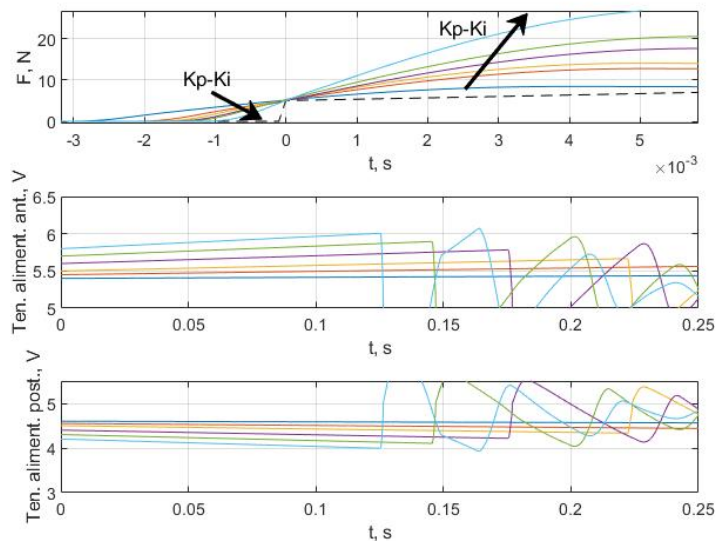


Figura 3.63: Confronto tra diversi  $k_p$  e  $k_i$  del PID della fase di approccio

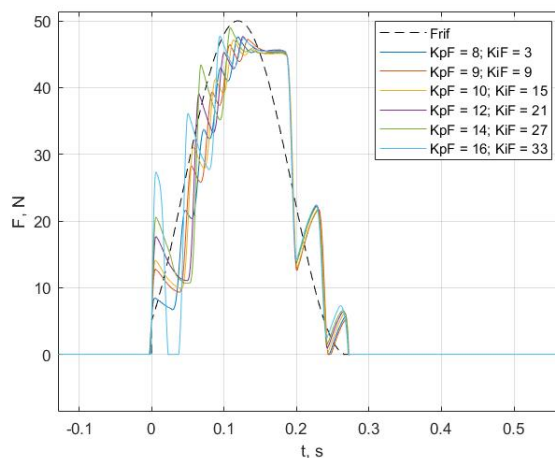


Figura 3.64: Andamenti risposta per diversi  $k_p$  e  $k_i$  del PID della fase di approccio

### 3.3.3 Fase di approccio controllata in posizione

I risultati analizzati nei paragrafi precedenti evidenziano come il controllo della fase di approccio determini dei miglioramenti al funzionamento del modello. Come già anticipato l'aspetto principale da considerare è l'individuazione di un sistema che sia allo stesso tempo funzionale e sicuro. Un controllo che non permetta di agire direttamente sulla velocità di fuoriuscita dello stelo non garantisce degli standard di sicurezza tali da poter applicare un modello di questo tipo al caso clinico.

Una soluzione più congeniale da questo punto di vista è un controllo in posizione della fase di approccio realizzato attraverso il sensore Banner Q4XTULAF300-Q8 (Figura 2.9). Le caratteristiche di questo componente permettono di ottenere un controllo affidabile considerando i suoi tempi di risposta e il tempo di campionamento del sistema real-time.

L'idea è quella di fornire un riferimento in velocità costante, che integrato definisca il profilo di spostamento per lo stelo, corrispondente ad una rampa saturata per limitare il movimento entro la corsa massima consentita. Al riferimento in posizione viene sottratto il valore rilevato dal sensore, l'errore risultante entra nel blocco della fase di approccio dove un secondo controllore PID determina il valore delle tensioni che alimentano le valvole. Il passaggio alla fase di strike si realizza sempre quando il segnale letto dalla cella di carico supera la soglia definita, da questo istante in poi inizia la fase di controllo in forza identico alle versioni precedenti.



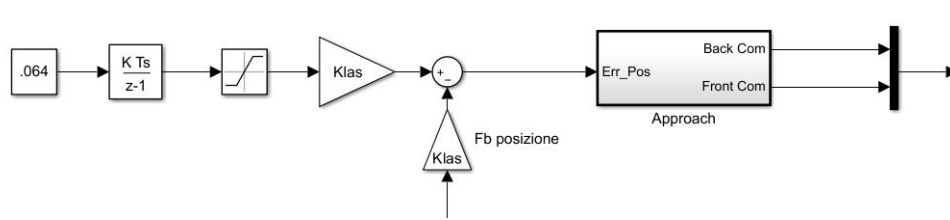


Figura 3.65: Ramo del modello simulink per il controllo della posizione

Viene utilizzato un integratore discreto identico a quello inserito nel modello simulink del sistema sperimentale. La velocità impostata è stata calcolata considerando uno movimento lineare dello stelo che coprisse i 0.08m, distanza tra l'estremità dello stelo e la massa da colpire, e un intervallo di tempo in cui eseguire questo spostamento. Il coefficiente angolare della retta ottenuta corrisponde al valore di velocità da imporre al modello.

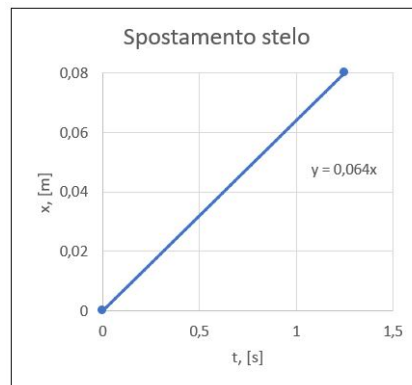


Figura 3.66: Spostamento ideale stelo

I blocchi *Klas* presenti in Figura 3.65 trasformano la grandezza cinematica in elettrica attraverso il guadagno del laser pari a  $100 \frac{V}{m}$ .

Il concetto di base di questa versione del modello non si discosta molto da quanto fatto nei modelli precedenti, se non per la possibilità di agire direttamente sull'entità della velocità.

Prima di analizzare i diversi risultati al variare dei segnali di riferimento, è utile approfondire la fase di approccio, quindi individuare i valori ottimali dei contributi

delle azioni PID.

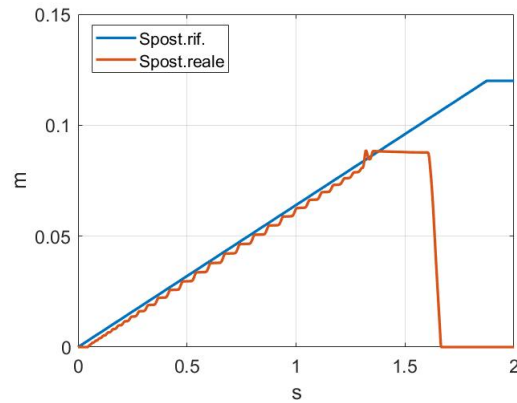


Figura 3.67: Andamento movimento stelo

In Figura 3.67 si ha il movimento dello stelo nell'intero ciclo di lavoro. Il controllo in posizione si ha fino al tratto costante della curva rossa, dove lo stelo ha raggiunto la massa e inizia il controllo in forza. Anche in questo caso la banda morta delle valvole incide, si nota dall'intervallo iniziale nel quale lo stelo non si muove a causa della ridotta entità dell'errore.

A differenza del controllo in forza, dove agendo sui parametri del controllore si modificava la velocità di impatto con la massa, in questo caso una loro variazione influisce sul modo in cui lo stelo segue la curva di riferimento. Nel caso mostrato, utilizzando solo un contributo proporzionale pari a 0.5 si osservano delle oscillazioni nel movimento dello stelo.

Il parametro ottimale deve garantire da un lato un giusto ricoprimento, quindi la capacità di seguire nel modo migliore il set, ma dall'altro deve essere il più lineare possibile, la presenza delle oscillazioni già con un  $k_p=0.5$  suggerisce una stretta dipendenza con l'aumento di questo parametro. Minimizzando l'errore quadratico tra set e feedback si ottiene un  $k_p=1.6$ , che però sviluppa notevoli oscillazioni nel movimento dello stelo. Da un punto di vista pratico si preferisce utilizzare un  $k_p$  inferiore, quindi vicino all'unità, che riduca questo effetto mantenendo un giusto compromesso sulla velocità con la quale raggiunge il target.

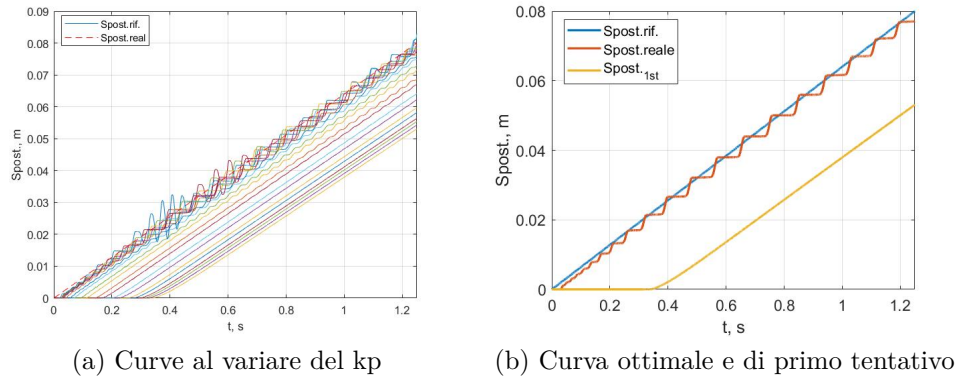


Figura 3.68: Fitting movimento stelo

Con un  $k_p=0.7$ , si ottiene un giusto compromesso tra oscillazioni e scostamento con il set.

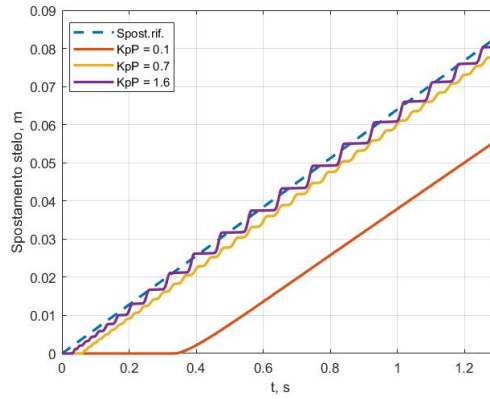


Figura 3.69: Spostamento stelo per diversi  $k_p$

Una variazione dei contributi integrativo e derivativo non apportano miglioramenti significativi, in quanto ragionando su una rampa, l'aspetto principale è sicuramente la prontezza del sistema che aumenta con il solo contributo proporzionale.

L'ottimizzazione realizzata ha riguardato il caso in cui la velocità dello stelo sia di  $64 \frac{mm}{s}$ , cambiando questa grandezza ci si aspetta una variazione della pendenza della rampa, ma senza alterare il comportamento dello stelo nei vari casi a parità di  $k_p$ .

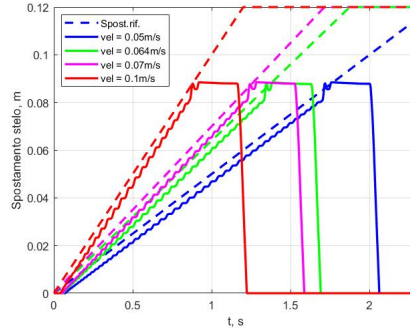


Figura 3.70: Spostamento stelo per diverse velocità

La Figura 3.70 evidenzia quanto detto, quindi la scelta del valore di velocità è legato esclusivamente all'istante in cui far avvenire il contatto, e, come osservato nei modelli precedenti, agli effetti che questo determina sul primo contatto con la massa.

Passando ai risultati relativi profilo di forza realizzato si analizza per primo il riferimento ad onda quadra. Il sistema è completamente vincolato, e lavora con gli stessi valori di guadagno del PID per la fase di strike dei modelli precedenti. Per il controllore della fase di approccio si è utilizzato il contributo proporzionale individuato (0.7). È evidente come la perturbazione si sviluppi ad un istante di tempo maggiore, quindi rispetto al controllo in forza lo stelo fuoriesce con una velocità inferiore.

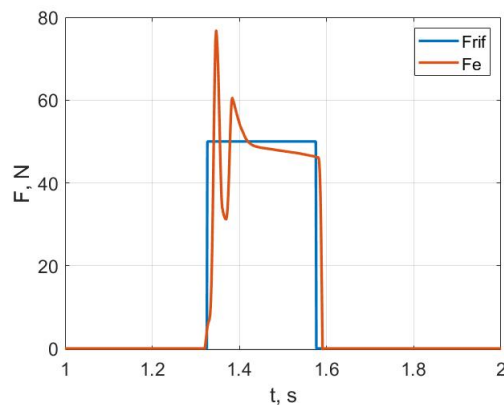


Figura 3.71: Risultato modello teorico con controllo in posizione della fase di approccio

Confrontando i risultati dei tre modelli si evincono le differenze relative al picco di primo contatto che si riduce realizzando la fase di approccio in anello chiuso.

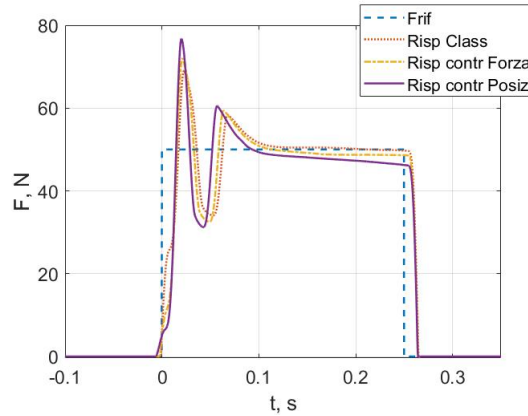


Figura 3.72: Confronto tra le tre versioni del modello teorico

Il modello migliora in prontezza, ma determina un overshoot maggiore, questo è legato sicuramente al diverso errore iniziale tra set e fb negli istanti iniziali della fase di strike. Se da un lato è necessario tenere in considerazione che le fasi di approccio vengono realizzate in condizioni differenti, nel senso che le velocità con cui lo stelo arriva a contatto con la massa sono diverse, è altrettanto vero che gli sviluppi del modello sono improntati proprio nel migliorare la gestione di questa fase di lavoro, riuscendo ad avere il controllo diretto di quello che accade. Al contrario il tratto discendente non mostra grandi differenze, tutte e tre le curve ritornano a zero con la stessa dinamica.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.3Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26s$
Errore ACC	$-1.54\%$
Errore TCK	$17.1\%$

Tabella 3.15: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.71

Rispetto ai risultati in tabella 3.10 si perde in accuratezza e tracking, e alla luce di un picco max vicino agli 80N, risulta necessario individuare una risposta che tenga principalmente conto del picco massimo raggiungibile.

I valori ottenuti fanno riferimento ad un parametro di  $k_p$  non ottimale, ma semplicemente un valore che potesse mettere a confronto i diversi modelli. Il  $k_p$  migliore per questo modello specifico è di 4.5, che consente di ridurre anche il picco massimo di forza, che si attesta sui 66N.

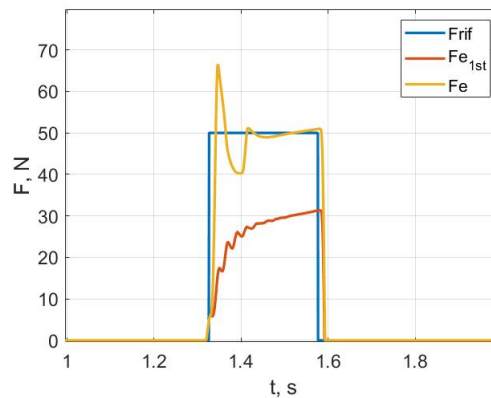


Figura 3.73: Curva di primo tentativo e ottimale sul  $k_p$ , con controllo in posizione

Con questo  $k_p$  a livello numerico si ha:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.7Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	1.9%
Errore TCK	15.6%

Tabella 3.16: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale rispetto al  $k_p$  migliore

Agendo in maniera specifica sul massimo valore raggiunto, evitando che superi i 50N, si individua il minimo valore di  $k_p$  accettabile.

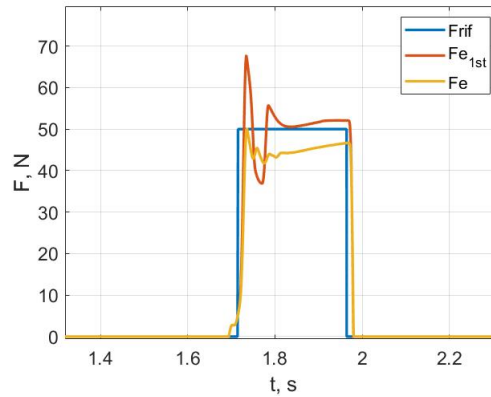


Figura 3.74: Curva di primo tentativo e ottimale del fitting sul valore massimo, con controllo in posizione

Il  $k_p$  varia tra un minimo di 3.1 e 4.5, valore che garantisce un minimo errore di tracking. Nella tabella seguente si mostrano il peggioramento della perturbazione ottenuta volendo limitare la forza massima impressa alla massa:

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.2Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27s$
Errore ACC	$-10.18\%$
Errore TCK	$20.19\%$

Tabella 3.17: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla curva ottimale di Figura 3.74

Andando a modificare il  $k_i$  per recuperare l'errore statico, si ottiene per un  $k_i=23.9$ , un buon risultato in termini di accuratezza senza eccedere troppo nei valori massimi raggiungendo un picco di circa 52N.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$12.5Ns$
Durata ID	$0.25s$

Durata FB	0.27s
Errore ACC	-0.1%
Errore TCK	13.1%

Tabella 3.18: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.75

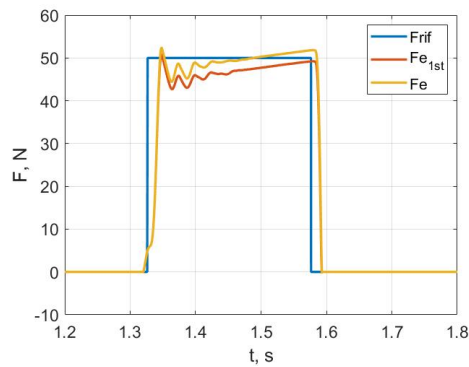


Figura 3.75: Curva di primo tentativo e ottimale del fitting su  $k_p$  e  $k_i$

In conclusione questo modello soggetto ad un input ad onda quadra richiede un  $k_p$  relativamente piccolo rispetto al  $k_i$ , riuscendo ad ottenere buoni risultati di tracking e accuratezza.

L'analisi del modello soggetto ad un set di forza di tipo sinusoidale si basa sulla forma d'onda di Figura 3.23, considerando i vantaggi che apporta.

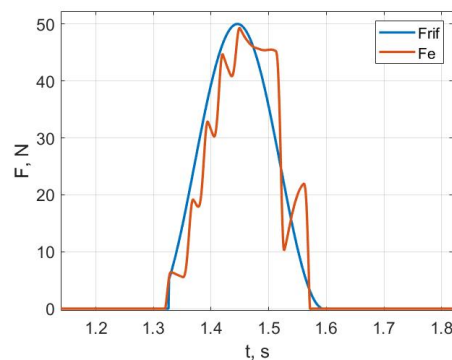


Figura 3.76: Risultato modello teorico con riferimento sinusoidale e controllo in posizione in apporcchio



Confrontando, a parità di parametri con quanto accade negli altri modelli si evidenzia il differente comportamento nel tratto in salita, giustificato sempre dalla differente velocità con la quale si muove lo stelo.

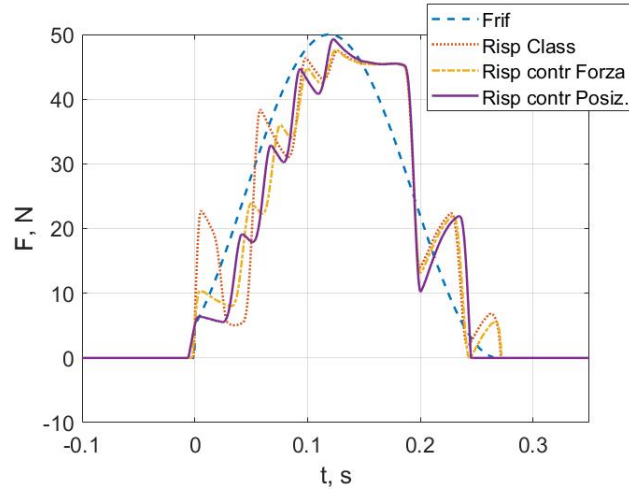


Figura 3.77: Confronto tra i tre diversi modelli con riferimento sinusoidale

Sicuramente in questo caso si ha un giusto compromesso tra la perturbazione ottenuta e la controllabilità dell'avvicinamento dello stelo.

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.2Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.24s$
Errore ACC	$-3.4\%$
Errore TCK	$22.2\%$

Tabella 3.19: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi a Figura 3.76

Valutando numericamente la differenza dal modello con controllo in forza (tabella 3.13) si evince un peggioramento, anche in questo caso, nel tracking e in accuratezza, non perdendo in impulso e durata del colpo.

Per questo tipo di riferimento il kp ottimale per l'errore di tracking è di 6.5.

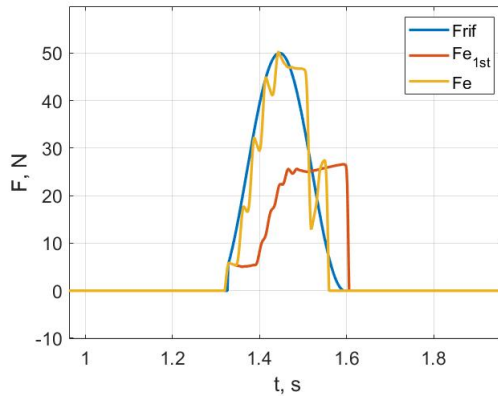


Figura 3.78: Curva ottimale del fitting sul kp, controllo posizione e riferimento sinusoidale

PARAMETRO	VALORE
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.3Ns$
Durata ID	$0.24s$
Durata FB	$0.22s$
Errore ACC	$-3.2\%$
Errore TCK	$21.3\%$

Tabella 3.20: Calcolo impulso per Figura 3.78

### 3.3.4 Modello del sistema svincolato con controllo in posizione della fase di approccio

Anche per questa versione del modello si analizza il comportamento al variare di rigidità e smorzamenti dei due componenti cedevoli. Si sottolinea come i risultati siano sempre da valutare qualitativamente, considerate le poche corrispondenze numeriche con il sistema reale.

Il primo caso analizzato è relativo alla variabilità della rigidità della massa impattata:

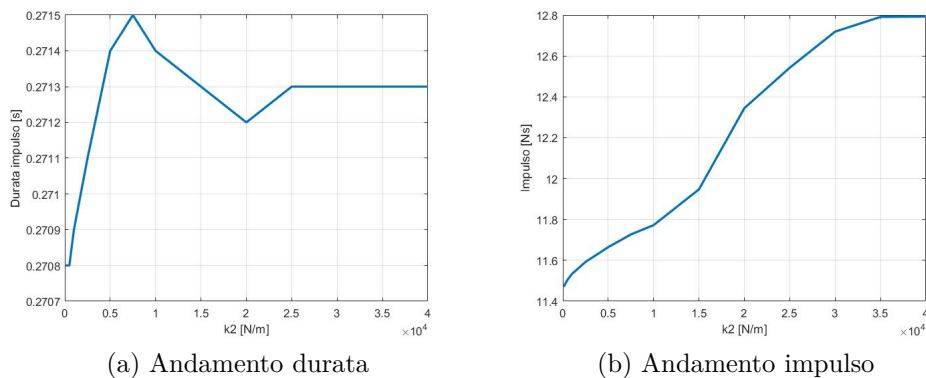


Figura 3.79: Andamenti impulso e durata al variare della rigidità  $k_2$ , con riferimento ad onda quadra

Il comportamento in entrambi i casi non si discosta da quanto ottenuto nei modelli precedenti, si tratta di differenze molto ridotte. Questo risulta più evidente nella Figura 3.80 da cui per valori superiori ai  $10000 \frac{N}{m}$  si perdono le oscillazioni nel tratto a regime.

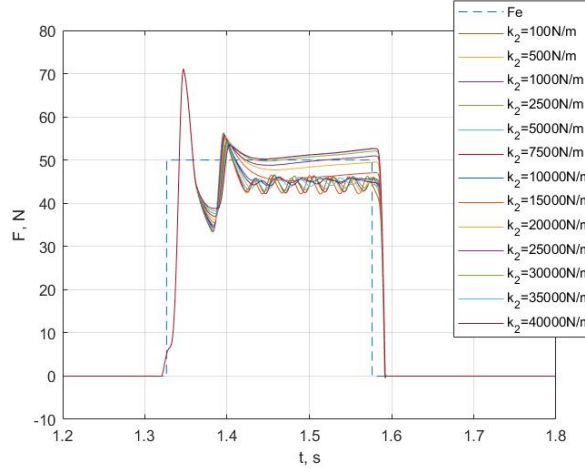
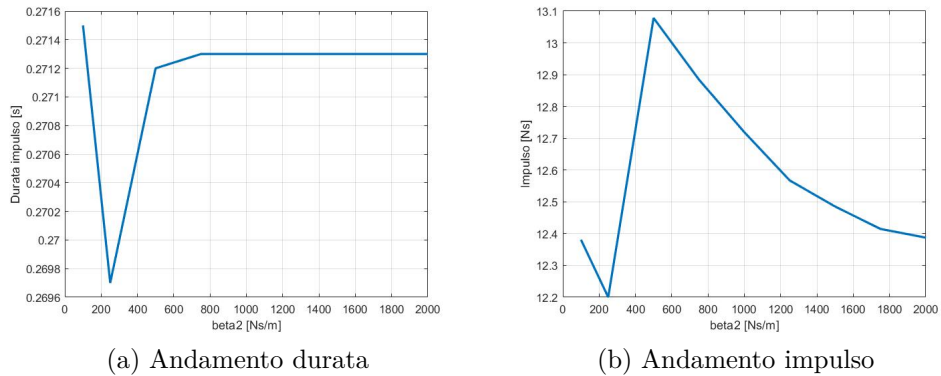


Figura 3.80: Risposta al variare di  $k_2$ , con riferimento onda quadra

Anche la variazione dello smorzamento porta risultati simili ai casi precedenti. La durata raggiunge valori costanti per valori di  $\beta_2$  superiori ai  $600 \frac{Ns}{m}$ .



(a) Andamento durata

(b) Andamento impulso

Figura 3.81: Andamenti impulso e durata al variare dello smorzamento  $\beta_2$ , con riferimento ad onda quadra

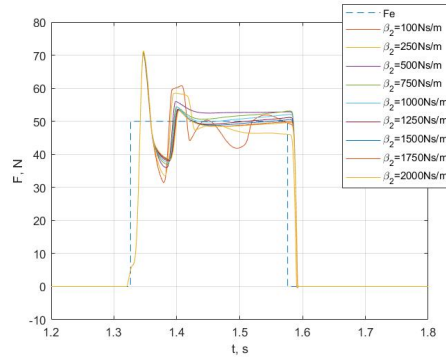


Figura 3.82: Risposta al variare di  $\beta_2$ , con riferimento onda quadra

Per quanto riguarda l'onda sinusoidale si ottiene una durata decrescente per valori maggiori del controllo in forza, e per l'impulso una forte variabilità con un aumento repentino tra i  $25000 \frac{N}{m}$  e  $30000 \frac{N}{m}$ .

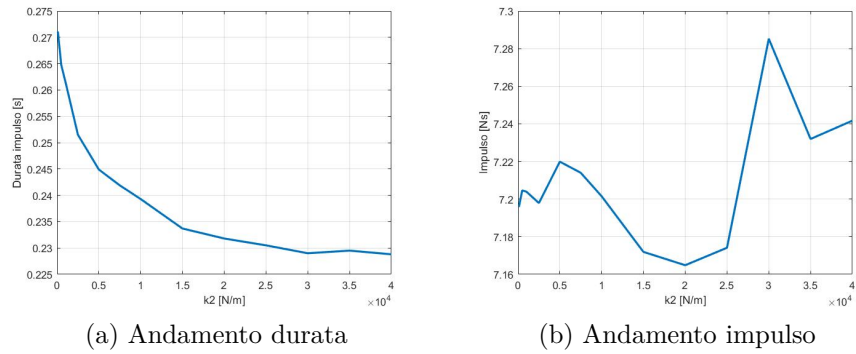


Figura 3.83: Andamenti impulso e durata al variare della rigidezza  $k_2$ , con riferimento sinusoidale

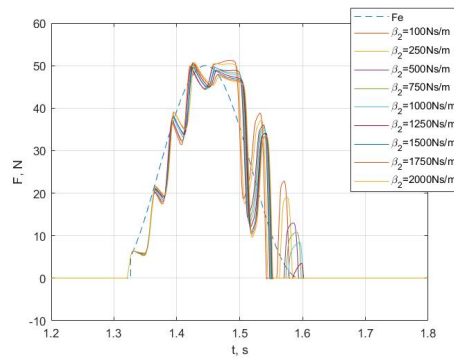


Figura 3.84: Risposta al variare di  $k_2$ , con riferimento sinusoidale

L'aumento dello smorzamento garantisce un aumento della durata, molto differente dal comportamento dei casi precedenti. L'impulso al contrario ha anche in queste condizioni un andamento decrescente.

