

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE - DIMEAS
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Studio del comportamento di un elastomero per supportazione motore mediante prove multiassiali e sollecitazioni termiche



Relatore:

Prof. Alessandro Fasana

Tutor aziendale :

Dott.ssa Giorgia Gorgoglione

Laureanda:

Carmen Oreste

Anno Accademico 2019-2020

*"Strong in will
to strive, to seek, to find,
and not to yield".*

— *Ulysses, Tennyson*

SOMMARIO

Al giorno d'oggi la progettazione dei veicoli verte sempre di più a realizzare una zona di comfort durante la guida per l'occupante del mezzo, una ritenuta migliore, sistemi di sospensione capaci di assorbire sobbalzi, urti, e di isolare i passeggeri anche sui fondi stradali più accidentati.

Le cause relative alle vibrazioni trasmesse possono ricondursi sostanzialmente a due fonti di eccitazione principali: *eccentricità del motore e feedback della strada*.

Tenere sotto controllo le vibrazioni, sia che nascano dal motore che dalla strada, è indispensabile per prevenire danni ad altre parti del veicolo: queste infatti possono minacciare, direttamente o indirettamente, il funzionamento di una grande quantità di componenti meccanici e non, dal motore alla trasmissione, fino al telaio stesso. Inoltre, come detto precedentemente, oltre a preservare l'integrità della vettura, i supporti motore svolgono anche la non secondaria funzione di eliminare le vibrazioni e i rumori indesiderati garantendo in tal modo piacere e comfort di guida.

La progressiva riduzione del peso della scocca, avvenuta di pari passo con il progresso tecnologico, ha fatto sì che il rapporto fra peso motore e peso scocca crescesse, e con esso anche il livello di vibrazioni e rumorosità propagate all'interno dell'abitacolo del veicolo.

In tale scenario si posizionano gli sforzi dei team *Noise Vibration Harshness (NVH)* delle aziende produttrici di veicoli che sono sempre più indirizzati alla riduzione dei disturbi acustici e delle vibrazioni percepibili dall'utente; è richiesta infatti un'opportuna ingegnerizzazione del sistema di supporti del gruppo propulsore (*Engine Mounting System - EMS*).

Questa tesi rappresenta il naturale proseguimento del lavoro avviato in [1], attività che ha sicuramente avuto una forte impronta di ricerca pionieristica in tale specifico campo. Lo scopo del lavoro affrontato in [1] risiede nell'indagine della variazione di rigidità della *torque rod*, uno degli elementi di supporto del gruppo propulsore del Jeep Renegade.

Dalle analisi svolte in [1] è emerso che l'azione congiunta di cicli affaticanti e temperature diverse da quella ambiente provoca sul componente una variazione delle sue caratteristiche, in particolare della rigidità. Le prove di fatica condotte a diverse temperature controllate hanno messo in luce l'intercambiabilità dell'ordine dei cicli affaticanti cui il componente può essere sottoposto ottenendo dei danneggiamenti confrontabili. Da [1] è emerso inoltre che la torque rod in condizioni statiche assume un comportamento termo-indurente manifestando globalmente un aumento della rigidità statica all'aumentare della temperatura. Incrementando invece la frequenza, prevale un funzionamento termo-plastico del componente e tale comportamento è sempre più spinto man mano che la temperatura aumenta.

Alcuni fra i diversi risultati, precedentemente citati, a cui si è giunti a conclusione in [1] sono stati dunque approfonditi in tale lavoro di ricerca.

Tra gli obiettivi si posiziona la possibilità di utilizzare dei criteri di isodanno per minimizzare i tempi-banco. Tale lavoro di tesi si prefigge inoltre di verificare il criterio *Palmgren-Miner* "riadattato", già dimostrato per un ciclo affaticante integrale (in [1]), anche nello scenario in cui si sottopone il componente ad una storia di carico isodanno.

Ai precedenti obiettivi si aggiunge anche l'indagine in maniera dettagliata della fatica alla temperatura di 100°C per stabilire con precisione l'esatto momento della rottura del componente in prova. In ultima analisi, si aggiunge la combinazione del ciclo di affaticamento e del ciclo termico in modo da rappresentare uno scenario quanto più reale sul componente in esame con climi freddi, miti e caldi.

La tesi si sviluppa nel seguente modo: i Capitoli 1 e 2 forniscono rispettivamente il background necessario per comprendere la componentistica che costituisce la supportazione motore in analisi e le caratteristiche peculiari, compresi i modelli matematici che ne descrivono il comportamento. Il Capitolo 3 oltre al funzionamento vero e proprio del banco di prova usato per effettuare i test, mostra i vari sistemi di riferimento di banco, vettura e torque rod e le correlazioni che vi sono tra gli stessi in fase di montaggio e azionamento/comando del banco.

Il capitolo 4 esplica la riproduzione dei segnali acquisiti su strada sul banco tramite software Remote Parameter Control. Il capitolo 5 condensa le prove di caratterizzazione statica e dinamica svolte preliminarmente alla prova di fatica a temperatura ambiente discussa nel capitolo 6 in cui si sulla base dei risultati sperimentali si effettua un raffronto sul decadimento della rigidità e dello smorzamento in seguito all'applicazione di carico integrale e di un ciclo affaticante isodanno.

Il capitolo 7 consente di avere una panoramica sugli elastomeri e su come si modifica il loro comportamento in relazione con la variabile temperatura. L'analisi prosegue con la valutazione del danneggiamento dal punto di vista termico: si sottopongono i provini a ciclo affaticante isodanno dapprima a temperatura costante pari a 100°C (capitolo 9) e poi a climi variabili (capitolo 11). Entrambe le prove di fatica a temperatura vengono precedute da prove di caratterizzazione discusse rispettivamente nei capitoli 8 e 10.

Il Capitolo 12 infine consente di giungere alle conclusioni, delineando anche quale potrebbe essere la linea di studio da seguire in futuro.

INDICE

Elenco delle figure	iv
Elenco delle tabelle	x
1 INTRODUZIONE	1
1.1 Engine mounting system (EMS)	1
1.2 EMS Jeep Renegade	3
1.3 Panoramica su Torque rod Jeep Ranegade	3
1.4 Approccio utilizzato per le prove	4
2 MODELLI DINAMICI E TIPOLOGIE DI EMS	6
2.1 Modelli Dinamici EMS	6
2.1.1 Ammortizzatore dinamico ideale	6
2.1.2 Ammortizzatore dinamico reale	8
2.1.3 Modello dinamico SDOF	11
2.2 Tipologie di supporti di EMS	14
2.2.1 Supporti elastomerici	14
2.2.2 Supporti idraulici	16
2.2.3 Supporti passivi	18
2.2.4 Supporti semi-attivi	18
2.2.5 Supporti attivi	19
3 DESCRIZIONE BANCO	20
3.1 Banco di prova	20
3.2 Schema del banco prova	21
3.3 Strumentazione per prove in temperatura	22
3.3.1 Guscio climatico	22
3.3.2 Vacuum bagging film	24
3.4 Sistemi di riferimento: banco, vettura, torque rod	25
3.4.1 Sistemi di riferimento bielletta e banco	27
3.5 Montaggio su banco del componente da testare	28
3.6 Compensazione della massa	30
4 ACQUISIZIONE E RIPRODUZIONE SEGNALI - RPC	33
4.1 Acquisizione e riproduzione del segnale	33
4.2 Software RPC	34
4.2.1 <i>Setup</i>	36
4.2.2 Operazioni preliminari di analisi sui segnali strada acquisiti - <i>Analyze</i>	38
4.2.3 Procedura di ricerca della FRF - <i>Model</i>	40
4.2.4 Procedura di ricerca del DRIVE - <i>Simulate</i>	42
5 MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA A TEMPERATURA AMBIENTE	46
5.1 Caratterizzazioni statiche	46
5.2 Caratterizzazioni dinamiche	47

5.3	Misura della capacità di smorzamento	48
5.4	Esecuzione dei test	49
5.5	Risultati	50
6	PROVA DI FATICA A TEMPERATURA AMBIENTE	56
6.1	Introduzione	56
6.2	Percorsi del ciclo vita	57
6.3	Contenuto energetico - danneggiamento	60
6.4	Analisi dei risultati sulla singola bielletta: confronto con i valori nominali	63
6.4.1	Rigidezza statica	63
6.4.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	66
6.4.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	70
6.4.4	Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica a bassa frequenza)	73
6.4.5	Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica ad alta frequenza)	75
6.5	Analisi dei risultati su tutte le biellette: confronto con i valori a nuovo	78
6.5.1	Rigidezza statica	78
6.5.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	80
6.5.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	83
6.5.4	Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica a bassa frequenza	85
6.5.5	Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica ad alta frequenza	88
6.6	Il danneggiamento come funzione di stato	90
6.6.1	Confronti fra le rigidzze statiche e dinamiche	91
6.6.2	Confronti fra smorzamento a bassa e ad alta frequenza	96
6.7	Conclusioni	98
7	I MATERIALI ELASTOMERICI	99
7.1	Classificazione	99
7.2	mescole	100
7.3	Processo di vulcanizzazione	101
7.4	Proprietà meccaniche	102
7.5	Proprietà dinamo-meccaniche	103
7.6	Resistenza alle basse temperature	105
7.7	Resistenza alle alte temperature	107
8	MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA A 100°C	108
8.1	Introduzione	108
8.2	Esecuzione dei test	108
8.3	Risultati caratterizzazioni a nuovo a 100°C	109
8.4	Risultati: confronto tra caratterizzazioni a nuovo a 22°C e 100°C	115
8.5	Risultati: conclusioni	120
9	PROVA DI FATICA A 100°C	124
9.1	Introduzione	124
9.2	Modalità di rottura	124
9.3	Analisi dei risultati sulla singola bielletta: confronto con i valori nominali	126
9.3.1	Rigidezza statica	126
9.3.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	127
9.3.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	129
9.4	Analisi dei risultati su tutte le biellette: confronto con i valori a nuovo	131

9.4.1	Rigidezza statica	131
9.4.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	132
9.4.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	133
9.5	Il danneggiamento come funzione di stato	135
9.6	Conclusioni	136
10	MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA CON CLIMI MISTI	137
10.1	Introduzione	137
10.2	Risultati caratterizzazioni a nuovo	137
11	PROVA DI FATICA CON CLIMI MISTI	144
11.1	Introduzione	144
11.2	Analisi dei risultati sulla singola bielletta: confronto con i valori nominali	145
11.2.1	Rigidezza statica	145
11.2.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	147
11.2.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	148
11.2.4	Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica a bassa frequenza)	150
11.2.5	Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica ad alta frequenza)	151
11.3	Analisi dei risultati su tutte le biellette: confronto con i valori a nuovo	152
11.3.1	Rigidezza statica	152
11.3.2	Rigidezza dinamica a bassa frequenza	154
11.3.3	Rigidezza dinamica ad alta frequenza	155
11.3.4	Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica a bassa frequenza	156
11.3.5	Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica ad alta frequenza	157
11.4	Il danneggiamento come funzione di stato	158
11.4.1	Confronti fra le rigidzze statiche e dinamiche	159
11.4.2	Confronti fra smorzamento a bassa e ad alta frequenza	160
11.5	Confronto tra prova a 100°C ,22°C e climi misti	161
12	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	166
12.1	Conclusioni	166
12.2	Sviluppi futuri	167
	Riferimenti bibliografici	168

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1	<i>Esplosione engine ed EMS: posizione dei supporti su vettura</i>	2
Figura 1.2	<i>Rappresentazione di un tassello lato motore</i>	2
Figura 1.3	<i>Torque rod e componenti di montaggio</i>	3
Figura 2.1	<i>Schema simbolico equivalente di ammortizzatore dinamico ideale [4]</i> . . .	6
Figura 2.2	<i>Ammortizzatore dinamico ideale, guadagno [4]</i>	7
Figura 2.3	<i>Ammortizzatore dinamico ideale, fase [4]</i>	7
Figura 2.4	<i>Schema simbolico equivalente di ammortizzatore dinamico reale [4]</i> . . .	8
Figura 2.5	<i>Ammortizzatore dinamico reale, guadagno [4]</i>	9
Figura 2.6	<i>Ammortizzatore dinamico reale, guadagno (intorno del minimo) [4]</i>	9
Figura 2.7	<i>Ammortizzatore dinamico reale, fase [4]</i>	10
Figura 2.8	<i>Sistema massa molla smorzatore [1]</i>	11
Figura 2.9	<i>Trasmissibilità in funzione di r [3]</i>	13
Figura 2.10	<i>Rigidità dinamica ideale di EMS [6]</i>	13
Figura 2.11	<i>Tasselli elastomerici [1]</i>	14
Figura 2.12	<i>Biellette elastomeriche [1]</i>	15
Figura 2.13	<i>Modello di un supporto elastomerico [13]</i>	15
Figura 2.14	<i>Rigidità in funzione della frequenza per un tassello elastomerico [13]</i> . . .	15
Figura 2.15	<i>Modello di un supporto idraulico [13]</i>	16
Figura 2.16	<i>Tassello idraulico con semplice orifizio [10]</i>	16
Figura 2.17	<i>Tassello idraulico con inertia track [10]</i>	17
Figura 2.18	<i>Tassello idraulico con inertia track e decoupler [10]</i>	17
Figura 2.19	<i>Rigidità dinamica di un tassello idraulico senza decoupler [15]</i>	17
Figura 2.20	<i>Rigidità dinamica di un tassello idraulico con decoupler [15]</i>	18
Figura 2.21	<i>Schema di funzionamento di un supporto attivo [1]</i>	19
Figura 3.1	<i>Banco prova MTS 833 [19]</i>	20
Figura 3.2	<i>Schema e componenti del banco MTS 833</i>	22
Figura 3.3	<i>Dettaglio cella climatica con sistema di riferimento del banco [1]</i>	23
Figura 3.4	<i>Collocamento cella climatica sul banco [1]</i>	23
Figura 3.5	<i>Sistema di riferimento del banco</i>	25
Figura 3.6	<i>Sistema di riferimento della vettura</i>	26
Figura 3.7	<i>Sistema di riferimento della bielletta</i>	26
Figura 3.8	<i>Sistema di riferimento locale della torque rod</i>	27
Figura 3.9	<i>Dettaglio punti di contatto in marcia avanti e retromarcia [1]</i>	27
Figura 3.10	<i>Relazione tra sistemi di riferimento di banco e bielletta</i>	28
Figura 3.11	<i>Schema configurazione attrezzatura e tassello generico</i>	29
Figura 3.12	<i>Schema configurazione attrezzatura e torque rod</i>	29
Figura 3.13	<i>Massa della staffa prima della compensazione</i>	31
Figura 3.14	<i>Massa della staffa dopo la compensazione</i>	32
Figura 4.1	<i>Correlazioni tra segnali</i>	34
Figura 4.2	<i>Step RPC</i>	35
Figura 4.3	<i>Parametri autodamage</i>	39
Figura 4.4	<i>Spettro in frequenza FRF 1ISODANNO</i>	41

Figura 4.5	Confronto tra DES e RFL a diverse iterazioni-percorso LAP_PABA	42
Figura 4.6	Zoom: confronto tra DES e RFL a diverse iterazioni-percorso LAP_PABA	43
Figura 4.7	Andamento di MAX, min, RMSE per ogni iterazione-percorso LAP_PABA	44
Figura 4.8	Confronto tra DES e RFL dell'ultima iterazione-percorso LAP_PABA	44
Figura 4.9	Zoom: confronto tra DES e RFL dell'ultima iterazione-percorso LAP_PABA	45
Figura 5.1	Curva caratteristica statica asse longitudinale $X_{bielletta}$	47
Figura 5.2	Dettaglio punti di contatto fra le parti della bielletta	47
Figura 5.3	Andamento qualitativo rigidezza dinamica	48
Figura 5.4	Rappresentazione mediante curva dello sfasamento tra tensione e dilatazione durante sollecitazioni cicliche [22]	48
Figura 5.5	Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo	50
Figura 5.6	Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo	52
Figura 5.7	Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo	52
Figura 5.8	Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo	54
Figura 5.9	Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo	54
Figura 6.1	Curva di Level Crossing- DD	60
Figura 6.2	Curva di Level Crossing- DC	61
Figura 6.3	Curva di Level Crossing- AD	61
Figura 6.4	Curva di Level Crossing- AC	62
Figura 6.5	Curva di Level Crossing- LC	62
Figura 6.6	Confronto bielletta 1, 1ISO DD: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita	64
Figura 6.7	Confronto bielletta 2, 2ISO DC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita	64
Figura 6.8	Confronto bielletta 3, 3ISO AD: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita	64
Figura 6.9	Confronto bielletta 4, 4ISO AC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita	65
Figura 6.10	Confronto bielletta 5, 5ISO LC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita	65
Figura 6.11	Confronto bielletta 1, 1ISO DD: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita	67
Figura 6.12	Confronto bielletta 2, 2ISO DC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita	67
Figura 6.13	Confronto bielletta 3, 3ISO AD: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita	67
Figura 6.14	Confronto bielletta 4, 4ISO AC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita	68
Figura 6.15	Confronto bielletta 5, 5ISO LC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita	68
Figura 6.16	Confronto bielletta 1, 1ISO DD: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita	70
Figura 6.17	Confronto bielletta 2, 2ISO DC: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita	70
Figura 6.18	Confronto bielletta 3, 3ISO AD: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita	71
Figura 6.19	Confronto bielletta 4, 4ISO AC: rigidezze dinamiche ad alta alle diverse percentuali di vita	71

Figura 6.20	Confronto biellette 5, 5ISO LC: rigidzze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita	71
Figura 6.21	Confronto biellette 1, 1ISO DD: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita	73
Figura 6.22	Confronto biellette 2, 2ISO DC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita	73
Figura 6.23	Confronto biellette 3, 3ISO AD: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita	73
Figura 6.24	Confronto biellette 4, 4ISO AC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita	74
Figura 6.25	Confronto biellette 5, 5ISO LC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita	74
Figura 6.26	Confronto biellette 1, 1ISO DD: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita	75
Figura 6.27	Confronto biellette 2, 2ISO DC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita	76
Figura 6.28	Confronto biellette 3, 3ISO AD: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita	76
Figura 6.29	Confronto biellette 4, 4ISO AC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita	76
Figura 6.30	Confronto biellette 5, 5ISO LC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita	76
Figura 6.31	Confronto biellette 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo	78
Figura 6.32	Confronto biellette 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo	79
Figura 6.33	Confronto biellette 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo	79
Figura 6.34	Confronto biellette 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo	79
Figura 6.35	Confronto biellette 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo	79
Figura 6.36	Confronto biellette 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	81
Figura 6.37	Confronto biellette 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	81
Figura 6.38	Confronto biellette 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	81
Figura 6.39	Confronto biellette 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	81
Figura 6.40	Confronto biellette 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	82
Figura 6.41	Confronto biellette 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidzza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	83
Figura 6.42	Confronto biellette 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidzza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	83
Figura 6.43	Confronto biellette 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidzza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	84

Figura 6.44	Confronto biellette 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidezza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	84
Figura 6.45	Confronto biellette 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidezza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	84
Figura 6.46	Confronto biellette 1, 1ISO DD: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	85
Figura 6.47	Confronto biellette 2, 2ISO DC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	86
Figura 6.48	Confronto biellette 3, 3ISO AD: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	86
Figura 6.49	Confronto biellette 4, 4ISO AC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	86
Figura 6.50	Confronto biellette 5, 5ISO LC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo	86
Figura 6.51	Confronto biellette 1, 1ISO DD: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	88
Figura 6.52	Confronto biellette 2, 2ISO DC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	88
Figura 6.53	Confronto biellette 3, 3ISO AD: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	88
Figura 6.54	Confronto biellette 4, 4ISO AC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	89
Figura 6.55	Confronto biellette 5, 5ISO LC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo	89
Figura 6.56	Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza, carico isodanno	91
Figura 6.57	Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza, carico integrale [1]	92
Figura 6.58	Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza tra carico integrale e isodanno	94
Figura 6.59	Zoom: Figura 6.58	95
Figura 6.60	Confronto globale delle variazioni percentuali della fase tra carico integrale e isodanno	96
Figura 6.61	Confronto globale delle variazioni percentuali della fase tra carico integrale e isodanno	97
Figura 7.1	elastomeri prima e dopo vulcanizzazione [25]	99
Figura 7.2	Confronto tra elastomero e termoplastico sotto sforzo unidirezionale [26]	102
Figura 7.3	Grafico sforzo-deformazione [27]	103
Figura 7.4	Modelli di Maxwell (a) e Voigt (b) [29]	104
Figura 7.5	Transizione vetrosa: G' modulo di shear conservativo, G'' modulo di shear dissipativo, $\tan\delta$ fattore di perdita [31]	106
Figura 8.1	Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo a 100°C	109
Figura 8.2	Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C	111
Figura 8.3	Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C	111
Figura 8.4	Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 100°C a nuovo	113
Figura 8.5	Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 100°C a nuovo	113
Figura 8.6	Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo a 22°C e 100°C	115

Figura 8.7	<i>Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo 22°C e 100°C</i>	116
Figura 8.8	<i>Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo 22°C e 100°C</i>	116
Figura 8.9	<i>Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 22°C e 100°C a nuovo</i>	118
Figura 8.10	<i>Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 22°C e 100°C a nuovo</i>	118
Figura 8.11	<i>grado di reticolazione e rigidità della fase gommosa [32]</i>	121
Figura 9.1	<i>Modalità di rottura della bielletta 5ISO 1 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C</i>	124
Figura 9.2	<i>Modalità di rottura della bielletta 5ISO 2 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C</i>	125
Figura 9.3	<i>Modalità di rottura della bielletta 5ISO 3 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C</i>	125
Figura 9.4	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: rigidzze statiche alle diverse percentuali di vita</i>	126
Figura 9.5	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: rigidzze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	128
Figura 9.6	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: rigidzze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	129
Figura 9.7	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo</i>	131
Figura 9.8	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidzza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo</i>	132
Figura 9.9	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidzza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo</i>	134
Figura 9.10	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidzza, carico isodanno LC 100°C</i>	135
Figura 10.1	<i>Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo</i>	137
Figura 10.2	<i>Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo</i>	139
Figura 10.3	<i>Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo</i>	139
Figura 10.4	<i>Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 22°C a nuovo</i>	141
Figura 10.5	<i>Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 22°C a nuovo</i>	141
Figura 11.1	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidzze statiche alle diverse percentuali di vita</i>	146
Figura 11.2	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidzze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	147
Figura 11.3	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidzze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	148
Figura 11.4	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: fase (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita</i>	150
Figura 11.5	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: fase (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita</i>	151
Figura 11.6	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo</i>	153

Figura 11.7	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidità dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo</i>	<i>154</i>
Figura 11.8	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidità dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo</i>	<i>155</i>
Figura 11.9	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della fase, caratterizzazione dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo . . .</i>	<i>156</i>
Figura 11.10	<i>Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della fase, caratterizzazione dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo . . .</i>	<i>157</i>
Figura 11.11	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità climi misti e carico isodanno LC</i>	<i>159</i>
Figura 11.12	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali della fase carico isodanno con climi misti</i>	<i>160</i>
Figura 11.13	<i>Confronto biellette: rigidità statiche alle diverse percentuali di vita</i>	<i>161</i>
Figura 11.14	<i>Confronto biellette: rigidità dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	<i>162</i>
Figura 11.15	<i>Confronto biellette: rigidità dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita</i>	<i>162</i>
Figura 11.16	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità statica</i>	<i>163</i>
Figura 11.17	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità dinamica a bassa frequenza</i>	<i>164</i>
Figura 11.18	<i>Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità dinamica ad alta frequenza</i>	<i>164</i>

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3.1	<i>Principali range di lavoro nominali del banco</i>	21
Tabella 3.2	<i>Bielletta in prova con Vacuum bagging film</i>	24
Tabella 3.3	<i>Specifiche tecniche Vacuum bagging film [20]</i>	24
Tabella 4.1	<i>Percorsi strada adoperati per lo studio</i>	33
Tabella 4.2	<i>Parametri di frequenza - SETUP</i>	37
Tabella 4.3	<i>Successione delle operazioni svolte sui percorsi strada</i>	38
Tabella 4.4	<i>Autodamage: confronto tra segnale originale e segnale isodanno</i>	40
Tabella 4.5	<i>Funzione di trasferimento, FRF</i>	41
Tabella 4.6	<i>Indici di MAX, min, RMSE per ogni percorso</i>	45
Tabella 5.1	<i>Specifiche degli sweep relativi alle caratterizzazioni dinamiche</i>	49
Tabella 5.2	<i>Rigidezze statiche a nuovo (0% ciclo affaticante)</i>	51
Tabella 5.3	<i>Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)</i>	53
Tabella 5.4	<i>Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)</i>	53
Tabella 5.5	<i>Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)</i>	55
Tabella 5.6	<i>Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)</i>	55
Tabella 6.1	<i>Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo normativa (LC)</i>	57
Tabella 6.2	<i>Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo durate decrescenti (DD)</i>	58
Tabella 6.3	<i>Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo durate crescenti (DC)</i>	59
Tabella 6.4	<i>Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo ampiezze decrescenti (AD)</i>	59
Tabella 6.5	<i>Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo ampiezze crescenti (AC)</i>	59
Tabella 6.6	<i>Corrispondenza fra bielletta e modalità di somministrazione del carico isodanno</i>	63
Tabella 6.7	<i>Corrispondenza fra bielletta e modalità di somministrazione del carico integrale</i>	63
Tabella 6.8	<i>Riepilogo risultati rigidezza statica con carico integrale - Valori assoluti [1]</i>	65
Tabella 6.9	<i>Riepilogo risultati rigidezza statica con carico isodanno - Valori assoluti</i>	66
Tabella 6.10	<i>Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz con carico integrale - Valori assoluti [1]</i>	68
Tabella 6.11	<i>Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz con carico isodanno - Valori assoluti</i>	69
Tabella 6.12	<i>Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 100 Hz carico integrale- Valori assoluti [1]</i>	72
Tabella 6.13	<i>Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 100 Hz carico isodanno- Valori assoluti</i>	72
Tabella 6.14	<i>Riepilogo risultati fase @ 25 Hz carico integrale- Valori assoluti</i>	74
Tabella 6.15	<i>Riepilogo risultati fase, @ 25 Hz carico isodanno- Valori assoluti</i>	74
Tabella 6.16	<i>Riepilogo risultati fase @ 100 Hz carico integrale- Valori assoluti</i>	77
Tabella 6.17	<i>Riepilogo risultati fase, @ 100 Hz carico isodanno- Valori assoluti</i>	77
Tabella 6.18	<i>Riepilogo risultati rigidezza statica, carico integrale - Variazione percentuale [1]</i>	80
Tabella 6.19	<i>Riepilogo risultati rigidezza statica, carico isodanno - Variazione percentuale</i>	80