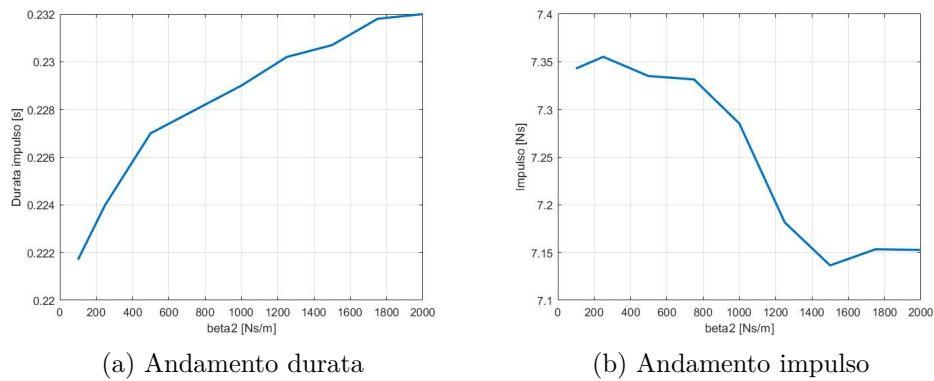


Figura 3.85: Andamenti impulso e durata al variare dello smorzamento  $\beta_2$ , con riferimento sinusoidale

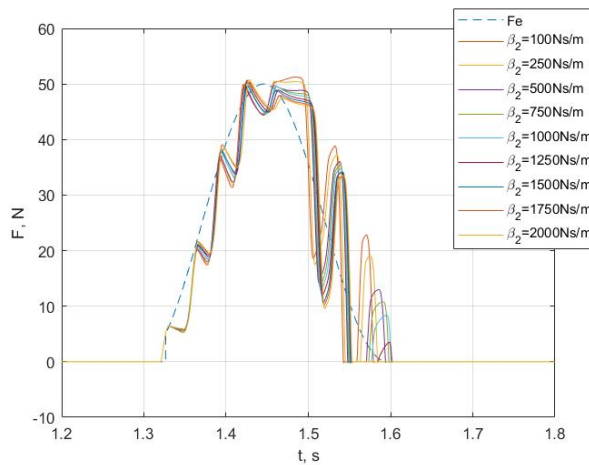


Figura 3.86: Risposta al variare di  $\beta_2$ , con riferimento sinusoidale

Analizzando la variabilità complessiva della cedevolezza, quindi modificando sia la rigidezza che lo smorzamento si ottengono risultati analoghi ai casi precedenti per il riferimento ad onda quadra. In particolare si nota come la variazione della cedevolezza non influisca su durata e impulso se non per piccoli range.

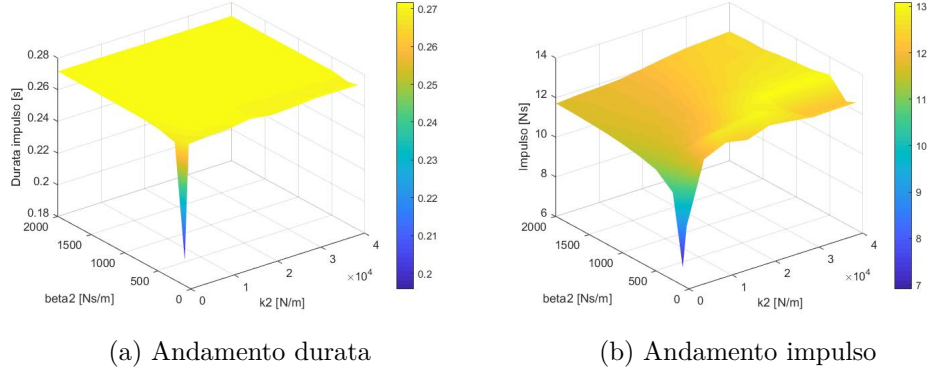


Figura 3.87: Andamenti impulso e durata al variare di  $\beta_2$  e  $k_2$ , con riferimento ad onda quadra

L'onda sinusoidale evidenzia un comportamento costante e con valori elevati di impulso per un buon range di cedevolezza, a meno della zona a bassi  $k$  e  $\beta$ . Per la durata il comportamento è cambia in maniera significativa, mantenendosi su valori bassi se non per  $\beta$  vicini a  $1000 \frac{N}{m}$  e ridotti  $k$ .

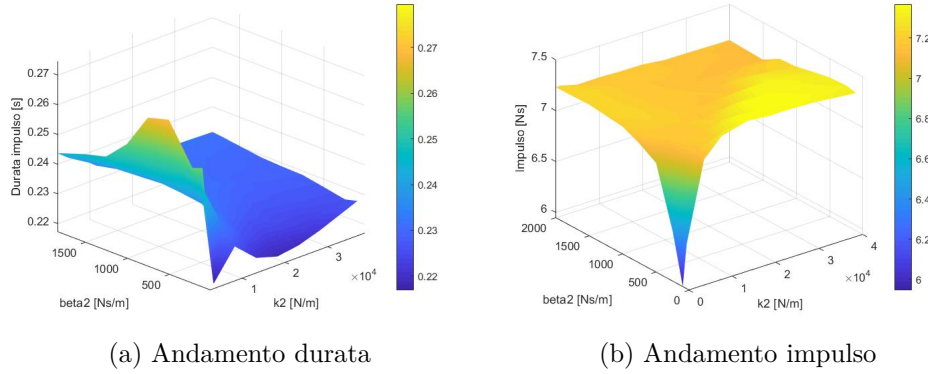


Figura 3.88: Andamenti impulso e durata al variare di  $\beta_2$  e  $k_2$ , con riferimento sinusoidale

Osservando le risposte relative al sistema completamente svincolato, si nota un comportamento complessivamente analogo a quanto visto precedentemente, a differenza del tratto iniziale dove è evidente la dipendenza dai valori di cedevolezza.

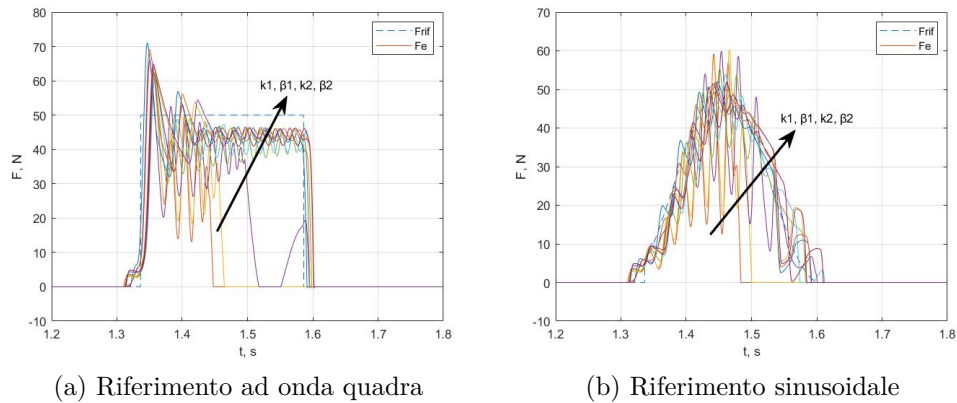


Figura 3.89: Andamento risposta al variare delle cedevolezza, fase di approccio controllata in forza

### 3.4 Risultati modello teorico con cilindro SMC

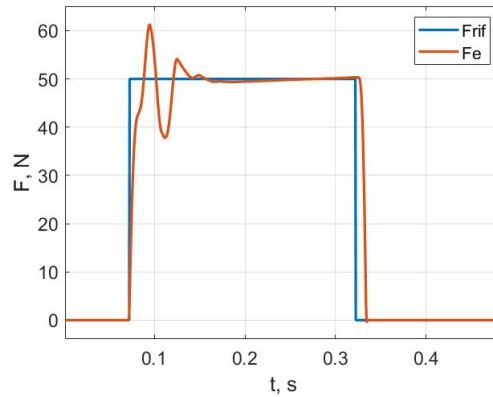
I risultati descritti hanno messo in luce principalmente come la sostituzione delle valvole e la modifica della logica di controllo influenzasse il modello. Per quanto riguarda l'attuatore si è fatto riferimento alle caratteristiche del cilindro MetalWork (Figura 2.4), che garantisce, guardando i risultati, una buona risposta del modello. Come descritto nel paragrafo 2.1.1 è stato individuato anche un secondo attuatore pneumatico, il cilindro SMC (Figura 2.5), sostituendo le caratteristiche nel modello si può osservare l'influenza di questo componente nel funzionamento generale del sistema.

PARAMETRO	MetalWork	SMC
Diametro stelo	12mm	10mm
Diametro stantuffo	32mm	25mm
Corsa	120mm	100mm
Massa traslante	0.18kg	0.15kg
Massa cilindro	3kg	2.7kg
Banda morta	5mm	2mm

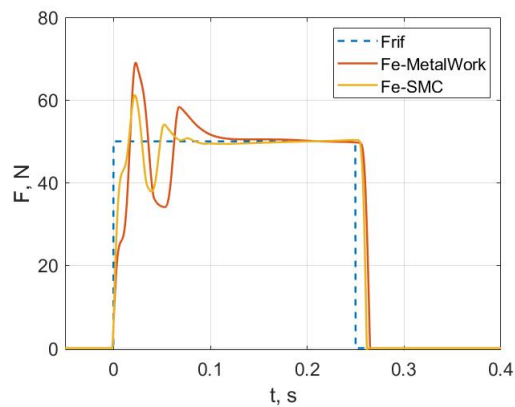
Tabella 3.21: Caratteristiche attuatori pneumatici

A partire dalle considerazioni fatte sul modello con attuatore MetalWork, sono state simulate le tre versioni del sistema con l'attuatore SMC.

Nella versione con fase di approccio controllata in anello aperto si osserva una maggior prontezza del SMC, sicuramente dovuto alla minor resistenza che oppone. Nel tratto in salita è evidente un avvallamento a valori di forza vicini ai 40N, associabile al picco di primo contatto che con il primo cilindro si presentava sui 20N. Questo implica una riduzione anche nel picco massimo raggiunto, con un aumento della ampiezza dell'oscillazione. Significativo è anche la riduzione dell'errore di accuratezza che scende al 1.6%, e il tracking che arriva all'8% (in confronto con tabella 3.6).



(a) Andamento con cilindro SMC

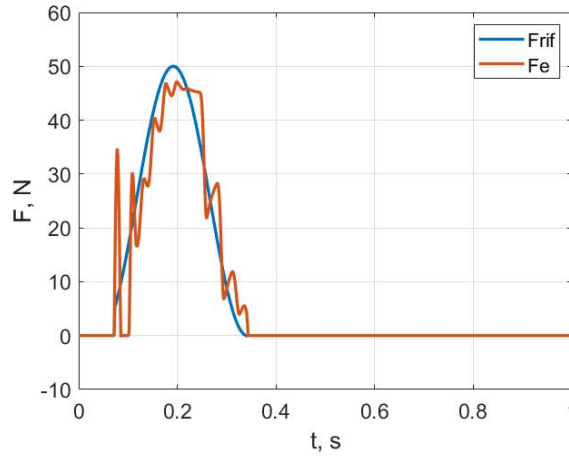


(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

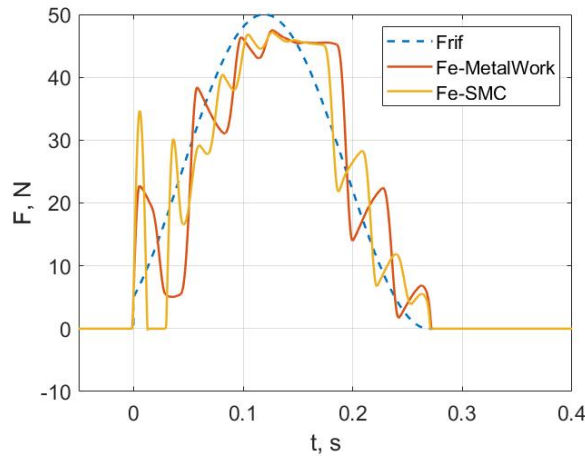
Figura 3.90: Risposta del modello con fase di approccio controllata in anello aperto, riferimento ad onda quadra (250ms,  $k_p=5$ )



Per il riferimento sinusoidale la maggior sensibilità accentua le oscillazioni già evidenti nel primo caso, peggiorando il picco di primo contatto che aumenta di intensità, determinando un peggioramento dei risultati. Nonostante questo, numericamente l'errore di tracking si riduce al 21.8%, a discapito dell'errore in accuratezza che scende a -1.1% (in confronto con tabella 3.9).



(a) Andamento con cilindro SMC

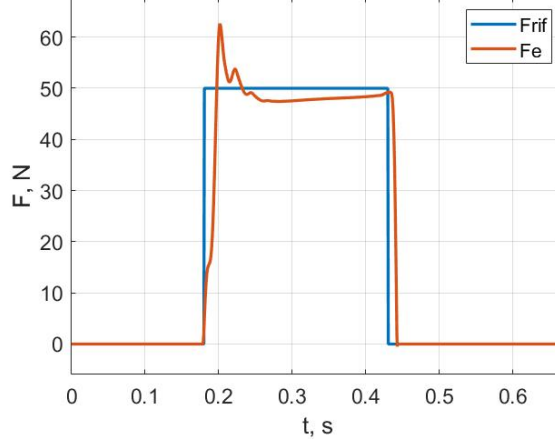


(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

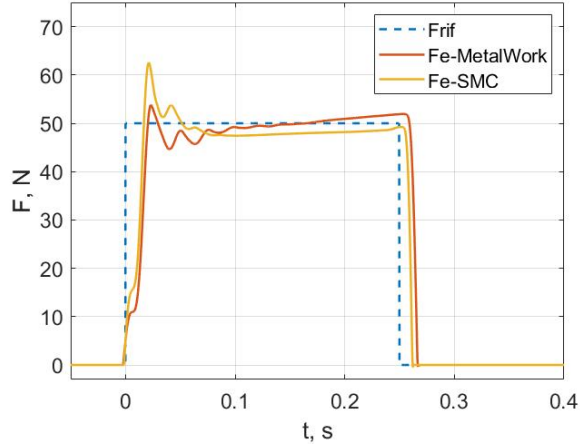
Figura 3.91: Risposta del modello con fase di approccio controllata in anello aperto, riferimento sinusoidale ( $k_p=5$ )

Analizzando il modello con approccio controllato in forza, si osserva lo stesso comportamento per il primo avvallamento che si realizza per valori di forza maggiori. Ma in questo caso il picco massimo è superiore a quello del MetalWork e a

regime si raggiunge un livello di forza inferiore ai 50N. A livello numerico si ottiene un miglioramento in tracking al 11.9% ma un peggioramento in accuratezza al -2% (in confronto con tabella 3.12).



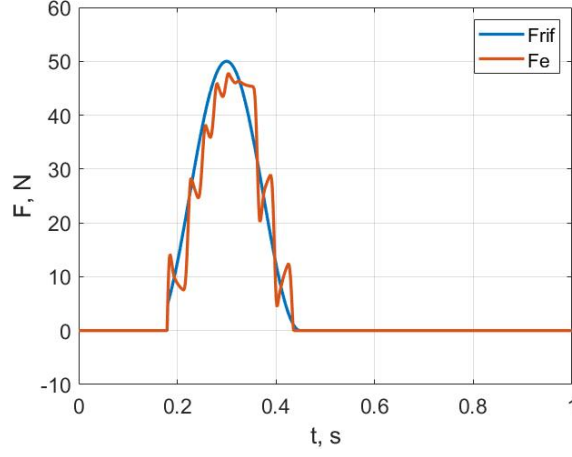
(a) Andamento con cilindro SMC



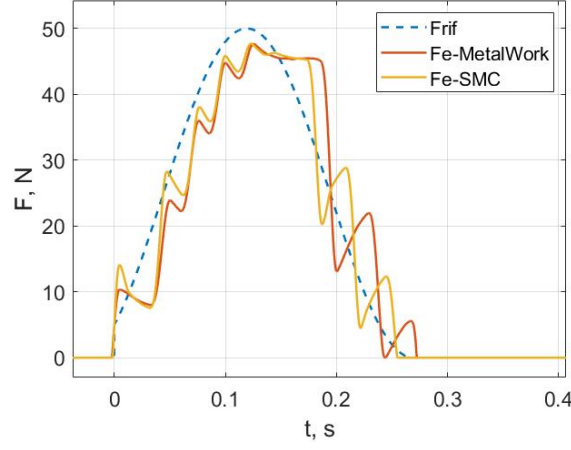
(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

Figura 3.92: Risposta del modello con fase di approccio controllata in forza, riferimento ad onda quadra (250ms,  $k_p=2.9$ ,  $k_i=24.2$ )

Con il riferimento sinusoidale il modello presenta sempre delle significative oscillazioni che si accentuano con il cilindro SMC, si nota una evidente riduzione della durata, che si attesta sui 250ms. Anche per questa configurazione si ottiene un miglioramento sul tracking, scende al 17.4%, e un peggioramento in accuratezza che arriva ai -3% (in confronto con tabella 3.13).



(a) Andamento con cilindro SMC

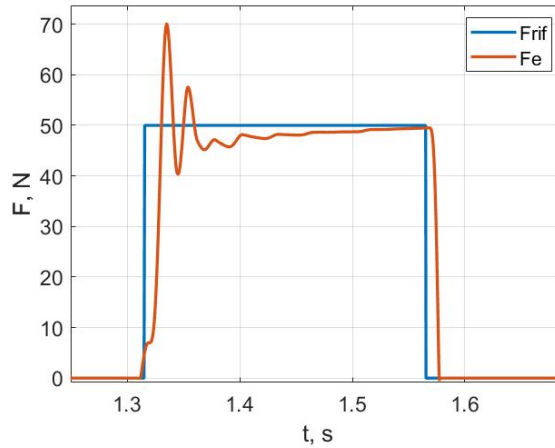


(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

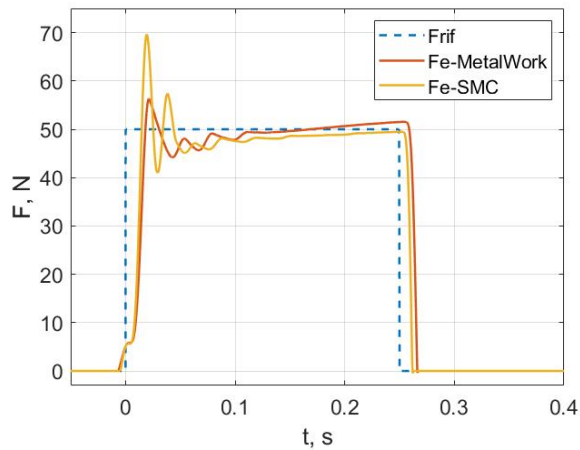
Figura 3.93: Risposta del modello con fase di approccio controllata in forza, riferimento sinusoidale ( $k_p=5$ )

Passando alla versione con controllo in posizione della fase di approccio, si evidenzia un comportamento analogo al caso precedente. Gli effetti del controllo della fuoriuscita sono gli stessi, aumentano sicuramente le oscillazioni, dovute alla diversa velocità di approccio. Si deve tenere in considerazione che le prestazioni migliori del cilindro si manifestano anche nel comportamento in fase di approccio, anche in questo caso aumenta la sensibilità, tradotta in un aumento delle oscillazioni nel tracking del profilo di spostamento, e necessità di ridurre il guadagno proporzionale. L'aumento dell'oscillazione implica da un lato il miglioramento nel tracking

scendendo al 12.7%, dall'altro un peggioramento dell'accuratezza fino al -2.3% (in confronto con tabella 3.18).



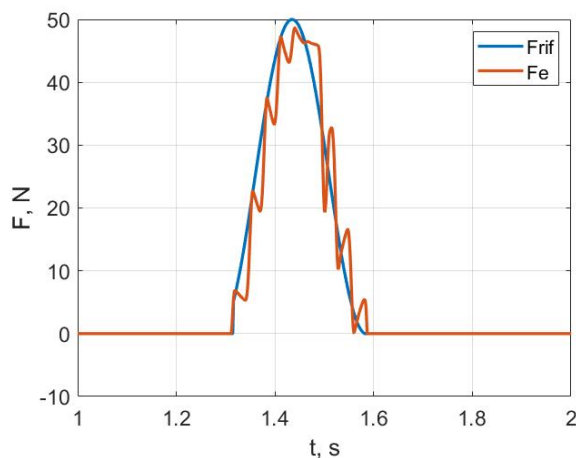
(a) Andamento con cilindro SMC



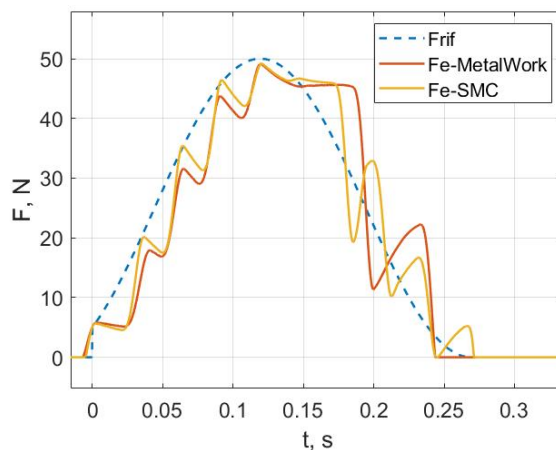
(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

Figura 3.94: Risposta del modello con fase di approccio controllata in posizione, riferimento ad onda quadra (250ms,  $k_p=3.1$ ,  $k_i=23.9$ ,  $k_{pPOS}=0.7$ )

Gli stessi effetti si presentano nella risposta al riferimento sinusoidale, la durata del colpo è maggiore di 30ms se confrontata ai 240ms ottenuti con il MetalWork. Ma si ottiene un netto miglioramento nel tracking scendendo fino al 17% e in accuratezza al -3.1% (in confronto con tabella 3.19).



(a) Andamento con cilindro SMC



(b) Confronto tra cilindro SMC e MetalWork

Figura 3.95: Risposta del modello con fase di approccio controllata in posizione, riferimento sinusoidale ( $k_p=5$ )

### 3.5 Variazione distanza perturbatore massa campione

Un ulteriore elemento su cui è necessario porre attenzione è la distanza stelo-massa. Se nell'ottica del banco questa grandezza può risultare di poco interesse, in quanto i componenti sono in generale vincolati nelle loro posizioni, non si può dire lo stesso dal punto di vista del test clinico. Durante l'esecuzione della prova, data

la variabilità intrinseca dell'operatore, e l'assenza di dispositivi che individuino l'esatta posizione del soggetto da impattare, diventa rilevante l'eventuale influenza della distanza. Risulta importante capire come la variazione della distanza cambi la risposta del sistema, e quindi riuscire ad individuare un range ottimale entro cui il comportamento rimane invariato.

Sulla base di quanto detto, in riferimento ai risultati ottimali di ognuno dei modelli sviluppati, si è cercato di individuare su cosa influisca questa distanza e un intervallo ottimale.

Il range considerato è compreso tra una distanza di 2cm ed un massimo di 10cm, escludendo il caso in cui l'estremità dello stelo si trovi già a contatto con il corpo e quello in cui lo stelo è completamente fuoriuscito.

Il sistema con controllo in anello aperto della fase di approccio evidenzia una dipendenza, soprattutto nella parte iniziale, da questo parametro.

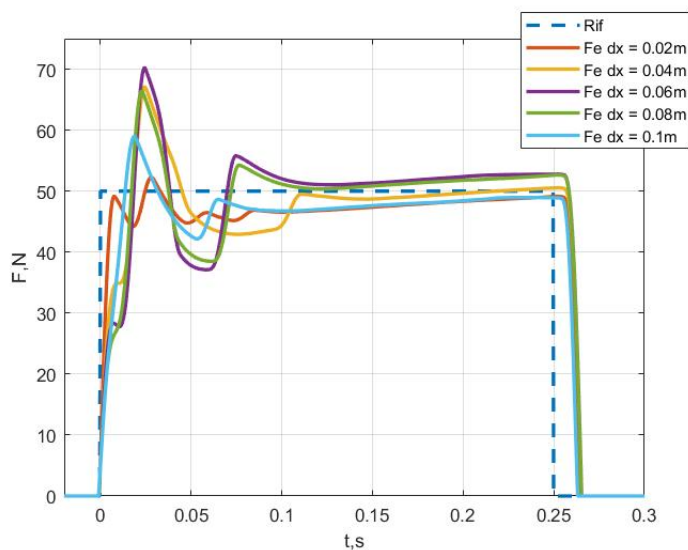


Figura 3.96: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra,  $k_p=5$ , controllo anello aperto

L'onda quadra evidenzia come un comportamento simile si abbia per valori compresi tra 4cm e 8cm. I maggiori effetti si presentano sul picco di primo contatto, per distanze ridotte raggiunge picchi più alti e determina oscillazioni successive per poi attenuarsi fino ad un valore costante inferiore ai 50N. Aumentando la distanza questo avvallamento iniziale si riduce di intensità andando ad influire sul picco vero

e proprio che aumenta. Per distanze superiori si ha una attenuazione complessiva della risposta, per quanto possa essere una conseguenza positiva si deve considerare il fatto di lavorare vicini a valori di corsa massima del pistone.

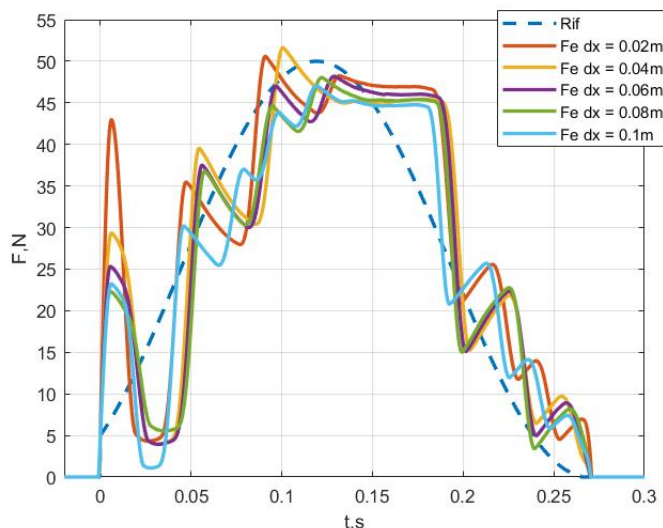


Figura 3.97: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale,  $k_p=5$ , controllo anello aperto

Anche per l'onda sinusoidale si osservano degli effetti, nel range individuato la variabilità è ridotta avvalorando l'idea di un comportamento ripetibile per queste distanze. Il picco di primo contatto si rivela maggiore per distanze ridotte, ma al crescere della distanza aumentano le oscillazioni. La motivazione è sicuramente da vedersi nell'energia dell'impatto, se lo stelo non ha raggiunto una velocità costante più il campione è vicino più energia viene scambiata con il corpo. Se da un lato in entrambi i casi una distanza vicina al limite di corsa dello stelo consente di ridurre i picchi da un altro si aumenta la possibilità di generare delle instabilità nel modello. Introducendo il controllo in forza nella fase di approccio si migliorano complessivamente i risultati. Per l'onda quadra il picco di primo contatto si riduce, mantenendosi sui 10N. Questo ha effetti sul comportamento durante il colpo: il picco maggiore si realizza nello stesso istante, la sua intensità si riduce in modo proporzionale all'aumentare della distanza. Anche in questo caso aumentano le oscillazioni per distanze inferiori ai 6cm, ma si mostra più stabile a regime, in tutti i casi si raggiungono valori simili.

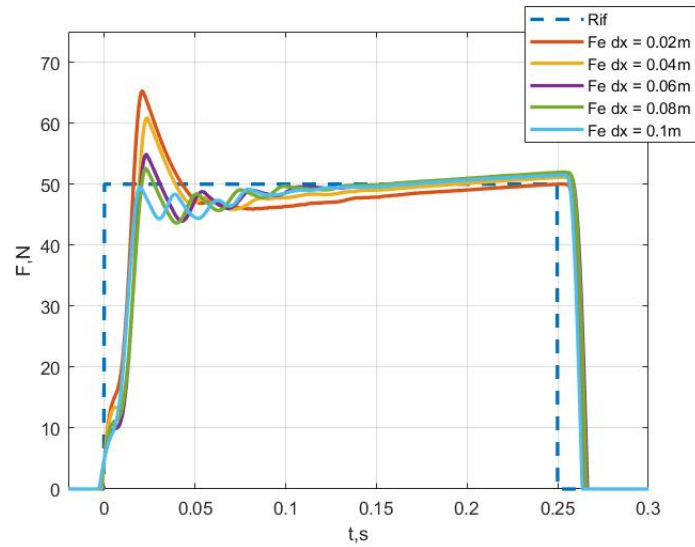


Figura 3.98: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra,  $k_p=2.9$ ,  $k_i=24.2$ , controllo in forza

Per il riferimento sinusoidale spicca la forte instabilità che si ottiene per ridotte distanze, e complessivamente un comportamento fortemente

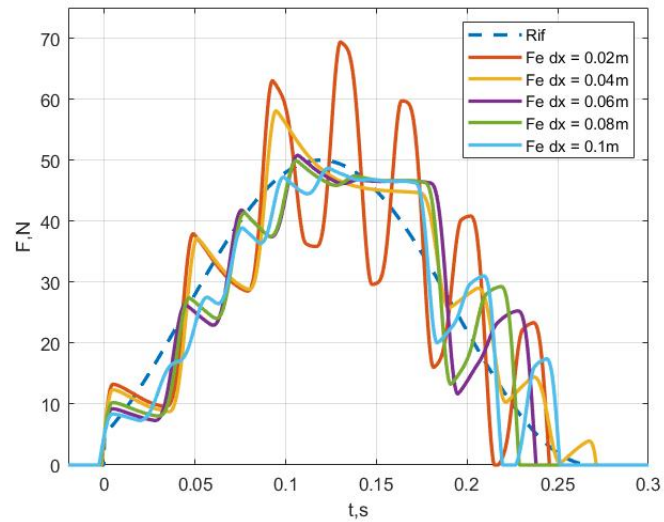


Figura 3.99: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale,  $k_p=6.8$ , controllo in forza

influenzato dalla distanza. L'andamento più regolare è ancora compreso nel range 6cm-8cm.



Con il controllo in posizione della fase di approccio si osserva un comportamento ancora più omogeneo tra le diverse condizioni, sicuramente incide la velocità di approccio, ma innanzitutto i picchi raggiungono valori più esigui, così come l'avvallamento iniziale che si presenta al disotto dei 10N.

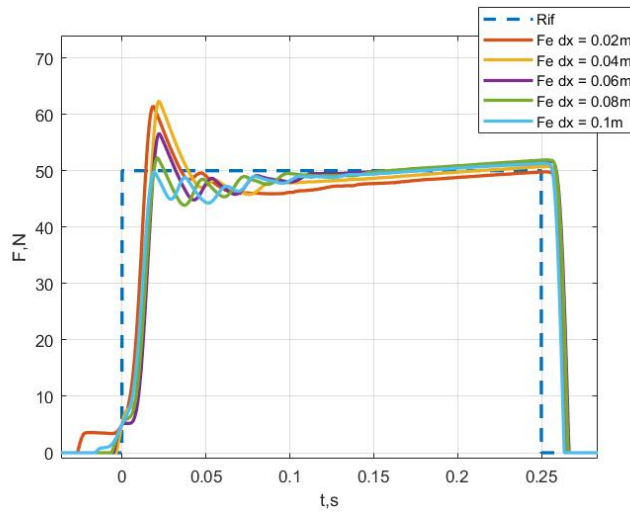


Figura 3.100: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra,  $k_p=3.1$   $k_i=23.9$ , controllo in posizione

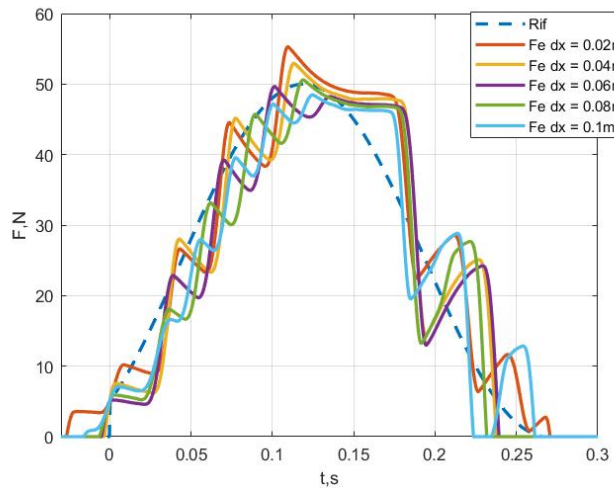


Figura 3.101: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale,  $k_p=6.5$ , controllo in posizione

Le stesse considerazioni si adattano al riferimento sinusoidale, in questo caso non si raggiunge in nessun caso instabilità, o eccessiva oscillazione. Il comportamento ottimale ricade sempre nello stesso range di distanze.

I risultati ottenuti in questa versione del modello avvalorano la tesi che vede ottimale questa soluzione, oltre alla maggior flessibilità nel controllo dell'intero ciclo di lavoro, si aggiunge la ridotta dipendenza dalla distanza  $dx$ , che si traduce in una ripetibilità maggiore in campo clinico, senza necessità di monitorare questa grandezza.

Considerati i risultati migliori ottenuti con la versione del modello con fase di approccio controllata in posizione, si è valutata l'influenza di questo parametro con il cilindro SMC.

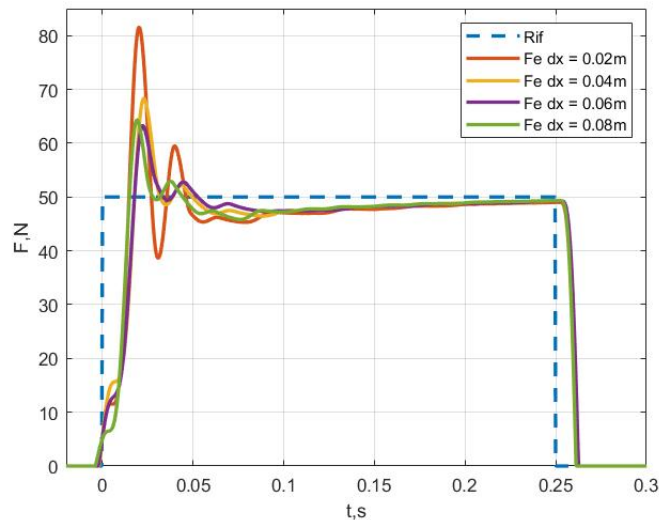


Figura 3.102: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda quadra,  $k_p=3.1$   $k_i=23.9$ , controllo in posizione, cilindro SMC

La prima considerazione da fare è la necessità di lavorare con distanze inferiori ai 10cm, il sistema non riesce a sviluppare il profilo nei limiti di corsa del pistone. La minor resistenza interna al cilindro incide anche su distanze più piccole dove aumenta l'oscillazione e la sua ampiezza. Ma considerando  $dx$  compresi tra 4cm e 8cm, l'andamento è ripetibile, le curve si sovrappongono a differenza di Figura 3.100.

Il riferimento sinusoidale implica un comportamento fortemente instabile a distanze minime, ma al contrario dell'onda quadra, sembra esserci una significativa

variabilità anche tra le altre distanze.

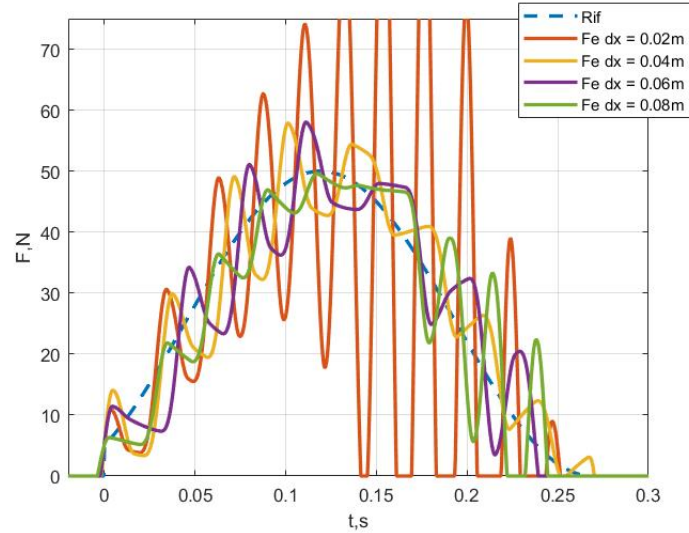


Figura 3.103: Risposta al variare della distanza stelo-massa, onda sinusoidale,  $k_p=6.5$ , controllo in posizione, cilindro SMC

### 3.6 Analisi conclusiva del modello teorico

Lo studio del perturbatore attraverso una simulazione teorica ha avuto come filo conduttore la necessità primaria di avere una base attraverso cui individuare le criticità da poter superare sul modello sperimentale. Non si è persa di vista l'applicazione in sé, cercando di individuare delle soluzioni congeniali all'attività da svolgere.

Sicuramente è evidente il miglioramento ottenuto con la sola sostituzione delle valvole, che si traduce nel modello in una semplice modifica dei parametri del componente. Questo determina un miglioramento del tracking che si riduce del 33.4% per l'onda quadra e del 54% per l'onda sinusoidale, che mostra anche una riduzione in accuratezza significativa. Anche nella durata si ha un effetto importante passando rispettivamente da 0.33s a 0.27s e da 0.34s a 0.3s. In questa fase la variabilità dei parametri del guadagno sono meno influenti rispetto al peso che la sostituzione delle grandezze delle valvole apportano, osservando le Figure 3.4a e 3.9 si osserva un comportamento molto simile se non per i valori numerici.

Si è evidenziata una ridotta variabilità dalla tensione di riferimento alle valvole della

fase di approccio, i valori scelti sono legati comunque ad una velocità di fuoriuscita che sia consona all'applicazione, quindi non ci si è discostati molto da un intorno di 6V. La variazione nei risultati è ridotta, e può incidere su un loro affinamento. L'introduzione di diverse tipologie di controllo oltre ad avere un riscontro pratico sulla gestione dell'intera applicazione, ha degli effetti significativi sulla risposta sinusoidale, che insieme alla modifica della forma del riferimento, consente di migliorare sicuramente l'errore di tracking (dal 30.3% al 21.9% per controllo in forza e al 22.2% per controllo in posizione), e avvicinare l'impulso al valore ideale.

Dei miglioramenti si osservano anche nel caso del riferimento ad onda quadra, in questo caso l'entità dell'impulso raggiunge i valori ideali in entrambe le versioni del modello, ma riuscendo in maniera significativa a migliorare l'accuratezza che si attesta sull'1% di scostamento e il tracking che si mantiene sul 15%. Inoltre intervenendo sul guadagno integrativo, si ottengono i risultati migliori (tabelle 3.12 e 3.18) avendo uno scarto infinitesimo sull'accuratezza, scendendo al disotto del 15% nel tracking e avendo come differenza più significativa i 20ms sulla durata. L'errore di durata, presentandosi in ogni prova, permette di considerarlo come un elemento caratteristico del modello fisico, quindi inevitabile a cause delle sue dinamiche.

Ponendo l'attenzione sui guadagni proporzionali, quello che emerge sono i risultati ottimali che si ottengono per un intorno di 5 per entrambe le forme d'onda: scendendo a 4.5 per l'onda quadra e attestandosi sui 6.5 o 6.8 per la sinusoidale. Utilizzando anche il ki si riesce a ridurre il picco massimo, perché si mantiene un buon ricoprimento del set riducendo il kp (2.9 contr.forza e 3.1 contr.posizione).

Anche l'utilizzo dell'attuatore più performante determina dei miglioramenti nel funzionamento, quello che emerge è una capacità maggiore, a parità di guadagni, nel seguire il segnale di riferimento, ma anche una maggiore sensibilità ad una loro variazione.

Da non sottovalutare è l'influenza della distanza stelo-massa, questa è fondamentale nell'applicazione clinica. Ciò che è emerso è un funzionamento ottimale in un range tra 4cm e 8cm, in cui le risposte non si differenziano in maniera significativa. Sicuramente si ha un funzionamento migliore con un controllo in posizione della fase di approccio e con il cilindro SMC.

In definitiva, dai modelli, si evince un comportamento migliore con un riferimento ad onda quadra, questo è sicuramente dettato dalla tipologia di forma d'onda che

implica un comportamento diverso dell'errore che viene compensato, e di conseguenza un comportamento differente del sistema pneumatico. È evidente la necessità, nel caso della sinusoide, di correggere continuamente la risposta, a differenza dell'onda quadra dove si hanno pochi punti di variazione, e questo incide sulle dinamiche del sistema pneumatico.

Nello specifico del tipo di controllo della fase di approccio ciò che si è evidenziato è la stretta relazione con la velocità di uscita dello stelo, e di conseguenza la versione con il controllo in posizione diventa quello più funzionale all'applicazione pratica, data la maggior facilità di azione sulla specifica grandezza che controlla la fuoriuscita dello stelo.

# Sistema sperimentale

Il banco prova reale è controllato attraverso il sistema real-time della dSPACE, attraverso una scheda D/A DS2101 si invia il segnale analogico alle valvole, a seconda della condizione di lavoro in cui si trova, che viene rilevato attraverso la scheda di acquisizione A/D DS2002. L'intero schema di controllo del banco è realizzato in ambiente Matlab-Simulink, e con il software Control-Desk fornito dalla dSPACE, si realizza l'interfaccia di comando del banco e visualizzazione dei segnali. Il modello realizzato si basa sugli schemi presentati nel capitolo 3, con la differenza di lavorare con i segnali acquisiti dai diversi sensori posti sul banco.



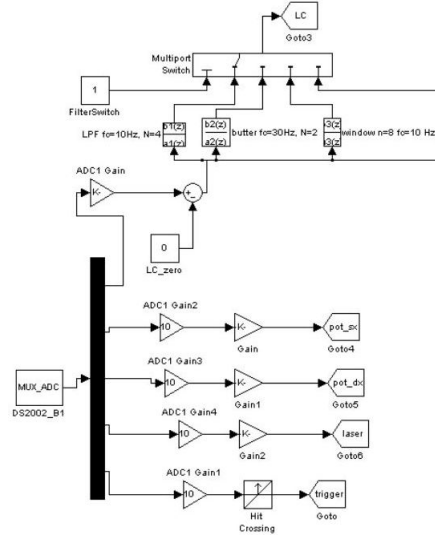


Figura 4.2: Schema di acquisizione dei segnali

In Figura 4.1 si ha in pratica lo stesso modello di Figura 1.1 per il quale si individuano anche in questo caso:

- *if block* - blocco che definisce il segnale di comando;
- *Subsystem* - blocco che definisce il profilo di forza da seguire;
- *Fasi* - blocchi che identificano le fasi da realizzare;

L'unica differenza sta nelle variabili che regolano l'intero sistema che sono grandezze reali acquisite opportunamente attraverso le schede, si notano i blocchi relativi alla lettura e all'invio del segnale (Figura 4.2).

Anche il sistema reale si basa su una macchina a stati, dove a seconda delle condizioni si definisce la fase da realizzare che regola la giusta sequenza di azioni da compiere.

Il software ControlDesk consente di lavorare con questo modello e realizzare un interfaccia grafica attraverso cui osservare i segnali acquisiti e, soprattutto, controllare i diversi parametri che entrano in gioco come forma d'onda e guadagni dei diversi controllori utilizzati.

Naturalmente il sistema di Figura 4.1 viene modificato per ognuna delle tre versioni realizzate del modello teorico, semplicemente aggiungendo nella fase di approccio l'opportuna retroazione su forza o posizione.

## 4.2 Sistema sperimentale con fase di approccio controllata in anello aperto

Il sistema sperimentale nella sua prima versione viene analizzato a partire dai dati ottimali ricavati dal modello teorico.

I parametri di funzionamento del sistema sono:

PARAMETRO	VALORE
Pressione alimentazione	$3bar$
Tensione di comando valv. post. (approccio)	$6V$
Tensione di comando valv. ant. (approccio)	$4V$
Tensione di comando valv. post. (ritorno)	$6.2V$
Tensione di comando valv. ant. (ritorno)	$0V$
Distanza stelo-massa	$0.08m$

Tabella 4.1: Parametri sistema sperimentale vincolato, approccio controllato in anello aperto

Sul banco sperimentale le prove vengono eseguite considerando tre diverse configurazioni:

- **Sistema fisso;**
- **Cilindro fisso e massa impattata mobile;**
- **Cilindro e massa mobili;**

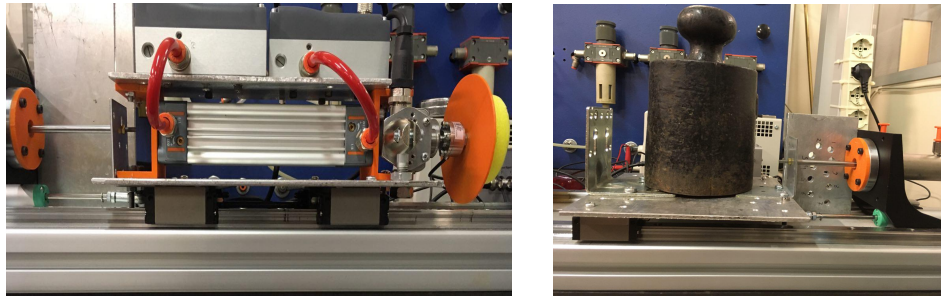
I riferimenti considerati sono gli stessi del modello teorico:

- **onda quadra:**  $250ms - F_{max} = 50N$
- **onda sinusoidale:**  $F_{max} = 50N$

### 4.2.1 Sistema fisso

La configurazione vincolata del sistema richiede la predisposizione di elementi di bloccaggio del cilindro e della massa. Il vincolo viene realizzato attraverso delle piastre che impediscono al respingente di lavorare, quindi rendono i componenti





(a) Sistemi di bloccaggio cilindro

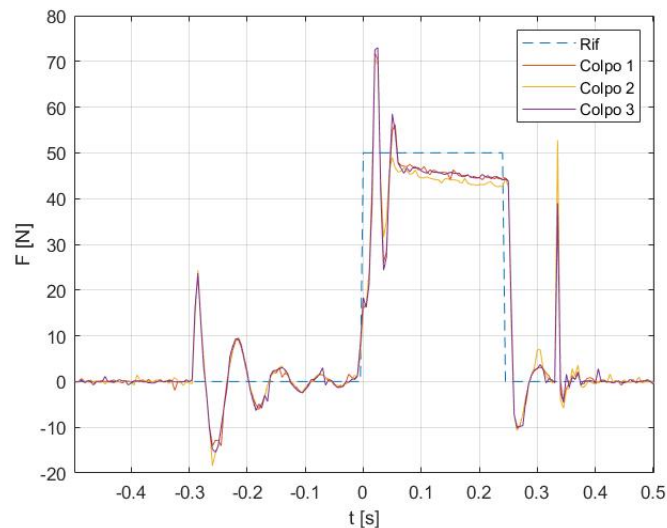
(b) Sistema bloccaggio massa

Figura 4.3: Configurazione sistema fisso

solidali al banco durante l'intero ciclo di lavoro.

La risposta simulata migliore si ottiene, nel caso di onda quadra di 250ms, con un valore di  $k_p$  pari a 5 (tab. 3.6). Sulla base di questo valore sono state eseguite 3 prove sul sistema.

Un aspetto che si presenta in ogni prova è l'oscillazione che avviene nei primi 200ms, che raggiunge anche valori significativi di forza, questo è dovuto alle inerzie del cilindro. L'improvviso flusso di pressione che entra nelle camere determina una velocità di fuoriuscita del pistone elevata e la cella di carico rileva la resistenza al moto data dallo stelo stesso e gli altri elementi collegati ad esso.

Figura 4.4: Colpi con  $k_p=5$  per onda quadra da 250ms e 50N

La media dei quattro colpi restituisce:

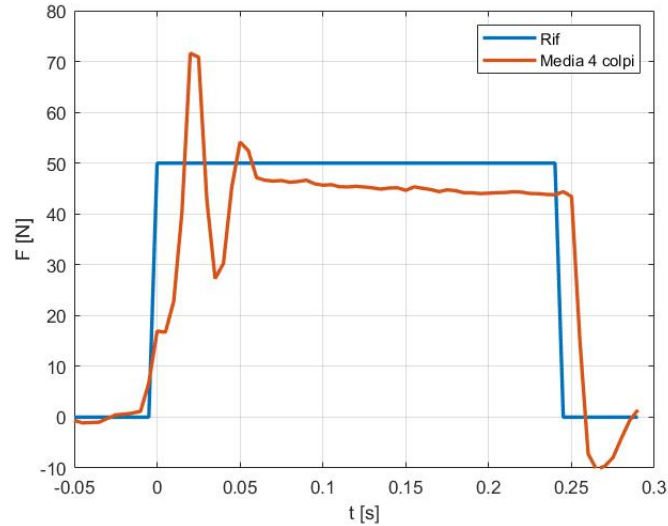


Figura 4.5: Media 4 colpi  $k_p=5$  per onda quadra da 250ms e 50N

Valutando i risultati numerici di queste prove si ottiene:

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.5 \pm 0.15Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26 \pm 0s$
Errore ACC	$-6.16\% \pm 1.25\%$
Errore TCK	$19.9\% \pm 0.41\%$

Tabella 4.2: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.5

Rispetto alla tabella 3.6 si osserva sicuramente un peggioramento dei risultati, dovuto principalmente alle diverse resistenze o comunque elementi di attenuazione che nel modello teorico non vengono presi in considerazione. Se da un lato si osserva comunque una buona risposta, da un altro eseguendo più prove con questo guadagno proporzionale, si verifica un comportamento non coerente con quanto mostrato. Il sistema sembra essere al limite della stabilità, di fatti in alcuni casi

si presentavano comportamenti del tipo mostrato in Figura 4.6. Questo oltre ad avere eccessive oscillazioni, mostra anche dei picchi notevoli (200N).

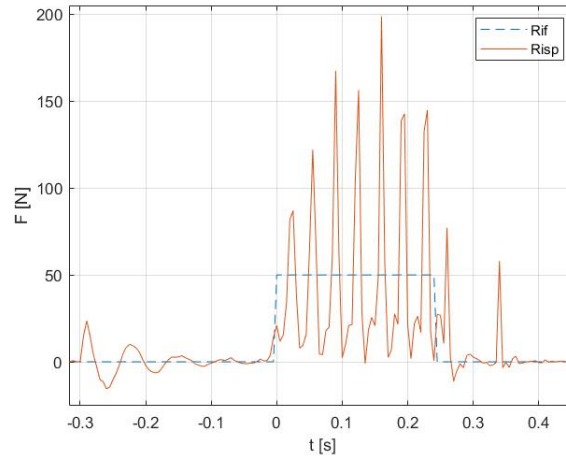


Figura 4.6: Risposta instabile con  $k_p=5$

Di conseguenza si è pensato di individuare il  $k_p$  che più si avvicinasse all'ottimo teorico garantendo una stabilità di funzionamento. Il valore individuato è 4.4, le cui risposte mostrano un errore a regime riducibile attraverso l'azione del contributo integrativo.

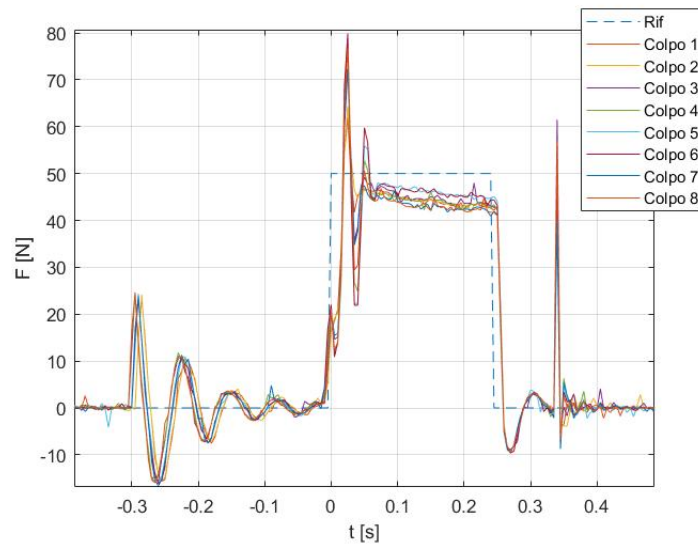


Figura 4.7: Colpi con  $k_p=4.4$  per onda quadra da 250ms e 50N

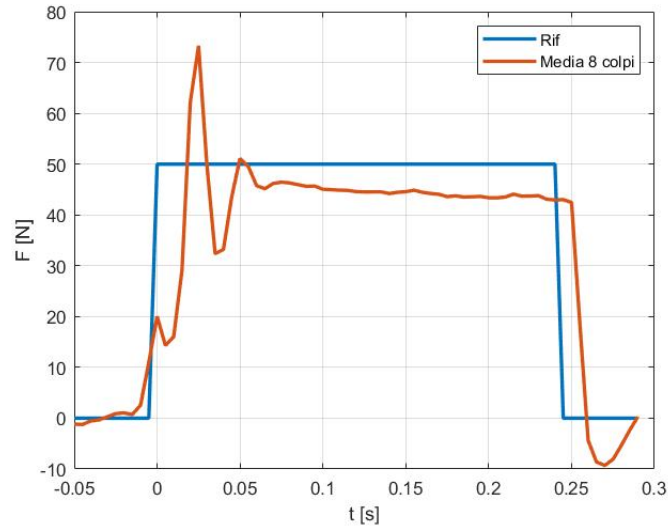


Figura 4.8: Media 8 colpi  $k_p=4.4$  per onda quadra da 250ms e 50N

Scendere al  $k_p=4.4$  non implica forti differenze nell'errore di accuratezza o tracking:

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.3 \pm 0.22Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26 \pm 0.003s$
Errore ACC	$-7.5\% \pm 1.8\%$
Errore TCK	$19.8\% \pm 1.7\%$

Tabella 4.3: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.8

Confrontando questa risposta con quella del modello teorico si nota la differenza sul picco di primo contatto, nel modello reale raggiunge valori più bassi ma l'avvalimento successivo è più marcato. L'errore maggiore che si presenta all'inizio della fase di strike determina un picco massimo maggiore di circa 10N. Anche nel comportamento a regime si nota una differenza, che influisce maggiormente sull'errore di tracking.

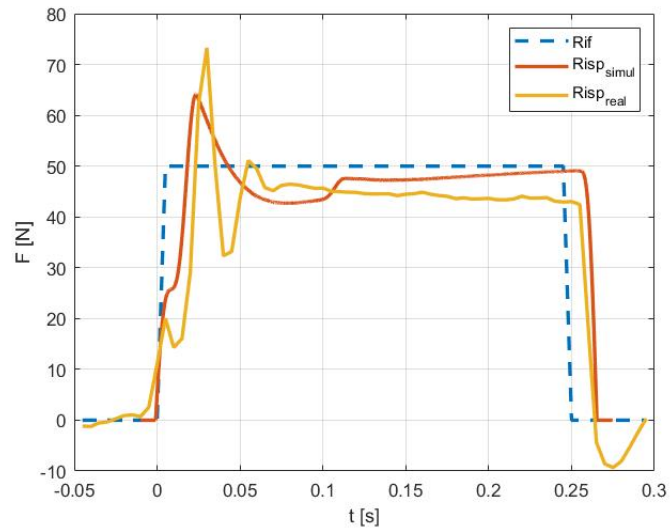


Figura 4.9: Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale

Dato lo scostamento successivo all'overshoot si è agito anche sul  $k_i$  cercando di migliorare i risultati specifici degli errori. La risposta ottimale si ottiene per valori di  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ .

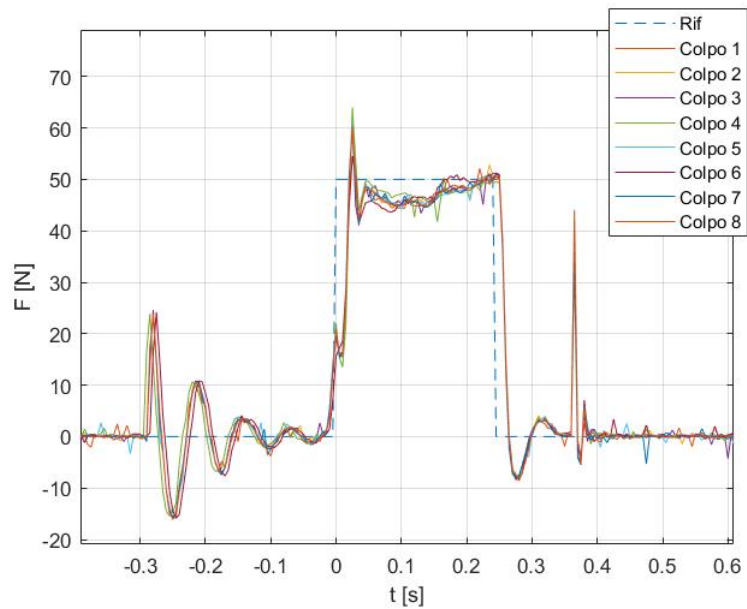


Figura 4.10: Colpi con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$  per onda quadra da 250ms e 50N

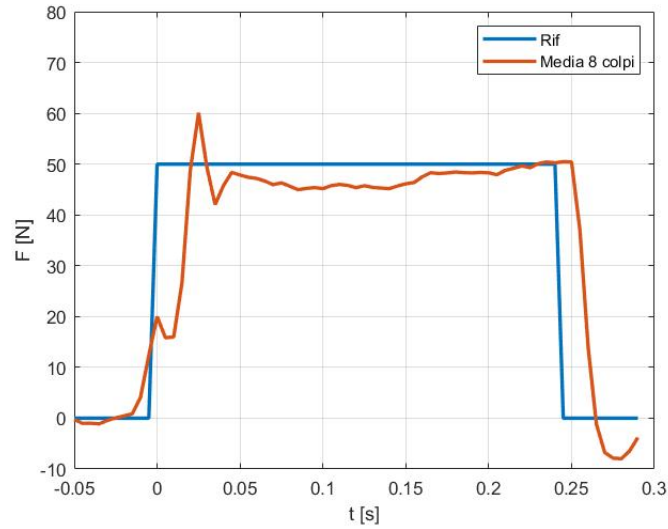


Figura 4.11: Media 8 colpi  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$  per onda quadra da 250ms e 50N

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$11.83 \pm 0.03Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27 \pm 0.002s$
Errore ACC	$-3.4\% \pm 0.23\%$
Errore TCK	$16.98\% \pm 0.27\%$

Tabella 4.4: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.11

Si osserva un miglioramento qualitativo della curva con il recupero dell'errore a regime, con il  $k_p$  inferiore a 4.4 si riesce anche ad evitare un overshoot significativo. Valutando il sistema teorico con questi contributi si ottiene una risposta migliore della sperimentale, si ottengono valori simili al picco massimo (60N), e si mantiene una forza a regime più vicina ai 50N.