Tabella 6.20	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz carico integrale - Variazione percentuale [1]	82
Tabella 6.21	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz carico isodanno - Variazione percentuale	82
Tabella 6.22	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 100 Hz carico integrale - Variazione percentuale [1]	84
Tabella 6.23	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 100 Hz carico isodanno - Variazione percentuale	85
Tabella 6.24	Riepilogo risultati fase dinamica @ 25 Hz carico integrale - Variazione percentuale	87
Tabella 6.25	Riepilogo risultati fase dinamica @ 25 Hz carico isodanno - Variazione percentuale	87
Tabella 6.26	Riepilogo risultati fase dinamica @ 100 Hz carico integrale - Variazione percentuale	89
Tabella 6.27	Riepilogo risultati fase dinamica @ 100 Hz carico isodanno - Variazione percentuale	89
Tabella 7.1	Riepilogo rigidzze statiche e dinamiche allo 0% ciclo affaticante (Capitolo 5)	106
Tabella 8.1	Specifiche degli sweep relativi alle caratterizzazioni dinamiche	109
Tabella 8.2	Rigidzze statiche a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)	110
Tabella 8.3	Rigidzze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)	112
Tabella 8.4	Rigidzze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)	112
Tabella 8.5	Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)	114
Tabella 8.6	Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)	114
Tabella 8.7	Rigidzze statiche a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)	115
Tabella 8.8	Rigidzze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)	117
Tabella 8.9	Rigidzze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)	117
Tabella 8.10	Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)	119
Tabella 8.11	Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)	119
Tabella 8.12	Riepilogo rigidzze (statiche e dinamiche) e della fase allo 0% ciclo affaticante	120
Tabella 9.1	Corrispondenza fra bielle e modalità di somministrazione del carico isodanno e temperatura della prova	124
Tabella 9.2	Riepilogo risultati rigidezza statica a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti	127
Tabella 9.3	Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti	128
Tabella 9.4	Riepilogo risultati rigidezza dinamica ad alta frequenza a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti	130
Tabella 9.5	Riepilogo risultati rigidezza statica, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale	132
Tabella 9.6	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @25Hz, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale	133

Tabella 9.7	Riepilogo risultati rigidezza dinamica @100Hz, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale	134
Tabella 10.1	Rigidezze statiche a nuovo (0% ciclo affaticante)	138
Tabella 10.2	Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)	140
Tabella 10.3	Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)	140
Tabella 10.4	Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)	142
Tabella 10.5	Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)	142
Tabella 11.1	ciclo termico	145
Tabella 11.2	Corrispondenza fra bielle e modalità di somministrazione del carico isodanno e temperatura della prova	145
Tabella 11.3	Riepilogo risultati rigidezza statica con climi misti e con carico isodanno - Valori assoluti	146
Tabella 11.4	Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza climi misti e carico isodanno - Valori assoluti	147
Tabella 11.5	Riepilogo risultati rigidezza dinamica ad alta frequenza con climi misti e carico isodanno - Valori assoluti	149
Tabella 11.6	Riepilogo risultati fase, @ 25 Hz climi misti e carico isodanno- Valori assoluti	150
Tabella 11.7	Riepilogo risultati fase, @ 100 Hz con climi misti e carico isodanno- Valori assoluti	151
Tabella 11.8	Riepilogo risultati rigidezza statica, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale	153
Tabella 11.9	Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale	154
Tabella 11.10	Riepilogo risultati rigidezza dinamica ad alta frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale	155
Tabella 11.11	Riepilogo risultati fase, caratterizzazione dinamica a bassa frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale	157
Tabella 11.12	Riepilogo risultati fase, caratterizzazione dinamica ad alta frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale	158

1

INTRODUZIONE

Oggigiorno l'industria automobilistica, altamente competitiva, richiede ai produttori di focalizzare maggiore attenzione sul comfort dei passeggeri e sulla qualità di guida. Ciò ha portato i progettisti a dirigere la loro attenzione verso lo sviluppo di dispositivi di supporto del motore di alta qualità, sia con prototipazione fisica tradizionale e test sia con prototipi virtuali e simulazioni numeriche [2].

Come anticipato brevemente nel sommario del presente lavoro di tesi, le cause relative alle vibrazioni trasmesse, all'interno di un'autovettura, possono ricondursi sostanzialmente a due fonti di eccitazione principali: da un lato vi è l'*eccentricità del motore* e dall'altro il *feedback della strada*:

- Eccentricità del motore: motori a 4 cilindri nel range del numero di giri compreso fra 650 e 6000 rpm contengono frequenze eccitatrici fra i 25 e 200 Hz con ampiezze di oscillazione dei tasselli misurate nel centro elastico solitamente inferiori a 0.3 mm;
- Feedback strada: imperfezioni dell'asfalto che vengono trasferite, tramite le sospensioni, alla scocca e contengono frequenze tipicamente inferiori ai 30 Hz ma con ampiezze di oscillazione dei tasselli misurate nel centro elastico maggiori di 0.3 mm.

In generale, a bassi regimi del motore il disturbo ad esso connesso si tradurrà in uno scuotimento del veicolo [3].

A velocità più elevate, la forza di disturbo del motore può portare ad una risonanza acustica dell'abitacolo, creando un fastidioso rumore di rimbombo all'interno del veicolo [3].

Al fine di ridurre e di filtrare quanto più possibile tali disturbi, è necessaria un'adeguata ingegnerizzazione del sistema di supporti del gruppo propulsore (*engine mounting system* - EMS).

Solitamente gli organi che compongono l'EMS sono in numero compreso tra un minimo di tre e un massimo di sei a seconda del veicolo per cui sono progettati.

Tra le caratteristiche principe che definiscono l'efficienza di tale tipologia di componenti si annovera sicuramente la rigidezza.

1.1 ENGINE MOUNTING SYSTEM (EMS)

Come già anticipato, il sistema di supporti del gruppo propulsore (*engine mounting system* - EMS) di un veicolo è composto da un numero variabile di supporti, solitamente pari a tre, la cui funzione primaria è quella di andare a sostenere il peso del gruppo propulsore facendo sì che il suo baricentro ricada all'interno del triangolo individuato dai tre vertici che corrispondono ai tre punti di appoggio dello stesso; in tal modo il carico del gruppo propulsore è distribuito in modo ottimale sui supporti stessi senza che vi sia l'insorgere di sbilanciamenti di carico eccessivi.

La seconda funzione dell'EMS è quella di isolare il telaio del veicolo dalle vibrazioni provenienti dalla strada e dal motore stesso.

Oltre alla bielletta o *Torque Rod - TR*, oggetto di studio del presente lavoro di tesi, gli altri componenti di supporto sono il tassello lato cambio o *Left Hand Mount - LHM* e il tassello lato motore o *Right Hand Mount - RHM*.

Per completezza inoltre, si riporta in Figura 1.1 un esploso del gruppo propulsore e dell'EMS che consente con più facilità di comprendere la locazione dei tre elementi di supporto LHM, RHM e TR rispetto al motore.

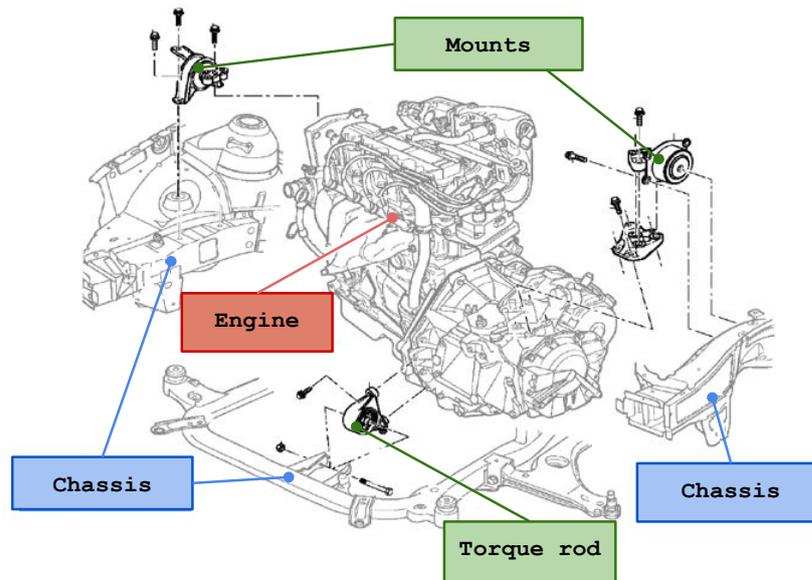


Figura 1.1: Esploso engine ed EMS: posizione dei supporti su vettura

Come esempio esplicativo viene riportato in Figura 1.2 una rappresentazione di un RHM dove è possibile discernere gli elementi principali che costituiscono il componente:

- *staffa* (1): rappresenta il supporto collegato al gruppo propulsore sul lato motore;
- *housing* (2): rappresenta il supporto collegato direttamente al telaio.

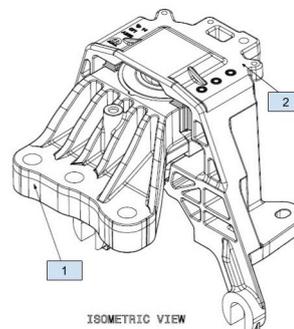


Figura 1.2: Rappresentazione di un tassello lato motore

1.2 EMS JEEP RENEGADE

Come esplicitato precedentemente, la configurazione tipica di EMS consiste in un numero di tasselli compreso tra tre e sei a seconda della tipologia specifica di vettura su cui vengono installati.

Nel caso particolare della vettura Jeep Renegade l'EMS consta di tre elementi che vanno a realizzare il collegamento tra gruppo propulsore e telaio:

1. *Left Hand Mount* - LHM o Shaft mount (Tassello lato cambio);
2. *Right Hand Mount* - RHM o Engine mount (Tassello lato motore);
3. *Torque Rod* - TR o Rear Engine Mount (Bielletta che sorregge la parte inferiore del gruppo propulsore).

Scopo del lavoro di tesi è studiare e analizzare la sola Torque rod (bielletta in gergo tecnico).

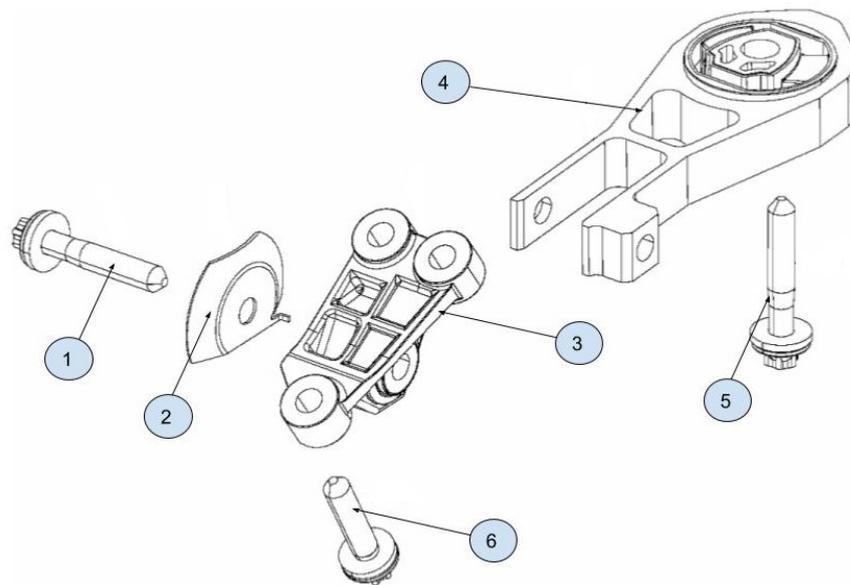


Figura 1.3: Torque rod e componenti di montaggio

In Figura 1.3 sono rappresentati:

- organi di collegamento (1,5,6);
- torque rod (4);
- supporto bielletta (3) per il collegamento alla parte posteriore del gruppo propulsore;
- scudo termico (2).

1.3 PANORAMICA SU TORQUE ROD JEEP RANEGADE

La funzione primaria della bielletta è quella di sostenere inferiormente il gruppo propulsore lavorando sia in trazione che in compressione rispettivamente nelle fasi

di accelerazione e frenata, ed in generale garantisce il corretto posizionamento del gruppo propulsore durante la totalità di un percorso stradale.

Tale elemento, insieme ai tasselli lato cambio e lato motore, afferisce ad una funzione chiave per quanto concerne l'isolamento del motore dalle vibrazioni. Quanto detto comporta che venga svolta una analisi ad hoc del componente in modo tale che vi sia profonda conoscenza del suo comportamento elastico. In altri termini, ciò significa analizzare in prima istanza la rigidità del componente e la variabilità di quest'ultima rispetto ai fattori da cui la stessa dipende:

- Condizioni di carico (le tipologie di sollecitazioni che il componente si trova ad affrontare);
- Danneggiamento (derivante dalla storia di carico che il componente subisce durante il suo ciclo di vita);
- Temperatura di esercizio.

La dipendenza della rigidità rispetto a tali parametri è stata approfondita in primo luogo nell'attività svolta in [1] e viene ripresa nel presente lavoro di tesi. L'incipit dell'analisi è relativo al mettere in evidenza e risalto l'influenza del comportamento elastico della torque rod solo ed esclusivamente dal ciclo affaticante, successivamente a questo si aggiungerà la valutazione della variabilità della rigidità rispetto alla temperatura.

In particolare quest'ultima indagine è significativa poichè un'autovettura è distribuita in mercati di zone geografiche dalle condizioni climatiche anche molto differenti. Per cui, al fine di garantire il corretto funzionamento con diversi climi, è opportuna un'indagine che tenga conto delle temperature alle quali il componente può trovarsi ad operare.

È da sottolineare che la sostituzione della bielletta supporto motore, entro il ciclo di vita medio di un veicolo, di norma, non è necessaria se il decadimento delle sue caratteristiche meccaniche non è tale da comprometterne il corretto funzionamento. Infatti, con questo lavoro di ricerca, è stata svolta un'analisi per avere una conferma che il decadimento della rigidità sia contenuto entro i limiti definiti in fase di progettazione.

1.4 APPROCCIO UTILIZZATO PER LE PROVE

Al fine di valutare il contributo del danneggiamento, meccanico e termico, della parte in gomma della bielletta, in gergo detta "il gommato", la maniera più indicata è quella di sottoporre un componente nuovo (provino) alle stesse sollecitazioni cui esso è soggetto durante il suo ciclo di vita su vettura: dal momento in cui esso viene assemblato sul veicolo (componente nuovo) al momento in cui esso deve essere sostituito (fine vita).

Queste sollecitazioni rappresentano quella che è nota con il nome di storia di carico del provino. Al fine di quantificare il danneggiamento, la storia di carico viene periodicamente interrotta per svolgere delle caratterizzazioni che permettono di valutare la rigidità del provino.

La storia di carico utilizzata in questa tesi non è virtuale, bensì deriva da un'acquisizione reale su una vettura. Il veicolo di test ha effettuato una serie di percorsi su strada, mentre una serie di componenti sono stati equipaggiati con sensori per l'acquisizione di forze, accelerazioni, spostamenti, ect: fra i componenti strumentati vi è anche la bielletta di nostro interesse. Quindi l'input di partenza, adoperato per questo lavoro, è stato ottenuto da acquisizioni su strada ed opportunamente post-processato per renderlo fruibile ai fini della campagna di prove in oggetto.

Successivamente i provini nuovi sono stati sottoposti all'azione della storia di carico postprocessata e, al fine di quantificarne l'impatto in termini di danneggiamento, la storia di carico è stata periodicamente interrotta in favore di una valutazione della rigidità del gommato; tale valutazione avviene tramite una prova specifica: la caratterizzazione statica e dinamica.

Questa valutazione di rigidità ha quindi consentito di confrontare il decadimento nel caso di vari scenari, così da ottenere una rosa di prove abbastanza ampia e poter effettuare delle valutazioni globali.

2

MODELLI DINAMICI E TIPOLOGIE DI EMS

2.1 MODELLI DINAMICI EMS

Si esplicano di seguito alcuni modelli dinamici tra i più utilizzati che descrivono il comportamento delle sospensioni per la riduzione delle vibrazioni indotte sulla vettura dalle imperfezioni del profilo stradale o dall'eccentricità del motore. Tali modelli sono trattati in [4].

2.1.1 Ammortizzatore dinamico ideale

L'ammortizzatore dinamico realizza la riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni di un sistema non tanto aumentandone la capacità di smorzamento, bensì consentendo uno scambio energetico tra il sistema stesso e la massa o le masse ausiliarie ad esso connesse. Lo schema base di un ammortizzatore dinamico è quello a due molle con una massa aggiunta (che chiameremo battente).

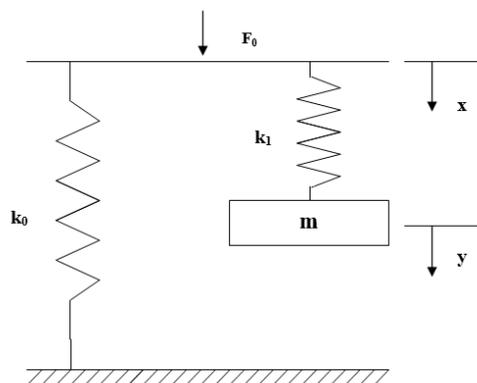


Figura 2.1: Schema simbolico equivalente di ammortizzatore dinamico ideale [4]

La molla di rigidezza k_0 rappresenta la rigidezza del sistema principale, quella di rigidezza k_1 si riferisce al collegamento meccanico tra il battente di massa m e il resto del sistema. La vibrazione è applicata al sistema sotto forma di una forzante armonica di ampiezza F_0 e di pulsazione ω ; l'oscillazione x del piattello su cui agisce la forzante è proprio il grado di libertà la cui escursione intendiamo minimizzare. Chiamiamo invece y lo spostamento della massa ausiliaria. La dinamica del sistema è descritta dalla seguente espressione matriciale:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_0 + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_0 \cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Ai fini dell'analisi del sistema come ammortizzatore, si è interessati alla determinazione dell'andamento di alcune variabili nel dominio della frequenza, in particolare

la risposta in frequenza dell'ampiezza di x trasformando il sistema nel dominio di Laplace. Di nostro interesse risultano guadagno e fase.

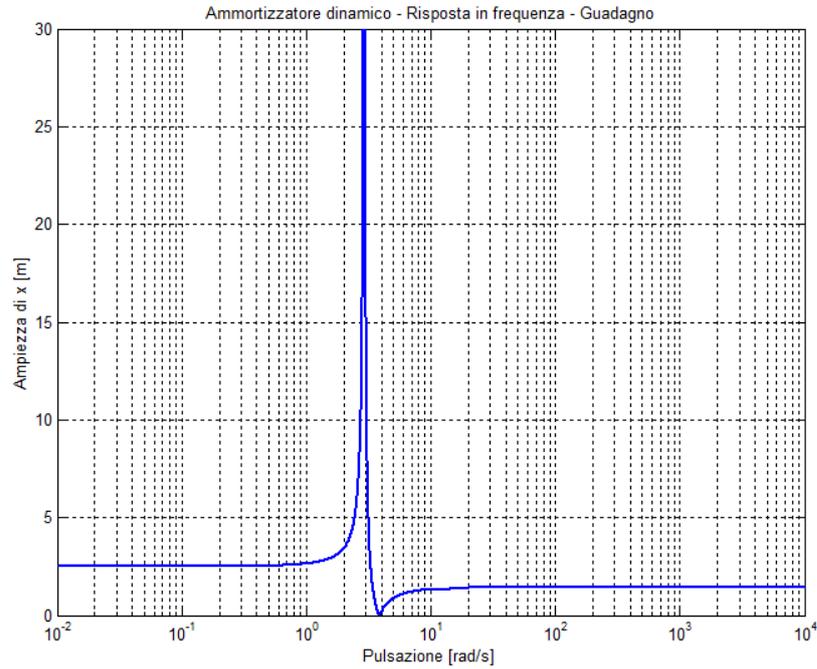


Figura 2.2: *Ammortizzatore dinamico ideale, guadagno* [4]

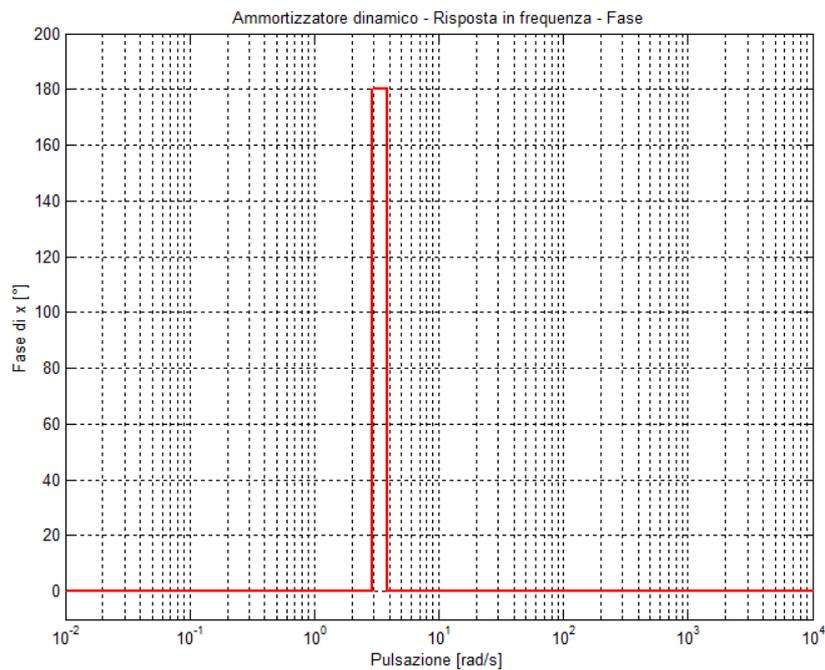


Figura 2.3: *Ammortizzatore dinamico ideale, fase* [4]

Per frequenze tendenti a zero è possibile constatare un asintoto orizzontale di valore $1/k_0$, corrispondente allo spostamento del grado di libertà x sotto una forza statica

di intensità F_0 . A frequenze molto basse, infatti, la forzante può considerarsi quasi statica e l'intervento del battente è marginale, cosicché il piattello si sposta esclusivamente di quanto consentito dalla rigidità k_0 . La risposta inizia poi a crescere al crescere di ω , fino a raggiungere il massimo in corrispondenza della pulsazione propria del sistema. In questo caso ideale, privo di smorzamenti, il picco è un asintoto verticale, la risposta ha ampiezza infinita e il sistema perde la sua integrità. In questo modello si è considerato il piattello non inerte, riducendo il computo delle masse in gioco a quella del battente. Ecco perché il numero degli autovalori del sistema (e quindi delle pulsazioni proprie che di tali autovalori sono la parte immaginaria) si è ridotto a uno; se si fosse attribuita una massa diversa da zero anche al piattello, il grafico avrebbe avuto i due picchi tipici di tutti i sistemi a due gradi di libertà.

Per frequenze ulteriormente più elevate, la risposta passa per un minimo, che nel caso ideale è lo zero; essa è la condizione di cosiddetta antirisonanza e realizza lo stato di miglior funzionamento per lo smorzatore in quanto a questa frequenza il piattello, eccitato dalla forza, rimane fermo trasferendo tutta l'oscillazione alla massa sospesa. Questa condizione si realizza per un valore della pulsazione di F pari alla pulsazione di risonanza della massa m supposta vincolata a terra tramite la sua rigidità k_1 .

2.1.2 Ammortizzatore dinamico reale

Trattasi di un sistema del tutto simile a quello precedente, ma nel quale si tiene conto degli smorzamenti, e quindi delle dissipazioni, che esistono necessariamente nella realizzazione pratica dello smorzatore. Si tratta quindi non tanto di introdurre volontariamente nel sistema degli elementi smorzanti quanto di tener conto delle caratteristiche dissipative dei materiali. Esse possono essere sintetizzate nel modello da un unico smorzatore di tipo viscoso (in grado cioè di sviluppare una forza antagonista al moto della massa a cui è legato proporzionale alla velocità del grado di libertà stesso), messo in parallelo alla molla k_1 , ma nel quale inglobiamo lo smorzamento relativo alla rigidità k_0 e, nel caso di smorzatore idroelastico, anche l'effetto dello smorzamento dovuto al passaggio della massa fluida nel condotto.