In generale la risposta ad un input ad onda quadra di 250ms e 50N di forza massima mostra un ridotto errore in accuratezza e tracking soprattutto agendo anche sul contributo integrativo, questi si attestano rispettivamente su valori inferiori al 10% per il primo e sotto il 20% per il secondo.

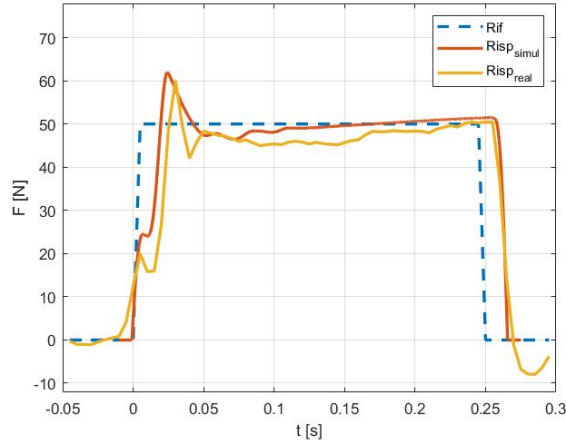


Figura 4.12: Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale e integrativo

Oltre ai parametri considerati, risulta utile valutare anche la ripetibilità della risposta, quindi la capacità del sistema di restituire lo stesso output in corrispondenza di uno stesso input. Nello specifico la ripetibilità si è calcolata come coefficient of variation, quindi il rapporto tra deviazione standard e media relativa all'impulso ottenuto. Il COV è pari a 1.95% già per le prove con  $k_p=4.4$ , scendendo allo 0.24% agendo anche sul  $k_i$ .

Considerando il segnale di riferimento sinusoidale si è ottenuta la risposta ot-

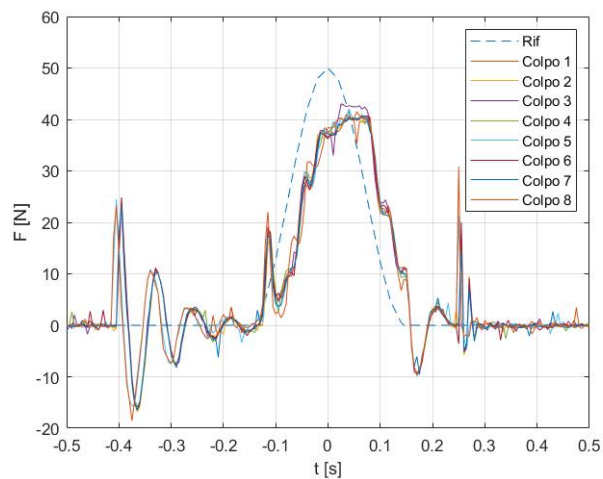


Figura 4.13: 8 colpi con  $k_p=5$  per onda sinusoidale

timale per  $k_p=5$  (tab. 3.9), anche in questo caso il sistema reale viene testato sulla base dei dati ottimali del modello teorico, a partire dalla forma d'onda che presenta già l'offset sul valore iniziale di 5N.

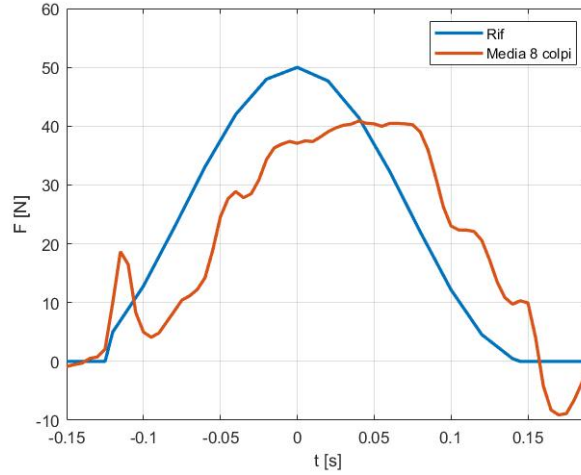


Figura 4.14: Media 8 colpi  $k_p=5$  per onda sinusoidale

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7 \pm 0.06Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.27 \pm 0s$
Errore ACC	$-5.84\% \pm 0.8\%$
Errore TCK	$41.7\% \pm 0.75\%$

Tabella 4.5: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.14

In questo caso il sistema reale si discosta notevolmente dal teorico (tab.3.9) soprattutto nel tracking raggiungendo valori superiori al 40%, seppur la risposta non segua in maniera accurata il riferimento, la ripetibilità si dimostra buona, mantenendosi vicina al 0.85%. La differenza con la risposta simulata si nota anche graficamente mettendo a confronto le risposte a parità di  $k_p$ .



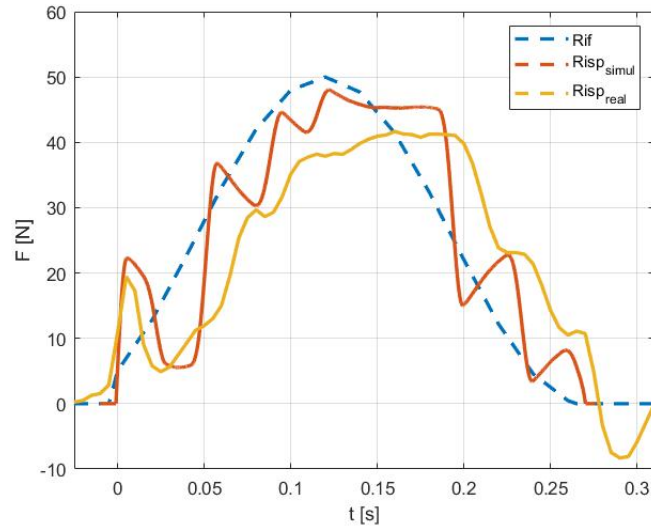


Figura 4.15: Confronto risposta simulata e sperimentale a parità di guadagno proporzionale per riferimento sinusoidale

In entrambi casi è evidente il picco di primo contatto; il modello teorico ha sicuramente meno elementi smorzanti che lo portano da un lato ad essere più pronto ma da un altro ad avere oscillazioni più marcate.

In questa condizione di lavoro non si sono presentate condizioni di instabilità, quindi si è cercato un valore di  $k_p$  ottimale per il sistema reale.

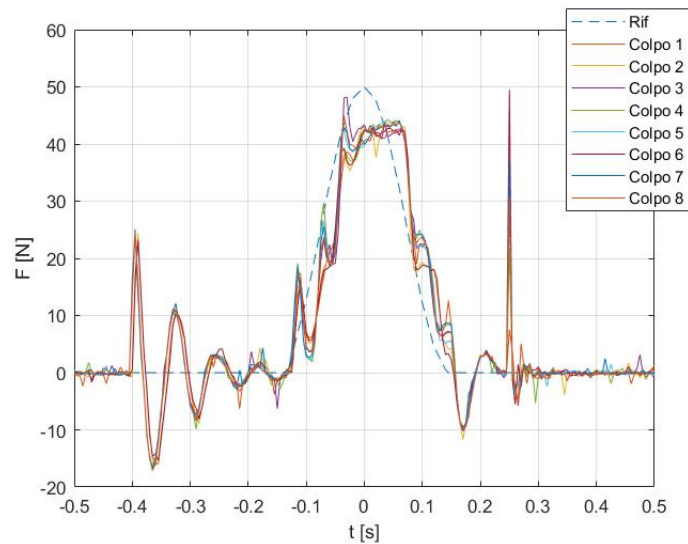


Figura 4.16: Colpi con  $k_p=7$  per onda sinusoidale

Agendo in un primo momento solo sul guadagno proporzionale si ottengono le risposte di Figura 4.16, per  $k_p=7$ .

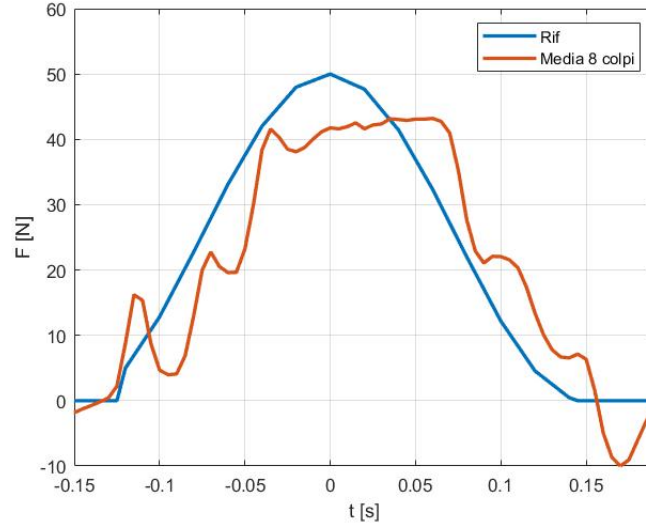


Figura 4.17: Media 8 colpi  $k_p=7$  per onda sinusoidale

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.24 \pm 0.14Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.27 \pm 0.007s$
Errore ACC	$-2.58\% \pm 1.8\%$
Errore TCK	$28.5\% \pm 0.82\%$

Tabella 4.6: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.17

Aumentare il  $k_p$  determina dei miglioramenti significativi dei risultati, ci si avvicina maggiormente ai risultati mostrati in tabella 3.9, con il limite che guadagni troppo elevati rendono più instabile il sistema, questo lo si nota anche dal coefficiente di ripetibilità che aumenta di un punto percentuale, attestandosi sul 1.9%. Il modello teorico con questo valore di  $k_p$  evidenzia significative oscillazioni, a testimonianza del raggiunto limite di stabilità. Il motivo del differente comportamento

deve sempre vedersi nella modellazione che non riesce a tenere conto di ogni singolo comportamento del sistema reale.

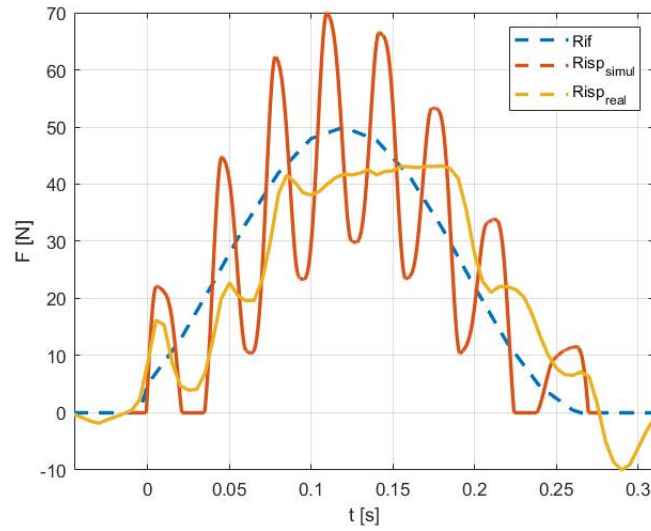


Figura 4.18: Confronto risposta simulata e sperimentale con  $k_p=7$  per riferimento sinusoidale

Anche per questo tipo di riferimento si è provato ad agire sul contributo integrativo, cercando di migliorare ulteriormente i risultati.

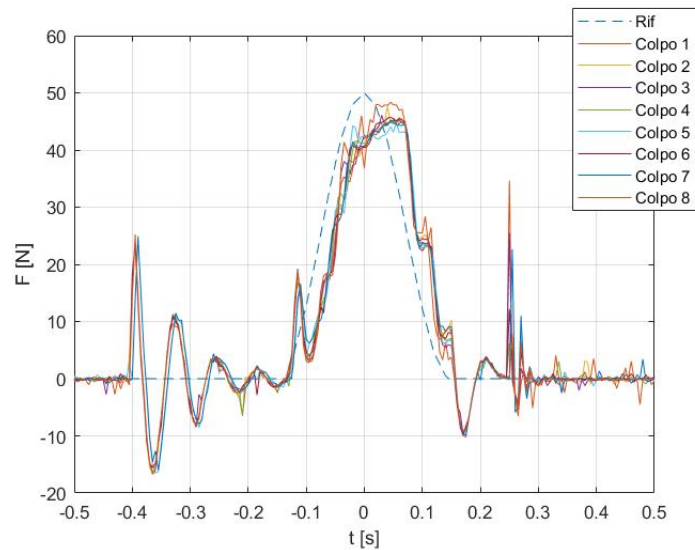
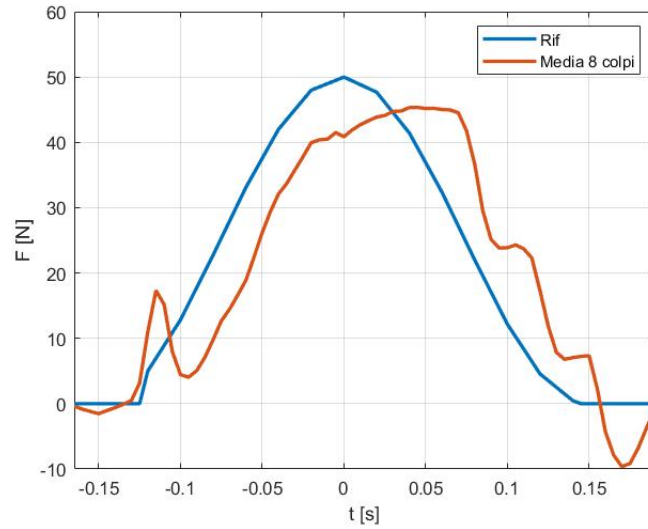


Figura 4.19: Colpi con  $k_p=6$  e  $k_p=16$  per onda sinusoidale

Figura 4.20: Media 8 colpi  $k_p=6$   $k_i=16$  per onda sinusoidale

In questo caso si osserva come a valle del picco del segnale di riferimento si perda il tratto costante della risposta ma il sistema cerchi di seguire il set in maniera più accurata.

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$7.5 \pm 0.067Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.27 \pm 0.004s$
Errore ACC	$0.37\% \pm 0.89\%$
Errore TCK	$34.7\% \pm 0.79\%$

Tabella 4.7: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.20

Si ottiene un miglioramento in accuratezza e nel valore specifico di impulso, perdendo leggermente in tracking. Però si ottiene una buona ripetibilità riuscendo a scendere fino ad un COV di 0.9%.

Dal confronto diretto con il modello teorico si nota una sostanziale differenza tra le due risposte, la maggior sensibilità del primo rende inefficace l'utilizzo del  $k_i$  ai fini dei risultati.

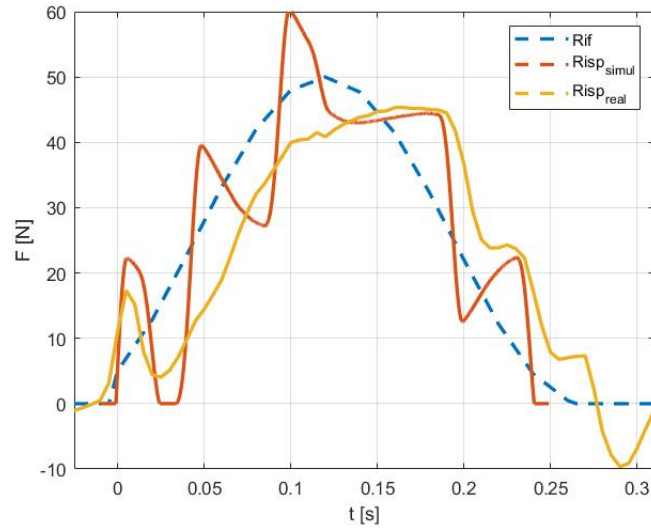


Figura 4.21: Confronto risposta simulata e sperimentale con  $k_p=6$  e  $k_i=16$  per riferimento sinusoidale

### 4.2.2 Cilindro fisso e massa mobile

La seconda configurazione si realizza liberando il respingente della massa.

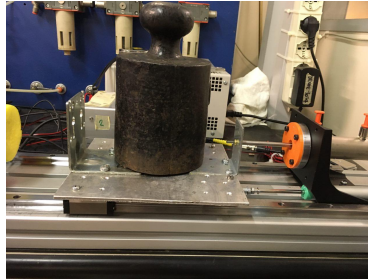


Figura 4.22: Configurazione con massa mobile

Nel capitolo 3 nell'analizzare il sistema svincolato si è mostrato il comportamento qualitativo del sistema, a causa delle ignote caratteristiche di rigidità e smorzamento dei respingenti. Non avendo dei valori ottimali di contributi del PID come punto di partenza, si è pensato di osservare gli andamenti a partire dai risultati ottimali ottenuti per il sistema vincolato.

Per il riferimento ad onda quadra si è partiti da  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ . Rendere cedevole la massa ha come primo effetto quello di non riuscire a garantire una applicazione continua del colpo data la possibilità del corpo di traslare, e quindi di allontanarsi

dall'estremità dello stelo. In Figura 4.24 si osserva la presenza di un picco quando il riferimento ritorna a zero, questo è dovuto proprio alla perdita del contatto con conseguente rimbalzo della massa sullo stelo.

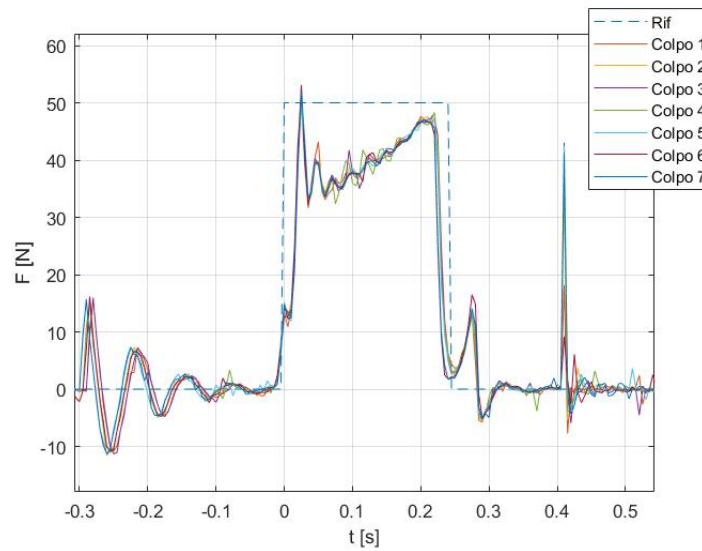


Figura 4.23: Colpi con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$  per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile

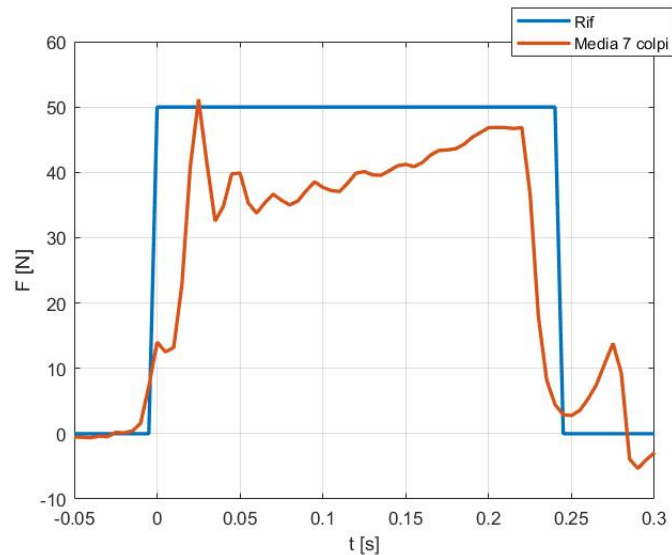


Figura 4.24: Media 7 colpi,  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile

Dalla Figura 4.25 si evidenzia questo particolare, per tutta la durata del colpo la somma algebrica dello spostamento dello stelo e della massa rimane nulla, e diventa inferiore a zero proprio in corrispondenza di quell'avvallamento dove la massa rimbalza sullo stelo. Confrontando in maniera diretta i due spostamenti si osserva come prima che lo stelo rientri, la massa si trovi ad una distanza maggiore. Si individua anche il punto in cui la posizione della massa coincide nuovamente con

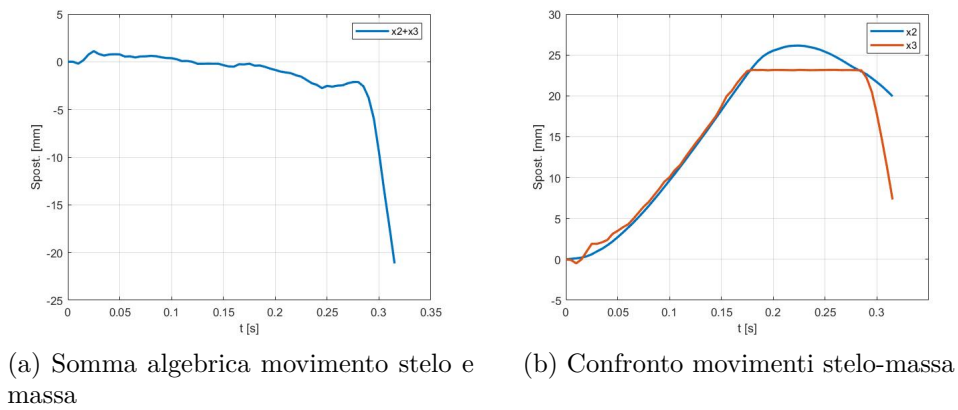


Figura 4.25: Spostamento stelo e massa durante il colpo

quella dello stelo.

Analizzando i risultati numerici si osserva come in generale non si abbia un decadimento significativo dei risultati, sicuramente influenzato dal fenomeno di rimbalzo.

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5N_s$
Impulso FB	$9.22 \pm 0.1N_s$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.28 \pm 0.002s$
Errore ACC	$-24.7\% \pm 0.82\%$
Errore TCK	$29.2\% \pm 1.04\%$
COV	$1.09\%$

Tabella 4.8: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.24

Agire sui contributi del PID non evita la perdita di contatto, e peggiora anche i risultati di accuratezza e tracking. Aumentando i guadagni, portandoli rispettivamente a  $k_p=4$  e  $k_i=40$ , si aumenta complessivamente il valore di forza scambiato visibile sia dall'aumento del picco massimo che dal picco in corrispondenza della ripresa del contatto.

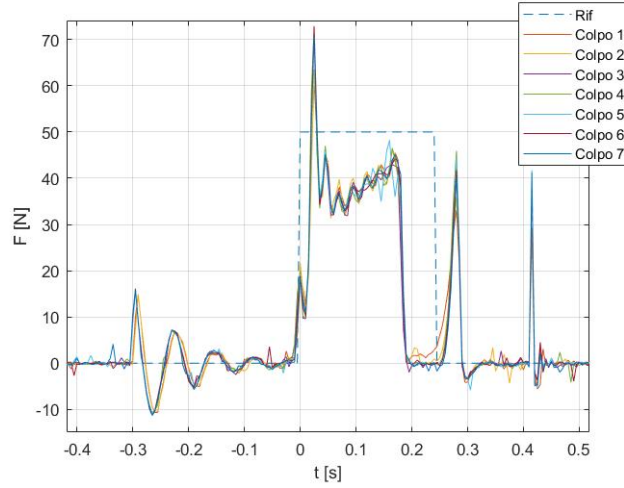


Figura 4.26: Colpi con  $k_p=4$  e  $k_i=40$  per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile

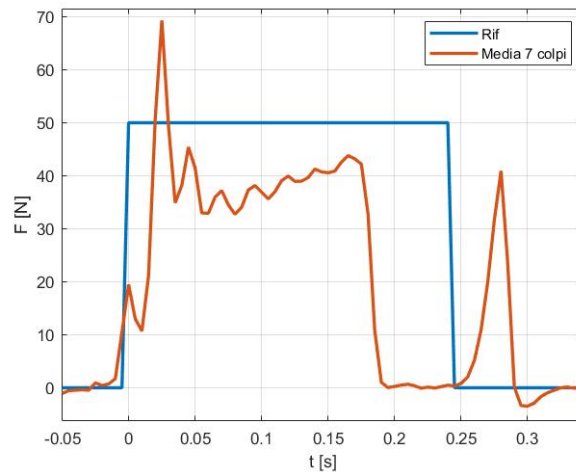


Figura 4.27: Media 8 colpi,  $k_p=4$  e  $k_i=40$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile



PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5N_s$
Impulso FB	$7.7 \pm 0.08N_s$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.29 \pm 0s$
Errore ACC	$-29.7\% \pm 0.70\%$
Errore TCK	$35.7\% \pm 1.3\%$
COV	$1.01\%$

Tabella 4.9: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.27

Anche analizzando il movimento di stelo e massa si nota il peggioramento del fenomeno di perdita del contatto, difatti la curva di Figura 4.28 scende repentinamente prima di ritornare a zero.

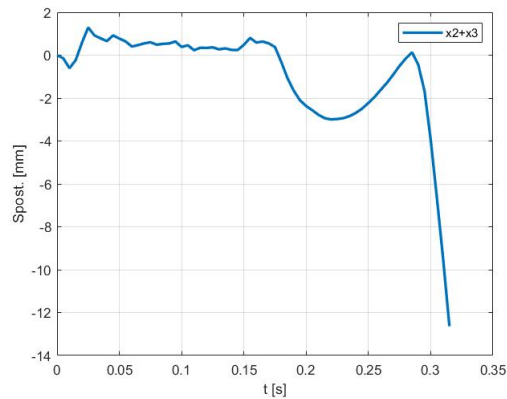


Figura 4.28: Somma algebrica movimento stelo e massa

Per limitare il problema della perdita di contatto, si è testato il sistema ponendo la distanza iniziale pari a 6cm, questo suggerisce da un lato la possibilità di lavorare con guadagni più ridotti e riuscire a limitare questo comportamento, ma da un altro si accentua l'avvallamento di primo contatto e il picco massimo.

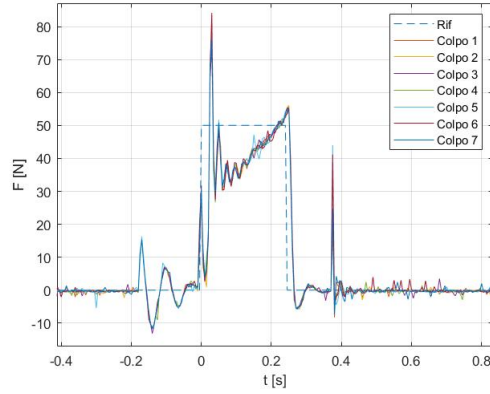


Figura 4.29: Colpi con  $k_p=3.6$  e  $k_i=40$  per onda quadra da 250ms e 50N, massa mobile, distanza 6cm

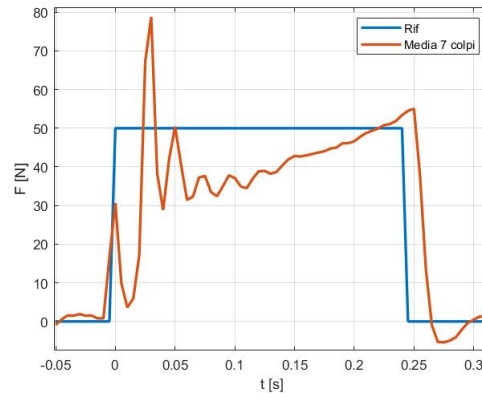
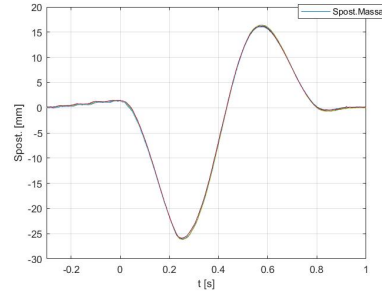


Figura 4.30: Media 8 colpi,  $k_p=3.6$  e  $k_i=40$ , per onda quadra da 250ms e 50N, con massa mobile, distanza 6cm

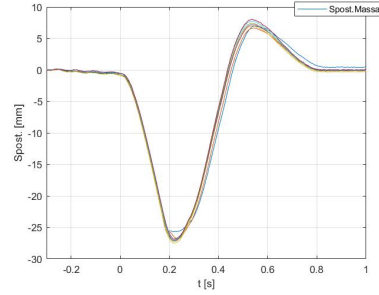
PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$10.6 \pm 0.016Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27 \pm 0.013s$
Errore ACC	$-13.3\% \pm 0.13\%$
Errore TCK	$30.9\% \pm 0.46\%$

Tabella 4.10: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.30

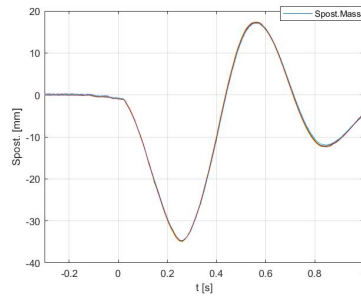
In tutti e tre i casi analizzati si può osservare come cambi il comportamento della massa impattata



(a) Spostamento massa per prova di Figura 4.24



(b) Spostamento massa per prova di Figura 4.27

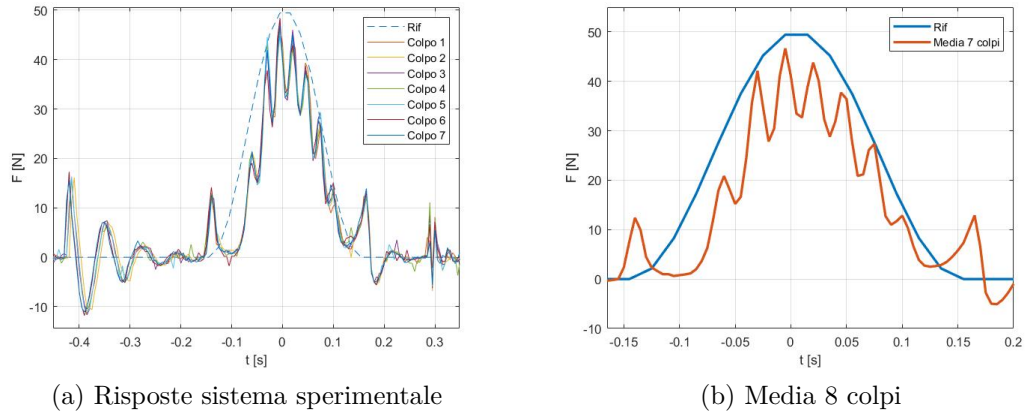


(c) Spostamento massa per prova di Figura 4.30

Figura 4.31: Confronto movimento massa per configurazione con massa mobile

Aumentando i guadagni si riduce l'oscillazione, che al contrario aumenta diminuendo la distanza tra i corpi. Per queste condizioni di lavoro i risultati suggeriscono di agire sui parametri del controllore per affinare la risposta del sistema, dati anche gli effetti sui valori massimi e i diversi picchi che si realizzano.