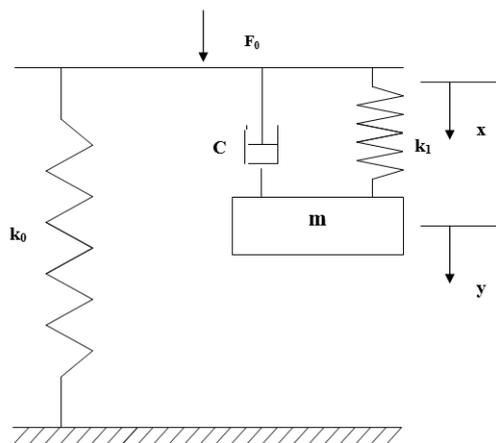


Figura 2.4: Schema simbolico equivalente di ammortizzatore dinamico reale [4]

La dinamica del sistema è descritta dalla seguente espressione matriciale:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_0 + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_0 \cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

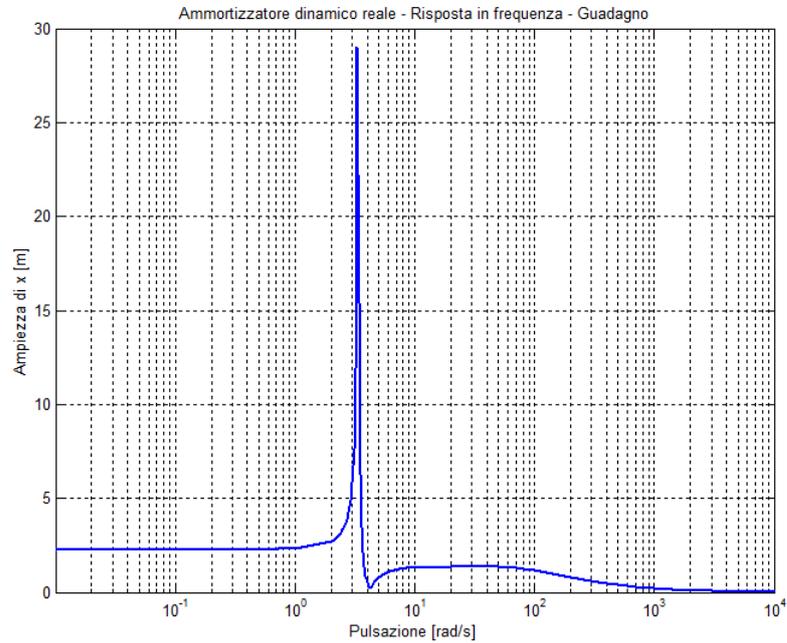


Figura 2.5: Ammortizzatore dinamico reale, guadagno [4]

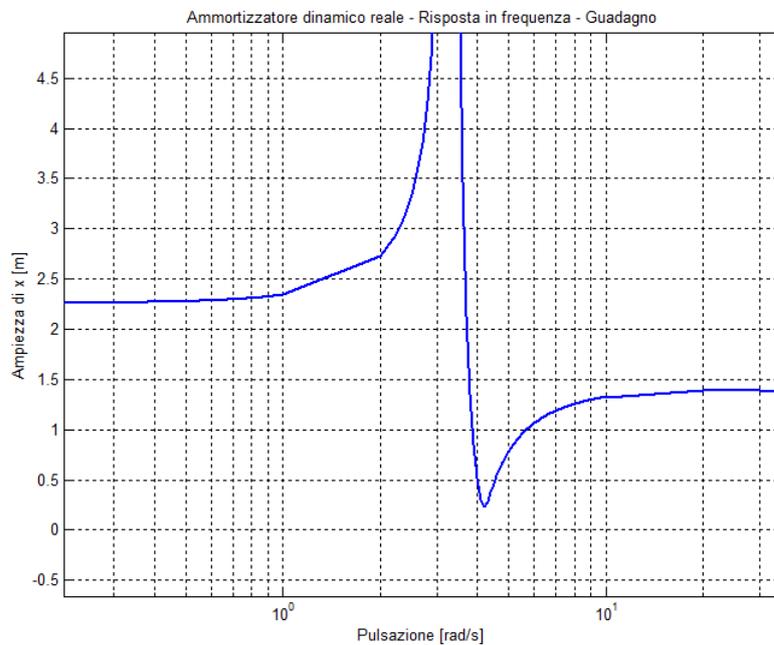


Figura 2.6: Ammortizzatore dinamico reale, guadagno (intorno del minimo) [4]

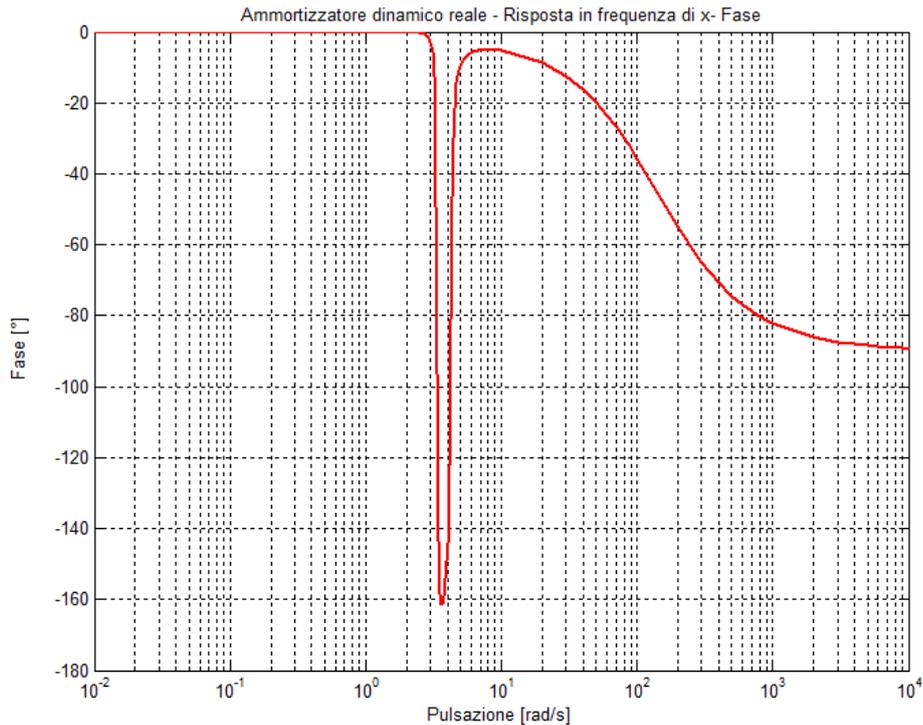


Figura 2.7: Ammortizzatore dinamico reale, fase [4]

L'andamento della risposta è analogo al caso ideale, ma con alcune importanti differenze:

- la presenza dello smorzatore viscoso introduce un elemento di dissipazione energetica che si traduce nell'abbassamento generalizzato dell'ampiezza della risposta, in particolare in corrispondenza della pulsazione propria ove l'asintoto verticale viene sostituito da un massimo locale di tipo stazionario, di entità sempre elevata, ma finita;
- la zona di antirisonanza si attenua e lo zero della risposta viene sostituito da un minimo locale.

Parametrizzando la risposta in base al valore del coefficiente c , si evidenzia come il minimo sia tanto più diverso da zero quanto più è elevato lo smorzamento viscoso: il dissipatore viene così a risultare addirittura controproducente per l'abbattimento delle vibrazioni nell'intorno dell'antirisonanza.

Si tratta allora di valutare un compromesso tra un ammortizzatore che lavora meglio nel suo punto di lavoro e uno che contiene meglio le vibrazioni nel resto del dominio di frequenza. Considerando però che questa architettura appare efficiente limitatamente all'impiego in prossimità dell'antirisonanza, risulta evidente puntare su una minimizzazione degli smorzamenti, strutturali e non, presenti nel sistema.

2.1.3 Modello dinamico SDOF

Per semplicità, al fine di valutare quali siano i requisiti di prestazione che un componente di EMS deve garantire, si consideri la modellazione qualitativa di uno degli isolatori dell'EMS (tassello isolatore), schematizzata in Figura 2.8.

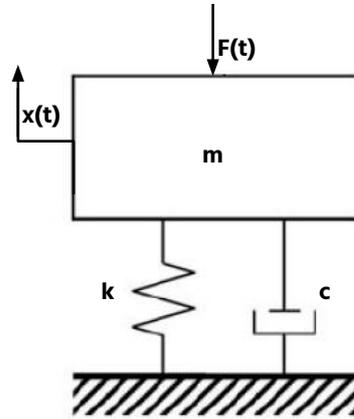


Figura 2.8: Sistema massa molla smorzatore [1]

Nel sistema massa-molla-smorzatore ad 1 grado di libertà la massa m rappresenta la massa equivalente del motore che grava sul tassello. Tale tassello risulta sollecitato dalla forzante generica $F(t)$ interpretabile come forza proveniente dal gruppo propulsore ipotizzando di mantenere fisso il telaio, k è la rigidezza del tassello e c la sua costante di smorzamento viscoso, mentre il vincolo in basso rappresenta il telaio dell'autovettura.

Si indica con $x(t)$, spesso in seguito semplicemente con x , lo spostamento della massa m a partire dalla configurazione di equilibrio statico, il che permette di affermare che se anche il moto avviene in direzione verticale non si dovrebbe tener conto della forza peso in quanto già bilanciata dalla forza statica di richiamo elastico della molla [5]. Designando inoltre con $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ la velocità e con $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ l'accelerazione, l'equazione di equilibrio alla traslazione risulta:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.3)$$

Si ha cioè un'equazione differenziale del secondo ordine, lineare, a coefficienti costanti e omogenea, la cui soluzione si cerca nella forma [5]:

$$x(t) = Ae^{st} \quad (2.4)$$

Dove A ed s sono due costanti, eventualmente complesse [5]. Derivando la (2.4) e sostituendola nella (2.3), si ottiene:

$$x(t) = A(ms^2 + cs + k) = 0 \quad (2.5)$$

Per evitare la soluzione banale, che consisterebbe nell'imporre $A=0$ e cioè l'assenza del moto, è necessario che il polinomio caratteristico si annulli [5]; quindi si pone:

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (2.6)$$

Da un'equazione differenziale del secondo ordine si passa dunque a una equazione algebrica di secondo grado i cui zeri, o poli del sistema, sono:

$$s_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \quad (2.7)$$

E la soluzione della (2.3) è:

$$x(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (2.8)$$

Nella quale le costanti A_1 e A_2 si determinano imponendo due condizioni iniziali. Se si indica con $c_{cr} = 2\sqrt{km}$ il valore del coefficiente di smorzamento, detto critico, per cui il radicando di (2.7) si annulla, con $\omega_n = \sqrt{k/m}$ la pulsazione naturale o propria e con $\zeta = c/c_{cr}$ il fattore di smorzamento del sistema, la (2.7) può essere riscritta come segue [5]:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.9)$$

L'evoluzione nel tempo dello spostamento x espresso dalla (2.8) varia con il segno del radicando della (2.9):

- $\zeta > 1$ il sistema si dice *sovrasmorzato* e gli zeri sono entrambi reali e negativi;
- $\zeta = 1$ il sistema si dice *criticamente smorzato* e gli zeri sono reali e coincidenti;
- $\zeta < 1$ il sistema si dice *sottosmorzato* e gli zeri sono complessi e coniugati;

In generale, l'efficacia dell'EMS dipende dai parametri che lo caratterizzano e dalla forma della forzante che lo stesso deve attenuare:

- rapporto delle frequenze: $r = \frac{\Omega}{\omega_n}$, dove:
 - Ω : pulsazione della forzante;
 - $\omega_n = \sqrt{k/m}$: pulsazione naturale o propria
- fattore di smorzamento: $\zeta = c/c_{cr}$, dove:
 - c : costante di smorzamento viscoso;
 - c_{cr} : costante di smorzamento viscoso critico.

L'efficacia dell'isolatore è strettamente legata alla *trasmissibilità* T , definita come il rapporto tra la la forza che si scarica a terra tramite il vincolo $f_v(t)$ (forza che si scarica sul telaio del veicolo) e la forza applicata (forza eccitatrice applicata dal motore sul tassello) $f(t)$:

$$T = \frac{f_v(t)}{f(t)} \quad (2.10)$$

La trasmissibilità del sistema in oggetto in modulo è esplicitata come segue:

$$|T| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.11)$$

La Figura 2.9 mostra l'andamento della trasmissibilità in funzione del rapporto delle frequenze r (frequenza della forzante e frequenza propria del gruppo propulsore) e del fattore di smorzamento ζ ; da tale grafico si evince che, al fine di ottenere dei bassi

valori di T (ciò significa avere delle basse forze scaricate sul vincolo) è necessario che il tassello abbia valori di rigidezza e fattori di smorzamento opportuni, a seconda della frequenza della forzante Ω . Si considera ora la relazione che sussiste tra r e la rigidezza k :

$$r = \frac{\Omega}{\omega_n} = \frac{\Omega}{\sqrt{k/m}} \quad (2.12)$$

Per la (2.12) la rigidezza k risulta inversamente proporzionale ad r .

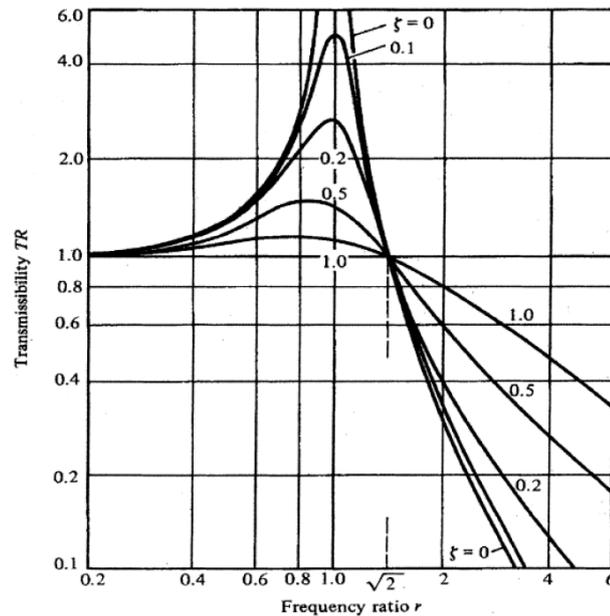


Figura 2.9: *Trasmissibilità in funzione di r* [3]

L'obiettivo è dunque quello di ridurre il più possibile la trasmissibilità T evitando di ottenere dei valori di r prossimi all'unità, per i quali si lavorerebbe in risonanza e si avrebbero dunque fortissime amplificazioni della forza trasmessa al vincolo. Ciò significa che ad alte frequenze eccitatrici Ω sono desiderabili bassi valori di k e ζ ; viceversa per basse frequenze eccitatrici Ω sono desiderabili alti valori di k e ζ .

A ciò va aggiunto che per transitori molto bruschi quali accelerazioni o frenate improvvise, assimilabili a risposte ad una forzante a gradino, basse rigidezze comportano spostamenti elevati con conseguente danneggiamento del gruppo propulsore. Esistono dunque dei limiti imposti dai transitori in cui il tassello deve garantire sia isolamento dalle vibrazioni ottimale, sia spostamenti relativamente contenuti.

Dunque l'EMS ideale, dovrebbe possedere una rigidezza variabile con la frequenza della forzante con andamento mostrato in Figura 2.10.

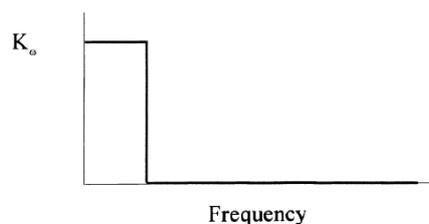


Figura 2.10: *Rigidità dinamica ideale di EMS* [6]

Inoltre poichè generalmente a basse frequenze corrispondo grandi ampiezze e viceversa, l'EMS ideale dovrebbe possedere delle caratteristiche che siano anche funzione dell'ampiezza, oltre che della frequenza.

2.2 TIPOLOGIE DI SUPPORTI DI EMS

Gli organi di supporto motore possono essere classificati, in primo luogo, in due macro categorie definite dalla:

- tipologia di supporto:
 - elastomerico;
 - idraulico.
- tipologia di azione:
 - passiva;
 - semi-attiva;
 - attiva.

Sono stati sviluppati diversi tipi di sistemi di supporto del motore; da elastomerico a idraulico e da passivo a attivo al fine di migliorarne il funzionamento e le prestazioni.

Nell'ambito dei successivi paragrafi verranno discussi ed esaminate le differenti tipologie di supporti a cui lo stato dell'arte sugli stessi è giunto.

2.2.1 Supporti elastomerici

I supporti elastomerici sono stati utilizzati per isolare la struttura del veicolo dalle vibrazioni causate dal motore a partire dal 1930 [7]. Da allora sono stati fatti molti progressi al fine di migliorare le prestazioni degli stessi supporti [8, 9, 10, 11].

Rientrano in questa classe tutti quei supporti che presentano soltanto una copertura gommata più o meno spessa sulla porzione di staffa che vede l'accoppiamento con l'housing. Di conseguenza la rigidezza del tassello deriva solo dall'accoppiamento gomma-metallo. I supporti elastomerici sono costituiti da un gommato che sottoposto a carichi resiste a grandi deformazioni; tale gommato inoltre ha la capacità di mantenere quasi completamente la sua forma originale dopo che il carico a cui è stato sottoposto viene rimosso. Ciò è dovuto alla proprietà intrinseca del materiale della gomma: la gomma è infatti un materiale viscoelastico, tale caratteristica gli consente di essere usato come isolatore e come smorzatore [12].



Figura 2.11: Tasselli elastomerici [1]



Figura 2.12: *Biellette elastomeriche* [1]

Il supporto elastomerico può essere rappresentato dal modello di Voigt in Figura 2.13 che consiste di una molla e di uno smorzatore viscoso.

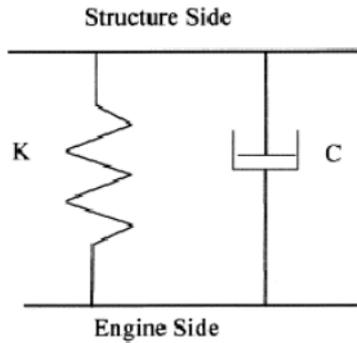


Figura 2.13: *Modello di un supporto elastomerico* [13]

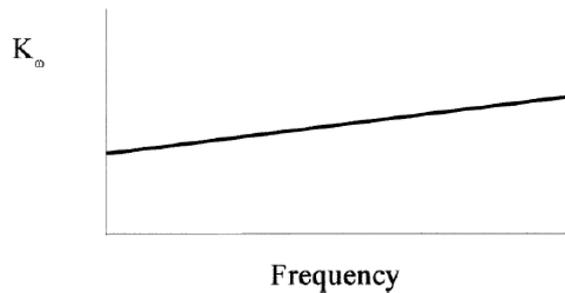


Figura 2.14: *Rigidezza in funzione della frequenza per un tassello elastomerico* [13]

Per tale tipologia di componenti, un andamento tipico della rigidezza al variare della frequenza è riportato in Figura 2.14. Si nota come al crescere della frequenza la rigidezza aumenti; questo effetto risulta indesiderato in quanto mentre a basse frequenze un'elevata rigidezza del componente è garanzia di un efficace isolamento dalle vibrazioni, alle frequenze più alte avere una rigidezza con un trend crescente comporta scarse performance del supporto.

Da un altro punto di vista, si potrebbe pensare di mantenere globalmente basso il valore di rigidezza per migliorare le performance del supporto man mano ci si avvicina a dei range di alta frequenza, ma questo comporterebbe una diminuzione delle performance per quanto concerne le basse frequenze. Infatti eventuali eccitazioni impulsive come accelerazioni, decelerazioni o cornering comporterebbero delle vibrazioni eccessive a bassa frequenza.

2.2.2 Supporti idraulici

I supporti idraulici si differenziano dagli elastomerici per la presenza di un circuito idraulico che separa due camere interne piene di fluido viscoso. L'introduzione di questi elementi modifica le caratteristiche del tassello: il fluido viscoso, in generale glicole, si vede costretto a muoversi attraverso un orifizio o circuito inerziale (*inertia track*) e crea di conseguenza degli effetti di rigidità e smorzamento amplificati rispetto a quelli di un tassello elastomerico.

I tasselli idraulici dunque, vista la presenza di tali elementi interni, risultano molto più versatili rispetto ai tasselli meramente in gomma; ciò significa che il loro ventaglio di applicazione risulta più ampio.

Tali tasselli in particolare garantiscono bassi valori di rigidità per fronteggiare le vibrazioni causate da fonti eccitatrici ad alta frequenza e elevati valori di smorzamento per fronteggiare eccitazioni impulsive di grande ampiezza, dunque di bassa frequenza.

Un tassello idraulico presenta il modello meccanico in Figura 2.15; la massa M rappresenta la massa di fluido viscoso all'interno del circuito idraulico, K_2 è il valore di rigidità (inferiore a K , valore invece deputato alla gomma) del tassello quando subentra la parte idraulica.

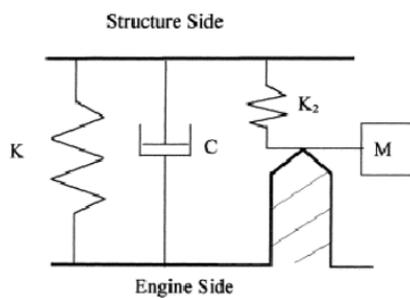


Figura 2.15: Modello di un supporto idraulico [13]

Esistono differenti soluzioni costruttive di tasselli idraulici che si differenziano per struttura e tipologia del mero circuito idraulico interno:

- tasselli idraulici con semplice orifizio;
- tasselli idraulici con inertia track;
- tasselli idraulici con inertia track e decoupler.

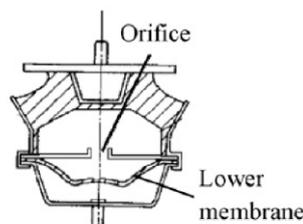


Figura 2.16: Tassello idraulico con semplice orifizio [10]

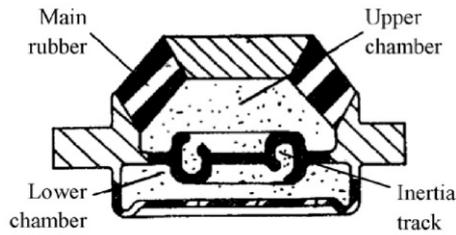


Figura 2.17: Tassello idraulico con inertia track [10]

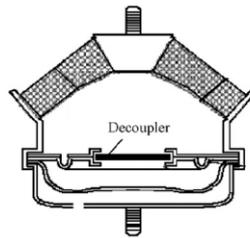


Figura 2.18: Tassello idraulico con inertia track e decoupler [10]

Il *decoupler* è un elemento interno flottante che permette di disaccoppiare l'*inertia track* e consentire in tal modo il passaggio del fluido attraverso un percorso differente. Questo accorgimento consente al tassello di avere un comportamento dipendente dall'ampiezza dell'eccitazione esterna.

Se si considera un tassello privo di *decoupler* sollecitato con una forzante generica, il fluido percorre l'*inertia track*, riempiendo e svuotando alternativamente le due camere. Al crescere della frequenza eccitatrice si genera uno smorzamento aggiuntivo da parte dell'*inertia track* che fa aumentare la rigidità dinamica del tassello come appare in Figura 2.19. Questo effetto, indesiderato, viene attenuato introducendo all'interno del sistema il *decoupler*. In presenza di eccitazioni con ampiezze ridotte, cioè con elevate frequenze, il fluido passa per il *decoupler*, riducendo in tal modo la rigidità dinamica [14].

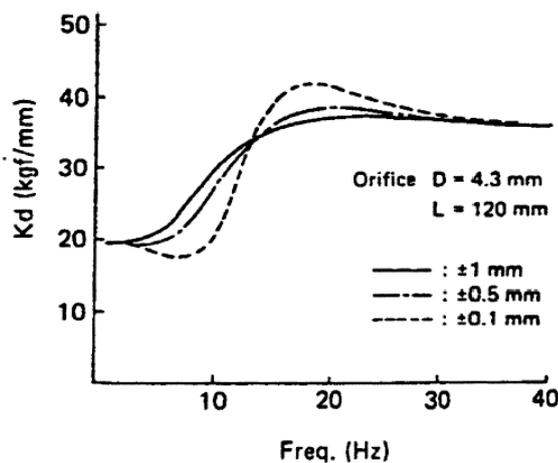


Figura 2.19: Rigidezza dinamica di un tassello idraulico senza decoupler [15]

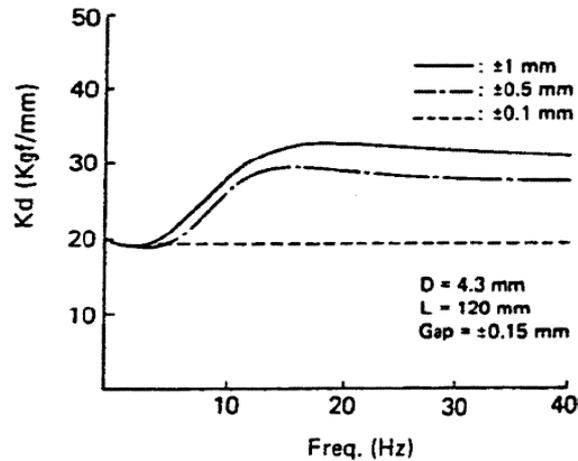


Figura 2.20: Rigidezza dinamica di un tassello idraulico con decoupler [15]

Il decoupler non elimina totalmente l'aumento di rigidezza indesiderato alle alte frequenze eccitatrici, bensì sposta tale effetto a frequenze più elevate che rappresentino dei range di lavoro che non interessano il tassello.

2.2.3 Supporti passivi

Sia i tasselli elastomerici che i tasselli idraulici rientrano nella categoria di supporti passivi; questa classe comprende tutti quei supporti privi di un qualsivoglia organo attuatore che vada ad interagire con il tassello stesso.

Questo comporta che parametri caratteristici come rigidezza e smorzamento sono pressochè invariabili con la forzante. Una volta effettuato il *tuning* del tassello, le caratteristiche di quest'ultimo risultano ottimizzate solo ed esclusivamente per un dato tipo di "isolamento obiettivo" a certe frequenze [1].

Questa tipologia di tasselli è indicata per ottenere un supporto del gruppo propulsore non troppo performante, ma che allo stesso tempo, non abbia costi elevati.

2.2.4 Supporti semi-attivi

In tale categoria rientrano i supporti passivi, quasi sempre idraulici, che sono stati opportunamente modificati al fine di avere al loro interno degli elementi regolabili; in tal modo diviene possibile adattare il tassello a differenti condizioni di lavoro andando ad agire su tali organi di regolazione [1].

Il sistema di adattamento dei parametri viene comandato generalmente con un controllo in anello aperto, che rappresenta il sistema più semplice di controllo.

Si fa ricorso a tale classe di supporti per migliorare le performance relativamente al range delle basse frequenze; per le alte frequenze si demanda tale funzione ai supporti di tipo attivo.

I parametri su cui si gioca per riadattare il tipo di supporto sono rigidezza e smorzamento, anche se, a livello di realizzabilità costruttiva, l'unico parametro realmente modificato è lo smorzamento.

2.2.5 Supporti attivi

Come anticipato nel sottoparagrafo 2.2.4, per migliorare l'efficienza dell'isolamento dalle vibrazioni nel range delle alte frequenze, si ricorre ad una soluzione tecnologicamente più complessa rispetto a quelle precedentemente descritte. Si tratta di tasselli passivi, sia elastomerici che idraulici, accoppiati con un attuatore, un sensore ed un sistema di controllo elettronico in anello chiuso [16][17].

Questa tipologia scongiura i carichi di lavoro più critici; essa permette infatti di ottenere un continuo adattamento del tassello rispetto alle forzanti esterne che devono essere mitigate.

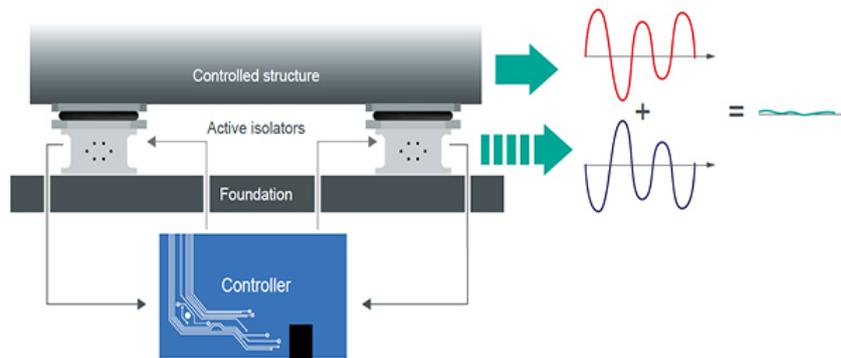


Figura 2.21: Schema di funzionamento di un supporto attivo [1]

3

DESCRIZIONE BANCO

Il presente Capitolo ha il compito di fornire una panoramica sulle caratteristiche tecniche del banco utilizzato per la campagna di prove, oltre a prefissarsi l'obiettivo di esplicitare il funzionamento dello stesso. A questo si aggiunge una breve trattazione di come avviene il montaggio del componente in esame sul banco e della prassi preliminare di compensazione della massa della staffa prima di passare ai test veri e propri di caratterizzazione statica e dinamica sul componente.

3.1 BANCO DI PROVA

Il banco adoperato per questa campagna di prove è l'MTS 833 (Figura 3.1), sviluppato dal fornitore MTS [18]; questo sistema è stato progettato per soddisfare e per far fronte alle esigenze di particolari test dell'industria automobilistica.

In particolare, il modello 833 "*triaxial Elastomer Test System*" fa parte della seconda generazione di sistemi di prova triassiali finalizzati all'esecuzione di test di caratterizzazione e di fatica di materiali e componenti elastomerici [19]. Si tratta di un banco triassiale in quanto sono presenti tre attuatori mutuamente ortogonali che possono essere sia comandati in forza sia in spostamento.



Figura 3.1: Banco prova MTS 833 [19]

Il banco inoltre si presta anche all'utilizzo di un pacchetto software opzionale che riproduce accuratamente i dati di carico provenienti da acquisizioni reali sui tre assi; pertanto, con il software *MTS Component Remote Parameter Control (RPC)* o *Component RPC*, questo sistema fornisce una risorsa per effettuare test di fatica e durata.

I range di lavoro nominali del banco sono sintetizzati e riportati in Tabella 3.1; si evince dunque come questa tecnologia è ampiamente utilizzata per testare i supporti del motore, ma è anche adatta per altre esigenze di simulazione triassiale che richiedono eccitazione in un intervallo di frequenza compreso tra 0.0 e 80 Hz.

La capacità di forza del sistema è di 25 kN su ogni asse e lo spostamento è di 25 mm su ogni asse. Le forze statiche e dinamiche trasmesse al campione possono essere misurate durante tutte le fasi della prova di fatica e di caratterizzazione.

Range nominale di frequenze	Escursione nominale forze	Escursione nominale spostamenti
0 ÷ 80Hz	±25kN	±25mm

Tabella 3.1: *Principali range di lavoro nominali del banco*

Come output è possibile leggere:

- Segnali di forza nel dominio del tempo;
- Segnali di spostamento nel dominio del tempo;
- Rigidezze e smorzamenti nel dominio delle frequenze;
- Velocità e accelerazioni nel dominio del tempo;
- Varie funzioni di risposta in frequenza (FRF).

3.2 SCHEMA DEL BANCO PROVA

In figura 3.2 è riportato lo schema che esplica i principali componenti presenti sul banco, in tale paragrafo si focalizza l'attenzione soprattutto sulla parte sensoristica del sistema, quella parte cioè che consente di ottenere la lettura dell'output.

Ognuno dei tre attuatori dispone di un LVDT (*linear variable displacement trasducer*), ciò consente di avere in output una lettura dei segnali di spostamento nel dominio del tempo.

Assolve poi, alla stessa funzione, ma come lettura di segnali in forza, la cella di carico che fornisce dunque misure multiassiali simultanee (F_x , F_y , F_z).

Inoltre tramite opportuna scheda di acquisizione esterna è possibile collegare strumenti addizionali quali accelerometri, estensimetri e termocoppie.

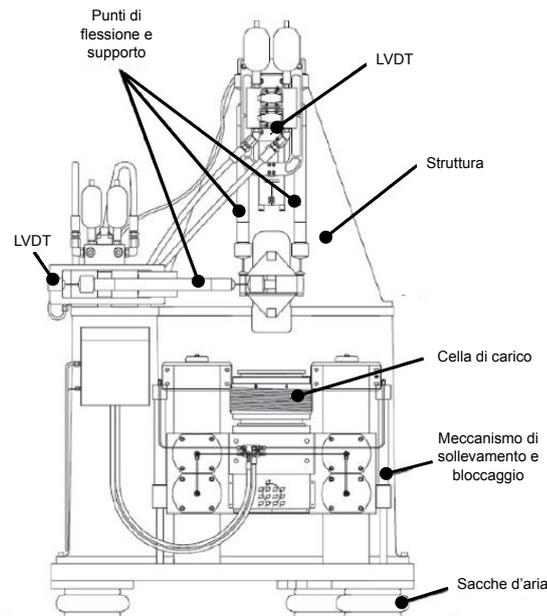


Figura 3.2: Schema e componenti del banco MTS 833

Come visibile dalla Figura 3.2 vi è un meccanismo di sollevamento e bloccaggio: i sollevatori e le serrature idrauliche controllano la testa trasversale al fine di avere un facile montaggio del campione e un facile accesso allo spazio di prova.

3.3 STRUMENTAZIONE PER PROVE IN TEMPERATURA

Oltre alle normali prove effettuate a temperatura ambiente, è possibile svolgere anche test a temperatura controllata; queste prove possono essere condotte, come nel caso dell'attività svolta in [1] mediante l'accoppiamento del banco con un guscio climatico. Per quanto concerne la presente attività invece si è utilizza una nuova strumentazione che prevede l'utilizzo del vacuum bagging film in quanto il guscio climatico precedentemente citato è momentaneamente oggetto di revisione e dunque inutilizzabile. Nel paragrafo viene descritto dapprima il funzionamento dell'accoppiamento del banco al guscio climatico e successivamente quello con il vacuum bagging film in quanto quest'ultimo risulta una semplificazione del primo.

3.3.1 Guscio climatico

Il guscio climatico circonda il provino, isolandolo dall'ambiente esterno. La cella climatica impone un flusso d'aria ad una certa temperatura a cui il provino è sottoposto. Essa consente di effettuare delle prove in un range di temperatura che va dai -40°C ai $+150^{\circ}\text{C}$. Il sistema è costituito da:

- cella climatica;
- guscio climatico;

- unità di condizionamento remoto;
- tubi di collegamento;
- termocoppia;
- sistema di tenuta pneumatico.

Il guscio (Figura 3.3) consiste in un box in materiale metallico coibentato internamente. Le dimensioni interne sono 436 mm di larghezza per 468 mm di profondità. L'altezza è 268 mm sul lato destro della camera e 199 mm sulla sinistra. Porta e finestra consentono l'ispezione visiva [19].



Figura 3.3: Dettaglio cella climatica con sistema di riferimento del banco [1]

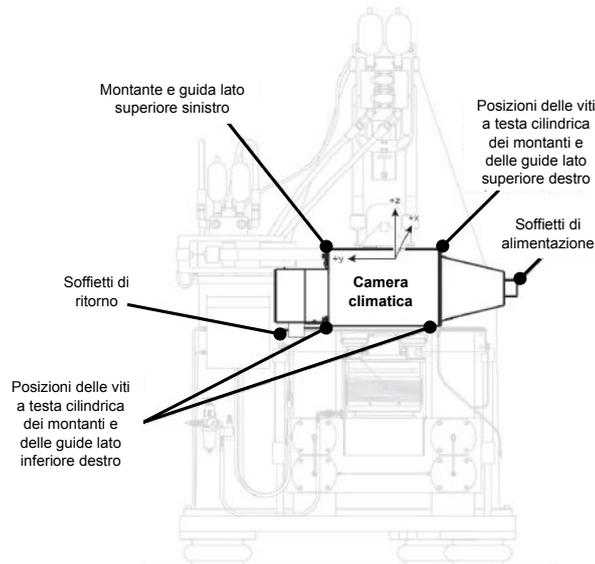


Figura 3.4: Collocamento cella climatica sul banco [1]

La Figura 3.4 rappresenta uno schema dell'accoppiamento del box con il banco; insieme al guscio, sono presenti anche gli altri componenti di interfaccia con il banco. Il montaggio del guscio sul banco prevede che esso venga calzato sulla cella di carico facendo combaciare la sezione tubolare all'altezza della camera pneumatica, presente sulla cella di carico stessa. Lo scopo della camera pneumatica, una volta gonfiata, è

quello di andare ad isolare in maniera rigorosa l'ambiente di test facendo sì che non vi siano trafile di aria che comporterebbero variazioni della temperatura imposta durante la prova in oggetto. Nonostante vi sia garanzia della tenuta precedentemente descritta, vi sono ulteriori fattori che provocano delle deboli fluttuazioni termiche quali, ad esempio, la conduzione attraverso le pareti metalliche sebbene queste ultime siano coibentate. Tuttavia un controllo retroattivo, possibile grazie alla lettura della termocoppia, consente il mantenimento costante della temperatura impostata.

3.3.2 Vacuum bagging film

Come anticipato nell'incipit del paragrafo, nel presente lavoro di tesi al fine di svolgere le prove alle diverse temperature controllate si è sostituito il guscio climatico realizzando un ambiente attorno alla torque rod in prova attraverso un *Vacuum bagging film* (Figura 3.2). Il funzionamento è esattamente lo stesso descritto per il guscio climatico. Tale sistema non risulta coibentato a differenza del guscio climatico; tuttavia il controllo retroattivo, possibile grazie alla lettura della termocoppia, consente il mantenimento costante della temperatura impostata.



Tabella 3.2: *Bielletta in prova con Vacuum bagging film*

Nello specifico si è utilizzato il VACFILM 800G. Esso è costituito da materiale idrofilo. L'umidità e l'acqua agiscono come plastificanti. Il livello di contenuto di umidità è quindi un fattore importante per le prestazioni. Tutti i film di nylon assorbono l'acqua, maggiore è il contenuto di umidità tanto più divengono flessibili. Al contrario, a livelli di umidità inferiori la flessibilità è limitata [20].

PROPERTIES			
Maximum Use Temperature	204°C (400°F)		
Color	Green		
Tensile strength at break (ASTM D882)	Transverse direction	60MPa	8702PSI
	Machine direction	65MPa	9427PSI
Elongation at break (ASTM D882)	Transverse direction	310%	
	Machine direction	330%	
Yield	17.4m ² /kg	9.44yd ² /lb	
AVAILABILITY			
Thickness	50, 75 and 100µm	0.002, 0.003 and 0.004in	
Roll weight	Up to 45kg	Up to 100lbs	
Widths	Up to 7m (open)	Up to 276in (open)	
Formats available	Sheet (SHT) Layflat tube (LFT), V-sheet(LTX)		

Tabella 3.3: *Specifiche tecniche Vacuum bagging film [20]*

3.4 SISTEMI DI RIFERIMENTO: BANCO, VETTURA, TORQUE ROD

Nella presente sezione verranno analizzati i tre principali sistemi di riferimento:

- sistema di riferimento del banco;
- sistema di riferimento della vettura;
- sistema di riferimento della bielletta in prova.

BANCO PROVA : Il banco possiede un proprio sistema di riferimento destrorso, le cui direzioni sono rappresentate in Figura 3.5.

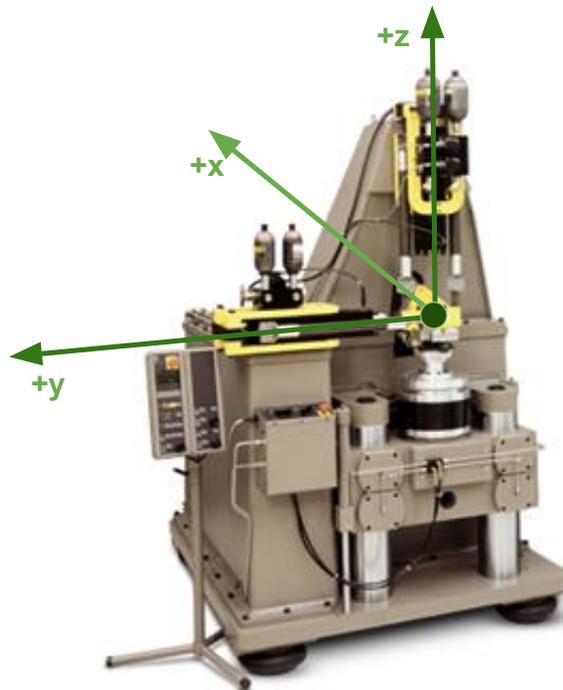


Figura 3.5: Sistema di riferimento del banco

VETTURA : Oltre al sistema di riferimento del banco, è fondamentale tener presente anche il sistema di riferimento relativo alla vettura schematizzato in Figura 3.6. Il sistema di coordinate principale è il sistema di coordinate globale del veicolo; i sistemi di coordinate secondari sono costituiti invece da coordinate locali degli isolatori e coordinate locali del gruppo propulsore.

Il sistema di riferimento della vettura esplica i seguenti gradi di libertà:

- X: asse longitudinale della vettura. La direzione positiva segue il verso di retromarcia del veicolo;
- Y: asse laterale della vettura. La direzione positiva è diretta a destra del guidatore;
- Z: asse verticale della vettura. La direzione positiva è quella uscente dall'abitacolo, vale a dire quella che punta al tettuccio della vettura stessa;
- R_X : asse di rollio. Rappresenta la rotazione intorno all'asse X del veicolo;

- R_Y : asse di beccheggio. Rappresenta la rotazione intorno all'asse Y del veicolo;
- R_Z : asse di imbardata. Rappresenta la rotazione intorno all'asse Z del veicolo.



Figura 3.6: Sistema di riferimento della vettura

BIELLETTA : Infine esiste un terzo sistema di riferimento che è quello relativo al componente (nel caso specifico la bielletta) ed è tale da essere coerente con il sistema di riferimento vettura, infatti in Figura 3.7, dove è rappresentato il componente nella posizione di montaggio su vettura, si constata facilmente che:

$$x_{Bielletta}^+ = x_{Vettura}^+ \quad (3.1)$$

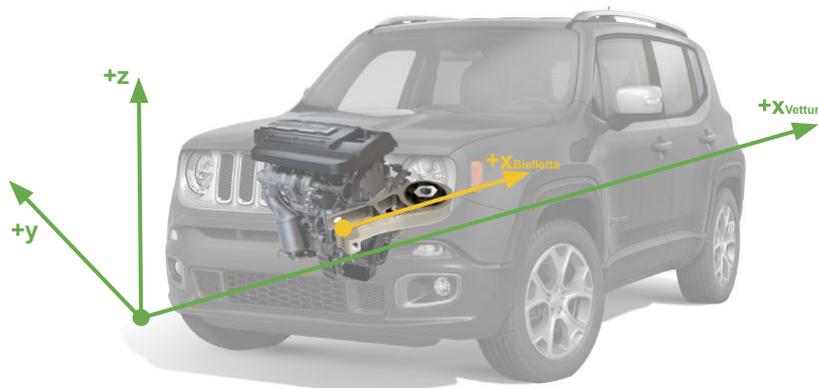


Figura 3.7: Sistema di riferimento della bielletta

Per una corretta esecuzione delle prove occorre montare il componente in modo tale che la sua orientazione sul banco coincida con quella all'interno della vettura. Tuttavia non è sempre possibile effettuare un montaggio tale che le direzioni delle attuazioni provenienti dal banco siano coincidenti con le direzioni delle sollecitazioni che il componente di EMS assorbe quando è montato su vettura [1]. Ovvero, sostanzialmente, il sistema di riferimento del componente può non coincidere con quello del banco; in questi casi bisogna montare le attrezzature per come è consentito farlo e successivamente, durante la fase di setup della prova, assegnare a ciascuna direzione il comando opportuno [1]. È questo il caso della bielletta, il cui montaggio viene trattato in maniera approfondita nel paragrafo 3.4.1.

3.4.1 Sistemi di riferimento bielletta e banco

Nel caso della torque rod, il sistema di riferimento locale è riportato in Figura 3.8 insieme alle indicazioni su come il componente di prova deve essere montato sul banco.

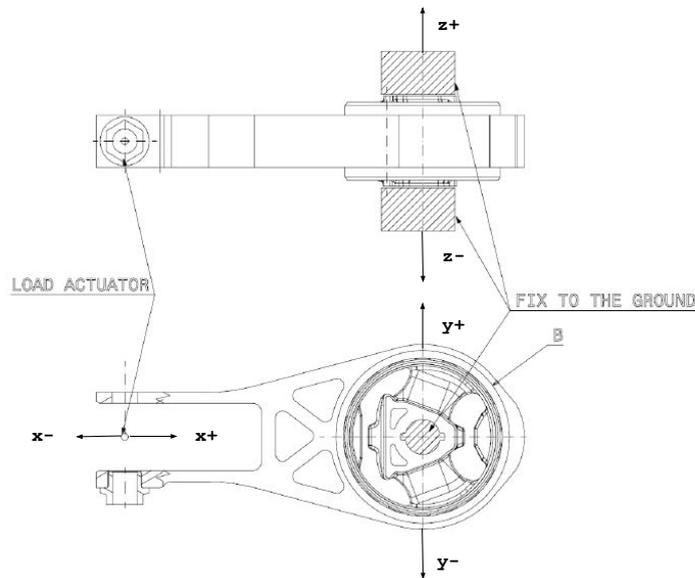


Figura 3.8: Sistema di riferimento locale della torque rod

La direzione principale di sollecitazione della torque rod è quella lungo l'asse x . Tuttavia le forcelle di supporto, necessarie per l'allestimento della torque rod sul banco, consentono il montaggio del componente in maniera tale che l'asse principale sia allineato con l'asse z del banco.

In altri termini, ciò implica che l'asse x del sistema di riferimento del componente di EMS risulti allineato all'asse z del sistema di riferimento del banco di prova con i rispettivi versi invertiti, ne segue che:

$$z_{\text{Banco}}^+ = x_{\text{Bielletta}}^- \quad (3.2)$$

I segnali strada che verranno acquisiti devono dunque essere riprodotti sul banco tenendo conto di tale relazione che sussiste tra i due sistemi di riferimento.

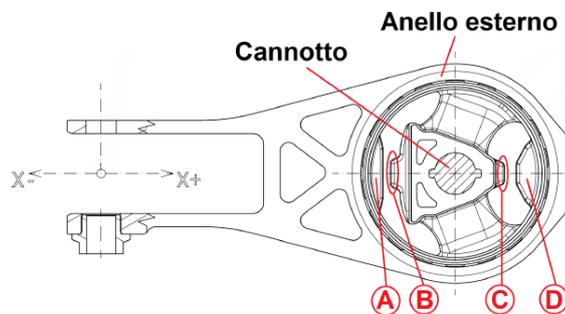


Figura 3.9: Dettaglio punti di contatto in marcia avanti e retromarcia [1]

Considerando la bielletta montata su vettura ($x_{\text{Bielletta}}^+ = x_{\text{Vettura}}^+$) in condizioni di lavoro normali e facendo riferimento alla Figura 3.9 si deduce che:

- se l'autovettura è in marcia in avanti la torque rod lavora in trazione ($x_{\text{Bielletta}}^-$), il canotto risulta collegato al telaio mentre le forcelle solidali all'anello esterno realizzano la connessione con il motore; con il veicolo in marcia avanti la luce più ampia (tra C e D) fra boccola e staffa si va a ridurre fino a quando il gommato presente sull'anello esterno (D) va in battuta con il gommato del canotto (C).
- se l'autovettura procede nel senso di retromarcia: valgono le medesime considerazioni fatte per la marcia in avanti ma considerando i versi invertiti, la torque rod lavora in compressione, la luce in questione è quella più piccola (tra A e B), e si va a ridurre fino a quando il gommato presente sull'anello esterno (A) va in battuta con il gommato del canotto (B).

Da tali considerazioni e dalle condizioni con cui avviene il montaggio della torque rod sul banco (Figura 3.10), si deduce che la condizione di trazione di tale componente di EMS ($x_{\text{Bielletta}}^-$) corrisponda alla direzione di "compressione" del banco (z_{Banco}^+).

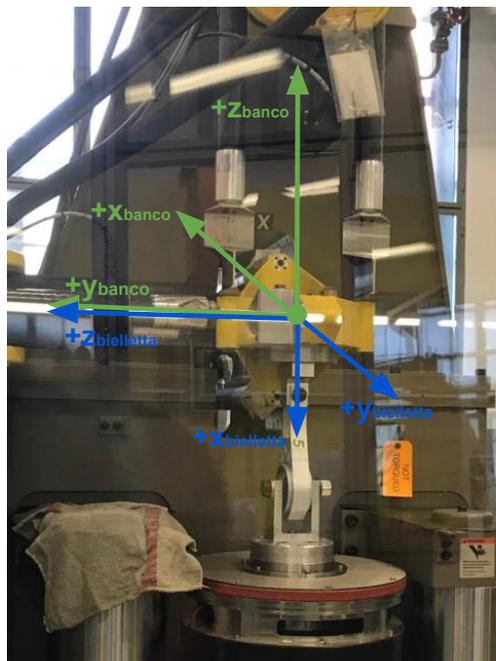


Figura 3.10: Relazione tra sistemi di riferimento di banco e bielletta

3.5 MONTAGGIO SU BANCO DEL COMPONENTE DA TESTARE

Per realizzare il collegamento tra il banco e il componente da testare è necessario ricorrere all'ausilio di elementi intermedi supplementari che da un lato sostengono il pezzo e ne consentono il vincolo al banco e dall'altro permettono la trasmissione del carico direttamente dal banco al provino.

Si riporta in Figura 3.11 una configurazione tipo di montaggio.

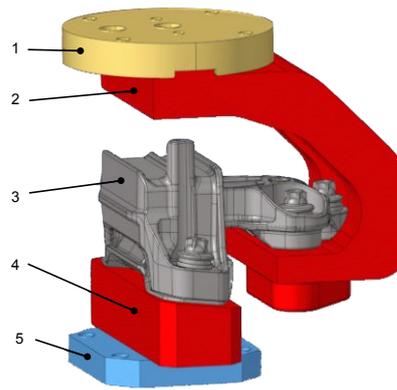


Figura 3.11: Schema configurazione attrezzatura e tassello generico

Di seguito si individuano i vari elementi che compongono il blocco montato sul banco, la numerazione rispetta le indicazioni in Figura 3.11:

1. Upper Plate: Piatto superiore;
2. Upper Clamp: Supporto superiore;
3. Componente da testare;
4. Lower Clamp: Supporto inferiore;
5. Lower Plate: Piatto inferiore.

Si riporta invece in Figura 3.12 una configurazione tipo di montaggio relativamente ad una TR, senza cella climatica installata.

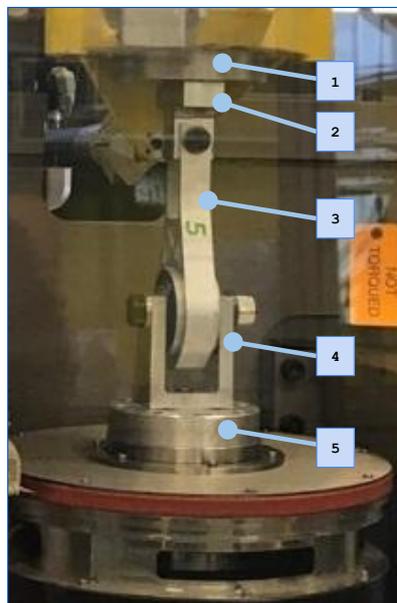


Figura 3.12: Schema configurazione attrezzatura e torque rod

Lo schema di montaggio per la bielletta in esame, senza cella climatica installata, riportato in Figura 3.12 consiste in:

1. Piatto superiore;

2. Staffa superiore;
3. Bielletta (Torque rod - TR);
4. Forcella inferiore;
5. Piatto inferiore.

3.6 COMPENSAZIONE DELLA MASSA

L'elemento di supportazione motore in analisi si interfaccia con la macchina di prova tramite una staffa di supporto specifica per il componente considerato. La staffa cambia a seconda del componente di EMS; cioè a componenti diversi corrispondono staffe differenti.

Il montaggio sulla macchina della staffa di supporto comporta, dunque, prima ancora che l'elemento di EMS venga coinvolto nella prova, l'esecuzione preliminare di una caratterizzazione dinamica della sola staffa. In tal modo è possibile evitare che la prova eseguita a componente installato risulti "inquinata" dai risultati ottenuti per la sola staffa. Tale procedura è di fondamentale importanza per due ragioni:

- in primo luogo in quanto la massa della staffa è confrontabile con quella dell'elemento di EMS, che deve essere l'unico oggetto in analisi durante la prova;
- in secondo luogo perché lo spettro in frequenza della staffa non deve in alcun modo inquinare lo spettro in frequenza del solo componente di EMS.