Gli aspetti critici individuati sul sistema soggetto ad un riferimento ad onda quadra, si presentano anche con il riferimento sinusoidale. In questo caso però emergono ulteriori problemi dovuti alla cedevolezza della massa, si osservano infatti eccessive oscillazioni che vanno ad inficiare il buon sviluppo della risposta. Dalla Figura 4.32 si nota il picco dovuto al rimbalzo della massa, quindi le oscillazioni presenti durante tutta la fase del colpo.

Figura 4.32: Risposta modello in configurazione con massa mobile,  $k_p=6$  e  $k_i=16$ 

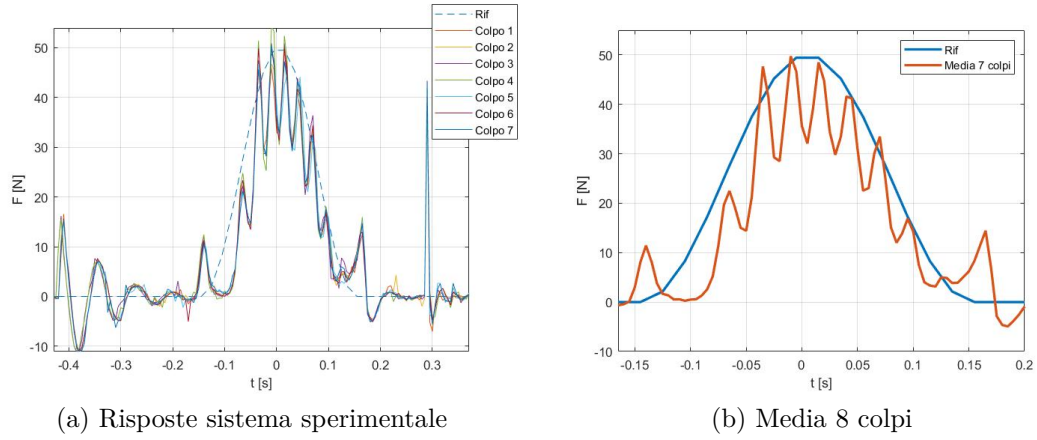
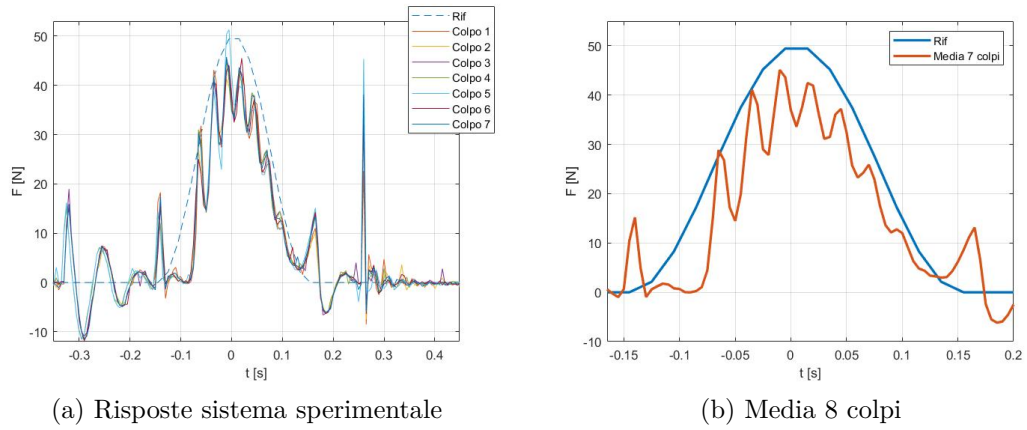
Il peggioramento dei risultati si evidenzia anche numericamente:

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$5.5 \pm 0.016Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.32 \pm 0s$
Errore ACC	$-26.4\% \pm 0.21\%$
Errore TCK	$36.3\% \pm 0.54\%$

Tabella 4.11: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.32

Anche in questo caso si è agito sui contributi del controllore per cercare di ridurre tutti gli aspetti negativi. La variazione del  $k_i$  è risultata inefficace, e dovendo agire solo sul guadagno proporzionale il range di variabilità si è ridotto notevolmente, potendo semplicemente aumentarlo garantendo la stabilità della risposta. Quello che si ottiene portando il  $k_p$  a 7 è un aumento della ampiezza complessiva della risposta e delle singole oscillazioni.

Riducendo la distanza tra i corpi non si hanno miglioramenti se non nel lavorare con guadagni inferiori:  $k_p=6.5$  e  $k_i=12$ .

Figura 4.33: Risposta modello in configurazione con massa mobile,  $k_p=7$  e  $k_i=16$ Figura 4.34: Risposta modello in configurazione con massa mobile,  $k_p=6.5$  e  $k_i=16$ , distanza 6cm

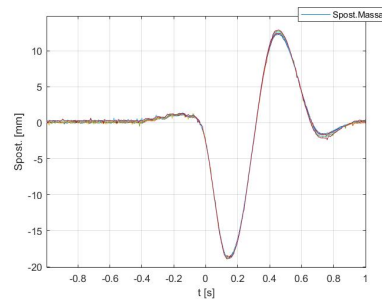
Da un punto di vista numerico si osserva un leggero miglioramento, ma in tutti i casi il riferimento sinusoidale non restituisce una risposta ottimale.

PARAMETRO	VAL.MEDIO FIG. 4.33	VAL.MEDIO FIG. 4.34
Impulso ID	$7.5Ns$	$7.5Ns$
Impulso FB	$5.9 \pm 0.06Ns$	$5.6 \pm 0.04Ns$
Durata ID	$0.27s$	$0.27s$
Durata FB	$0.31 \pm 0.002s$	$0.31 \pm 0.002s$
Errore ACC	$-21.1\% \pm 0.77\%$	$-25.2\% \pm 0.54\%$

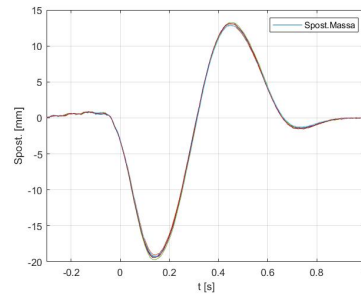
Errore TCK	$33.2\% \pm 0.71\%$	$34.9\% \pm 0.52\%$
COV	0.98%	0.72%

Tabella 4.12: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per differenti contributi e distanza stelo-massa

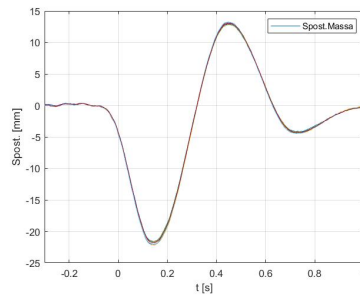
A livello di spostamenti della massa si osserva un comportamento analogo nelle diverse condizioni di lavoro. In generale per questa configurazione il sistema perturba la massa determinando una escursione complessiva di circa 3cm in maniera analoga a quanto accade al soggetto nelle prove cliniche.



(a) Spostamento massa per prova di Figura 4.32



(b) Spostamento massa per prova di Figura 4.33



(c) Spostamento massa per prova di Figura 4.34

Figura 4.35: Confronto movimento massa per configurazione con massa mobile e riferimento sinusoidale

### 4.2.3 Cilindro e massa mobile

La terza configurazione è quella che tende a simulare e rappresentare la prova clinica. svincolando anche il cilindro si analizza l'effetto della sua cedevolezza sulla perturbazione effettuata.

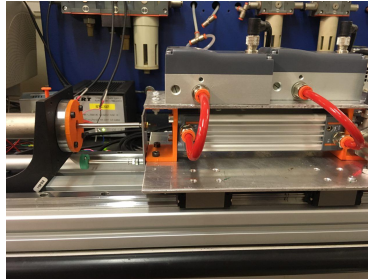


Figura 4.36: Cilindro svincolato

Come nel caso precedente, il problema principale in questa tipologia di prove è la possibilità che si possa perdere il contatto tra i corpi. Inoltre, in questa specifica configurazione si è dovuto considerare che l'operatore a differenza del soggetto del quale viene considerata solo la risposta passiva, applica un'azione durante le diverse fasi del colpo. Questo si è realizzato andando a ridurre la cedevolezza dal lato cilindro, principalmente aumentando la resistenza alla traslazione. Quello che si è ottenuto è una oscillazione ridotta rispetto alla massa, ma comunque presente come risulta dalla prove su soggetti.

Come dati di partenza per il controllore sono state considerate le prove ottimali del modello teorico, quindi per il riferimento ad onda quadra:  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ , per l'onda sinusoidale:  $k_p=6$  e  $k_i=16$ .

Per la prima tipologia di prove si evidenzia una amplificazione dell'effetto negativo di perdita di contatto tra i corpi con dei risultati fortemente inconsistenti.

Il sistema mostra significative oscillazioni con un segmento di 80ms nei quali non si applica alcun carico alla massa. Analizzando gli spostamenti dei corpi si evidenzia questo comportamento, con un oscillazione reciproca dei componenti che determina successivi impatti tra di essi.

Durante il colpo i corpi sono a contatto solo i primi 80ms, successivamente i movimenti reciproci distaccano completamente i componenti rendendo inapplicabile un modello di questo tipo al caso clinico, tenendo conto anche degli altri fattori che

non vengono considerati sul banco.

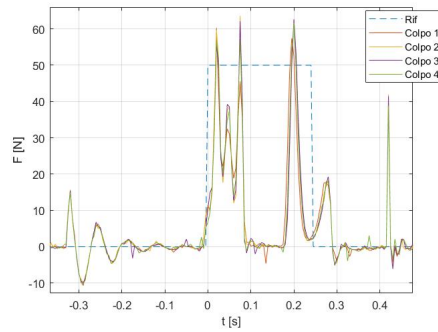


Figura 4.37: Colpi con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$  per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato

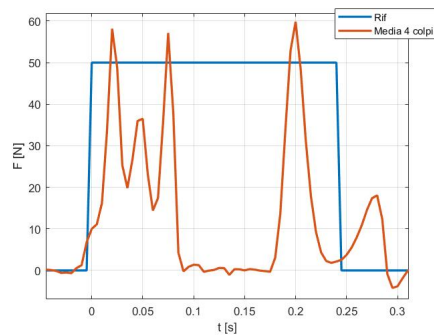
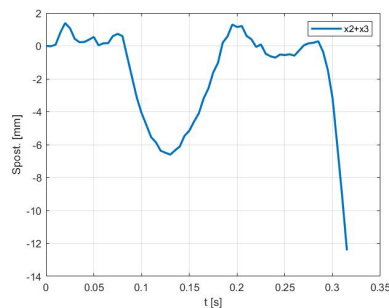
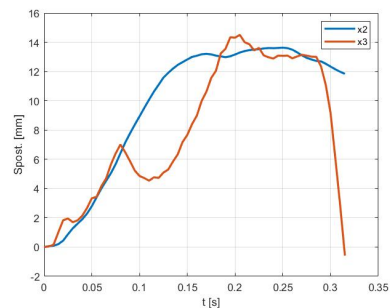


Figura 4.38: Media 8 colpi,  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato



(a) Somma algebrica movimento stelo e massa



(b) Confronto movimenti stelo-massa

Figura 4.39: Spostamento stelo e massa durante il colpo, terza configurazione



È utile guardare gli spostamenti letti dai potenziometri, dai quali si osserva un iniziale movimento retrogrado di tutto il carrello del cilindro dovuto alla reazione della forza di pressione agente sul pistone interno. Successivamente si ha un spostamento positivo in corrispondenza della fase di approccio, dove già la cella di carico legge delle forze dovute all'inerzia dello stelo. Successivamente la reazione della massa all'urto generato dal pistone si scarica sui carrelli determinando una oscillazione di circa 1cm. Naturalmente questo movimento oscillatorio determina un successivo contatto con la massa e la generazione dei successivi picchi. La massa subisce uno spostamento privo di oscillazioni nell'intorno della posizione iniziale, anche l'escursione complessiva è ridotta, circa 1.5cm, questo dovuto all'urto ridotto generato dallo stelo. Di fatti questa configurazione mostra un movimento maggiore del cilindro rispetto alla massa, condizione come anticipato non conforme al test reale.

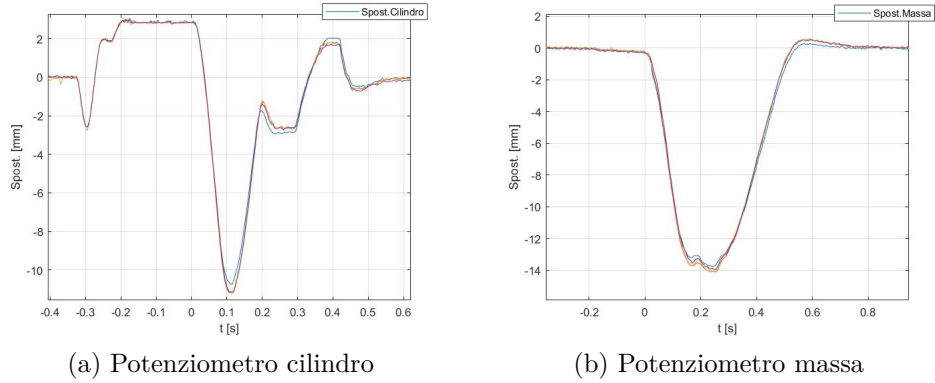


Figura 4.40: Spostamento cilindro e massa per onda quadra con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$

Agire sui parametri del controllore non apporta alcun miglioramento alla risposta del modello, l'unica variazione che evita la perdita del contatto è la riduzione della distanza tra i corpi. Questo, grazie alla ridotta durata del colpo e alla conseguente diversa energia che viene scambiata tra i corpi, restituisce delle risposte più accurate.

Il segnale presenta significative oscillazioni ma con i parametri scelti si riesce a seguire meglio il riferimento. Si nota il comportamento completamente differente dal caso precedente, comportamento che indica la forte variabilità di questo modello. Dalla tabella 4.13 si evidenzia numericamente questa differenza sostanziale.

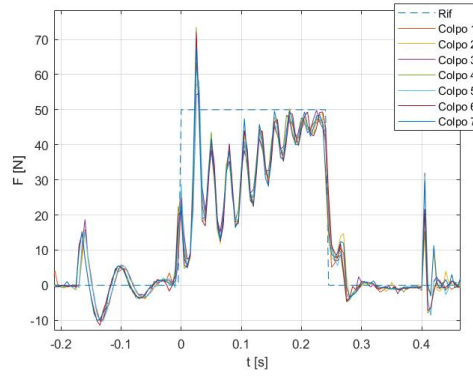


Figura 4.41: Colpi con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ , distanza  $dx=6\text{cm}$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato

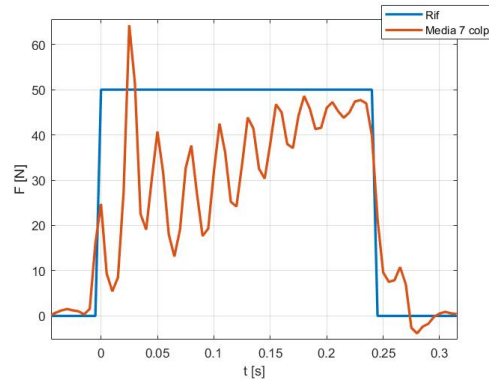


Figura 4.42: Media 8 colpi,  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$ , distanza  $dx=6\text{cm}$ , per onda quadra da 250ms e 50N, sistema svincolato

PARAMETRO	VAL.MEDIO FIG. 4.38	VAL.MEDIO FIG. 4.42
Impulso ID	$12.5Ns$	$12.5Ns$
Impulso FB	$4.4 \pm 0.03Ns$	$8.81 \pm 0.03Ns$
Durata ID	$0.25s$	$0.25s$
Durata FB	$0.29 \pm 0s$	$0.27 \pm 0.003s$
Errore ACC	$-63.8\% \pm 0.27\%$	$-28.1\% \pm 0.21\%$
Errore TCK	$73.8\% \pm 0.26\%$	$34.8\% \pm 0.59\%$
COV	$0.74\%$	$0.30\%$

Tabella 4.13: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per diversa distanza stelo-massa, per riferimento ad onda quadra e cilindro svincolato

Osservando i movimenti dei due componenti si nota come in questo caso rimangano maggiormente a contatto e allo stesso tempo la massa subisca una escursione maggiore del cilindro, muovendosi rispettivamente di circa 4cm e circa 2cm. Anche in queste condizioni si ha a valle del colpo un ridotto impatto, limitato dalla maggior velocità di rientro dello stelo.

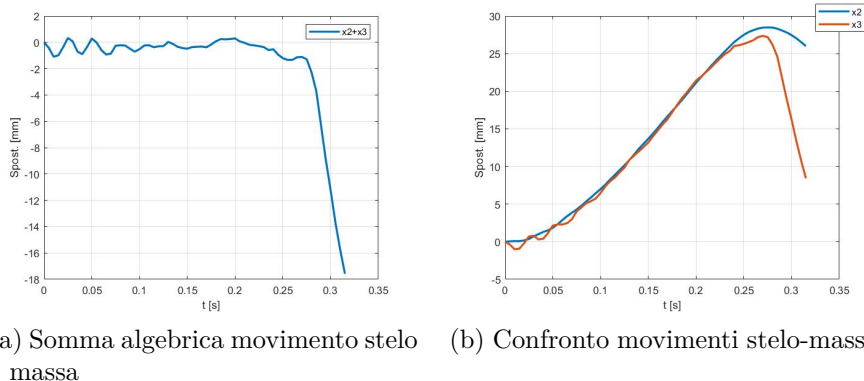


Figura 4.43: Spostamento stelo e massa durante il colpo, terza configurazione, distanza stelo-massa 6cm

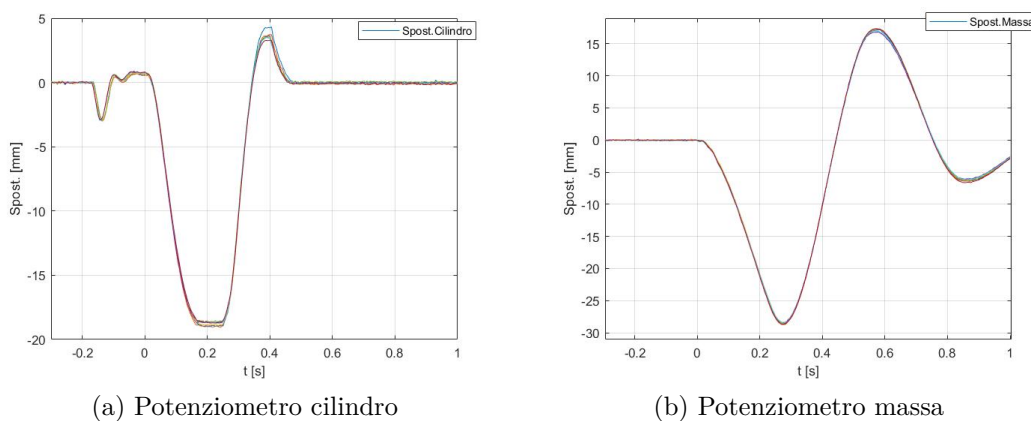


Figura 4.44: Spostamento cilindro e massa per onda quadra con  $k_p=3.5$  e  $k_i=35$  e distanza  $dx=6\text{cm}$

Passando al riferimento sinusoidale la risposta del sistema non cambia, anche per questo segnale la risposta risulta inconsistente a testimonianza dei forti limiti di questa tipologia di controllo. Nelle figure successive si mostrano i risultati ottenuti

agendo sulla distanza stelo-massa e sui guadagni proporzionale e integrativo per limitare le forti oscillazioni. I valori migliori considerati sono:  $k_p=4$  e  $k_i=25$ .

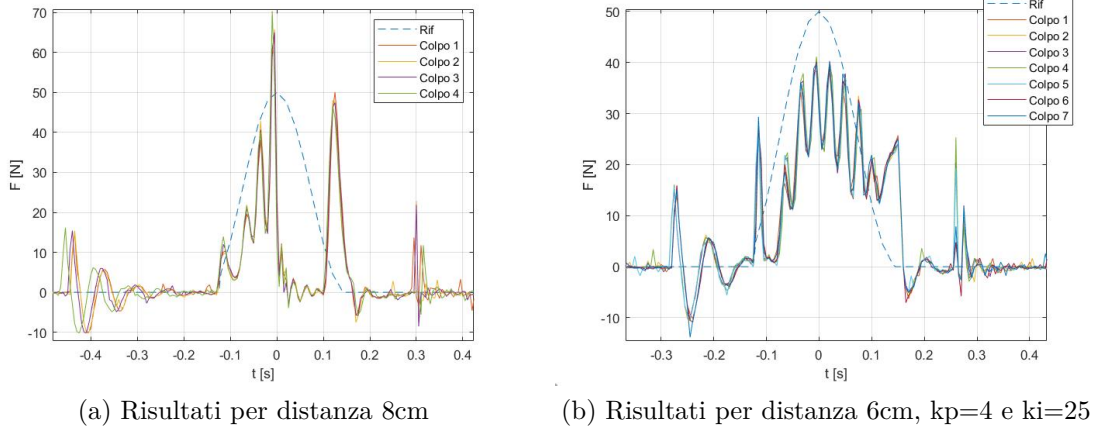


Figura 4.45: Risposta sperimentale terza configurazione, riferimento sinusoidale

Anche in questo caso la riduzione della distanza ha una influenza significativa sulla risposta, i parametri del controllore hanno permesso di evitare condizioni di instabilità e allo stesso tempo un'ampiezza maggiore del segnale rilevato. Seppur migliorando, il risultato è meno consistente rispetto alla risposta con l'onda quadra riscontrabile anche dallo scostamento dei risultati numerici rispetto al riferimento (tab.4.14).

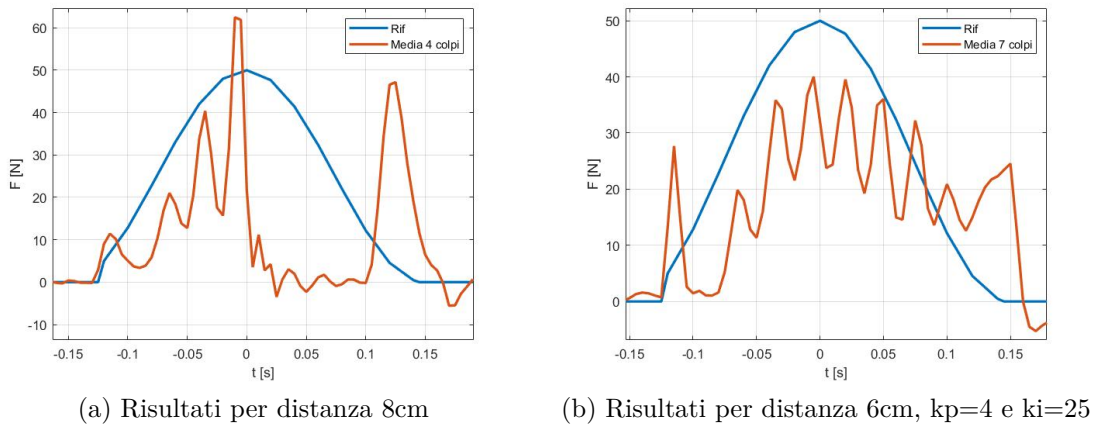


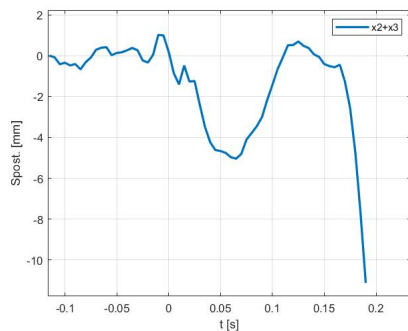
Figura 4.46: Risposta media sperimentale terza configurazione, riferimento sinusoidale

PARAMETRO	VAL.MEDIO dx-8cm	VAL.MEDIO dx-6cm
Impulso ID	$7.5N_s$	$7.5N_s$
Impulso FB	$3.78 \pm 0.03N_s$	$5.64 \pm 0.04N_s$
Durata ID	$0.27s$	$0.27s$
Durata FB	$0.27 \pm 0s$	$0.28 \pm 0s$
Errore ACC	$-49.12\% \pm 0.35\%$	$-24.05\% \pm 0.56\%$
Errore TCK	$83.1\% \pm 0.38\%$	$52.9\% \pm 0.18\%$
COV	$0.68\%$	$0.74\%$

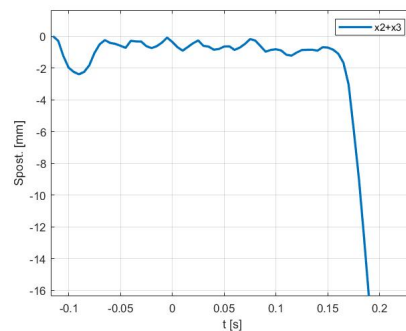
Tabella 4.14: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking per diversa distanza stelo-massa e contributi PID, riferimento sinusoidale, terza configurazione

Osservando i diversi movimenti dei componenti si evidenzia meglio l'effetto della distanza sul mantenimento del contatto tra i corpi.

Osservando lo spostamento complessivo del cilindro si nota una maggiore stabilità nel caso di distanze ridotte, con la conseguenza di avere delle escursioni nel moto maggiori, circa 1.8cm. Per la massa si osserva un'oscillazione maggiore per distanze ridotte, dove lo spostamento copre range più vicini al caso reale (3cm).

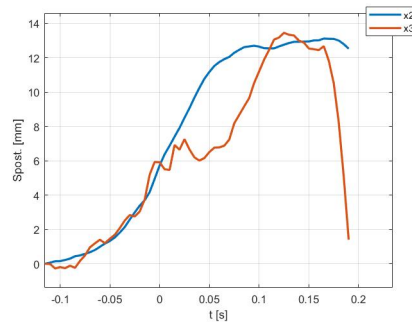


(a) Risultati per distanza 8cm

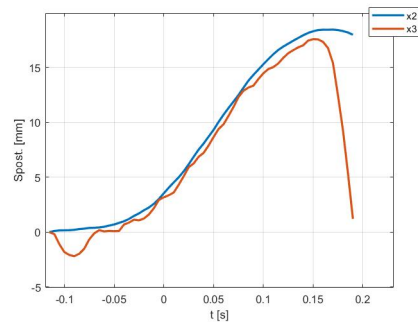


(b) Risultati per distanza 6cm,  $k_p=4$  e  $k_i=25$

Figura 4.47: Somma algebrica spostamento cilindro e massa durante il colpo, terza configurazione, riferimento sinusoidale

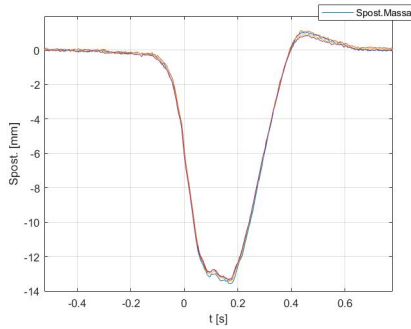


(a) Risultati per distanza 8cm

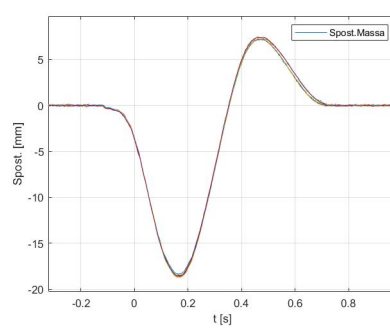


(b) Risultati per distanza 6cm,  $k_p=4$  e  $k_i=25$

Figura 4.48: Confronto spost. cilindro e massa, terza configurazione, rif. sinusoidale

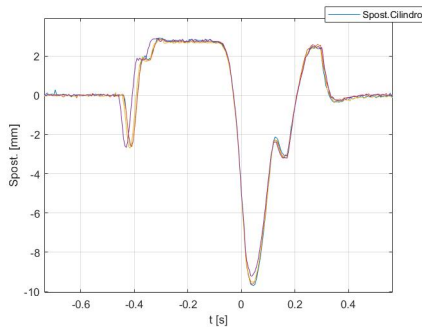


(a) Risultati per distanza 8cm

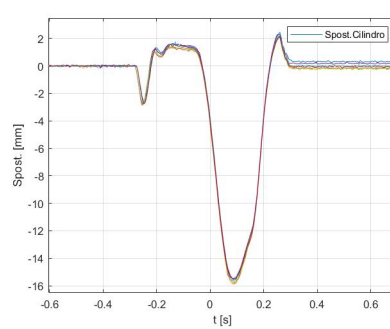


(b) Risultati per distanza 6cm,  $k_p=4$  e  $k_i=25$

Figura 4.49: Spostamento massa, terza configurazione, riferimento sinusoidale



(a) Risultati per distanza 8cm



(b) Risultati per distanza 6cm,  $k_p=4$  e  $k_i=25$

Figura 4.50: Spostamento cilindro, terza configurazione, riferimento sinusoidale

Complessivamente questa tipologia di controllo non restituisce risultati positivi soprattutto nella configurazione più vicina al caso reale. Tra i due riferimenti, come riscontrato anche nell'analisi teorica, quello ad onda quadra garantisce un funzionamento migliore, mantenendosi ripetibile al variare di pochi parametri. Importante è anche l'oscillazione iniziale della forza durante la fase di approccio, questa è legata alla tensione di comando che determina una pressione relativamente grande nelle camere. L'effetto negativo di questo comportamento ricade sull'operatore che deve controllare il movimento che si determina con il rischio di compromettere il buon esito della prova.