In altri termini si vuole che il banco percepisca durante l'esecuzione dei test solo ed esclusivamente la massa del tassello e non quella della staffa di supporto e che le frequenze proprie della staffa non intralcino la caratterizzazione dinamica del componente di EMS. Il secondo aspetto equivale a richiedere di portare le frequenze proprie della staffa all'infinito, in modo che non appaiano nel campo di utilizzo del banco.

$$\omega_{\text{staffa}} = \sqrt{\frac{k}{m_{\text{staffa}}}} \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

$$m_{\text{staffa}} \rightarrow 0 \quad (3.4)$$

Dove:

- ω_{staffa} è la prima frequenza di risonanza della staffa [rad/s];
- k è la rigidezza della struttura [N/m];
- m_{staffa} è la massa della staffa [kg].

Se le frequenze proprie della staffa vengono portate all'infinito si ha che la massa della staffa debba essere ridotta a valori infinitesimi (equazione 3.4).

Se la massa della staffa viene portata a zero, allora per il banco è come se fosse presente il solo componente di EMS, coerentemente con l'intento precedentemente descritto, come dimostra la seguente relazione matematica:

$$\omega_{\text{staffa+EMS}} = \sqrt{\frac{k}{m_{\text{staffa}} + m_{\text{EMS}}}} \quad (3.5)$$

$$m_{\text{staffa}} \rightarrow 0 \Rightarrow \omega_{\text{staffa+EMS}} \rightarrow \sqrt{\frac{k}{m_{\text{staffa}}}} = \omega_{\text{EMS}} \quad (3.6)$$

Dove:

- $\omega_{\text{staffa+EMS}}$ è la frequenza di risonanza della staffa e del componente di EMS [rad/s];
- k è la rigidezza della struttura [N/m];
- m_{staffa} è la massa della staffa [kg].
- m_{EMS} è la massa del componente di EMS [kg].

Ovviamente non è possibile realizzare una staffa di massa infinitesima, quindi l'azzeramento della massa della staffa verrà perseguito mediante una compensazione di quest'ultima, ovvero mediante una sottrazione.

La caratterizzazione dinamica della staffa consiste nel far percepire al banco la staffa come se quest'ultima avesse massa nulla, quindi si parlerà, anche se impropriamente, di *compensazione e azzeramento della massa* di suddetta staffa.

Per far ciò, si plotta nel dominio delle frequenze la Funzione di Risposta in Frequenza dell'inversa di *inertanza*, funzione che esplica il rapporto tra l'accelerazione rilevata lungo l'asse e la forza registrata lungo la stessa direzione. In particolare, l'accelerazione si ricava per doppia derivazione dello spostamento letto dagli LVDT locati sull'attuatore, la forza è rilevata mediante la cella di carico su cui è appoggiata l'attrezzatura.

Con lo strumento *oscilloscopio*, quindi si imposta la videata come mostrato nella Figura 3.13.

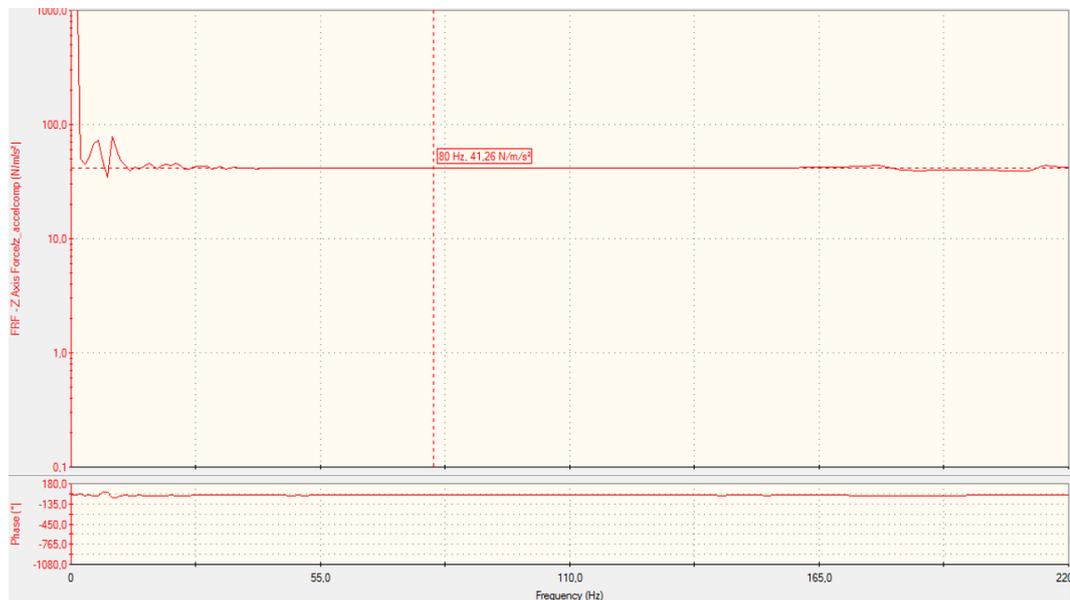


Figura 3.13: Massa della staffa prima della compensazione

Da Figura 3.13 si nota come la massa (il cui valore numerico è indicato nel rettangolo in rosso) è pressoché costante al variare della frequenza, come è logico aspettarsi. Tuttavia una lettura più precisa della massa va fatta alla frequenza di 80 Hz, perché 80 Hz rappresenta la frequenza massima a cui può lavorare il banco, quindi individua per quest'ultimo la condizione di lavoro più gravosa nella quale occorre scongiurare,

maggiormente rispetto alle altre frequenze del range $0 \div 80$ Hz, la condizione della risonanza. Pertanto con il valore della massa letto a 80 Hz si entra nel campo "Massz" della finestra "Calculation Parameters" dello "Station Manager" del banco e lo si inserisce manualmente con il segno negativo (dato che per compensare una massa, occorre sottrarla).



Figura 3.14: Massa della staffa dopo la compensazione

Dopo la compensazione la massa raggiunge valori molto prossimi allo zero indice del fatto che la compensazione sia andata a buon fine.

In conclusione, poiché viene realizzata una staffa dedicata per ciascun elemento di supporto è necessario eseguire la caratterizzazione dinamica di ciascuna staffa montata su macchina; è consigliabile poi salvare la suddetta caratterizzazione dinamica per renderla disponibile in futuro, a parità di componente in analisi.

4

ACQUISIZIONE E RIPRODUZIONE SEGNALI - RPC

4.1 ACQUISIZIONE E RIPRODUZIONE DEL SEGNALE

L'acquisizione dei segnali strada è avvenuta per mezzo di una vettura allestita con 150 differenti sensori. Il veicolo di test ha eseguito una serie di percorsi, dettati da normativa, tali da poter coprire la maggior parte di condizioni strada che il veicolo commercializzato si troverà ad affrontare durante l'arco della sua vita.

I percorsi trattati per questa attività sono in totale nove, ciascuno di essi possiede una propria sigla distintiva, preceduta da un acronimo che indica invece le condizioni di carico della vettura. Di seguito gli acronimi adoperati:

- FPL (Full Pay-Load): Condizioni di carico massime per l'autovettura;
- LAP (Light As Possible): Condizioni di carico minime per l'autovettura;
- OR (Off-Road): Condizioni di carico con 2 passeggeri e 70 kg nel bagagliaio.

Come detto precedentemente, oltre all'indicazione sulle condizioni di carico della vettura, a ciascun percorso è associata una sigla specifica che esplica il tratto di pista sul quale viene effettuata la prova su strada. In Tabella 4.1 ne viene brevemente fornita una descrizione.

Condizioni di carico vettura	Sigla	Descrizione percorso
FPL (Full Pay-Load)	PABA	Pavè belga
	OB-PROC	Onda breve - Procaccini
	PORF - PROC	Pavè svizzero italiano - Procaccini
	POT	Buca
LAP (Light As Possible)	PABA	Pavè belga
	OB-PROC	Onda breve - Procaccini
	PORF - PROC	Pavè svizzero italiano - Procaccini
	POT	Buca
OR (Off-Road)	TLANE	Truck lane

Tabella 4.1: Percorsi strada adoperati per lo studio

Le acquisizioni effettuate, anche dette RLDA (Road Load Data Acquisition) signals, rappresentano soltanto dei segnali grezzi di partenza, che necessitano, pertanto, di una serie di operazioni preliminari, affinché venga assicurata una loro riproduzione sul banco quanto più fedele possibile. Sulla strumentazione della torque rod montata sul banco si vuole leggere un segnale (RISPOSTA o RSP) che sia il più possibile simile a quello proveniente dalla prova su strada (DESIDERATO o DES). L'obiettivo preliminare dunque è quello di rendere coincidenti il segnale desiderato e la risposta così da

poter effettuare correttamente le prove. Se il sistema di attuazione del banco seguisse una legge lineare e se i pezzi in prova fossero infinitamente rigidi, allora si potrebbe comandare il banco direttamente con il segnale desiderato, ottenendo una risposta pressoché coincidente con il desiderato stesso, in un rapporto 1:1. La non linearità del banco, oltre ai pezzi in prova dotati di elastomeri, fa sì che il trasferimento del segnale non sia 1:1, ovvero che, utilizzando il segnale rilevato su strada come DRIVE, non venga riprodotto identico sulla torque rod del desiderato. Pertanto diventa fondamentale la valutazione della Funzione di Risposta in Frequenza del banco (FRF), che, come ogni FRF, correla tra loro il segnale di ingresso a un sistema ed il segnale di uscita dallo stesso. Tale FRF deve essere tale da:

- tener presente la time history della prova su strada (DESIDERATO);
- generare un adeguato comando per gli attuatori del banco (DRIVE).

Con la condizione che: il segnale drive sia proprio quello tale da generare una risposta il più possibile simile al desiderato (ciò equivale a richiedere che lo scarto tra la risposta e il desiderato sia inferiore al 10%). Quindi le incognite del problema sono la Funzione di Trasferimento (FRF) e il segnale di comando o drive. L'obiettivo risiede nel trovare i DRIVE tali da generare RISPOSTE il più possibile simili ai DESIDERATI, ovvero i SEGNALI STRADA. A tal proposito, si determina la FRF tramite il legame tra un DRIVE DI RUMORE BIANCO e la sua RISPOSTA e si impiega la FRF trovata per generare i DRIVE corrispondenti ai DESIDERATI.

Lo strumento che consente di fare ciò è un'applicazione che si basa sul controllo remoto dei parametri: R(emote) P(arameter) C(ontrol).

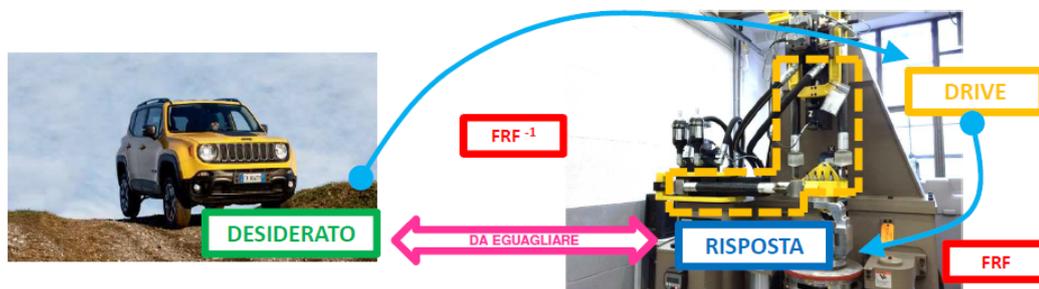


Figura 4.1: Correlazioni tra segnali

4.2 SOFTWARE RPC

Per il trattamento dei segnali menzionati precedentemente è stato utilizzato il software RPC (*Remote Parameter Control*). Esso è suddiviso in differenti sezioni, ciascuna delle quali ha particolari funzioni; di seguito le 4 sezioni principali che sono state adoperate per questo lavoro, e le rispettive funzionalità:

- *Setup* - per definire canali di comando/lettura e parametri relativi alle acquisizioni;
- *Analyze* - per effettuare operazioni preliminari sui segnali grezzi ed ottenere i DES;

- *Model* - per ricercare le FRF;
- *Simulate* - per ricercare i DRIVE.

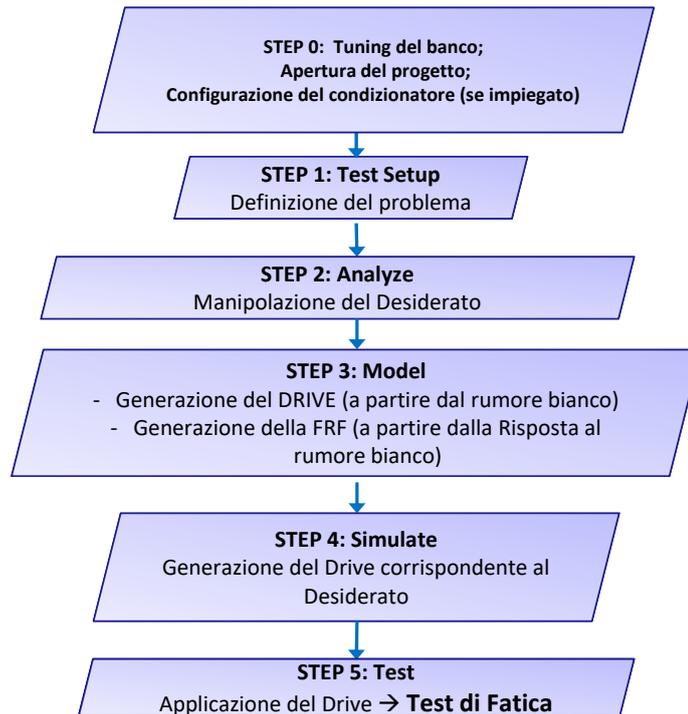


Figura 4.2: Step RPC

Il problema esplicito nel paragrafo precedente risulta caratterizzato da 4 segnali, di cui 2 noti (DES e RSP) e 2 da determinare (FRF e DRIVE). Per risolverlo, si suddivide il problema in due parti e considerando la prima relazione, quella tra DES e DRIVE si sfrutta la definizione di Funzione di Trasferimento:

$$H(\Omega) = \frac{\text{Output signal}(\Omega)}{\text{Input signal}(\Omega)} \quad (4.1)$$

che, applicata al nostro problema, diventa:

$$H(\Omega) = \frac{\text{DES}(\Omega)}{\text{DRIVE}(\Omega)} \quad (4.2)$$

da cui si può esplicitare il DRIVE :

$$\text{DRIVE}(\Omega) = \frac{\text{DES}(\Omega)}{H(\Omega)} = \text{DES}(\Omega) \cdot H^{-1}(\Omega) \quad (4.3)$$

Dall'ultima relazione ottenuta si è giunti alla definizione del DRIVE incognito da ottenere; tuttavia $H(\Omega)$ non è nota, quindi anche la sua inversa è incognita. Per trovare $H(\Omega)$, occorre risolvere la seconda parte del problema sfruttando l'altro dato noto, ovvero la RSP. In particolare, si costruisce un problema analogo a quello appena descritto: tramite la sezione *Model* di RPC si crea un DRIVE di rumore bianco (segnale casuale, ma noto perchè generato), dopodiché, si legge il segnale RSP dalla sensoristica del banco. A questo punto, applicando la medesima definizione di Funzione di

Trasferimento vista prima e sfruttando la conoscenza di entrambi i segnali Drive e Risposta (il primo costruito, il secondo, letto), si ricava:

$$H(\Omega) = \frac{\text{Output signal}(\Omega)}{\text{Input signal}(\Omega)} = \frac{\text{Risposta}(\Omega) \text{ al rumore bianco}}{\text{Drive}(\Omega) \text{ di rumore bianco}} \quad (4.4)$$

A questo punto nota la $H(\Omega)$ è nota anche la sua inversa. Dopo aver calcolato l'inversa è possibile risalire ai DRIVE. In breve, eguagliando l'equazione 4.4 con 4.2 si ottiene:

$$\text{DRIVE}(\Omega) = \text{DES}(\Omega) \cdot \frac{\text{Drive}(\Omega) \text{ di rumore bianco}}{\text{Risposta}(\Omega) \text{ al rumore bianco}} \quad (4.5)$$

In sintesi dunque, i passaggi da svolgere per una corretta riproduzione del segnale strada su banco sono da effettuarsi in quest'ordine:

1. Operazioni generiche sui segnali grezzi per ottenere il DES;
2. Ricerca della FRF;
3. Ricerca del DRIVE che fornisca: $\text{RSP} \equiv \text{DES}$.

4.2.1 Setup

È la fase in cui viene effettuata la definizione del problema, ovvero vengono individuati:

- I parametri di frequenza;
- I segnali Drive: segnale di comando in forza del banco;
- I segnali Response: segnale letto dalla cella di carico del banco.

La combinazione del drive e della risposta definisce la forma della matrice rappresentativa della Funzione di Trasferimento.

Parametri di frequenza:

Nello specifico essi sono **Sample Rate**, **Nyquist**, **Delta F** e **Frame size** e vengono scelti come segue:

- L'utente sceglie il **Sample Rate** (Hz) in accordo con il teorema di Shannon, secondo il quale per un corretto campionamento del segnale è necessario che:

$$\text{Sample Rate} > 2 \cdot \text{max frequenza del segnale} \quad (4.6)$$

Considerando che le frequenze di lavoro non superano i 50 Hz, già un Sample Rate di 204,8 Hz può andar bene, ma il fornitore del banco consiglia di garantire un rapporto almeno pari a 5 tra il Sample Rate e la massima frequenza perchè le accelerazioni sono ricavate come doppia derivazione dello spostamento. Se la frequenza di campionamento fosse bassa si avrebbero pochi punti per ciclo relativamente allo spostamento e le derivate successive sarebbero affette da errore. Poiché bisogna effettuare una doppia derivazione si necessita di più punti, ovvero di una frequenza di campionamento più alta. Si opta dunque per un Sample Rate pari a **409.6 Hz**.

- La frequenza di **Nyquist**, che tiene conto della massima frequenza contenuta nel segnale, viene poi calcolata di conseguenza come la metà del Sample Rate ovvero pari a **204.8 Hz**.
- L'utente sceglie l'**Impulse Response** (s), sapendo che:

$$\Delta F = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\text{Impulse Response}} \quad (4.7)$$

$$\Delta F \simeq 0.1 \div 0.2\text{Hz} \quad (4.8)$$

Dove Delta F rappresenta la risoluzione in frequenza, ovvero la più piccola variazione in frequenza apprezzabile.

- Dal valore di Delta F ottenuto si avrà infine il **Frame Size**:

$$\text{Frame Size} = \frac{\text{Sample Rate}}{\Delta F} \quad (4.9)$$

Dall'equazione 4.9 è possibile notare che, a parità di Sample Rate, il Frame Size aumenta al diminuire di Delta F. Poiché il Delta F è tanto migliore quanto più è piccolo il suo valore, allora è lecito aspettarsi dei valori di Frame Size molto alti. Il **Frame Size** è il numero di linee spettrali (o punti): esso rappresenta una sorta di "dimensione di massima" per un ipotetico contenitore che dovrà ospitare il segnale considerato. Se la dimensione massima è molto grande e, in generale, di gran lunga più ampia rispetto al segnale che deve contenere, allora il software provvede, in automatico, a riempire il gap vuoto con l'ultimo valore del segnale mantenuto costante nel tempo, oppure con il valore nullo mantenuto costante nel tempo. Quindi il risultato di questa operazione è l'allungamento nel tempo del segnale considerato senza l'apporto di alcun valore aggiunto. Onde evitare questo abbondare di informazioni non significative e non richieste, si sceglie l'Impulse Response nell'ottica del compromesso tra un Delta F sufficientemente piccolo e un Frame Size non eccessivamente grande.

- Si sceglie dunque un **Delta F** pari a **0.2 Hz** e un **Frame Size** pari a **2048 pts**, quest'ultimo è scelto pari a 5 volte la frequenza di campionamento.

Si riportano in Tabella 4.2 in maniera compatta i valori scelti per i diversi parametri di frequenza precedentemente descritti.

Sample Rate (Hz)	è la frequenza di campionamento, inversa al periodo di campionamento; indica il numero di letture/rilevazioni effettuate in 1s	409,6 Hz
Nyquist (Hz)	deriva dal teorema di Shannon; tiene conto della massima frequenza contenuta nel segnale	204,8 Hz
Delta F (Hz)	è la risoluzione in frequenza, ovvero la più piccola variazione in frequenza apprezzabile	0,2 Hz
Frame Size (pts)	è il numero di linee spettrali (o punti) presenti nella frequenza di campionamento	2048 pts

Tabella 4.2: Parametri di frequenza - SETUP

4.2.2 Operazioni preliminari di analisi sui segnali strada acquisiti - *Analyze*

Poiché i segnali strada acquisiti sono grezzi essi necessitano di una serie di operazioni che hanno lo scopo di rendere il segnale più significativo ai fini della riproduzione della prova.

A tale scopo si usa la sezione *Analyze* di RPC. Ognuno dei percorsi acquisiti su strada viene sottoposto a delle operazioni preliminari che, generalmente, prevedono:

- Estrazione di canali;
- Ricampionamento a 409.6 Hz perchè le accelerazioni sono ricavate come doppia derivazione dello spostamento. Tale scelta è coerente con la Tabella 4.2, in tal modo si uniformano tra loro i segnali grezzi di partenza;
- Filtraggio (con filtro passa-basso solitamente a 50 Hz);
- Cambiamenti di segno (a seconda di come è orientato il pezzo in prova rispetto al banco);
- Unione di Time Histories;
- Taglio delle porzioni di solo rumore o delle porzioni che non corrispondono alla percorrenza del veicolo, ovvero a manovre esclusivamente di frenata o messa in moto.

Al termine di queste operazioni si ottiene quindi il segnale desiderato (DES) propriamente detto, che differisce dalla time history strada a causa di tutte le operazioni svolte su di esso.

Le operazioni effettuate per questo lavoro sono riportate in Tabella 4.3.

TOOL	Descrizione
IMPORTAZIONE	Importazione dei dati acquisiti (150 canali)
ESTRAZIONE DEL CANALE	Estrarre il canale relativo alla bielletta (CH90)
TAGLIO (CUT)	Eliminare i transitori iniziali e finali non significativi ai fini della prova
RICAMPIONAMENTO (RESAMPLE)	Ottenere una frequenza di campionamento di 409,6 Hz a partire da quella dei dati grezzi (1000 Hz)
FILTRAGGIO (FILTER)	Eliminare le frequenze superiori ai 50 Hz non significative ai fini della prova, con filtro passa basso da 0 a 50 Hz (0,6 in presenza di accelerometri)
AUTODAMAGE	Creazione di un segnale che abbia lo stesso danneggiamento di quello di partenza garantito al 98%±2%
Spettro in frequenza (SPECTRUM)	Eseguito al termine di ognuno dei precedenti tools: calcolo dello spettro in frequenza del segnale, ovvero trasformazione del segnale da Time History (segnale nel dominio del tempo) a Funzione di Risposta in Frequenza

Tabella 4.3: Successione delle operazioni svolte sui percorsi strada

Come è possibile notare da Tabella 4.3, nel caso particolare della attività sperimentale, oltre ai tool generalmente utilizzati, si è fatto ricorso al tool **AUTODAMAGE** che verrà descritto di seguito.

Autodamage:

Nel presente lavoro di tesi, come anticipato brevemente nel sommario, si vuole valutare la possibilità di utilizzare dei criteri isodanno per minimizzare i tempi-banco. In altri termini, si vuole ottenere, a partire dalla storia di carico integrale, una storia di carico isodanno, cioè che abbia un contenuto equivalente di danneggiamento rispetto al carico integrale.

La metodologia di definizione dello spettro equivalente è basata su due considerazioni di fondo, che contribuiscono e concorrono a ridurre i tempi di prova [21]:

1. un fattore di carico più elevato comporta un carico più elevato e quindi un danno maggiore.
2. un numero minore di occorrenze a un fattore di carico più elevato può provocare un danno maggiore rispetto a un numero più elevato di occorrenze con un fattore di carico minore.

Lo spettro originale viene quindi manipolato in modo da eliminare, con una vera e propria operazione di omissione, le occorrenze dei fattori di carico più bassi e in modo da aumentare, secondo un criterio di proporzionalità, la parte più significativa dello spettro, applicando uno o più coefficienti moltiplicativi [21]. Il risultato è uno spettro equivalente con meno occorrenze e più affaticante.

Il processo di manipolazione dello spettro è di tipo iterativo, in quanto si deve ottenere il compromesso migliore tra tempi di prova, severità e rappresentatività del nuovo spettro [21].

Il software RPC consente di ricavare rapidamente il segnale equivalente alla time history integrale attraverso il tool "autodamage". Come visibile da Figura 4.3 il tool prevede che l'utente inserisca una serie di input affinché si possa ottenere il segnale equivalente in output.

Figura 4.3: Parametri autodamage

Gli input risultano:

- **Desired Damage Retention:** nel caso specifico tale valore è posto pari a 98%. Ciò si vuole ottenere, a partire dalla storia di carico integrale, una storia di carico isodanno, cioè che abbia un contenuto equivalente di danneggiamento rispetto al carico integrale del 98%.
- **Tolerance:** la tolleranza sul 98% è posta pari al 2%. Ciò significa che il range di tollerabilità del processo iterativo risulta: $96\% \div 100\%$.

- **Iteration Number:** è il numero di iterazioni rispetto al quale si vuole che il software arrivi a convergenza. Tale fattore risulta variabile a seconda del segnale.
- **Taper Time:** generalmente il suo valore è basso, compreso in un range tra $0.2 \div 0.5s$. Rappresenta il tempo in cui, a valle del segnale ottenuto, la rampa raggiunge l'ultimo valore del segnale mantenuto costante nel tempo, oppure il valore nullo mantenuto costante nel tempo.
- **Window Size:** affinché si abbia un processo iterativo efficace, il segnale viene ripartito in più porzioni con una durata pari al Window Size. L'iterazione fino al raggiungimento della convergenza stabilita avviene per ciascuna di queste porzioni di segnale. Si è posto tale valore in un range tra $2 \div 3s$, ovvero un range mediamente grande al fine di limitare e contenere quanto più possibile il numero di iterazioni.