### **4.3 Sistema sperimentale con fase di approccio controllata in anello chiuso**

L'analisi dei risultati sviluppati sul banco sperimentale con il controllo della fase di approccio in anello aperto ha evidenziato sicuramente l'attendibilità del modello teorico rispetto al sistema completamente vincolato.

Per le altre configurazioni si deve tenere in considerazione innanzitutto la validità delle risposte in confronto con quelle ottenute sui soggetti, dato anche il comportamento fortemente instabile della versione priva di vincoli, o comunque la forte dipendenza da differenti parametri. Inoltre non avendo dei dati sul comportamento dell'operatore diventa difficile fare un confronto diretto delle diverse condizioni di lavoro. Da ciò si è posta maggiormente l'attenzione sulla seconda configurazione, assimilando il bloccaggio del cilindro all'azione esercitata dall'operatore nell'applicazione del colpo.

Se precedentemente si è cercato di osservare sia la robustezza del sistema nelle diverse versioni che la corrispondenza del modello teorico con il funzionamento sperimentale, per queste altre tipologie di controllo si è cercato di individuare la condizione di funzionamento ottimale.

#### **4.3.1 Risultati controllo in forza**

Il sistema completamente vincolato con il controllo in forza restituisce anche in questo caso dei buoni risultati. È evidente la perdita del fenomeno oscillatorio in

fase di uscita dello stelo, ma allo stesso tempo la ridotta velocità impiegata per arrivare a contatto con la massa.

Degli effetti si hanno anche sul picco di primo contatto dovuti al controllo in forza nella fase di approccio, per cui a partire dal contatto, riducendosi l'errore, diminuisce la velocità di uscita dello stelo.

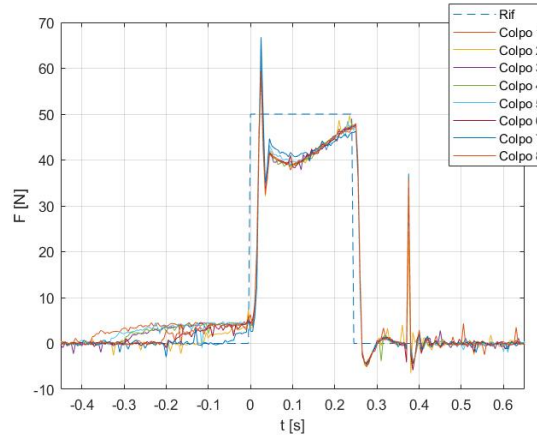


Figura 4.51: Colpi con  $k_p=5.8$  e  $k_i=52$  per onda quadra da 250ms e 50N

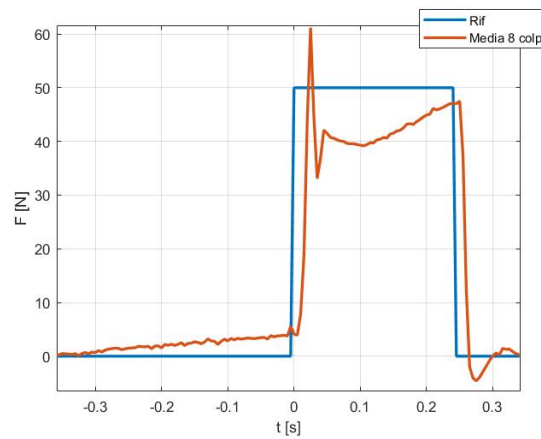


Figura 4.52: Media 8 colpi  $k_p=5.8$  e  $k_i=52$  per onda quadra da 250ms e 50N

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$10.41 \pm 0.05Ns$
Durata ID	$0.25s$



Durata FB	$0.26 \pm 0.005s$
Errore ACC	$-14.4\% \pm 1.6\%$
Errore TCK	$26.9\% \pm 1.33\%$
COV	0.45%

Tabella 4.15: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.52

I risultati ottenuti in questa configurazione rilevano un leggero peggioramento rispetto alla risposta di Figura 4.11.

Il modello teorico si mostra più performante sempre a causa della semplificazioni presenti. Quello che si era riscontrato è un funzionamento ottimale rispetto al tracking per contributi di valore superiore. La maggior prontezza e sensibilità del modello è evidenziabile anche dal confronto diretto a parità di  $k_p$  e  $k_i$ .

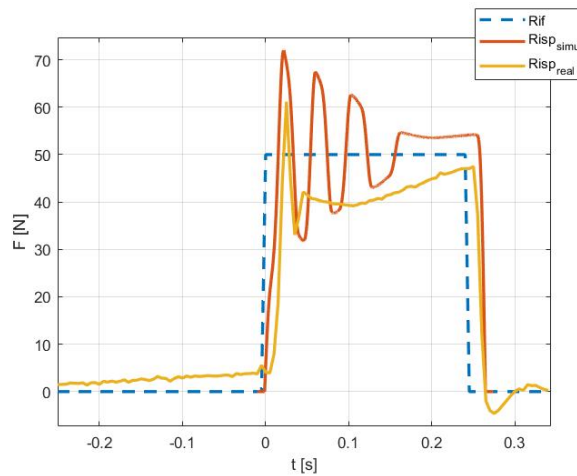


Figura 4.53: Confronto risposta sperimentale e teorica, per onda quadra con  $k_p=5.8$  e  $k_i=52$

Imponendo al modello un riferimento sinusoidale gli effetti sulla fase di approccio rimangono gli stessi, si perde il picco di primo contatto, questo a sostegno di quanto riscontrato attraverso le simulazioni, quindi l'introduzione di un riferimento di forza pari alla soglia di passaggio tra approccio e strike migliora il comportamento complessivo. Ma gli effetti della riduzione di velocità si ripercuotono sul colpo

vero e proprio che migliora in tracking ma perde in entità di impulso e accuratezza, parametri fondamentali di valutazione del sistema.

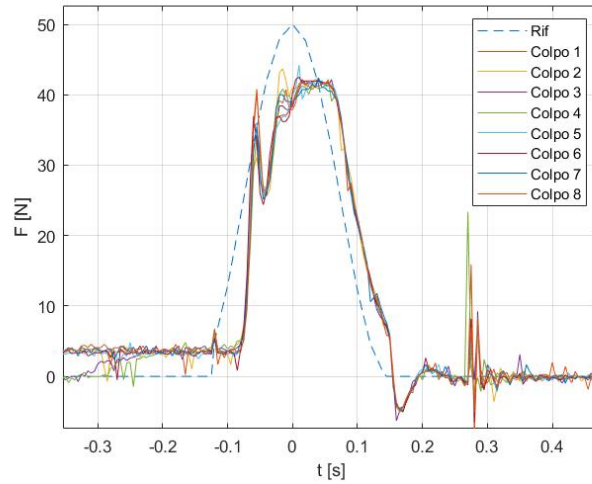


Figura 4.54: Colpi con  $k_p=15$  e  $k_i=30$  per onda sinusoidale

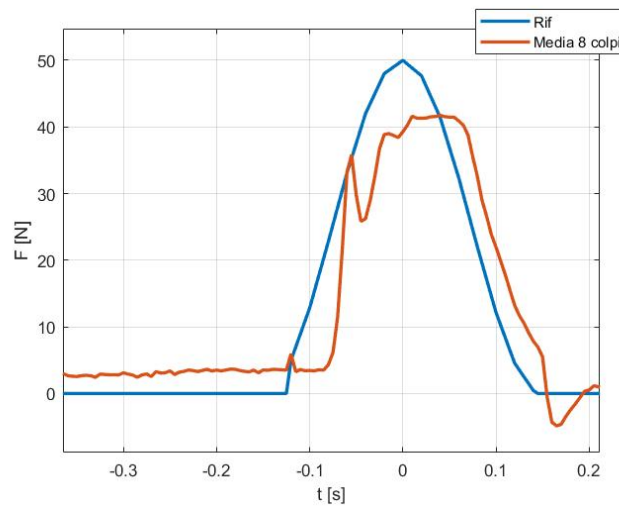


Figura 4.55: Media 8 colpi  $k_p=12$  e  $k_i=30$  per onda sinusoidale

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$6.87 \pm 0.05Ns$
Durata ID	$0.27s$

Durata FB	$0.27 \pm 0s$
Errore ACC	$-7.6\% \pm 0.32\%$
Errore TCK	$32.5\% \pm 0.35\%$
COV	$0.35\%$

Tabella 4.16: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.55

Rendendo libero il movimento della massa si riscontra una prima difficoltà per la perdita di contatto tra i corpi, questo rende vana la variazione dei guadagni. La condizione migliore ottenuta per una distanza iniziale di 8cm, si raggiunge con valori di  $k_p=6$  e  $k_i=5$ , che determina risultati poco soddisfacenti. La scelta dei parametri è ricaduta su valori che garantissero il mantenimento del contatto entro l'applicazione del colpo.

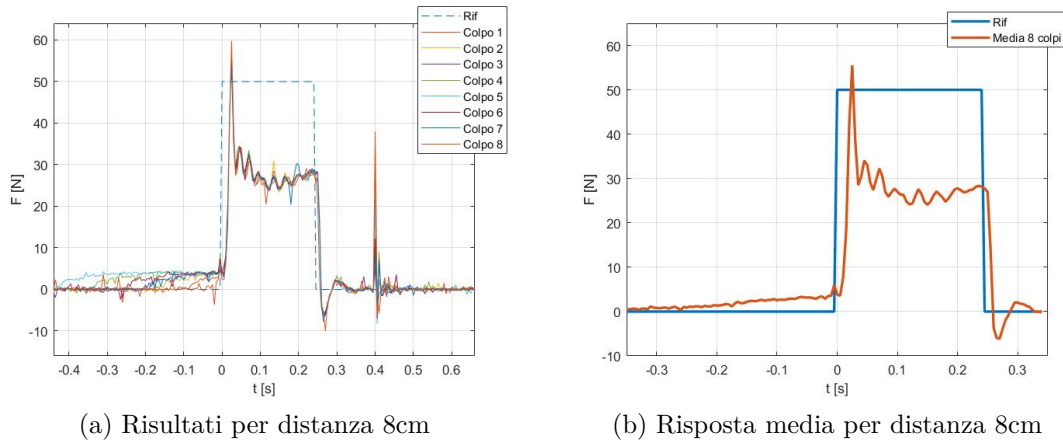


Figura 4.56: Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra,  $k_p=6$  e  $k_i=5$

Portando la distanza a 6cm si osserva un miglioramento del comportamento, questo consente di lavorare sui contributi del controllore e migliorare la risposta complessiva. In questa condizione di funzionamento si evidenzia un andamento analogo alla versione in anello aperto pur riducendo anche in questo caso i risultati numerici.

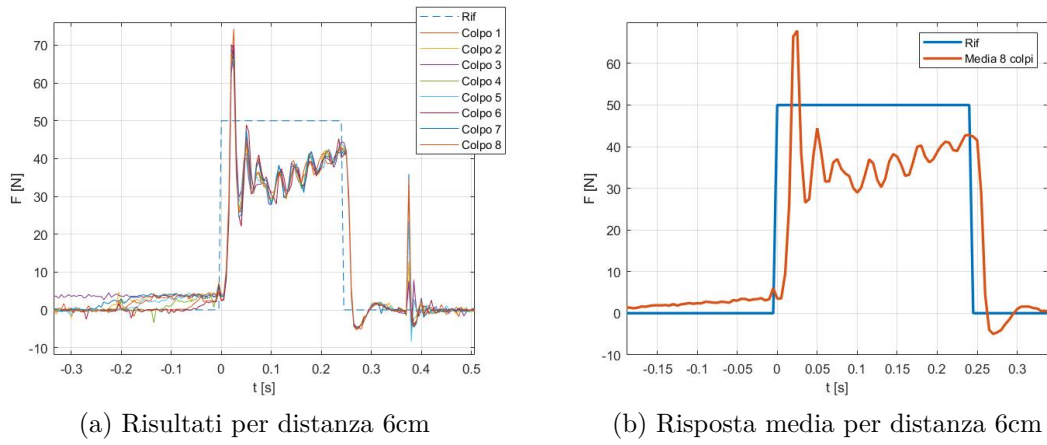


Figura 4.57: Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra,  $k_p=6.5$  e  $k_i=31$  e distanza  $dx=6\text{cm}$

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.5Ns$
Impulso FB	$9.13 \pm 0.07Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.26 \pm 0.006s$
Errore ACC	$-24.9\% \pm 1.18\%$
Errore TCK	$36.2\% \pm 1.18\%$
COV	$0.73\%$

Tabella 4.17: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.57

Gli effetti sono più significativi con il riferimento sinusoidale, in questo caso rispetto alla versione in anello aperto i risultati migliorano. Anche per queste condizioni di lavoro si verifica la perdita di contatto tra i corpi, con conseguente effetto ininfluente della variazione dei contributi del PID e necessario avvicinamento dei corpi.

Si osserva una riduzione delle oscillazioni oltre che del picco di primo contatto rispetto a quanto mostrato in Figura 4.33, numericamente è evidente il miglioramento nel tracking che questo tipo di controllo apporta al sistema.

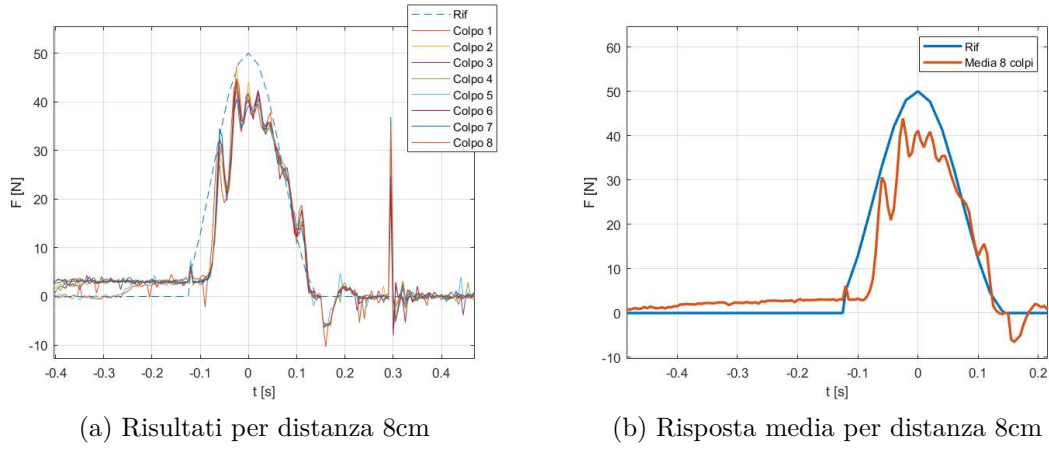


Figura 4.58: Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale,  $k_p=12$  e  $k_i=30$

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$5.8 \pm 0.03Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.24 \pm 0.002s$
Errore ACC	$-21.6\% \pm 0.4\%$
Errore TCK	$25.6\% \pm 0.42\%$
COV	$0.57\%$

Tabella 4.18: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.58

Con la riduzione della distanza la risposta migliora complessivamente, e contemporaneamente una variazione dei contributi non ha effetti significativi, infatti i risultati ottimali mostrati sono stati ottenuti con i medesimi contributi del caso precedente.

Dai risultati in tabella 4.19 si evidenzia come questo tipo di controllo migliori principalmente i risultati della risposta sinusoidale, riuscendo a garantire un buon comportamento anche nella condizione svincolata.

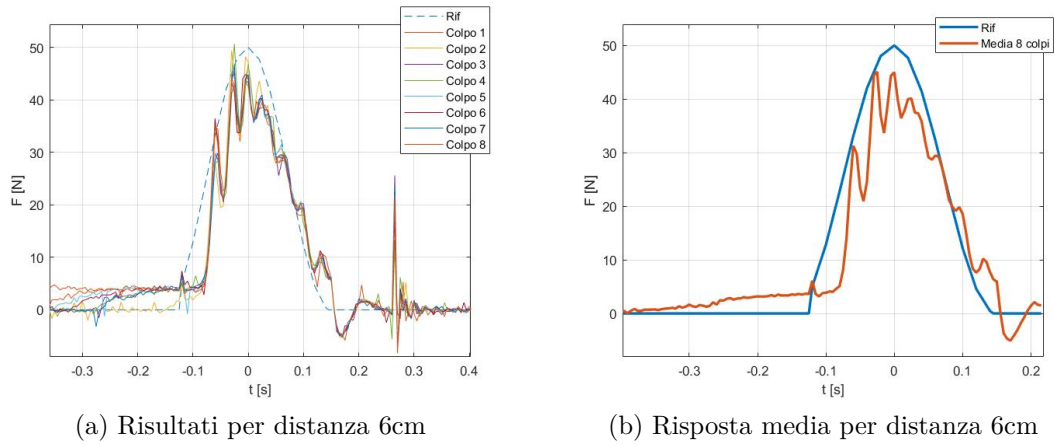


Figura 4.59: Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale,  $k_p=12$  e  $k_i=30$  e  $dx=6\text{cm}$

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.5Ns$
Impulso FB	$6.1 \pm 0.08Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.26 \pm 0.02s$
Errore ACC	$-17.1\% \pm 1.8\%$
Errore TCK	$26.1\% \pm 1.58\%$
COV	$1.23\%$

Tabella 4.19: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.59

Complessivamente un controllo di questo tipo, a differenza di quanto riscontrato con il modello teorico, non influisce sui risultati numerici dell'impulso. Si deve considerare anche il differente comportamento proprio in fase di approccio dove il modello è più pronto, raggiunge prima la condizione di passaggio tra le fasi. Il sistema reale è significativamente più lento nell'arrivare a  $5N$ , questo è dovuto alle resistenze pneumatiche interne, senza trascurare il rumore che altera il segnale della cella di carico non determinando un errore costante in quello specifico intervallo. Sicuramente il comportamento del sistema migliora, la particolare condizione di funzionamento sulla fase di approccio garantisce un passaggio più graduale tra le

prime due fasi. Di contro, però, si hanno effetti negativi sul colpo vero e proprio che risente della velocità inferiore all’inizio della fase di strike.

Un miglioramento più visibile si osserva nelle risposte al riferimento sinusoidale, soprattutto nel caso di massa libera.

### 4.3.2 Risultati controllo in posizione

Introducendo il controllo in posizione nel modello si definisce in maniera diretta la velocità di fuoriuscita dello stelo. Nei differenti test si è scelta una velocità di 70mm/s con un guadagno proporzionale sul controllo in posizione pari a 1.

Come analizzato attraverso le simulazioni, il valore costante di velocità incide sulla pendenza della rampa, quindi sul tempo impiegato a raggiungere il corpo. Agire sul guadagno contribuisce a seguire in modo più accurato il riferimento.

I valori scelti consentono di avere un buon compromesso tra tempi di impatto e ricoprimento del riferimento.

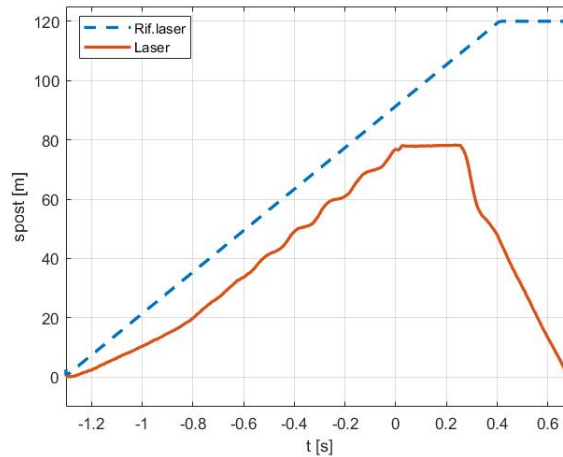


Figura 4.60: Spostamento stelo

Dall’analisi dei risultati teorici si è visto come, con un controllo in anello chiuso, i parametri di valutazione rimanessero su valori elevati, ma contemporaneamente si riuscisse a migliorare il comportamento della risposta e il controllo stesso della fase di avvicinamento al corpo da impattare.

Da un punto di vista sperimentale risulta più complesso raggiungere condizioni ottimali, ma si nota la stessa tendenza del caso teorico.

Considerando la risposta ad un riferimento ad onda quadra per il sistema fisso si evidenzia l'assenza anche in questo caso delle oscillazioni negli istanti iniziali dell'approccio. Con un comportamento nella fase di strike più vicino a quello del sistema in anello aperto. È visibile nuovamente il picco di primo contatto, dovuto alla differente velocità raggiunta.

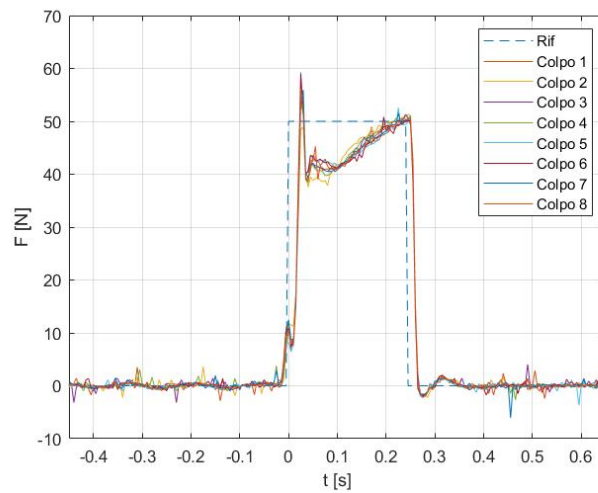


Figura 4.61: Colpi con  $k_p=6$  e  $k_i=75$  per riferimento ad onda quadra

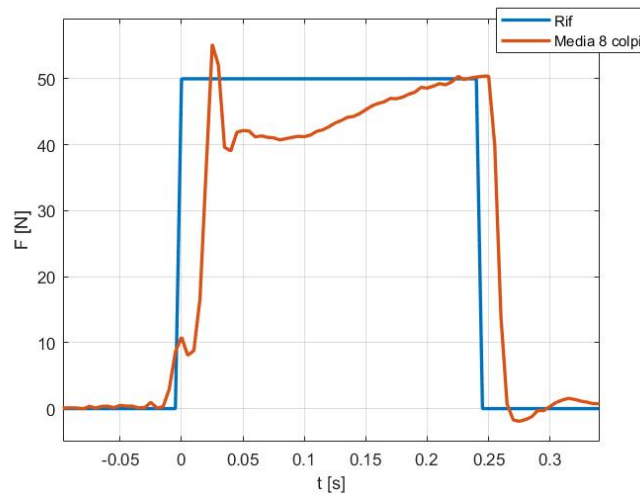


Figura 4.62: Media 8 colpi  $k_p=6$  e  $k_i=75$  per riferimento ad onda quadra



A livello numerico i risultati migliorano rispetto al controllo in forza, mantenendosi in linea con quelli del controllo in anello aperto ma sempre inferiori a quelli ideali.

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.25N_s$
Impulso FB	$11.1 \pm 0.005N_s$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.265 \pm 0s$
Errore ACC	$-9.4\% \pm 0.04\%$
Errore TCK	$22.3\% \pm 0.3\%$
COV	$0.05\%$

Tabella 4.20: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.62

Anche con il riferimento sinusoidale si ottengono dei miglioramenti, soprattutto nella forma d'onda riducendo l'errore in tracking. L'accuratezza peggiora a causa delle maggiori oscillazioni che si generano.

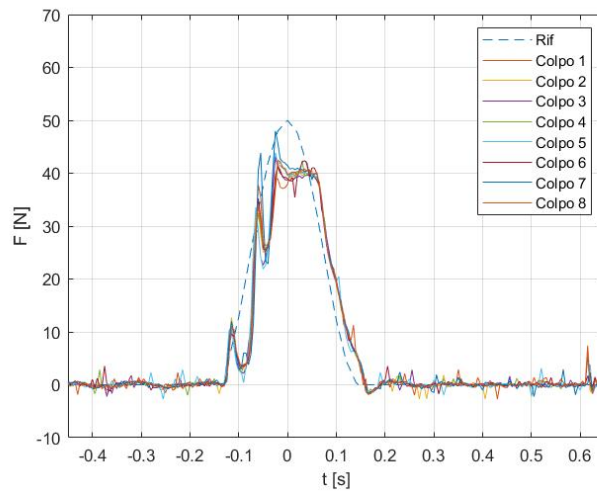


Figura 4.63: Colpi con  $k_p=14$  e  $k_i=70$  per riferimento sinusoidale

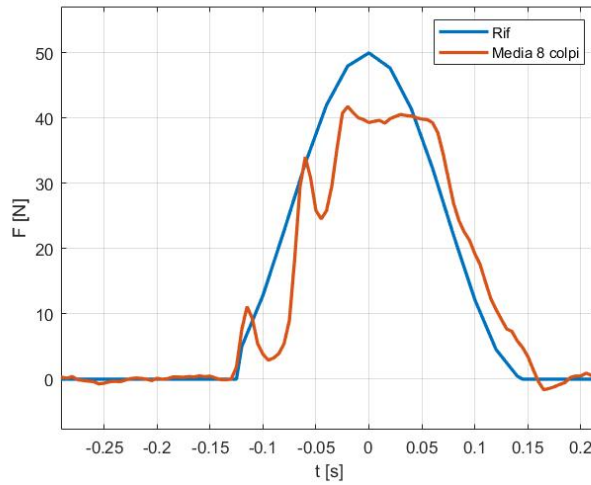


Figura 4.64: Media 8 colpi  $k_p=14$  e  $k_i=70$  per riferimento sinusoidale

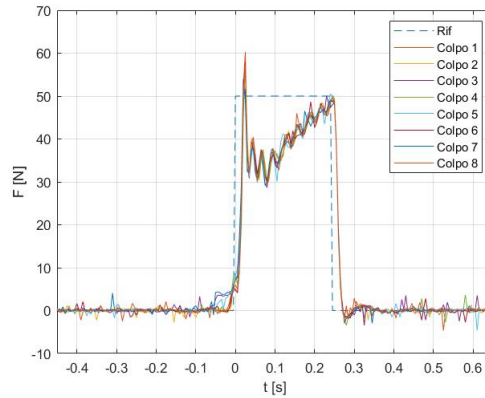
PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.4Ns$
Impulso FB	$6.7 \pm 0.09Ns$
Durata ID	$0.27s$
Durata FB	$0.26 \pm 0.002s$
Errore ACC	$-10.2\% \pm 1.3\%$
Errore TCK	$26.7\% \pm 0.5\%$
COV	$1.4\%$

Tabella 4.21: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.64

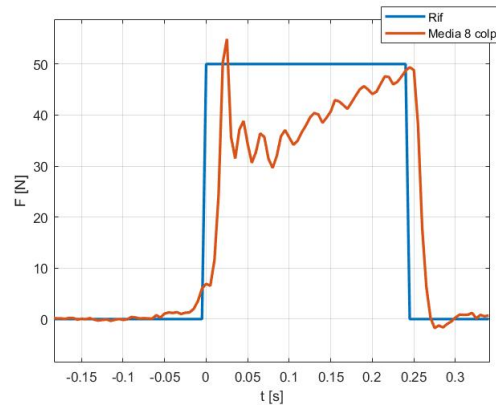
La configurazione svincolata ha evidenziato anche in questo caso la necessità di ridurre a 6cm la distanza tra stelo e massa per evitare la perdita di contatto.

La risposta ottimale si ottiene per valori di  $k_p$  e  $k_i$  leggermente inferiori, mantenendo un comportamento simile alla versione in anello chiuso.

L'andamento per un riferimento sinusoidale continua a mostrare maggiori miglioramenti a sottolineare la maggior robustezza che questa versione del controllo garantisce.