Al termine dell'applicazione di tale tool si ottiene dunque un segnale equivalente in termini di danneggiamento rispetto al segnale integrale di partenza con un grado di confidenza pari al $98\% \pm 2\%$.

Il segnale isodanno presenta delle ampiezze (Newton) maggiori e delle durate di gran lunga inferiori del segnale di partenza come visibile da Tabella 4.4.

Condizioni di carico vettura	Percorso	Tipo di segnale	Ampiezza Max (N)	Ampiezza Min (N)	Durata (s)	
FPL (Full Pay-Load)	PABA	Originale	4802	-3318	93	
		Autodamage	5028	-3623	30	
	OB-PROC	Originale	4954	-1088	95	
		Autodamage	4924	-2027	30	
	PORF-PROC	Originale	2040	-718	20	
		Autodamage	2482	-1357	10	
	POT	Originale	2253	-2063	13	
		Autodamage	2904	-2662	5	
	LAP (Light As Possible)	PABA	Originale	4135	-4822	75
			Autodamage	4357	-4390	25
OB-PROC		Originale	3793	-1871	80	
		Autodamage	3973	-2738	25	
PORF-PROC		Originale	2688	-1182	20	
		Autodamage	3252	-2056	10	
POT		Originale	2230	-2244	15	
		Autodamage	2710	-3084	5	
OR (Off-Road)		TLANE	Originale	3164	-1682	105
			Autodamage	3628	-2662	55

Tabella 4.4: Autodamage: confronto tra segnale originale e segnale isodanno

4.2.3 Procedura di ricerca della FRF - Model

In questa fase viene individuata la Funzione di Risposta in Frequenza del sistema banco-attrezzatura-componente; la sezione *Model* di RPC viene usata a tale scopo.

La ricerca viene effettuata mediante l'azionamento sequenziale degli attuatori secondo una forzante casuale (rumore bianco). Nel caso specifico questa operazione

si semplifica perché ai fini delle prove sarà di interesse soltanto l'asse Z del banco, pertanto esso sarà l'unico ad essere azionato in questo frangente.

Si delineano due scenari possibili a seconda della modalità di lettura della risposta: la prima modalità avviene attraverso lo strain gauge montato sulla bielletta, la seconda prevede l'uso della sensoristica del banco (cella di carico).

Per quanto concerne la presente attività si è fatto ricorso alla seconda modalità come riassunto in Tabella 4.5.

Nome FRF	Sensori applicati alla bielletta	Letture segnale risposta
FRF IISODANNO	-	cella di carico

Tabella 4.5: Funzione di trasferimento, FRF

Si parte dal riportare risposta al rumore bianco generato (letta sulla cella di carico integrata nel banco) al DRIVE che l'ha generata, viene così creata una FRF ($H(\Omega)$) contenente i rapporti tra input e output del sistema nella configurazione in cui esso si trova (considerando quindi la presenza del provino, delle attrezzature e di conseguenza le interazioni con il banco). L'approccio prevede che si intervenga su alcuni parametri di controllo quali:

- esponente del decadimento della FRF: esso dipende da quanto è rigido il gommatto del provino;
- ampiezza di sollecitazione del rumore bianco che deve essere quanto più confrontabile con l'ampiezza più grande del segnale della storia di carico;
- durata in secondi di applicazione del segnale di rumore bianco.

Si ricerca dunque la combinazione più calzante che riesca a descrivere il problema. Tale combinazione si ritiene raggiunta quando:

- il decadimento in ampiezza della FRF (segnale nel dominio della frequenza) risulta contenuto in un ordine di grandezza nell'intorno dell'unità (ovvero si hanno uscita ed ingresso del segnale in rapporto vicino all'unità) così da poter semplificare la successiva fase di ricerca del DRIVE;
- lo sfasamento ottenuto è tale da non causare eventuali inversioni di fase.

Il rispetto di queste condizioni porta ad ottenere degli andamenti ottimali di ampiezza e fase della FRF, come riscontrabile dallo spettro in frequenza della FRF IISODANNO definitiva, rappresentato in Figura 4.4.

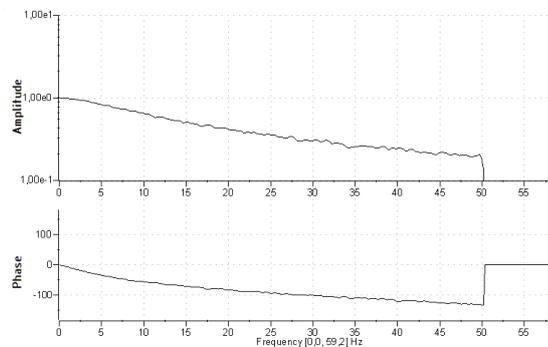


Figura 4.4: Spettro in frequenza FRF IISODANNO

4.2.4 Procedura di ricerca del DRIVE - *Simulate*

Nella sezione *Simulate* di RPC si abbandona il rumore bianco in favore dei segnali strada; per ciascuno di essi, occorre ricercare il DRIVE tale che la risposta letta sul banco coincida, il più possibile, con il desiderato; solo allora si potrà considerare conclusa la serie di operazioni necessarie alla riproduzione del segnale strada sul banco. Per ottenere il DRIVE appena menzionato si adopera la FRF ricavata precedentemente nella sezione *Model* (Tabella 4.5). Si consideri che in questa fase il segnale strada a cui si fa riferimento è il desiderato, frutto dell'editing del segnale strada grezzo di partenza avvenuto nella sezione *Analyze*.

Si procede secondo questi step:

1. Selezione del DES da riprodurre sul banco ottenuto in *Analyze*;
2. Selezione della FRF ottimale ottenuta in *Model*;
3. Impostazione parametri "*region*" e "*gain multiplier*" ovvero dei guadagni relativi ciascun asse per "indirizzare" l'iterazione verso una convergenza più veloce verso il DRIVE definitivo;
4. Iterazione fino all'ottenimento di una buona sovrapposizione del DES e risposta filtrata a 50 Hz (il confronto del DES lo si fa con la risposta filtrata RFL e non con la risposta semplicemente letta RSP perché il DES è per convenzione il segnale strada già filtrato nella fase di *Analyze*). Quindi non sarebbe giusto confrontare tra loro un segnale filtrato (DES) e uno non filtrato (RSP).

Per poter fare un confronto visivo immediato sulla qualità della riproduzione ottenuta alla fine di ogni iterazione, vengono plottati i seguenti segnali temporali su uno stesso grafico:

- Risposta obiettivo (DES);
- Risposta reale filtrata (RFL) (con filtro passa basso: frequenza di taglio a 50 Hz).

Per rappresentare tale raffronto, si è preso a titolo di esempio il segnale desiderato relativo al percorso LAP_PABA; in Figura 4.5 si riportano alcune delle RFL ottenute alla fine delle iterazioni 1,4,6 e 9 insieme al segnale DES cui esse tendono con il progredire delle iterazioni.

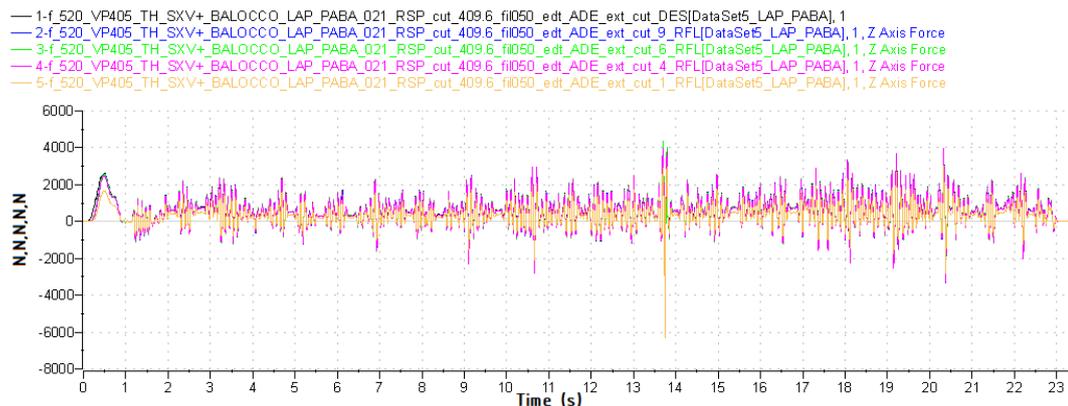


Figura 4.5: Confronto tra DES e RFL a diverse iterazioni-percorso LAP_PABA

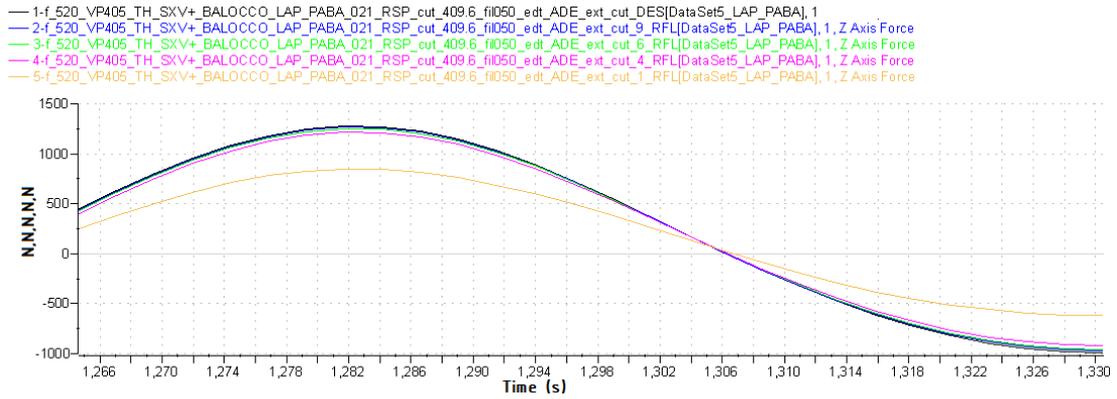


Figura 4.6: Zoom: confronto tra DES e RFL a diverse iterazioni-percorso LAP_PABA

In Figura 4.6 è riportato un dettaglio del medesimo segnale, che evidenzia meglio la progressione della convergenza verso il risultato finale; in questa figura è stata aggiunta anche la traccia relativa all'iterazione finale (nr. 10).

Questi andamenti, tuttavia, sono utili a definire soltanto da un punto di vista qualitativo la bontà della riproduzione del segnale strada.

Per avere invece un riscontro di tipo quantitativo si considerano, invece i seguenti termini, calcolati dal software alla fine di ogni iterazione:

- Valore massimo:

$$\text{MAX} = \frac{\text{MAX}[\text{DES}(t)]}{\text{MAX}[\text{RFL}(t)]} \cdot 100 \%$$

- Valore minimo:

$$\text{min} = \frac{\text{min}[\text{DES}(t)]}{\text{min}[\text{RFL}(t)]} \cdot 100 \%$$

- Errore (Radice dell'errore quadratico medio - RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - f_i}{d_i} \right)^2}$$

Affinché le iterazioni procedano bene, si deve avere che:

- Valore MAX: deve tendere al 100%;
- Valore min: deve tendere al 100%;
- Errore (RMSE): questo, in realtà rappresenta il vero termine di benchmark che definisce quantitativamente la bontà dell'iterazione. Esso deve tendere a 0%; se si ottiene un valore pari al 10-15% si può ritenere ancora accettabile, tuttavia maggiore è il margine accettato, più sarà necessario verificare caso per caso la qualità della sovrapposizione fra il segnale strada DES da riprodurre e quello di RFL ottenuto dal DRIVE dell'ultima iterazione;
- Valutazione visiva della sovrapposizione fra il segnale strada DES da riprodurre e quello di RFL ottenuto dal DRIVE dell'i-esima iterazione.

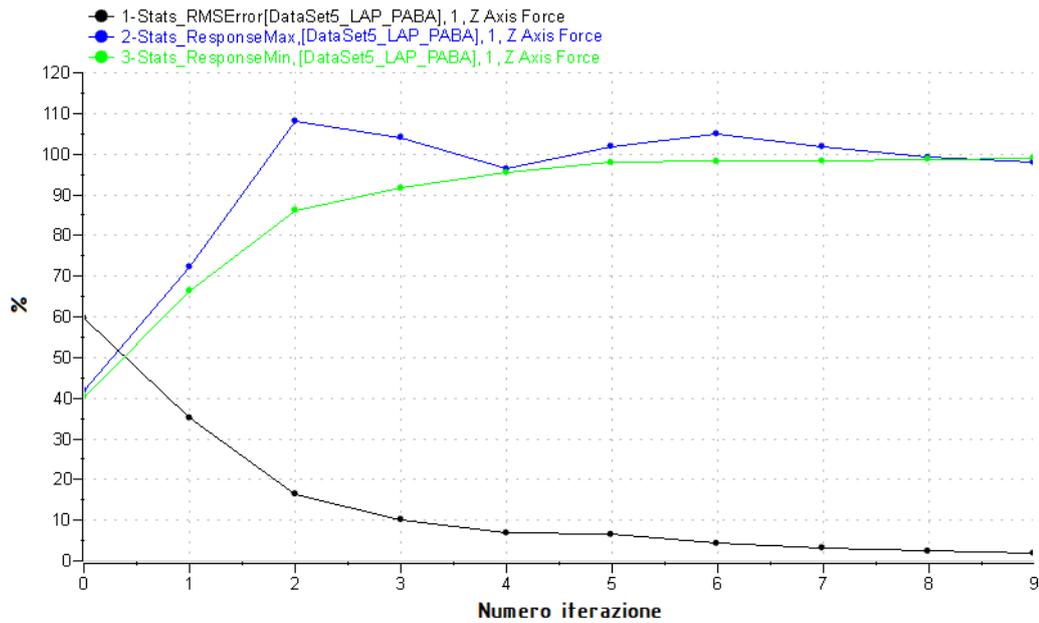


Figura 4.7: Andamento di MAX, min, RMSE per ogni iterazione-percorso LAP_PABA

Nel caso in esempio, come mostra la Figura 4.7, in cui sono riportati i valori di MAX, min, RMSE per ogni iterazione relativi sempre al percorso LAP_PABA, si vede che le condizioni di cui sopra risultano ampiamente soddisfatte.

A conferma di ciò, in Figura 4.8, sempre relativamente al percorso LAP_PABA, si riportano il DES e la RFL definitiva, ottenuta con il DRIVE dell'ultima iterazione, dove è possibile notare la praticamente perfetta sovrapposizione dei due segnali.

Si riporta in Figura 4.9 uno zoom del grafico 4.8 per mettere in maggiore risalto la sovrapposizione dei due segnali.

In maniera analoga a quanto visto per il percorso LAP_PABA per ciascuno dei segnali strada è stato ricavato il relativo DRIVE utilizzando la FRF 1ISODANNO.

A questo punto si è dunque in possesso dei 9 DRIVE che danno come risposta esattamente i 9 segnali desiderati di partenza; con questo si ritiene conclusa la procedura di ricerca della buona riproduzione del segnale strada sul banco.

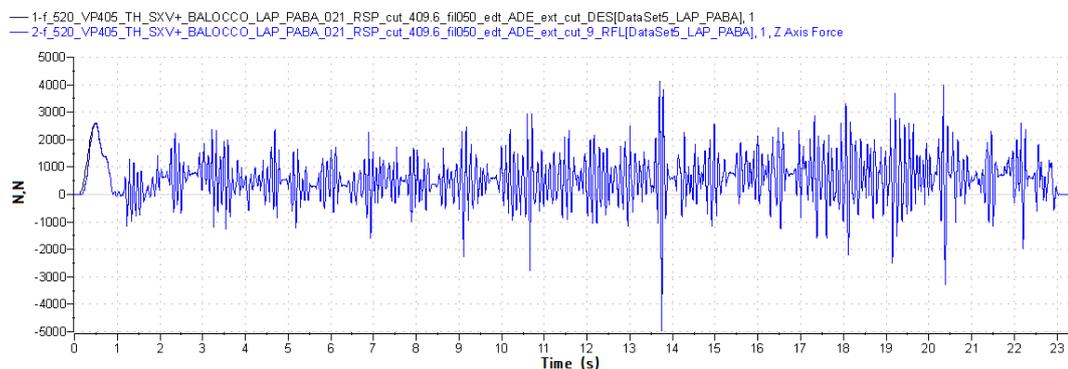


Figura 4.8: Confronto tra DES e RFL dell'ultima iterazione-percorso LAP_PABA

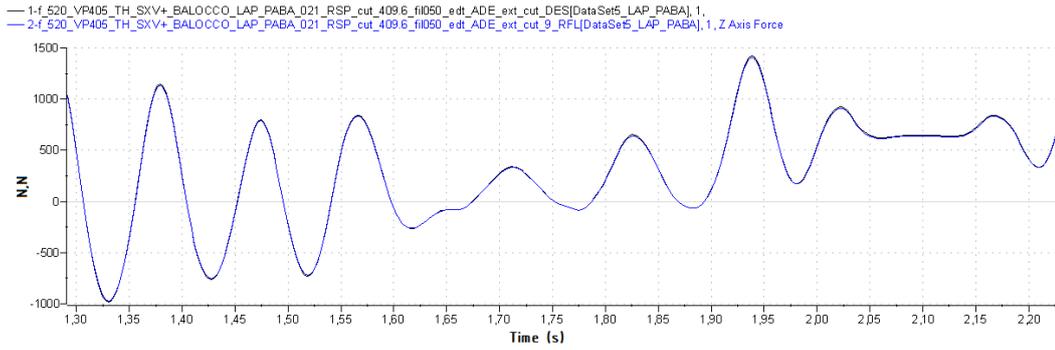


Figura 4.9: Zoom: confronto tra DES e RFL dell'ultima iterazione-percorso LAP_PABA

Si riportano in Tabella 4.6 gli indici MAX, min e RMSE per tutti i percorsi per evidenziare la convergenza raggiunta per ciascuno di essi.

Condizioni di carico vettura	Percorso	Tipo di segnale	Max (N)	Min (N)	RMS (N)	Convergenza Max RFL/Des(%)	Convergenza Min RFL/Des(%)	Convergenza RMSE RFL/Des(%)
FPL (Full Pay-Load)	PABA	Des Road	4802.22	-3318.44	1109.50	101.73	105.95	5.61
		RFL bench	4885.42	-3515.73	1047.24			
	OB-PROC	Des Road	4954.09	-1088.43	1113.32	99.87	97.43	2.06
		RFL bench	4947.74	-1060.47	1090.33			
	PORF-PROC	Des Road	2039.569	-718.32	767.8	99.39	98.46	1.97
		RFL bench	2027.09	-707.28	752.64			
POT	Des Road	2252.48	-2062.63	566.16	98.69	101.81	4.48	
	RFL bench	2223.08	-2099.98	540.78				
LAP (Light As Possible)	PABA	Des Road	4135.06	-4822.13	955.51	97.97	102.78	1.27
		RFL bench	4051.02	-4956.32	943.41			
	OB-PROC	Des Road	3793.11	-1870.75	1227.68	99.91	101.42	0.91
		RFL bench	3789.54	-1897.25	1216.54			
	PORF-PROC	Des Road	2687.73	-1181.46	712.02	100.28	98.40	1.83
		RFL bench	2695.24	-1162.54	698.98			
	POT	Des Road	2229.78	-2243.59	591.68	87.78	96.31	14.33
		RFL bench	1957.33	-2160.78	506.891			
OR (Off-Road)	TLANE	Des Road	3163.52	-1682.09	679.62	102.42	102.53	2.1
		RFL bench	3240.14	-1724.64	665.329			

Tabella 4.6: Indici di MAX, min, RMSE per ogni percorso

5

MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA A TEMPERATURA AMBIENTE

L'operazione preliminare di caratterizzazione mira alla determinazione della rigidità sia in campo statico che in campo dinamico del componente elastomerico.

Si utilizzano i dati previsti a livello progettuale e riportati sul disegno del componente per individuare le fasi della prova di caratterizzazione statica e dinamica suddetta. Le fasi da individuare dipendono:

- Dalla normativa in uso;
- Dai dati presenti a disegno.

Pertanto la procedura è specifica per la bielletta oggetto di studio.

Nel caso specifico verrà condotta una prova di caratterizzazione statica e due prove di caratterizzazione dinamica: una a bassa frequenza (25Hz) e una ad alta frequenza (100Hz).

5.1 CARATTERIZZAZIONI STATICHE

La caratterizzazione statica di un componente, come anticipato, tende all'individuazione della sua rigidità in condizioni statiche.

La procedura di caratterizzazione viene eseguita applicando un segnale di comando in forza (segnale a rampa) con opportune specifiche (intervallo forze, velocità di movimentazione degli attuatori) che dipendono dalle indicazioni dettate da norma o da disegno dell'antivibrante analizzato. In output vengono lette le forze dalla cella di carico e gli spostamenti dagli LVDT, si riporta il grafico forza-spostamento (Figura 5.1) che esplica la curva caratteristica di caratterizzazione statica.

Nel grafico, che rappresenta la curva di caratterizzazione statica definita da progetto, si può discernere una zona ad andamento lineare da una avente andamento non lineare. Il tratto di interesse per la valutazione della rigidità statica risulta quello lineare, il quale solitamente si colloca, come nel caso della bielletta di questo studio, nell'intorno dell'origine.

Generalmente, per quanto concerne i tasselli, la caratterizzazione viene effettuata sequenzialmente su tutte le direzioni, estendendosi sia in trazione sia in compressione; ovviamente la geometria del gommato dello specifico tassello incide sulla forma e sull'ampiezza della curva, rivelando comportamenti differenti del componente.

In questo studio si farà riferimento soltanto alla rigidità longitudinale (X nel s.r. locale della bielletta), ragion per cui verrà condotta una sola prova di caratterizzazione statica.

La forma tipica della curva di caratterizzazione è quella visibile in Figura 5.1. L'andamento della forza in funzione dello spostamento risulta simmetrico in un piccolo intorno dello 0, per poi lasciare spazio a due comportamenti diversi in trazione e compressione, ciò è sintomatico del fatto che la rigidità globalmente non risulta simmetrica rispetto all'origine.

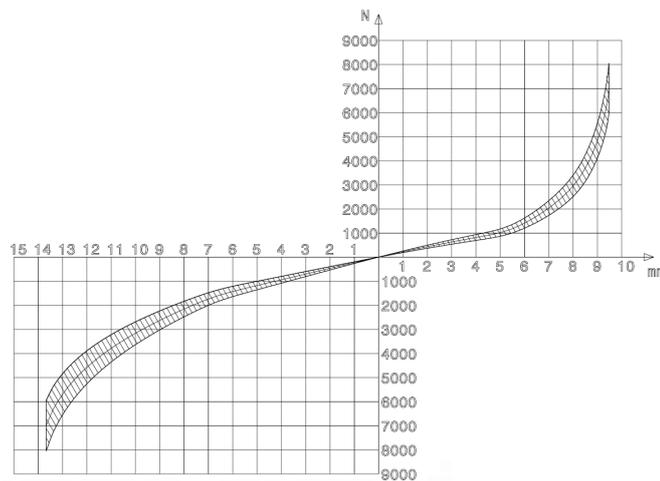


Figura 5.1: Curva caratteristica statica asse longitudinale $X_{bielletta}$

Questa asimmetria può essere spiegata esaminando la conformazione della bielletta rappresentata in Figura 5.2: si nota che vi sono due corse differenti a seconda della direzione di tamponamento dell'anello esterno (mobile) sul cannotto (fisso sul telaio). In particolare la luce disponibile (e quindi la corsa senza tamponamento) risulta minore lungo la direzione X^+ (quando il punto A tampona sul punto B); questa è la ragione per cui il grafico presenta una minore estensione del tratto elastico lungo questa direzione (circa 5 mm) rispetto alla direzione X^- dove il tratto elastico si estende fino a circa -8 mm.

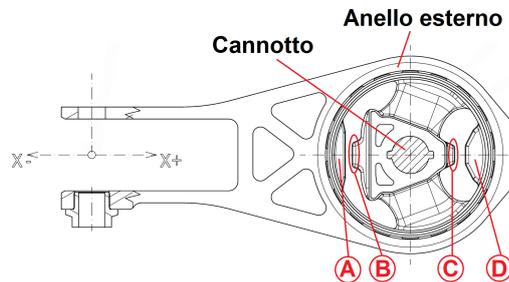


Figura 5.2: Dettaglio punti di contatto fra le parti della bielletta

5.2 CARATTERIZZAZIONI DINAMICHE

La caratterizzazione dinamica del componente, come quella statica, è finalizzata ad individuare la sua rigidità ed inoltre anche il suo smorzamento; con la differenza che in questo caso, i parametri vengono valutati nel momento in cui il componente è sollecitato da forzanti a diverse frequenze (e cioè in campo dinamico).

La procedura per la caratterizzazione dinamica viene svolta effettuando uno sweep in frequenza con un comando di spostamento sinusoidale; ovvero viene applicata una serie di sinusoidi a frequenza crescente, le cui specifiche in termini di ampiezza e frequenza dipendono dalle indicazioni da norma o da disegno dell'antivibrante analizzato. Il valore della frequenza a cui valutare la rigidità dinamica è indicato anch'esso da norma o da disegno a seconda dello specifico componente.

I dati letti dal banco continuano ad essere le forze e gli spostamenti, tuttavia l'output finale ottenuto in tal caso non risulta più un grafico forza-spostamento, bensì un grafico che esplica l'andamento della rigidità in funzione della frequenza.

Considerando gli elementi tipici che compongono un EMS, e tenendo conto che il componente è un semplice elastomero con parti in gomma-metallo, generalmente si ottiene un andamento crescente della rigidità in funzione della frequenza, come quello qualitativo rappresentato in Figura 5.3.