(a) Risultati per distanza 6cm

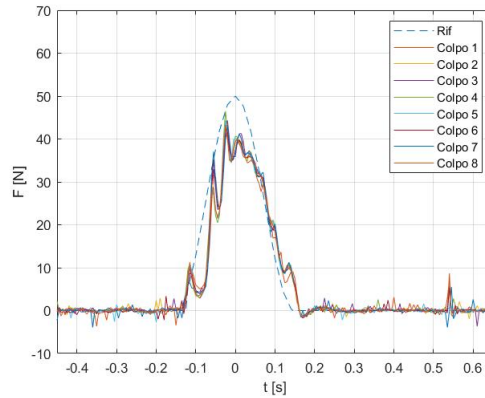


(b) Risposta media per distanza 6cm

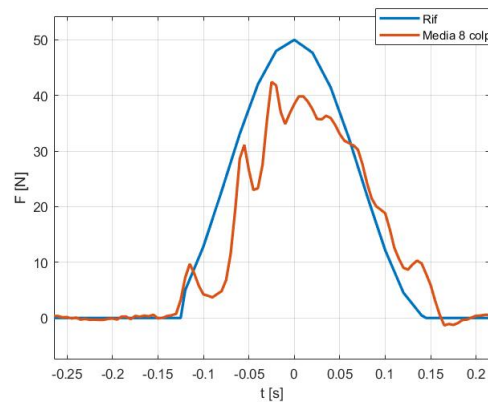
Figura 4.65: Risultati per sistema con massa libera, riferimento ad onda quadra,  $k_p=5.5$  e  $k_i=55$  e distanza  $dx=6\text{cm}$

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$12.25Ns$
Impulso FB	$10.1 \pm 0.03Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27 \pm 0.005s$
Errore ACC	$-17.03\% \pm 1.34\%$
Errore TCK	$30.7\% \pm 1.14\%$
COV	$0.73\%$

Tabella 4.22: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.65



(a) Risultati per distanza 6cm



(b) Risposta media per distanza 6cm

Figura 4.66: Risultati per sistema con massa libera, riferimento sinusoidale,  $k_p=5.5$  e  $k_i=55$  e distanza  $dx=6\text{cm}$

PARAMETRO	VAL.MEDIO $\pm$ DEV.STD
Impulso ID	$7.4Ns$
Impulso FB	$6.17 \pm 0.05Ns$
Durata ID	$0.25s$
Durata FB	$0.27 \pm 0s$
Errore ACC	$-17\% \pm 0.64\%$
Errore TCK	$29.14\% \pm 0.44\%$
COV	$0.77\%$

Tabella 4.23: Calcolo dell'impulso e degli errori di tracking relativi alla risposta di Figura 4.66

La definizione di un controllo in posizione consente di mantenere i valori specifici della perturbazione in linea con quelli ottenuti nella prima versione del sistema, già vicini ai valori ideali. In più garantisce una maggior controllabilità dell'intera prova, potendo agire direttamente non solo nella fase di applicazione dell'impulso. Risultati soddisfacenti si ottengono anche nel caso di una configurazione non vincolata, che suggerisce un buon comportamento anche nel caso reale, con i dovuti limiti per la presenza di altri fattori non presi in considerazione nel dispositivo in esame.

Tra i due riferimenti le risposte migliori si ottengono per l'onda quadra, non tanto guardando ai valori numerici, quanto nella capacità di seguire il set. Ai fini della prova sicuramente non si ricerca un sistema capace di ripercorrere fedelmente il set, ma quanto la capacità di applicare sul soggetto un determinato impulso, ripetibile nel tempo, senza essere influenzato significativamente da fattori esterni, e in questa ottica l'impulso ad onda quadra risponde in maniera più soddisfacente.

## 4.4 Individuazione dei valori di cedevolezza dei respingenti

Nel capitolo 3 si è testato il modello teorico al variare dei parametri di rigidezza e smorzamento dei respingenti. L'analisi ha posto l'attenzione solo sull'andamento qualitativo del sistema, non avendo informazioni specifiche sulle caratteristiche di cedevolezza.

A valle dei test sperimentali, avendo a disposizione dei risultati ottimali per i diversi controlli nella configurazione svincolata, sono stati sviluppati degli script Matlab che permettessero di individuare l'ordine di grandezza di questi parametri e di conseguenza avere un modello teorico più fedele e rispondente al funzionamento reale. L'individuazione di queste grandezze si è basata su un confronto diretto tra lo spostamento della massa ottenuto nei test sperimentali e quello restituito dal modello teorico. Innanzitutto si è calcolato un valore di primo tentativo di rigidezza considerando esclusivamente l'escursione massima della massa impattata e rapportandola alla forza di 50N impressa. Da qui si è individuato l'ordine di grandezza della rigidezza vicina a  $1300 \frac{N}{m}$ .

Le valutazioni sono state fatte sulle prove che hanno mostrato un movimento maggiore della massa, principalmente quelle in cui la distanza dallo stelo era di 6cm, e il riferimento di forza ad onda quadra.

Da qui si è sviluppato un processo iterativo che al variare della rigidezza e dello smorzamento del respingente lato massa, riducesse l'errore quadratico medio tra lo spostamento reale e quello simulato sulla massa. Questo procedimento è stato applicato ai tre diversi modelli, così da individuare un valore medio che permettesse di rispondere bene a tutte le condizioni di funzionamento.

Nelle figure seguenti si mostra il processo iterativo e il risultato ottenuto minimizzando la differenza tra gli andamenti dello spostamento.

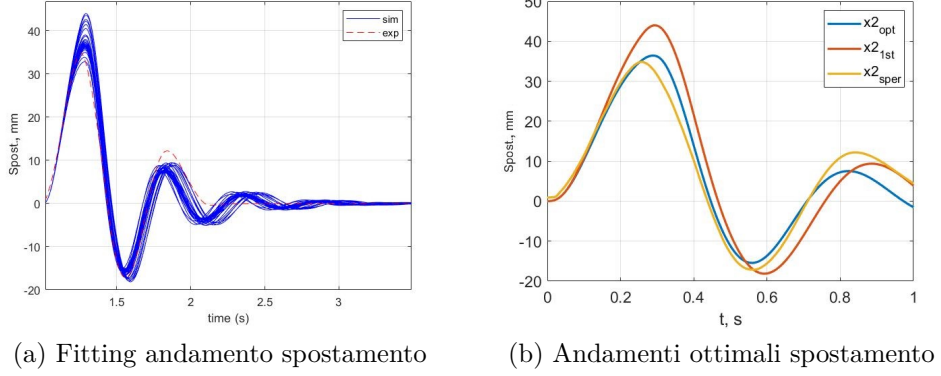


Figura 4.67: Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in anello aperto

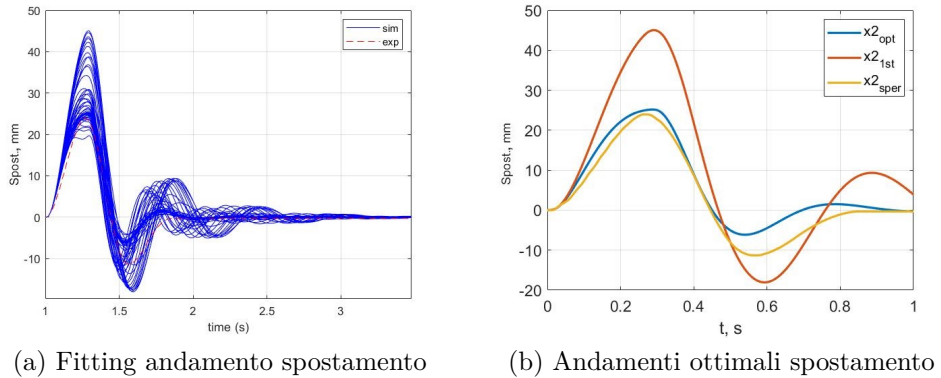


Figura 4.68: Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in forza

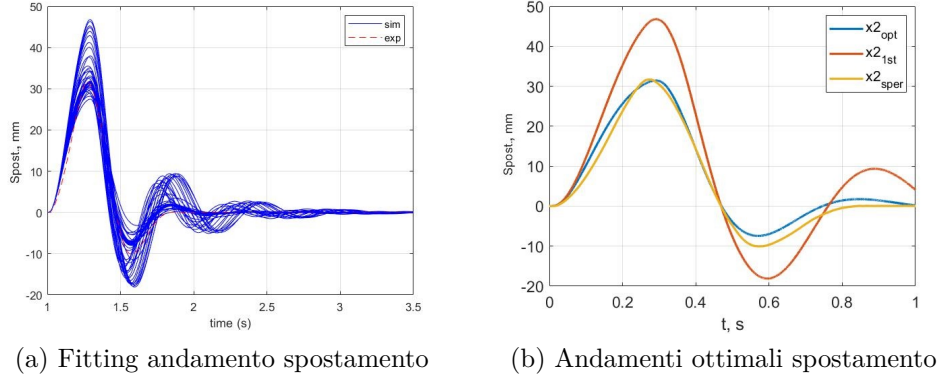


Figura 4.69: Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento massa, sistema con controllo in posizione

Dalle figure di destra (b) si osserva un ordine di grandezza analogo tra i diversi controlli e un comportamento leggermente differente soprattutto nell'ampiezza delle oscillazioni, questo si traduce in differenti valori di rigidezza e smorzamento che non possono dipendere dal tipo di controllo.

Il diverso comportamento è da imputare alle condizioni con cui lo stelo entra in contatto con la massa, queste dipendenti dal controllo, che hanno effetti sulla resistenza generata dall'attrito tra carrelli e guide, non modellato nel modello.

CONTROLLO	RIGIDEZZA $k_2$	SMORZAMENTO $\beta_2$
Anello Aperto	$1500 \frac{N}{m}$	$55 \frac{Ns}{m}$
Contr. Forza	$1960 \frac{N}{m}$	$73 \frac{Ns}{m}$
Durata ID	$1570 \frac{N}{m}$	$65 \frac{Ns}{m}$

Tabella 4.24: Valori di rigidezza e smorzamento per i tre differenti controlli

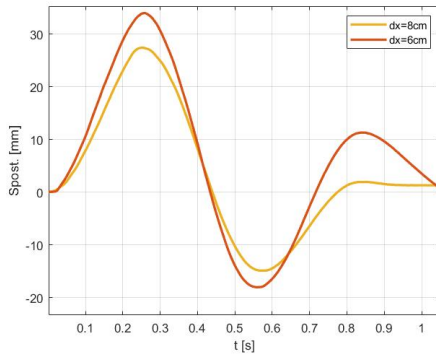
I valori ottimali utilizzati nel modello per testare nelle altre configurazioni il sistema sono stati scelti come media di queste tre coppie di risultati:

- **RIGIDEZZA**  $k_2$ :  $1670 \frac{N}{m}$
- **SMORZAMENTO**  $\beta_2$ :  $64 \frac{Ns}{m}$

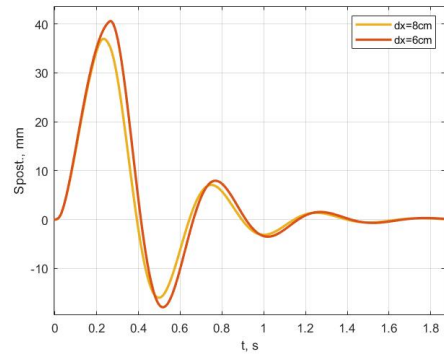
Con questi valori, i risultati del modello tendono a convergere verso quelli sperimentali, anche per la configurazione svincolata. Si deve tenere conto che considerare

un valore medio allontana dalla condizione ottimale le tre risposte, ma complessivamente mantiene ugualmente un giusto comportamento.

In figura 4.70 si può osservare la differenza tra risposta reale e simulata per la distanza stelo-massa di 6cm e 8cm a parità di guadagni tra modello e sistema. È evidente la maggior oscillazione ottenuta dal modello, giustificata dalla mancata modellazione dell'attrito sulle guide. Si nota anche la stessa tendenza al variare della distanza con l'aumento dell'ampiezza delle oscillazioni.

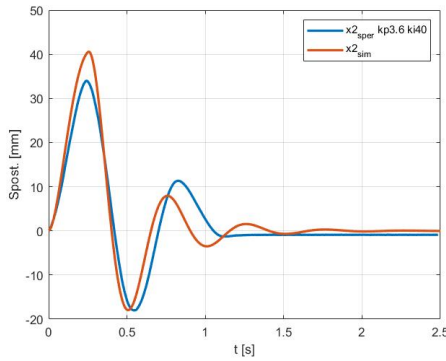


(a) Andamento sperimentale

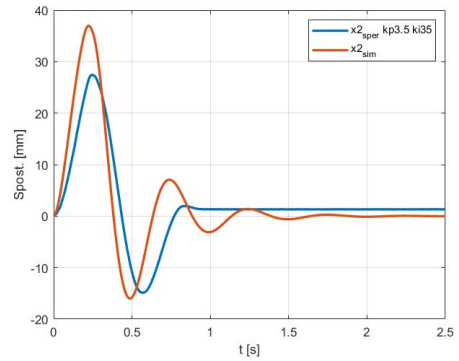


(b) Andamento simulato

Figura 4.70: Confronto andamento spostamento massa al variare della distanza



(a) Distanza 6cm



(b) Distanza 8cm

Figura 4.71: Confronto diretto sperimentale-simulato

Si osserva come la variazione di guadagno e di distanza nel sistema reale siano più influenti, a differenza del modello dove l'effetto più significativo è relativo all'ampiezza delle oscillazioni che tendono a crescere al diminuire della distanza, in



maniera comunque analoga allo sperimentale.

Il risultato più significativo riguarda sicuramente la risposta dell'impulso applicato, con questi valori di cedevolezza e lavorando opportunamente sul segnale si ottiene un andamento molto simile a quello sperimentale.

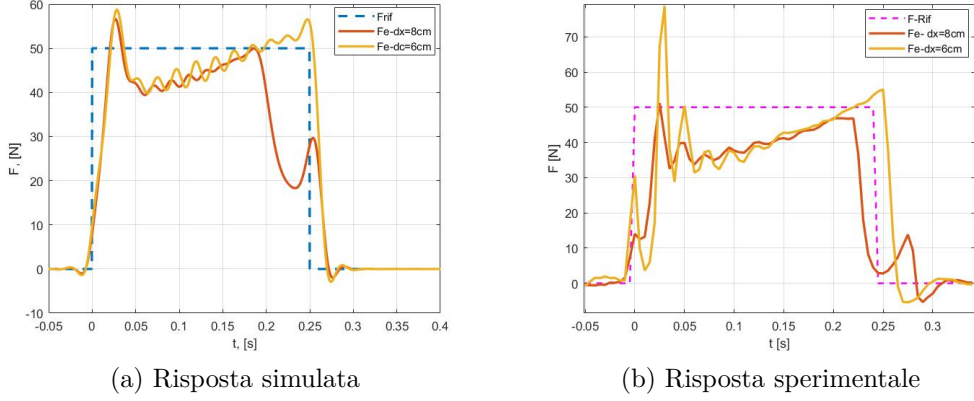


Figura 4.72: Confronto impulso sperimentale-simulato

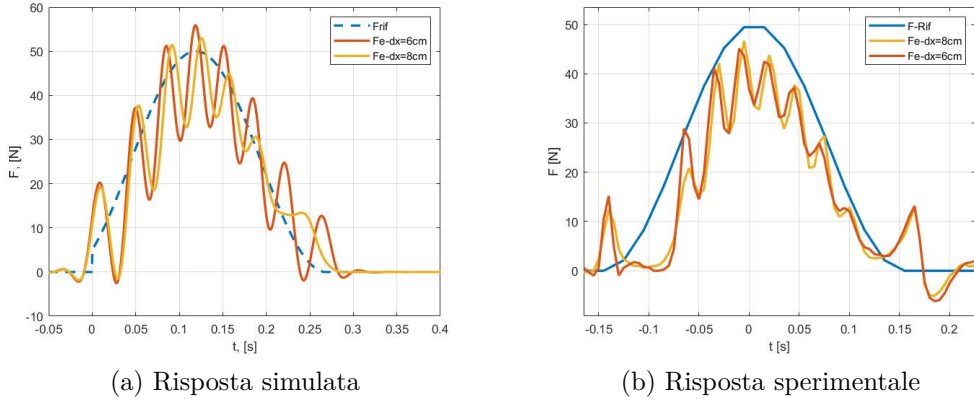


Figura 4.73: Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato

Risultati analoghi si ottengono anche per le altre due versioni del modello. Nel caso del controllo in forza lo spostamento della massa è più smorzato e si perde leggermente la corrispondenza tra gli andamenti in funzione della distanza, ma si ottiene ugualmente un buona corrispondenza nell'impulso.

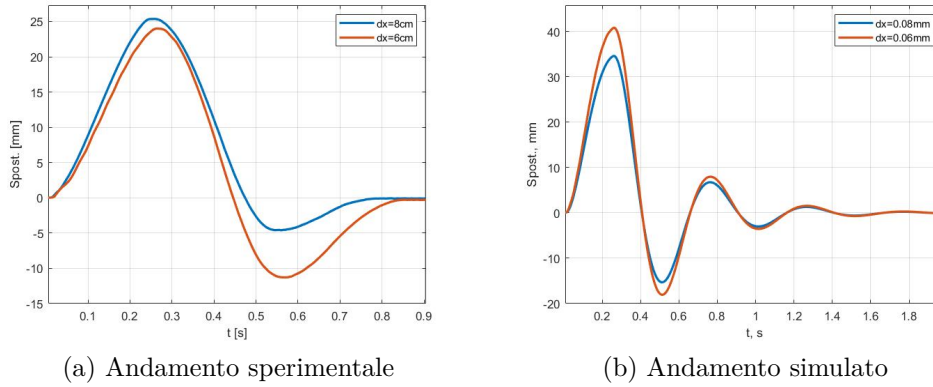


Figura 4.74: Confronto spostamento massa al variare della distanza, contr.forza

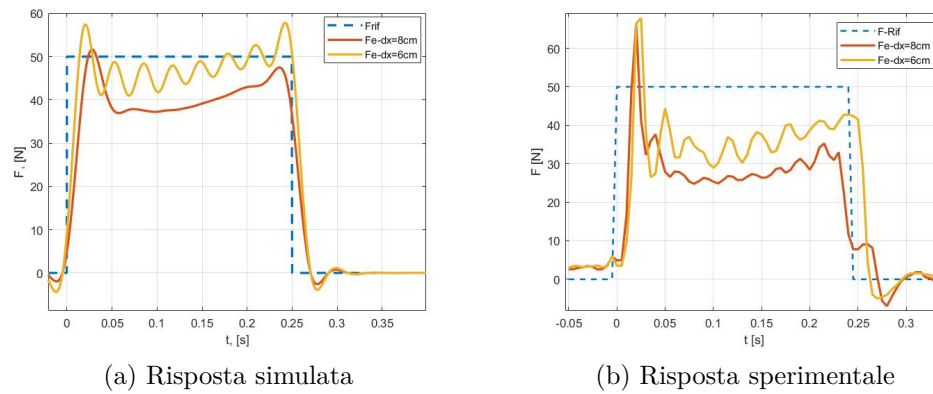


Figura 4.75: Confronto impulso sperimentale-simulato, contr.forza

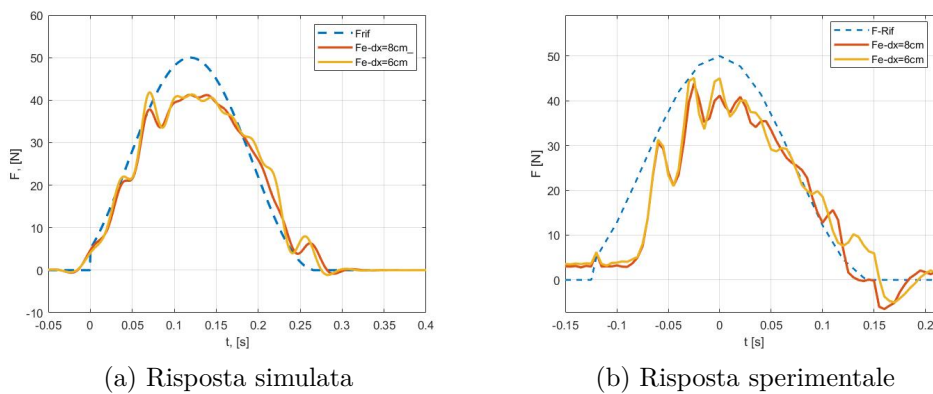


Figura 4.76: Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato, contr.forza

Allo stesso modo anche nel modello con controllo in posizione si ottengono dei risultati soddisfacenti.

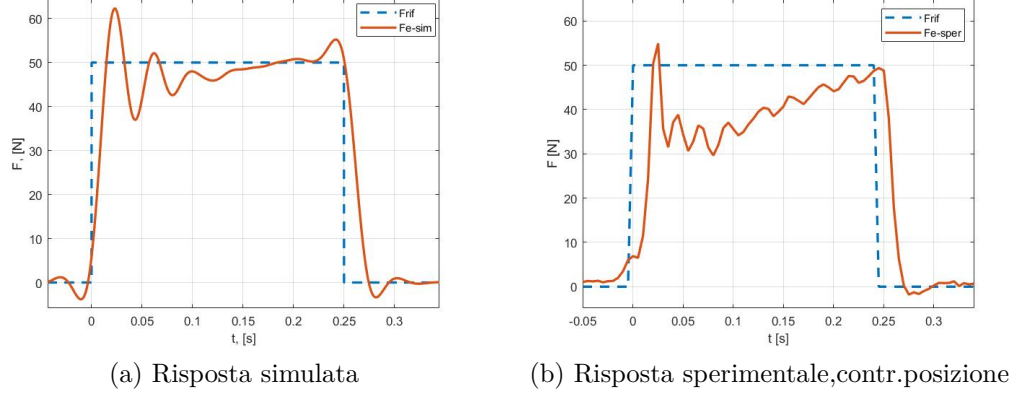


Figura 4.77: Confronto impulso sperimentale-simulato, contr. posizione

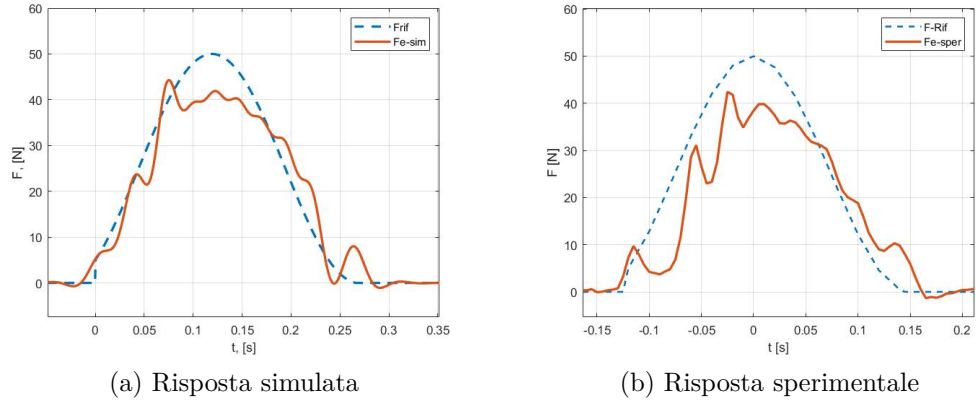


Figura 4.78: Confronto impulso sinusoidale sperimentale-simulato, contr. posizione

La corrispondenza del modello teorico è riscontrabile anche nella versione completamente svincolata. Per questa configurazione si è sviluppato un processo iterativo analogo al precedente, che lavorasse sulla cedevolezza lato cilindro al fine di far corrispondere la curva dello spostamento reale a quella simulata.

I due respingenti presentano le stesse caratteristiche di cedevolezza, nello specifico stessa tipologia di molle e stesso precarico. Al fine di rendere più realistica la simulazione del test clinico sul banco, si è agito sulla resistenza al movimento del blocco cilindro, aumentando l'attrito dei carrelli sulle guide.

Nel modello non avendo considerato questa grandezza, si è agito proprio sulla rigidità e lo smorzamento del respingente per aumentare la forza resistente alla traslazione.

Il procedimento è stato applicato al solo sistema con controllo in posizione della fase di approccio, soggetto ad un riferimento di forza ad onda quadra.

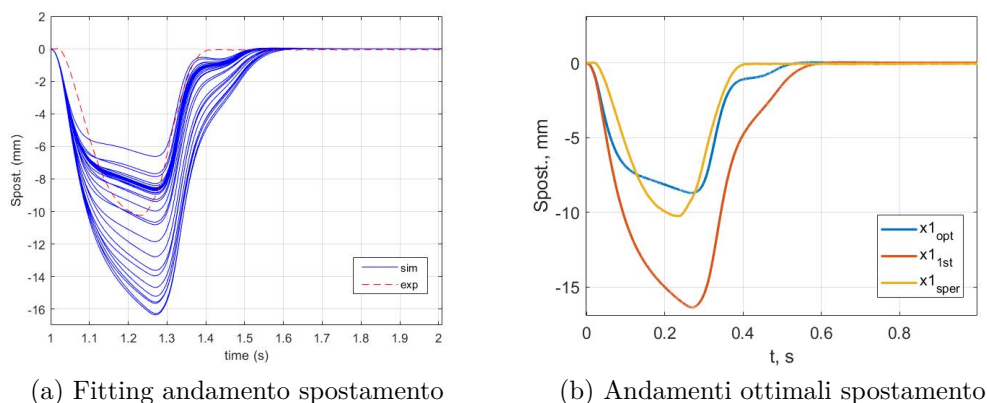


Figura 4.79: Iterazioni e risultato ottimale dello spostamento cilindro

Il processo iterativo restituisce come valori ottimali:

- **RIGIDEZZA**  $k_1$ :  $4824 \frac{N}{m}$
- **SMORZAMENTO**  $\beta_1$ :  $194 \frac{Ns}{m}$

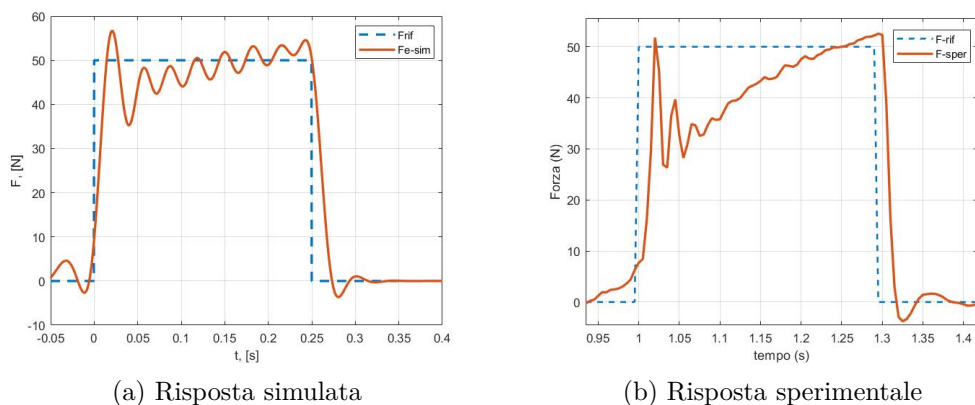


Figura 4.80: Confronto impulso sperimentale-simulato, sistema svincolato

Introducendo queste grandezze nel modello teorico corrispondente si ottengono dei risultati molto vicini a quelli sperimentali. In generale il modello restituisce una risposta migliore di quella sperimentale, ugualmente accettabile considerando la mancata modellazione di differenti fenomeni.

## 4.5 Analisi conclusiva del sistema sperimentale

Il sistema sperimentale nelle sue diverse versioni ha mostrato in generale un buon funzionamento per ogni soluzione. Dal modello teorico, avendo la possibilità di individuare le condizioni ottimali di funzionamento, si osservano più facilmente i vantaggi di un controllo in posizione della fase di approccio.

Sicuramente a parità di risultati, il controllo diretto della fase di uscita dello stelo lo rende più funzionale all'attività da svolgere.

I risultati mostrati nella sezione precedente sono stati ottenuti utilizzando il cilindro MetalWork ISO 1552 serie 3 (Figura 2.4), che consente di ottenere risposte vicine a quanto ricercato. Testando il cilindro SMC MQMLB25H-100D (Figura 2.5), caratterizzato da attriti interni più ridotti, si ha un comportamento più sensibile del precedente.

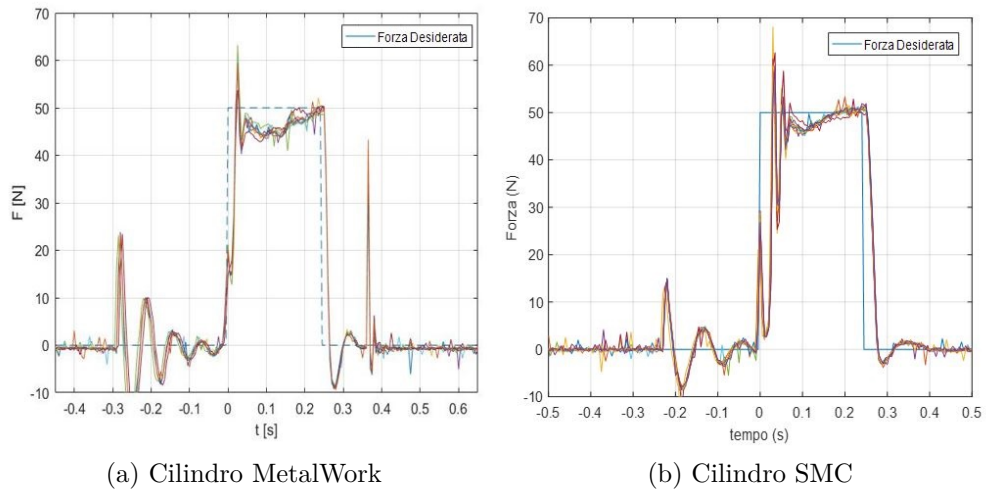


Figura 4.81: Risposte per diversi cilindri

In Figura 4.81 si confrontano delle prove eseguite con entrambi i cilindri sulla versione del sistema vincolato controllato in anello aperto. Si nota dalle maggiori

oscillazioni la diversa prontezza e sensibilità del SMC, seppur si mantenga un comportamento analogo nel tratto a regime.

La prima versione del banco e del prototipo PGAS presentavano le valvole CKD (Figura 2.13), queste sono state sostituite dalle valvole CAMOZZI (Figura 2.14) più compatte e performanti. L'introduzione di questi componenti ha effetti principalmente sulla durata del colpo: questo passa dai 300ms a poco più di 250ms, a fronte di un riferimento di 250ms. Degli effetti si presentano anche nel passaggio dalla fase di approccio a quella di strike nel quale le CKD risultano più sensibili alle leggere variazioni di tensione. Il comportamento è particolare anche nel tratto a regime, le CAMOZZI consentono di mantenere i 50N per un intervallo maggiore. Sicuramente c'è da sottolineare come le CKD non risentano del fenomeno oscillatorio dovuto all'inerzia successivo all'inizio della fase di approccio.

In Figura 4.82 si mostrano i risultati ottenuti con il sistema fisso, controllato in anello aperto utilizzando il cilindro SMC poiché mette in evidenza maggiormente le differenze tra le due tipologie di valvola.

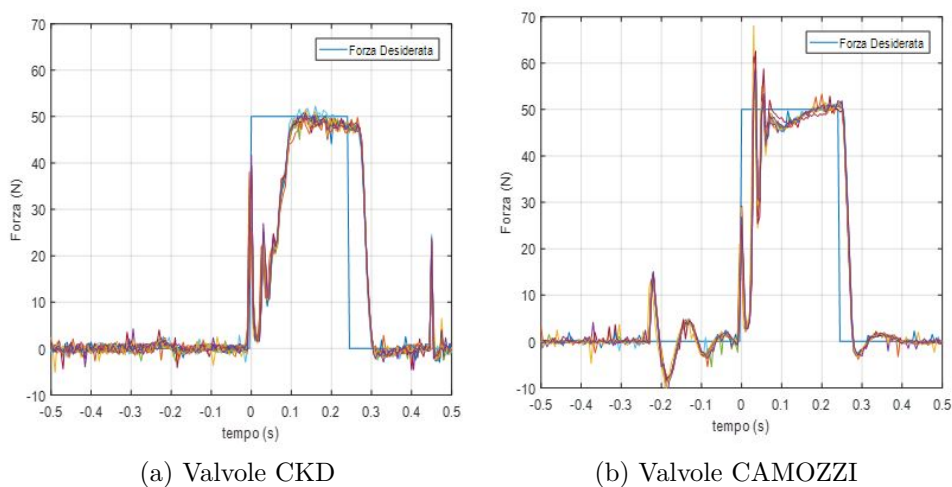


Figura 4.82: Risposte per differenti valvole

Introducendo un controllo in anello chiuso nella fase di approccio si evitano le oscillazioni in fase di uscita dello stelo, e inoltre viene gestita in maniera più semplice e controllabile.

Dal confronto diretto dei tre controlli la terza soluzione è quella più indicata da applicare al test clinico per due ragioni: innanzitutto a parità di distanza tra stelo

e massa riesce a seguire meglio il riferimento ottenendo un buon valore di impulso senza eccedere troppo nel picco massimo di forza; in secondo luogo il controllo in posizione mostra una minore dipendenza dalla distanza, in Figura 4.85 per le distanze di 5cm e 8cm, la differenza è ridotta a parità di guadagni del controllore.

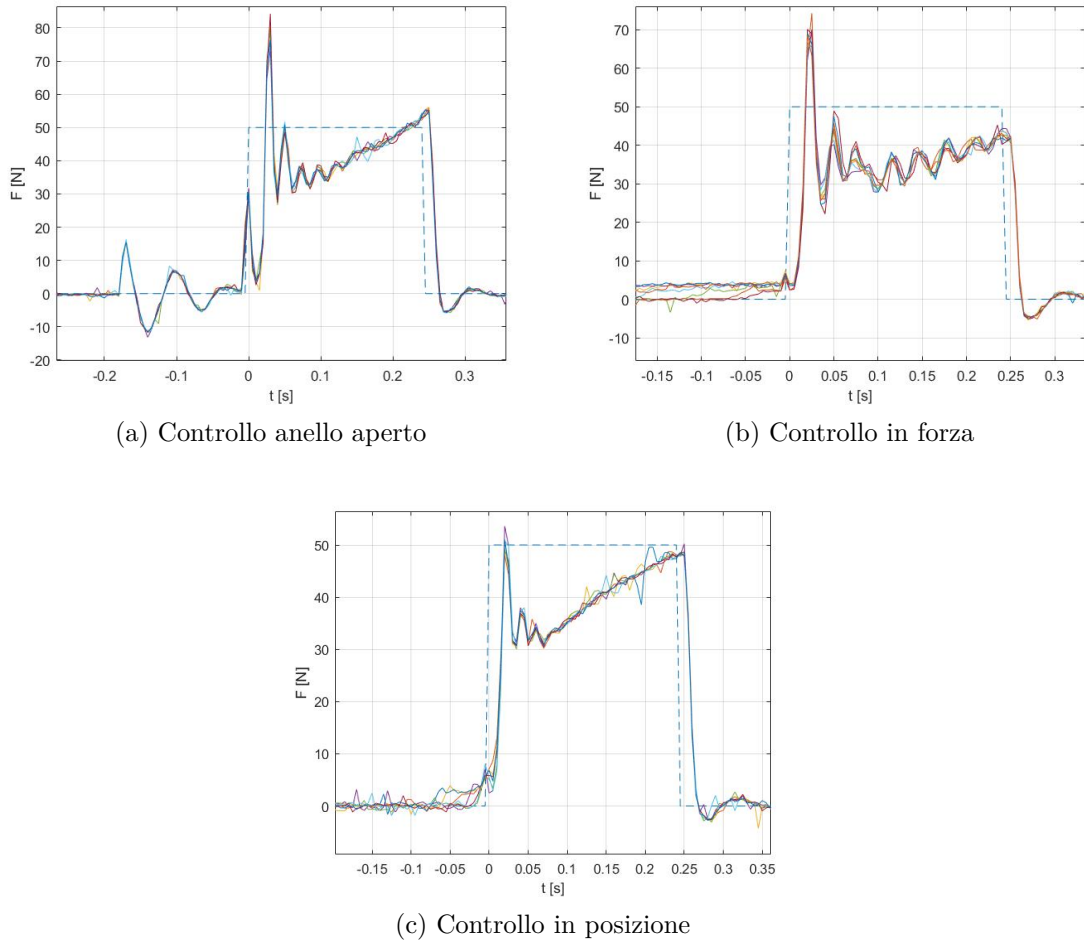


Figura 4.83: Risposte per differenti tipologie di controllo, configurazione con massa libera

Inoltre un controllo di questo tipo nella configurazione con la massa non vincolata mostra un comportamento migliore, che suggerisce un buon funzionamento anche sul sistema imbracciato.

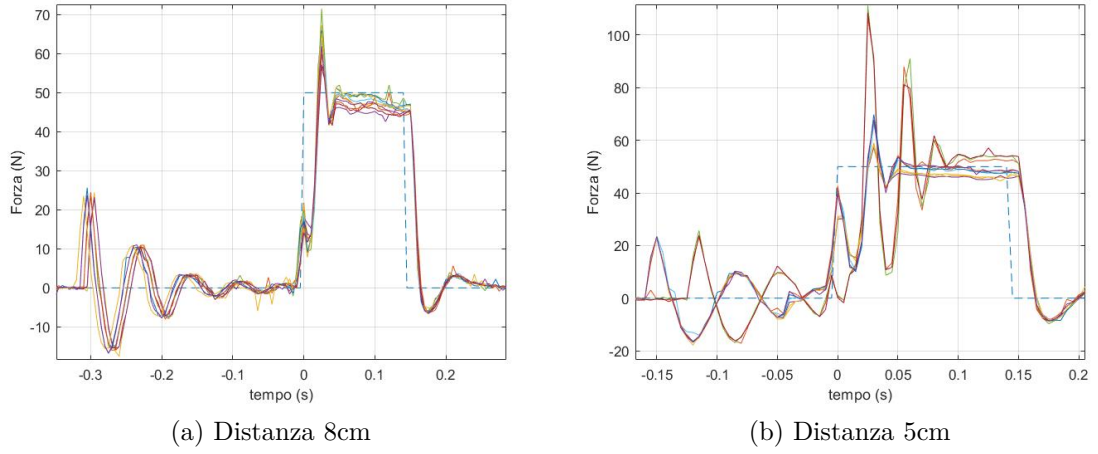


Figura 4.84: Risposte per differenti distanze con controllo in anello aperto

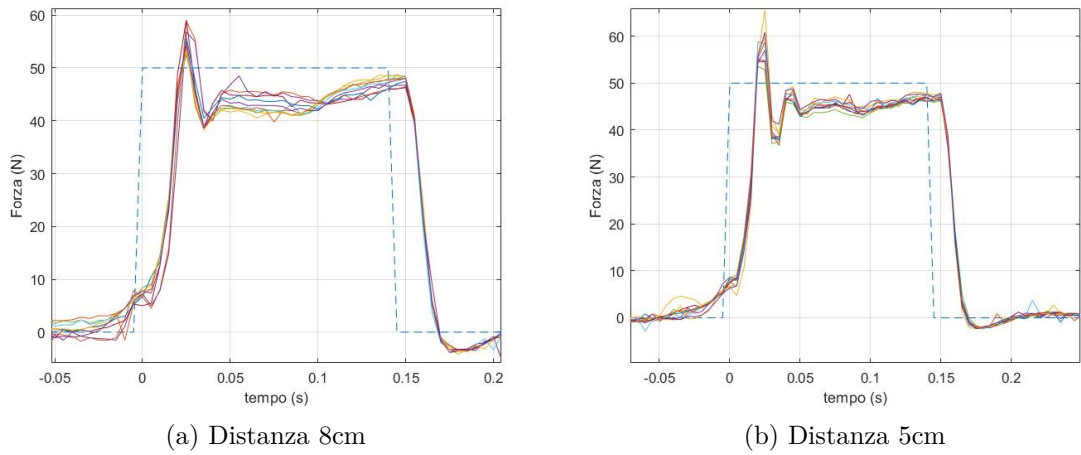


Figura 4.85: Risposte per differenti distanze con controllo in posizione

In conclusione alla luce di queste valutazioni la soluzione del perturbatore imbracciato è ancora percorribile rispetto ad una soluzione vincolata ad una struttura fissa. Per quanto quest'ultima possa fornire perturbazioni maggiormente ripetibili e accurate, nel complesso il sistema diventa meno flessibile e maggiormente ingombrante, rendendo anche più complessa l'intera procedura di prova.



# Conclusioni

Il lavoro di tesi ha posto l'attenzione su un dispositivo di perturbazione automatico per l'analisi del controllo posturale. L'obiettivo centrale è stato l'individuazione di una soluzione ottimale e innovativa, che potesse superare i limiti dei diversi sistemi esistenti, e allo stesso tempo fornire delle misure oggettive e quantificabili del comportamento dell'uomo soggetto a stimoli esterni.

Lo studio si è basato su un primo dispositivo automatico realizzato nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino. A partire dai limiti emersi nell'accuratezza dell'impulso, nell'influenza delle cedevolezze di operatore e soggetto e della distanza perturbatore-bersaglio, si è indagato su componenti e sistemi di controllo capaci di proporre una soluzione ottimale.

Attraverso la realizzazione di un banco prova, che simulasse il test svolto su persone, si è analizzato accuratamente l'intero sistema, cercando di ottenere una perturbazione ripetibile e controllata.

A sostegno del set sperimentale si è sviluppato un modello in Matlab-Simulink capace di riprodurre il funzionamento del banco e avere la possibilità di indagare in maniera approfondita tutte le possibili soluzioni ipotizzate.

Le simulazioni hanno permesso di avere una prima idea sulle diverse configurazioni e sui differenti componenti. Come ipotizzato, l'introduzione di valvole più compatte e performanti, e di un attuatore a basso attrito con tenuta metallo su metallo, hanno determinato delle risposte con una buona dinamica e adeguate durate in confronto al profilo di forza in input. I risultati più significativi riguardano il comportamento per differenti logiche di controllo, in particolare si è introdotto un controllo in anello chiuso della fase di avvicinamento dello stelo al bersaglio, per avere una maggiore controllabilità negli istanti che precedono la perturbazione. Questa tipologia di controllo mostra un significativo miglioramento per un impulso

con riferimento sinusoidale, e consente nel caso di un input ad onda quadra di ottenere valori di impulso e durata vicini a quelli di riferimento. La risposta, inoltre, risulta indipendente dalla distanza stelo-massa.

Il banco sperimentale ha confermato quanto emerge dalle simulazioni, mostrando anche una buona ripetibilità dei colpi. Sicuramente la mancata modellazione di attriti e resistenze pneumatiche ha inciso nella corrispondenza con i risultati sperimentali, ma aver ottenuto un comportamento analogo consente di avere un buon punto di partenza per un futuro sviluppo del modello. È significativo osservare come si riesca a ridurre la durata del colpo, ma ogni prova presenti un ritardo costante di 20ms, attribuibile alle dinamiche proprie del sistema pneumatico.

La differenza tra le diverse tipologie di controllo non è così marcata nel banco al contrario del modello, ma mostra un importante miglioramento nella configurazione con massa impattata e cilindro liberi di muoversi, quindi la versione più vicina alla prova su soggetti. In questo caso, oltre ad avere una buona risposta rispetto al riferimento, si ottiene anche una bassa influenza al variare della distanza tra dispositivo e bersaglio. In quest'ottica sarebbe utile andare ad indagare anche la variabilità dei soggetti variando le cedevolezza lato cilindro e lato massa.

Quello che è emerso in maniera preponderante è l'importanza che ha la velocità di fuoriuscita dello stelo, strettamente legata alla tipologia di controllo attuata. Il controllo in posizione consente di agire direttamente sul parametro di velocità, invece di lavorare sulle tensioni di comando delle valvole o sul riferimento in forza da seguire nella fase di avvicinamento. Questo avvalorata la tesi che vede in questa logica di controllo la scelta più idonea da applicare al dispositivo nell'esecuzione delle prove sull'uomo, evidenziando anche la sostanziale equivalenza di un dispositivo fisso con uno imbracciato, giustificando l'utilizzo di quest'ultimo data la maggiore flessibilità e semplicità di utilizzo.

In futuro è necessario implementare i risultati ottenuti sul dispositivo reale, verificando che le variabilità date dai soggetti coinvolti non infici i buoni risultati che il banco prova ha mostrato. Da non sottovalutare una possibile indagine sull'utilizzo di attuatori elettrici che possano ovviare alle problematiche dell'attuazione pneumatica.

# Appendice A

## Equazioni modello analitico e caratteristiche sensori

Tabella A.1: Parametri modello matematico

DESCRIZIONE	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
Diametro stelo	$d_s$	$mm$
Diametro cilindro	$d_c$	$mm$
Massa del pistone	$m$	$kg$
Massa del cilindro	$M_1$	$kg$
Massa impattata	$M_2$	$kg$
Metà corsa del pistone	$x_0$	$mm$
Banda morta della camera	$x_m$	$mm$
Distanza iniziale stelo-massa	$dx$	$mm$
Spostamento stelo	$x_3$	$mm$
Spostamento assoluto cilindro	$x_1$	$mm$
Spostamento massa impattata	$x_2$	$mm$
Pressione iniziale nella camera	$P_i$	$bar$
Temperatura iniziale della camera	$T_i$	$K$
Coefficiente politropico dell'aria	$n$	
Coefficiente di attrito viscoso dell'aria	$\gamma$	$Ns/m$
Pressione di alimentazione	$P_S$	$bar$

*Continua nella prossima pagina*

*Continua dalla pagina precedente*

DESCRIZIONE	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
Forza di attrito all'interno del cilindro	$F_{att}$	$N$
Conduttanza massima della valvola	$C_{max}$	$Nl/sbar$
Rapporto critico	$b$	
Segnale di tensione della valvola	$V_{max}$	$V$
Tempo di risposta della valvola	$\tau$	$ms$
Costante elastica polietilene	$K_3$	$N/m$
Coefficiente di smorzamento polietilene	$\beta_3$	$Ns/m$
Costante elastica respingente sinistro	$K_1$	$N/m$
Coefficiente di smorzamento respingente sinistro	$\beta_1$	$Ns/m$
Costante elastica respingente destro	$K_2$	$N/m$
Coefficiente di smorzamento respingente destro	$\beta_2$	$Ns/m$

*Si conclude dalla pagina precedente*

## Valvole

- flusso sonico:  $0 < \frac{P_B}{P_A} < b$

$$G = \rho_0 P_A C \quad (A.1)$$

$$G = -\rho_0 P_B C \quad (A.2)$$

- flusso subsonico:  $b < \frac{P_B}{P_A} \leq b$

$$G = \rho_0 P_A C \sqrt{1 - \left( \frac{\frac{P_B}{P_A} - b}{1 - b} \right)^2} \quad (A.3)$$

$$G = -\rho_0 P_A C \sqrt{1 - \left( \frac{\frac{P_B}{P_A} - b}{1 - b} \right)^2} \quad (A.4)$$

Assumendo una relazione di tipo lineare tra l'apertura  $A_V$  e la conduttanza  $C$ , si ottiene:

$$C = K_v V_{ref}$$

$$K_V = \frac{C_{max}}{V_{refmax}}$$

$K_v$ : guadagno statico di flusso della valvola;

Con una dinamica del primo ordine si ottiene una relazione tra segnale in tensione e conduttanza:

$$C = \frac{K_v}{\tau s + 1}$$

### Cilindro pneumatico

- Equazione di continuità:

$$\sum G_{in} - \sum G_{out} = \frac{d\rho V}{dt} \quad (A.5)$$

Dall'equazione di stato dei gas perfetti e considerando una trasformazione politropica con esponente  $n$  si ottiene:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{nRT_{i0}} \left( \frac{P}{P_i} \right)^{\frac{1}{n}-1} \frac{dP}{dt} \quad (A.6)$$

Considerando:

$$V = A(x + x_0 + x_m) \frac{dV}{dt} = A \frac{dx}{dt}$$

Le due equazioni di continuità diventano:

$$G_1 = \frac{P_{1i} A_1}{RT_{1i}} \left( \frac{P_1}{P_{1i}} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{dx}{dt} + \frac{A_1(x + x_0 + x_{m1})}{nRt_{1i}} \left( \frac{P_1}{P_{1i}} \right)^{\frac{1}{n}-1} \frac{dP_1}{dt} \quad (A.7)$$

$$G_1 = -\frac{P_{2i} A_2}{RT_{2i}} \left( \frac{P_2}{P_{2i}} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{dx}{dt} + \frac{A_2(x + x_0 + x_{m2})}{nRt_{2i}} \left( \frac{P_2}{P_{2i}} \right)^{\frac{1}{n}-1} \frac{dP_2}{dt} \quad (A.8)$$

Da queste si ricavano le espressioni per le derivate delle pressioni:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{G_1 n R T_{1i}}{A_1(x + x_0 + x_{m1}) \left( \frac{P_1}{P_{1i}} \right)^{\frac{1}{n}-1}} + \frac{P_1 n}{(x_0 + x_{m1} + x)} \frac{dx}{dt} \quad (A.9)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{G_2 n R T_{2i}}{A_2(x + x_0 + x_{m2}) \left(\frac{P_2}{P_{2i}}\right)^{\frac{1}{n}-1}} + \frac{P_2 n}{(x_0 + x_{m2} + x)} \frac{dx}{dt} \quad (\text{A.10})$$

Dai rispettivi schemi si ricavano le seguenti espressioni:

$$m(\ddot{x}_3 + \ddot{x}_1) + \gamma \dot{x}_3 + F_e + P_2 A_2 - P_1 A_1 + F_{att} \text{sign}(\dot{x}_3) = 0 \quad (\text{A.11})$$

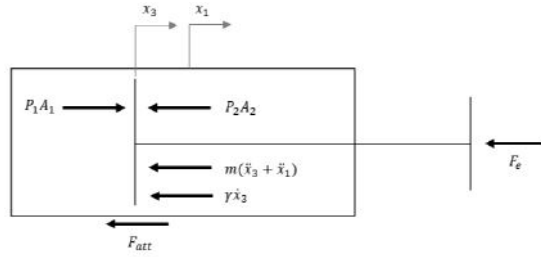


Figura A.1: Equilibrio stelo (A.11)

$$F_e + M_1 \ddot{x}_1 + m(\ddot{x}_3 + \ddot{x}_1) + K_1 x_1 + \beta_1 \dot{x}_1 = 0 \quad (\text{A.12})$$

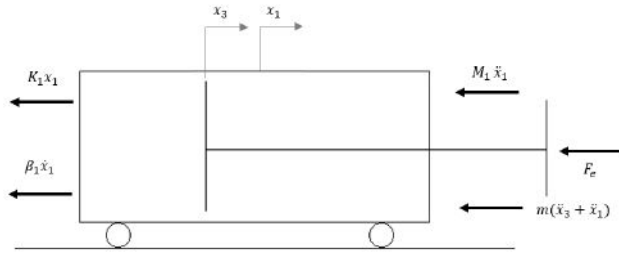


Figura A.2: Equilibrio cilindro (A.12)

$$F_e = K_3(x_3 + x_1 - dx - x_2) + \beta_3(\dot{x}_3 + \dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (\text{A.13})$$

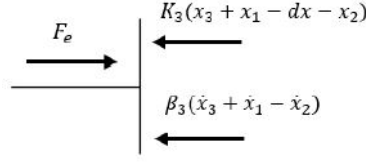


Figura A.3: Calcolo forza esterna (A.13)

### Sistema di equilibrio modello pendolo inverso

Vedi Figura 2.2

$$\begin{cases} R_v = mg \\ R_o = m\ddot{x} \\ mg(b - x) + m\ddot{x}d + I_A\ddot{\theta} = 0 \end{cases}$$

- $R_v$ : componente verticale della reazione vincolare del terreno;
- $R_o$ : componente orizzontale della reazione vincolare del terreno;
- $g$ : accelerazione di gravità;
- $\ddot{x}$ : accelerazione in direzione anteroposteriore del terreno;
- $x$ : coordinata anteroposteriore del centro di massa;
- $d$ : distanza tra il centro dell'articolazione della caviglia ed il suolo;
- $I_A$ : momento di inerzia;
- $\theta$ : accelerazione angolare del baricentro;

Ipotizzando  $d = 0$  e  $\theta = \ddot{x}l$ , la terza equazione del sistema diventa:

$$mg(b - x) + I_A \frac{\ddot{x}}{l} = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$\ddot{x} = \frac{mgl}{I_A}(x - b) \quad (\text{A.15})$$

Considerando una risposta puramente passiva della reazione dell'uomo al disturbo esterno, il corpo viene considerato come una massa che trasla lungo la direzione di

applicazione della forza.

$$M_2\ddot{x}_2 + \beta_2\dot{x}_2 + K_2x_2 - K_3(x_3 + x_1 - dx - x_2) - \beta_3(\dot{x}_3 + \dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \quad (\text{A.16})$$

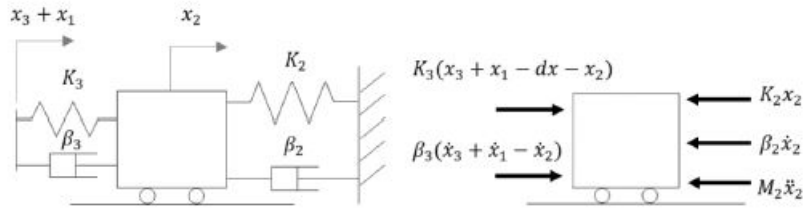


Figura A.4: Equilibrio massa impattata

Attraverso l'equazione A.13 si può scrivere:

$$M_2\ddot{x}_2 + \beta\dot{x}_2 + K_2x_2 = F_e \quad (\text{A.17})$$

### Caratteristica lineare potenziometro

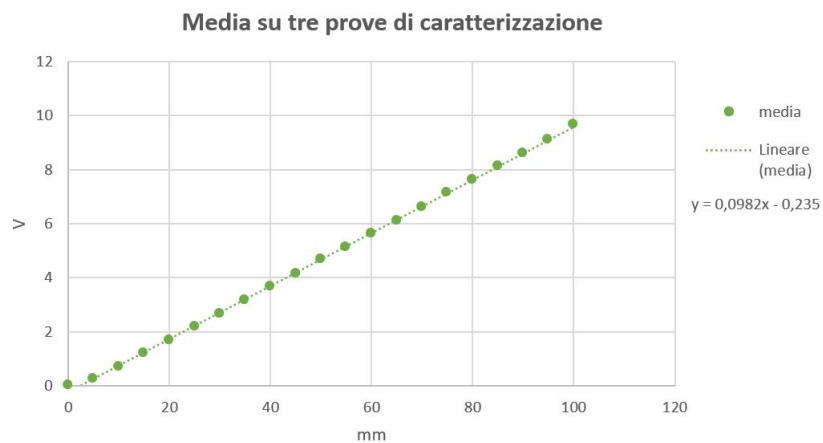


Figura A.5: Caratteristica lineare Potenziometro



## Caratteristica sensore laser

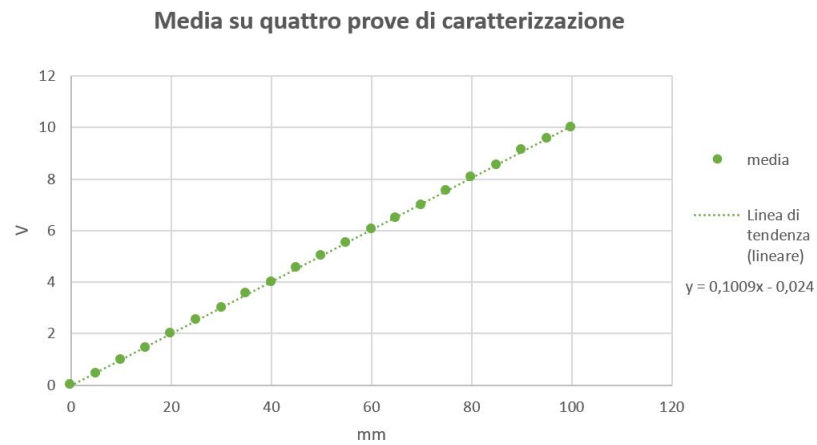


Figura A.6: Caratteristica sensore laser

## Caratteristica cella di carico

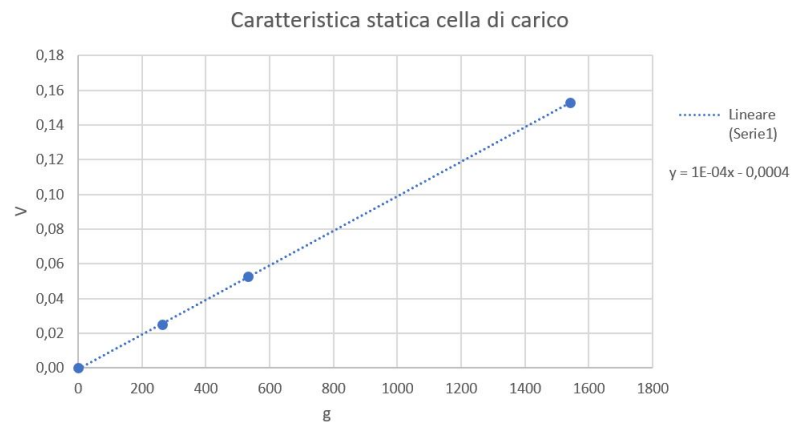


Figura A.7: Caratteristica cella di carico

# Bibliografia

- [1] De Benedictis C., Franco W., Maffiodo D., Ferraresi C.,  
**Control of Force Impulse in Human-Machine Impact**, Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, 2017.
- [2] Genovese M., Ferraresi C., Muscolo G.G., Franco W., De Benedictis C.,  
**Dispositivo automatico per l'applicazione di forze impulsive**.  
Tesi di laurea magistrale, 2019.
- [3] Paterna M., Ferraresi C., Roatta S., Franco W., De Benedictis C.,  
**Caratterizzazione di un sistema posturale**.  
Tesi di laurea magistrale, 2018.
- [4] Zrinka Potocanac, Janneke de Bruine, Susanne van der Veenm, Sabine Verschueren, Jaap van Dieën, Jacques Duysens, Mirjam Pijnapples,  
**Fast online corrections of tripping responses**.  
Exp Brain Res, 232:3579-3590, 2014.
- [5] Ali Shahvarpour, Aboulfazl Shirazi-Adl, Hakim Mecheri, Christian Larivière,  
**Trunk response to sudden forward perturbations - Effects of preload and sudden load magnitudes, posture and abdominal antagonistic activation**.  
Journal of Electromyography and Kinesiology 24, 394-403, 2014.
- [6] Avril Mansfield, Brian E. Maki, **Are age-related impairments in change-in-support balance reactions dependent on the method of balance perturbation?**.  
Journal of Biomechanics 42, 1023-1031, 2009.
- [7] Maffiodo D., Franco W., De Benedictis C., Paterna M., Muscolo G.G., Roatta S., Ferraresi C., Dvir Z., **Pneumo-tronic perturbator for the study of**

- human postural responses**, 28<sup>th</sup> International Conferance on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Kaiserlautern, June 2019.
- [8] Belforte G., **Manuale di pneumatica**, Milano Tecniche nuove, 2005.
- [9] Viktorov V., Colombo F., **Automazione dei sistemi meccanici**-Corso Base, 2016.