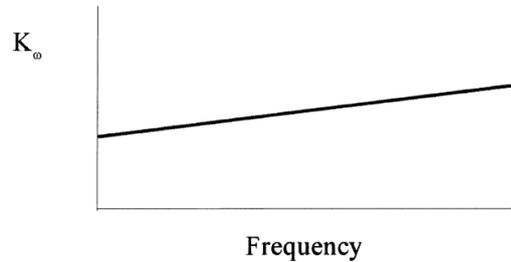


Figura 5.3: Andamento qualitativo rigidità dinamica

5.3 MISURA DELLA CAPACITÀ DI SMORZAMENTO

Si consideri un materiale soggetto a tensione che vari secondo la:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

Dove σ_0 è la massima ampiezza della tensione, ω la pulsazione e t il tempo. Si supponga che la massima dilatazione sia sfasata rispetto alla massima tensione dell'angolo di fase ϕ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (5.2)$$

Dove ε_0 è la massima ampiezza della dilatazione. La differenza di fase tra tensione e dilatazione è illustrata dalla curva ellittica in Figura 5.4 in cui si vede che i massimi della tensione e della dilatazione non si verificano contemporaneamente.

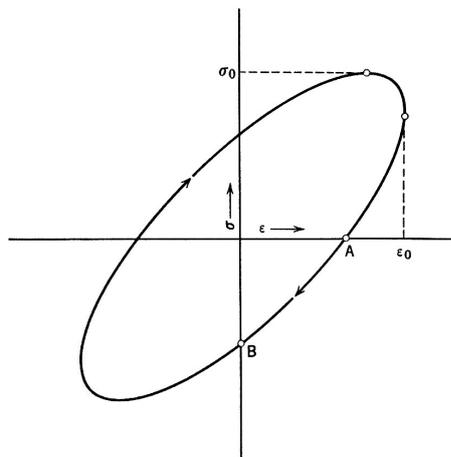


Figura 5.4: Rappresentazione mediante curva dello sfasamento tra tensione e dilatazione durante sollecitazioni cicliche [22]

L'area in Figura 5.4 è una misura dell'energia dissipata per ciclo. Tale energia vale:

$$\Delta u = \oint \sigma d\varepsilon \approx \frac{\sigma_0^2}{E} \pi \sin\phi \approx E \varepsilon_0^2 \pi \sin\phi \quad (5.3)$$

Confrontando la (5.3) con l'energia elastica totale accumulata, rappresentata approssimativamente da:

$$u \approx \frac{\sigma_0^2}{2E} \approx \frac{E \varepsilon_0^2}{2} \quad (5.4)$$

Si ottiene:

$$\frac{\Delta u}{u} \approx 2\pi \sin\phi \quad (5.5)$$

Sia $\Delta u/u$ che $\sin\phi$ possono venire impiegati come misura dello smorzamento e riportati in funzione della frequenza a temperatura costante. Se ϕ è piccolo, si può porre $\sin\phi \approx \tan\phi \approx \phi$, e qualunque di queste quantità può essere usata come misura dello smorzamento [22].

In particolare per quanto concerne la presente attività di tesi si farà riferimento alla fase ϕ come misura dello smorzamento.

5.4 ESECUZIONE DEI TEST

In questo paragrafo si riportano le specifiche, definite a disegno, con cui le caratterizzazioni statiche e dinamiche sono state effettuate per la bielletta di questo lavoro.

Prove statiche

Le caratterizzazioni statiche hanno i seguenti parametri da impostare:

- Intervallo forze: ± 700 daN;
- Velocità di movimento attuatori: 20 mm/min;
- Calcolo rigidità nel range di forza: ± 50 daN.

Prove dinamiche

La procedura di caratterizzazione dinamica viene effettuata due volte, a bassa (LF) ed alta frequenza (HF), adoperando differenti specifiche nei due casi, i cui valori sono riportati in Tabella 5.1.

Sweep	Ampiezza sinusoide [mm]	Intervallo frequenze [Hz]	Step frequenze [Hz]	Frequenza indicata per la lettura della rigidità dinamica [Hz]
#1 (LF)	$\pm 0,1$	1 ÷ 50	1	25
#2 (HF)	$\pm 0,05$	5 ÷ 110	5	100

Tabella 5.1: Specifiche degli sweep relativi alle caratterizzazioni dinamiche

5.5 RISULTATI

In questo lavoro, per la prima campagna di prove finalizzata all'esecuzione di prove di fatica a temperatura non controllata, sono state usate 5 bielle nuove.

Risulta opportuno verificare che le condizioni a nuovo dei vari componenti adoperati siano simili o comunque non vi siano differenze troppo evidenti, in modo da garantire dei risultati allineati in partenza.

Ciascuna delle bielle nuove è stata numerata con un numero progressivo e con un codice, per poter distinguere il ciclo affaticante cui ciascuna è sottoposta; per il momento non si tenga conto del codice (di cui si parlerà nel capitolo 6), ma solo del numero progressivo.

Risultati prove statiche

Gli andamenti ottenuti con i cicli statici sono riportati in Figura 5.5.

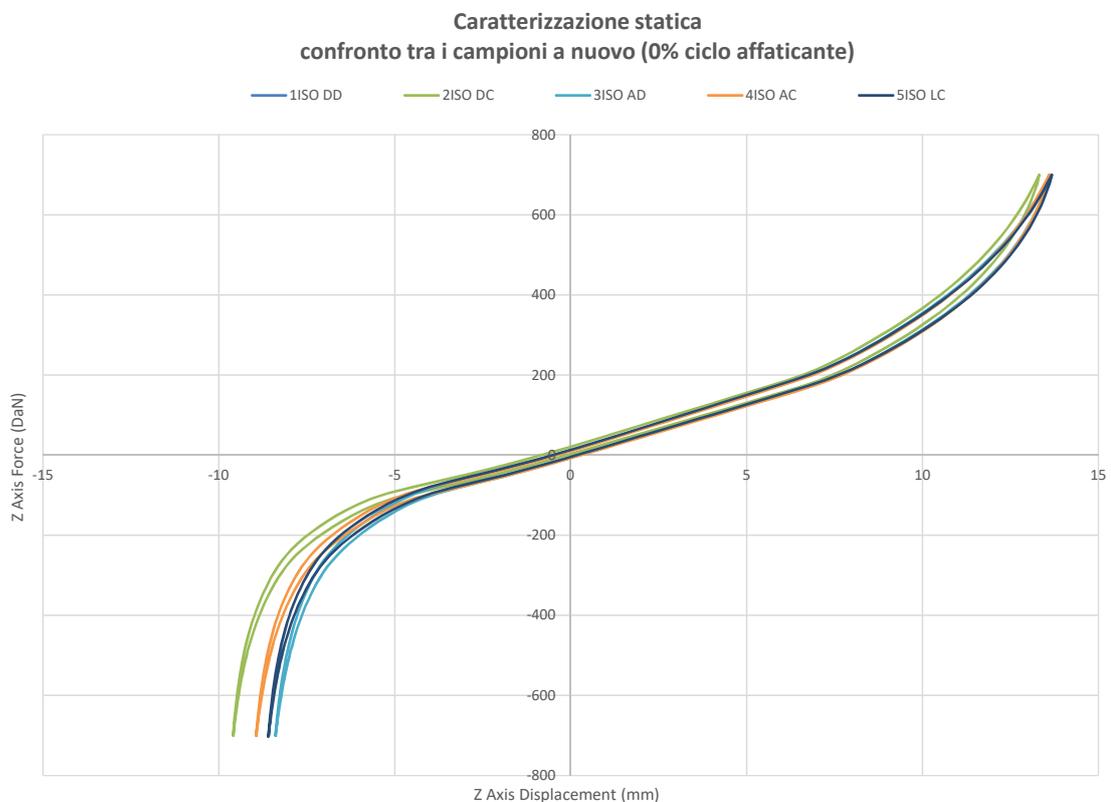


Figura 5.5: *Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo*

Di seguito in Tabella 5.2 sono raccolti i valori delle rigidezze statiche in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni, insieme ad esse, sono stati calcolati e riportati ulteriori parametri, tipicamente adoperati nell'analisi di dati sperimentali; nel caso specifico si tratta di:

- valore nominale di progetto della rigidezza (K_{nom});
- scostamenti massimo e minimo ammissibili rispetto al valore nominale di progetto ($K_{nom} \pm 15\%$);
- *COV*(*coefficient of variation*) della rosa di prove.

Il COV è un indice che permette di valutare la dispersione dei valori sperimentali ottenuti attorno alla media degli stessi; in particolare la coerenza dei dati è considerata ammissibile se:

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 < 10\% \quad \text{con: } \begin{cases} \sigma : \text{deviazione standard} \\ \mu : \text{media} \end{cases}$$

Nelle tabelle relative a questo capitolo, in rosso sono evidenziati i valori delle rigidità che non cadono all'interno della banda di tolleranza delle rigidità ammissibili sopracitata.

Test	Rigidità statica K_{stat} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: +/- 700daN K calcolata in: +/-50daN
K_{nom} [daN/mm]	22
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	18.7
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	25.3
K- bielletta 1ISO [daN/mm]	25.1
K- bielletta 2ISO [daN/mm]	24.5
K- bielletta 3ISO [daN/mm]	25.3
K- bielletta 4ISO [daN/mm]	25
K- bielletta 5ISO [daN/mm]	24.9
COV	1.2%

Tabella 5.2: Rigidità statiche a nuovo (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Le rigidità statiche ottenute sono tutte spostate verso il limite superiore della banda ($K_{nom} - 15\% < K - \text{bielletta } \#n < K_{nom} + 15\%$);
2. Solo nel caso della bielletta 3ISO il valore di rigidità corrisponde esattamente al limite superiore della banda di tolleranza;
3. I valori ottenuti sono coerenti tra loro, infatti il COV ottenuto è molto basso (1.2%) e anche visivamente la sovrapposizione delle curve di isteresi non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi, indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le biellette sono simili.

Risultati prove dinamiche - rigidità

In questa sezione si riportano i risultati grafici relativi a:

- Curve dinamiche a 0.2mm picco-picco, nel range $1 \div 50$ Hz (Figura 5.6);
- Curve dinamiche a 0.1mm picco-picco, nel range $5 \div 110$ Hz (Figura 5.7).

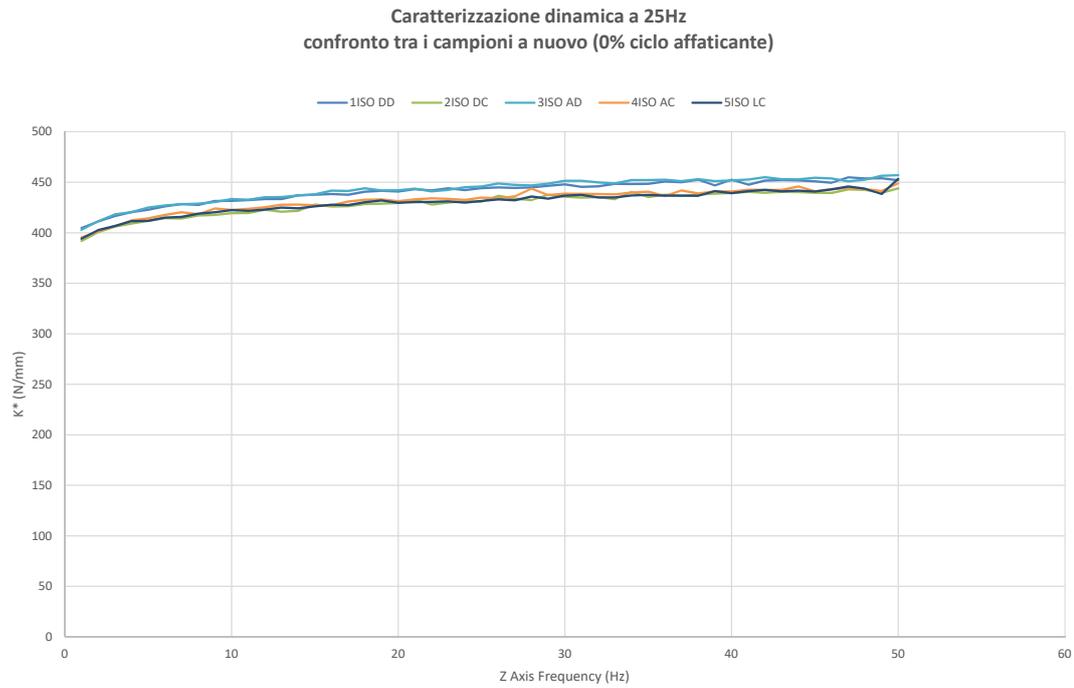


Figura 5.6: *Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo*

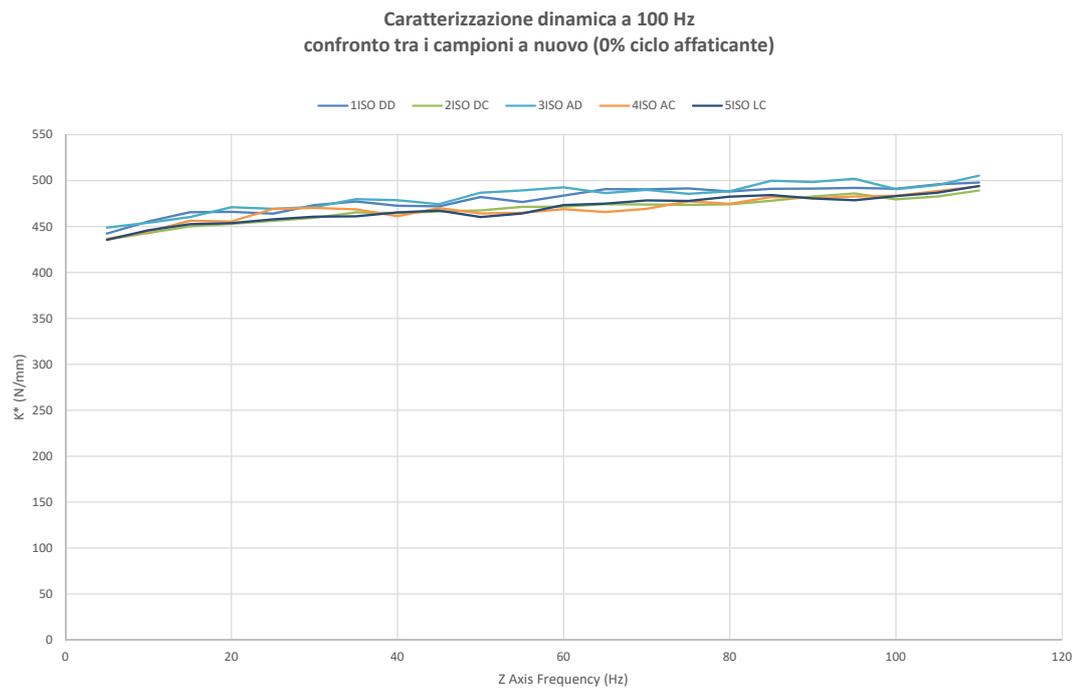


Figura 5.7: *Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo*

Di seguito nelle Tabelle 5.3 e 5.4 sono raccolte le rigidezze dinamiche, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; analogamente al caso statico insieme a questi valori sono riportati rigidezza nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Rigidezza dinamica a bassa frequenza K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz K letta a: 25Hz
K_{nom} [daN/mm]	35
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	29.8
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	40.3
K- bielletta 1ISO [daN/mm]	44.4
K- bielletta 2ISO [daN/mm]	43.1
K- bielletta 3ISO [daN/mm]	44.6
K- bielletta 4ISO [daN/mm]	43.5
K- bielletta 5ISO [daN/mm]	43.2
COV	1.59%

Tabella 5.3: Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)

Test	Rigidezza dinamica ad alta frequenza K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz K letta a: 100Hz
K_{nom} [daN/mm]	38
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	32.3
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	43.7
K- bielletta 1ISO [daN/mm]	49.1
K- bielletta 2ISO [daN/mm]	48
K- bielletta 3ISO [daN/mm]	49.1
K- bielletta 4ISO [daN/mm]	48.4
K- bielletta 5ISO [daN/mm]	48.3
COV	1.03%

Tabella 5.4: Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)

Dai risultati relativi alle caratterizzazioni dinamiche, sia a bassa che ad alta frequenza si può notare:

1. Una buona sovrapposizione degli andamenti. Considerando le Figure 5.6 e 5.7, si nota come essi siano contenuti entro una banda di variabilità abbastanza limitata e abbiano anche un andamento crescente, in linea con le caratteristiche tipiche di un tassello elastomerico (Figura 5.3). Inoltre, riferendosi ai valori dei COV calcolati nelle Tabelle 5.3 e 5.4 (rispettivamente 1.59% e 1.03%) si ha conferma numerica della bassa dispersione anche dei valori di rigidezza dinamica.
2. Un forte discostamento dai valori nominali definiti a progetto, per tutte le biellette. Questo aspetto tuttavia non compromette l'attendibilità dei risultati relativi a tale lavoro in quanto il quadro dei risultati ottenuti serve solo a verificare che i dati di partenza siano confrontabili tra loro.

Risultati prove dinamiche - smorzamento (fase)

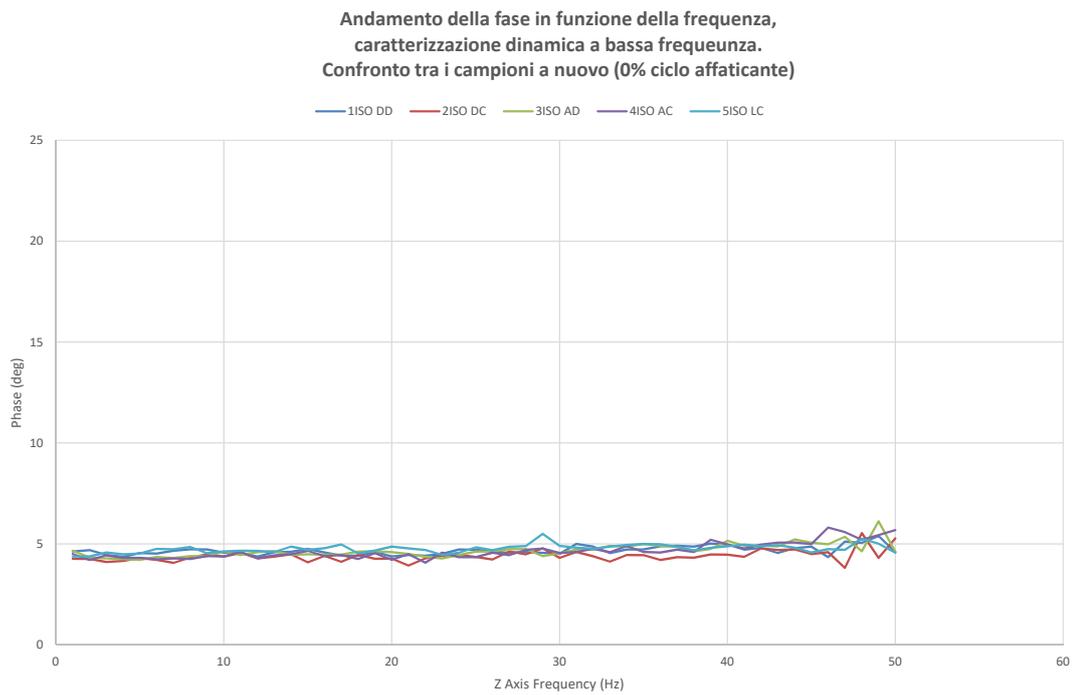


Figura 5.8: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo

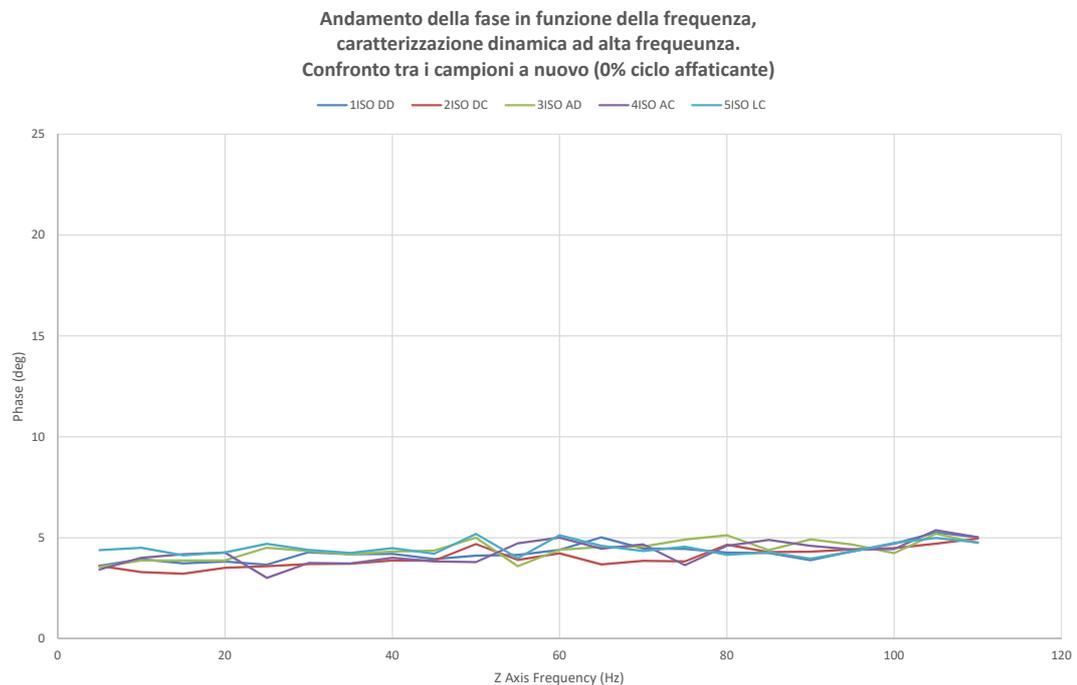


Figura 5.9: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo

Di seguito nelle Tabelle 5.5 e 5.6 sono raccolte fasi, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; insieme a questi valori sono riportati fase nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Fase caratterizzazione dinamica a bassa frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz fase letta a: 25Hz
Phase _{nom} [deg]	5
Phase _{nom} -15% [deg]	4.25
Phase _{nom} +15% [deg]	5.75
Phase- bielletta 1ISO [deg]	4.70
Phase- bielletta 2ISO [deg]	4.35
Phase- bielletta 3ISO [deg]	4.61
Phase- bielletta 4ISO [deg]	4.34
Phase- bielletta 5ISO [deg]	4.83
COV	4.74%

Tabella 5.5: Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)

Test	Fase caratterizzazione dinamica ad alta frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz fase letta a: 100Hz
Phase _{nom} [deg]	6
Phase _{nom} -15% [deg]	5.1
Phase _{nom} +15% [deg]	6.9
Phase- bielletta 1ISO [deg]	4.71
Phase- bielletta 2ISO [deg]	4.48
Phase- bielletta 3ISO [deg]	4.24
Phase- bielletta 4ISO [deg]	4.44
Phase- bielletta 5ISO [deg]	4.74
COV	4.57%

Tabella 5.6: Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Le fasi ottenute dalle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza sono tutte spostate verso il limite inferiore della banda di tolleranza ($\text{phase}_{\text{nom}} - 15\% < \text{phase} - \text{bielletta } \#n < \text{phase}_{\text{nom}} + 15\%$);
2. Le fasi ottenute dalle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza sono tutte fuori dal range di tolleranza;
3. I valori ottenuti, sia a bassa che ad alta frequenza sono coerenti tra loro, infatti i COV ottenuti sono bassi (4.74% e 4.57%) e anche visivamente la sovrapposizione delle curve non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi, indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le biellette sono simili.

6

PROVA DI FATICA A TEMPERATURA AMBIENTE

6.1 INTRODUZIONE

Le attività principali del presente capitolo possono essere riassunte come segue:

- valutare l'impatto della storia di carico isodanno (costruita attraverso i vari step del software RPC) sulla rigidità e sullo smorzamento a temperatura ambiente;
- confrontare i risultati derivanti dall'applicazione del carico isodanno con quelli prodotti dall'attività svolta in [1], dove la storia di carico era integrale.

La ripetizione della storia di carico un certo numero di volte, definito dalla norma, determina il ciclo di vita della bielletta.

Nello specifico, lo svolgimento della campagna di prove è avvenuta come segue:

1. La storia di carico viene applicata un numero di volte tale da ottenere la durata corrispondente al ciclo vita (*Life Cycle*: LC) del componente che nel caso in esame è di circa 44 ore. Tale storia di carico risulta ridotta della metà in termini di durata rispetto al carico integrale applicato in [1] che invece ammonta a 88ore.
2. L'applicazione del carico del ciclo vita viene intervallata da caratterizzazioni statiche e dinamiche, in modo da valutare l'andamento della rigidità e dello smorzamento (fase) ogni 25% della vita del componente (ovvero ogni 25% della fatica accumulata), di seguito un riepilogo degli istanti in cui sono state fatte le caratterizzazioni:
 - componente nuovo (0%);
 - 25%;
 - 50%;
 - 75%;
 - fine vita (100%).

Le percentuali indicate nella lista precedente sono riferite alla durata ideale della vita del componente, esse possono essere quindi interpretate anche come percentuale di affaticamento dello stesso.

La presente attività, in tale scenario, differisce dall'attività svolta in [1] solo per la storia di carico che è isodanno e non più integrale; dunque, una volta ricavate le rigidità e la fase, l'elaborazione procede con il confronto delle stesse secondo le medesime 3 modalità adottate in [1].

Le modalità risultano:

1. Confronto della rigidità e dello smorzamento di ogni bielletta, durante il ciclo di vita, rispetto al valore nominale (§ 6.4);
2. Confronto della rigidità e dello smorzamento di ogni bielletta, durante il ciclo di vita, rispetto al valore di rigidità e smorzamento a nuovo (§ 6.5);
3. Confronto globale dei rapporti delle rigidità con l'obiettivo di individuare un effetto della fatica analogo ad una "funzione di stato" (§ 6.6).

Da qui in avanti si definisce come "prova" l'insieme di somministrazione della storia di carico e caratterizzazioni per valutare le rigidità statiche e dinamiche e lo smorzamento.

6.2 PERCORSI DEL CICLO VITA

Il ciclo di vita della bielletta, definito secondo il mix standard SXV, comprende 9 differenti percorsi su strada. Questi percorsi sono gli stessi utilizzati in [1].

In Tabella 6.1 si riportano le sigle dei 9 percorsi adoperati ed il numero di ripetizioni relative a ciascun percorso (ovvero quante volte globalmente la bielletta viene sottoposta alla medesima storia di carico durante la prova).

I segnali sono scritti nell'ordine con cui devono essere eseguiti secondo normativa, per rappresentare il mix strada statisticamente più probabile che il componente si troverà ad affrontare durante la sua vita a bordo della vettura.

Questo mix, viene indicato nel seguito genericamente come Ciclo Vita (oppure LC: *Life cycle*).

Condizioni di carico vettura	Percorso	Ripetizioni
FPL (Full Pay-Load)	PABA	2142
	OB-PROC	618
	PORF-PROC	1606
	POT	36
LAP (Light As Possible)	PABA	1056
	OB-PROC	305
	PORF-PROC	792
	POT	18
OR (Off-Road)	TLANE	420

Tabella 6.1: Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo normativa (LC)

Per le descrizioni specifiche di sigle e condizioni di carico vettura dei percorsi si rimanda alla Tabella 4.1 del paragrafo 4.1.

Lo schema illustrato in Tabella 6.1 rappresenta una specifica tipologia di prova alla quale si assocerà l'acronimo generico LC per indicare che è quella definita da normativa.

Uno step ulteriore verso un'indagine più approfondita della variazione di rigidità e di smorzamento è stato quello di domandarsi se esistono dei parametri della prova che possono avere una qualche influenza sul fenomeno di decadimento della rigidità e dello smorzamento.

I parametri in oggetto tenuti in considerazione sono:

- le durate (intese come numero di ripetizioni di ciascun percorso);
- le ampiezze (ovvero la differenza fra la massima e la minima sollecitazione registrata su ciascun percorso).

Da questo approfondimento sono quindi state ricavate 4 ulteriori modalità di somministrazione del carico al componente. Quindi, considerando anche quella secondo normativa, si arriva ad un totale di 5 modalità con cui la prova a fatica viene svolta in questo lavoro di tesi; di seguito si riportano le nomenclature ed i relativi acronimi scelti:

1. Durate decrescenti (DD);
2. Durate crescenti (DC);
3. Ampiezze decrescenti (AD);
4. Ampiezze crescenti (AC);
5. Ciclo da normativa (LC: *Life cycle*).

La durata complessiva di ciascuna delle prove modificate è sempre pari a quella del LC; l'unica differenza è l'ordine (ma non il numero di ripetizioni) con cui i percorsi si susseguono.

Nelle Tabelle da 6.2 a 6.5 sono riportati le sequenze delle quattro tipologie di prove sopracitate.

Ricordando la convenzione trattata nel paragrafo 3.4, secondo la quale $Z_{\text{banco}}^+ \equiv X_{\text{bielletta}}^-$ segue che la colonna relativa alle F_z^{min} rappresenta dei carichi di trazione per la bielletta, in quanto negativi, viceversa saranno di compressione i valori positivi relativi alla colonna delle F_z^{MAX} .

Percorso	Ripetizioni	F_z^{MAX} [N]	F_z^{min} [N]	$F_z^{\text{MAX}} - F_z^{\text{min}}$ [N]
FPL_PABA	2142	5028	-3623	8651
FPL_PORF-PROC	1606	2482	-1357	3839
LAP_PABA	1056	4357	-4390	8747
LAP_PORF-PROC	792	3252	-2056	5308
FPL_OB-PROC	618	4924	-2027	6951
OR_TLANE	420	3628	-2253	5881
LAP_OB-PROC	305	3973	-2738	6711
FPL_POT	36	2904	-2662	5566
LAP_POT	18	2710	-3084	5794

Tabella 6.2: Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo durate decrescenti (DD)

Percorso	Ripetizioni	F_z^{MAX} [N]	F_z^{min} [N]	$F_z^{MAX} - F_z^{min}$ [N]
LAP_POT	18	3111	-2821	5932
FPL_POT	36	2904	-2662	5566
LAP_OB-PROC	305	3973	-2738	6711
OR_TLANE	420	3628	-2253	5881
FPL_OB-PROC	618	4924	-2027	6951
LAP_PORF-PROC	792	3252	-2056	5308
LAP_PABA	1056	4357	-4390	8747
FPL_PORF-PROC	1606	2482	-1357	3839
FPL_PABA	2142	5028	-3623	8651

Tabella 6.3: Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo durate crescenti (DC)

Percorso	Ripetizioni	F_z^{MAX} [N]	F_z^{min} [N]	$F_z^{MAX} - F_z^{min}$ [N]
LAP_PABA	1056	4357	-4390	8747
FPL_PABA	2142	5028	-3623	8651
FPL_OB-PROC	618	4924	-2027	6951
LAP_OB-PROC	305	3973	-2738	6711
OR_TLANE	420	3628	-2253	5881
LAP_POT	18	2710	-3084	5794
FPL_POT	36	2904	-2662	5566
LAP_PORF-PROC	792	3252	-2056	5308
FPL_PORF-PROC	1606	2482	-1357	3839

Tabella 6.4: Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo ampiezze decrescenti (AD)

Percorso	Ripetizioni	F_z^{MAX} [N]	F_z^{min} [N]	$F_z^{MAX} - F_z^{min}$ [N]
FPL_PORF-PROC	1606	2482	-1357	3839
LAP_PORF-PROC	792	3252	-2056	5308
FPL_POT	36	2904	-2662	5566
LAP_POT	18	2710	-3084	5794
OR_TLANE	420	3628	-2253	5881
LAP_OB-PROC	305	3973	-2738	6711
FPL_OB-PROC	618	4924	-2027	6951
FPL_PABA	2142	5028	-3623	8651
LAP_PABA	1056	4357	-4390	8747

Tabella 6.5: Sequenza dei 9 percorsi ordinati secondo ampiezze crescenti (AC)

Come anticipato nei capitoli precedenti, per ogni prova è stata usata una bielletta nuova così da poter fare un confronto a parità di vita del componente.

È bene sottolineare che a causa del processo produttivo non ideale non sarà mai possibile realizzare dei componenti identici; tuttavia le operazioni di caratterizzazione descritte nel capitolo 5 hanno lo scopo di confrontare fra loro le rigidità e gli smorzamenti delle biellette nuove in modo da garantire, almeno sotto questo punto di vista, un punto di partenza comune per il confronto svolto nel prosieguo.

6.3 CONTENUTO ENERGETICO - DANNEGGIAMENTO

Nel presente paragrafo si riportano le curve di level crossing ottenute sul software RPC attraverso i tool "Sequence editor" e "Histogram accumulation".

Tali curve presentano in ascisse il numero di cicli (in scala logaritmica) che il provino ha effettuato durante la prova e in ordinate l'ampiezza del carico (in N) a cui è stato sollecitato. Per tutti i grafici (Figure 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5) è possibile constatare come le curve nere e blu, rispettivamente quella del carico integrale e isodanno, globalmente tendono a sovrapporsi: in particolare il numero di cicli della storia di carico integrale è maggiore in quanto la prova ha una durata globale di 88 ore rispetto alle 44 ore della storia di carico isodanno. A questo si aggiunge che le ampiezze di carico per il ciclo isodanno risultano maggiori rispetto a quelle del ciclo integrale.

Si può dunque concludere che il contenuto energetico in termini di danneggiamento sul componente in esame è pressoché lo stesso sia che si applichi la storia di carico integrale, sia che si applichi la rispettiva storia di carico isodanno.

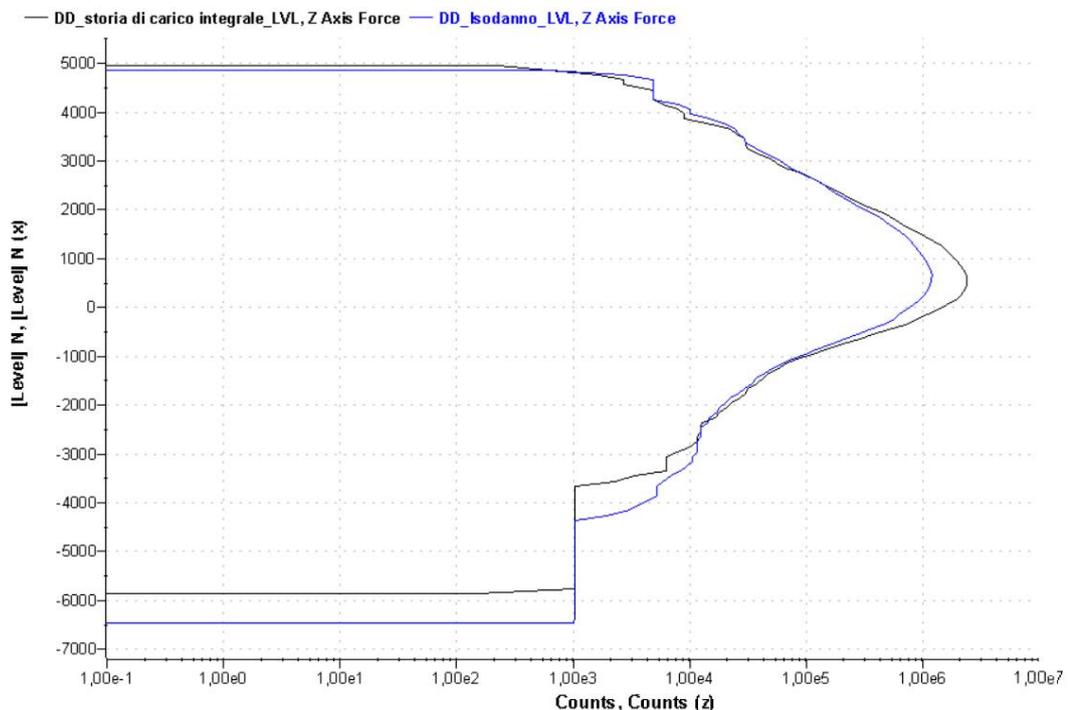


Figura 6.1: Curva di Level Crossing- DD

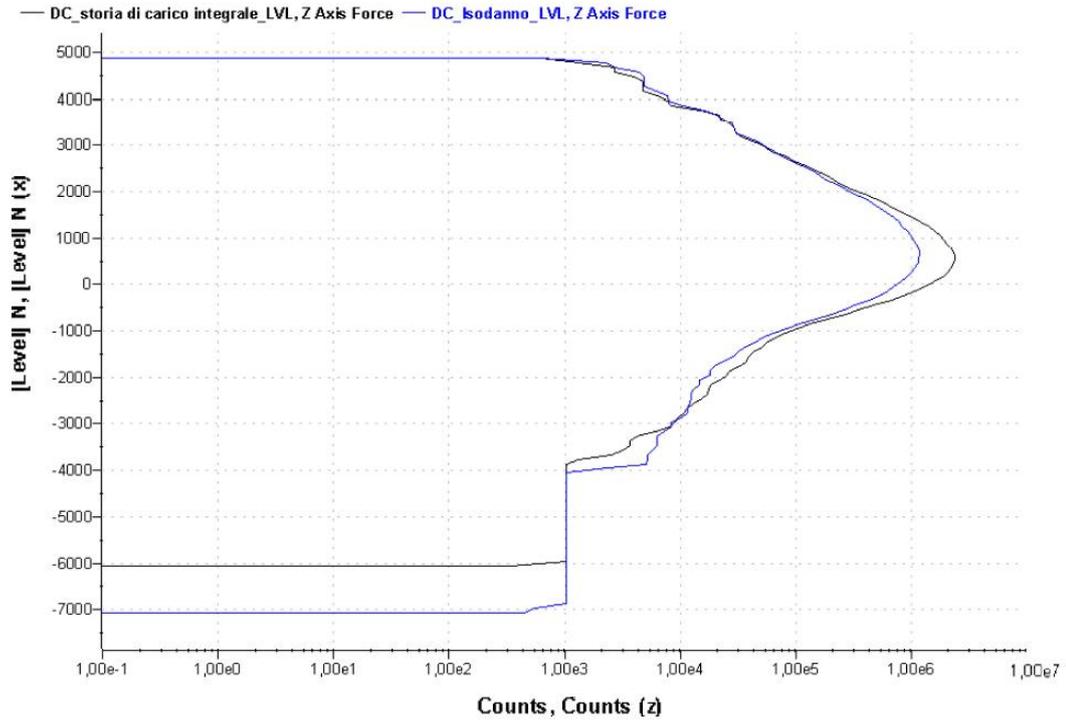


Figura 6.2: Curva di Level Crossing- DC

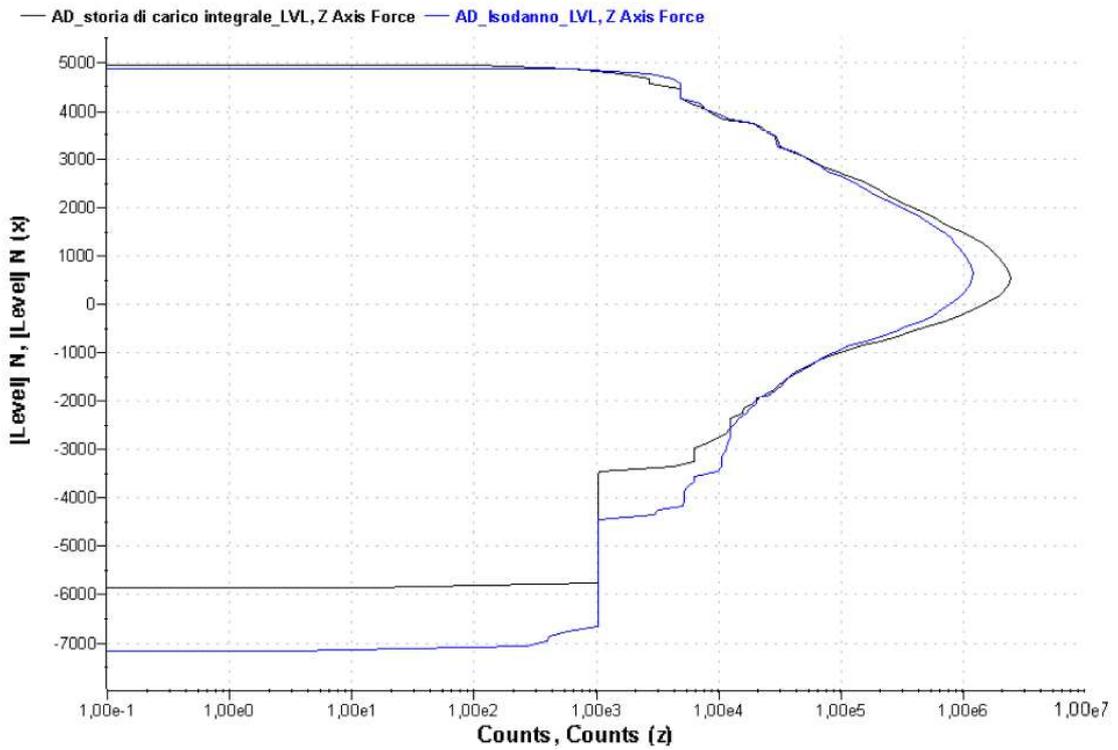


Figura 6.3: Curva di Level Crossing- AD

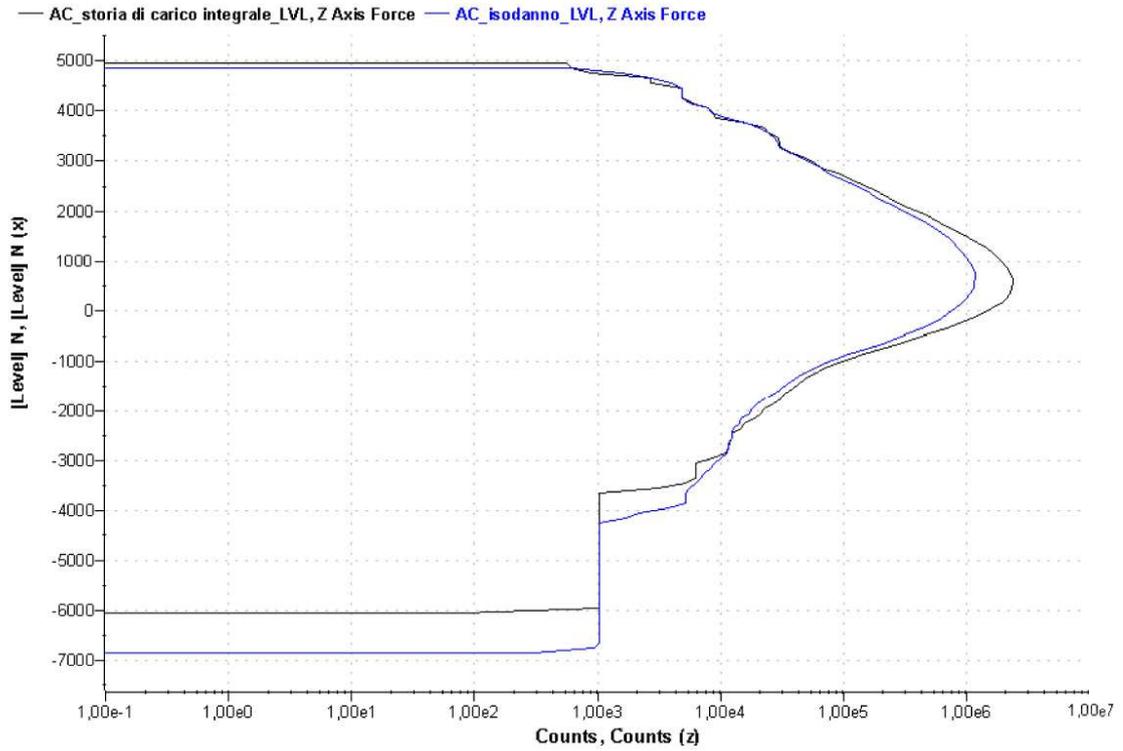


Figura 6.4: Curva di Level Crossing- AC

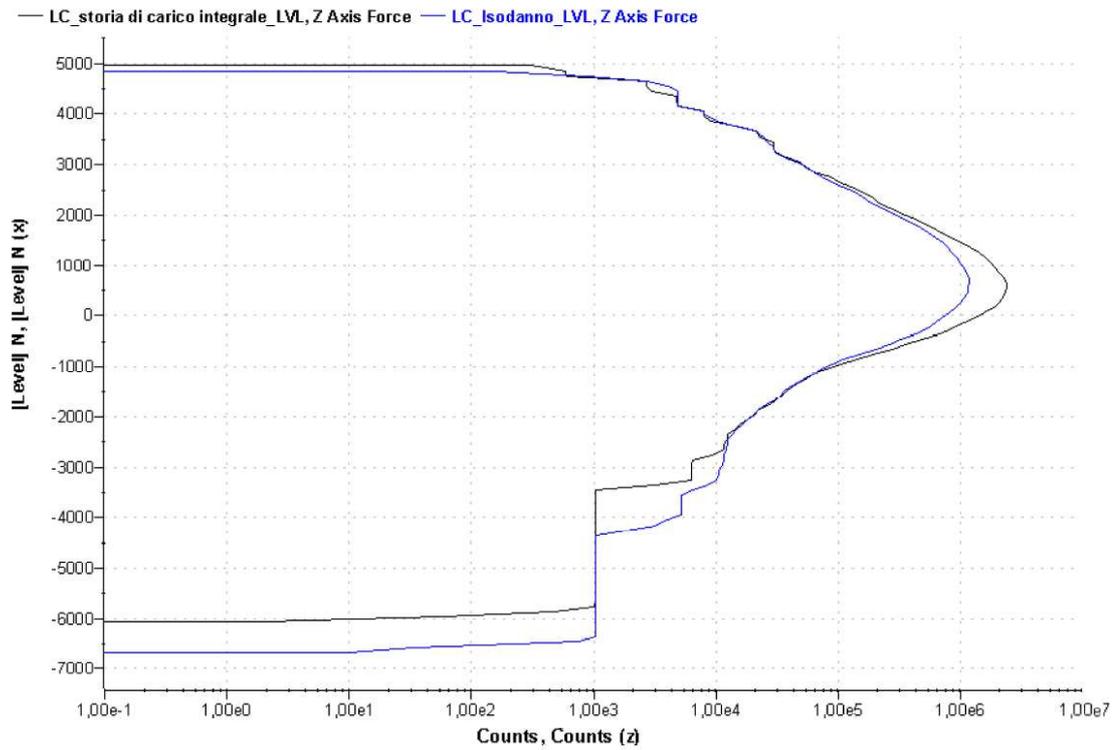


Figura 6.5: Curva di Level Crossing- LC

6.4 ANALISI DEI RISULTATI SULLA SINGOLA BIELLETTA: CONFRONTO CON I VALORI NOMINALI

In questa sezione si riportano gli andamenti della rigidezza, sia statica che dinamica, e delle fasi allo scopo di indagare il loro decadimento rispetto alle condizioni nominali nel corso del ciclo vita dovuto alle 5 diverse modalità di somministrazione del carico.

Nello specifico la modalità di confronto dei risultati è quella sulla singola bielletta: ovvero considerando una modalità di somministrazione del carico, si confronta la rigidezza e la fase ai diversi istanti di vita (ogni 25% del ciclo di vita) con la rigidezza nominale e la fase nominale.

Si sottolinea che a ciascuna modalità di somministrazione del carico corrisponde univocamente una bielletta nuova come riportato in Tabella 6.7.

Numero bielletta	Modalità di somministrazione del carico
1ISO	Durate decrescenti (DD)
2ISO	Durate crescenti (DC)
3ISO	Ampiezze decrescenti (AD)
4ISO	Ampiezze crescenti (AC)
5ISO	Ciclo da normativa (LC)

Tabella 6.6: Corrispondenza fra bielle e modalità di somministrazione del carico isodanno

Nell'attività svolta in [1] si ha invece:

Numero bielletta	Modalità di somministrazione del carico
1	Durate decrescenti (DD)
2	Durate crescenti (DC)
3	Ampiezze decrescenti (AD)
4	Ampiezze crescenti (AC)
5	Ciclo da normativa (LC)

Tabella 6.7: Corrispondenza fra bielle e modalità di somministrazione del carico integrale

6.4.1 Rigidezza statica

L'analisi descritta in questo paragrafo consiste nel verificare se i valori delle rigidità ottenute cadono nella banda del $\pm 15\%$ del valore nominale indicato da progetto ($K_{nom} = 22 \frac{daN}{mm}$).

Questo procedimento è del tutto analogo a quello illustrato nel paragrafo 5.5, relativo alle caratterizzazioni a nuovo. Quindi si considerano, come visto prima, gli scostamenti fra i valori nominali e quelli dei dati sperimentali, e la dispersione di questi ultimi, monitorata tramite il COV.

Nelle Figure 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 sono presentati i risultati grafici di quanto appena descritto oltre ad un raffronto tra l'andamento delle rigidità di bielle sottoposte per la stessa tipologia di percorso a carico integrale e a carico isodanno.

Ciascun grafico riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto, ed una banda di tolleranza pari a $K_{nom} \pm 15\%$.

Da cui segue che, affinché la rigidezza sia ancora accettabile secondo progetto, si dovrebbe ottenere che tutti i valori ricavati sperimentalmente, a ciascuna percentuale di vita della bielletta, siano compresi entro le sopradette bande di tolleranza.

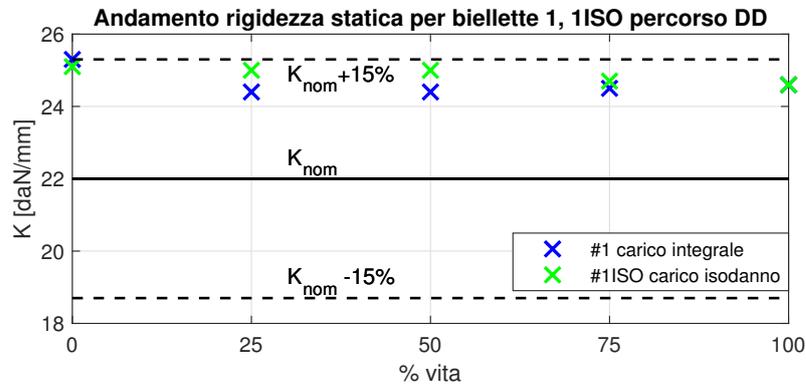


Figura 6.6: Confronto bielletta 1, 1ISO DD: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

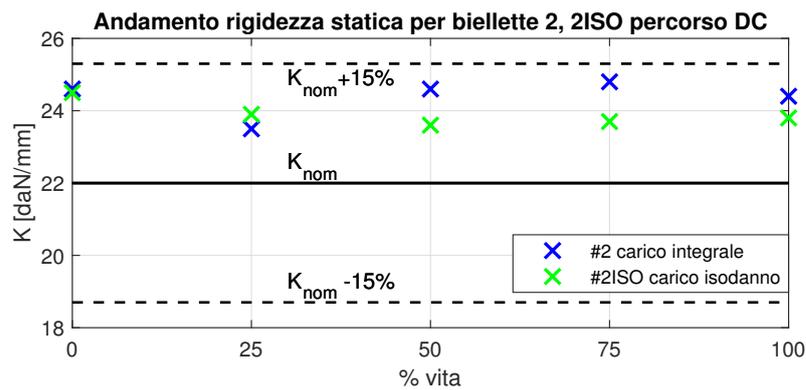


Figura 6.7: Confronto bielletta 2, 2ISO DC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

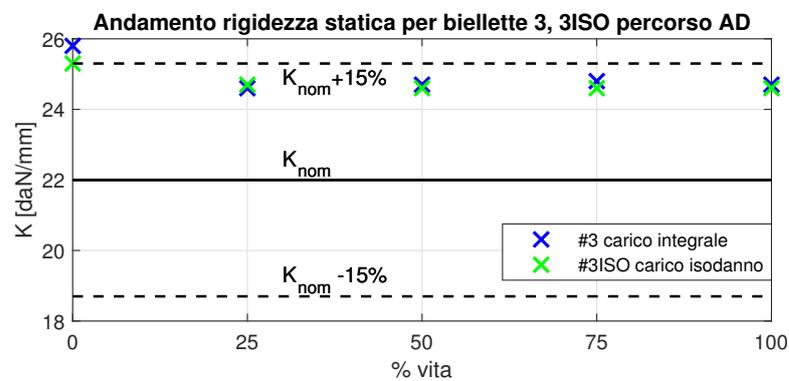


Figura 6.8: Confronto bielletta 3, 3ISO AD: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

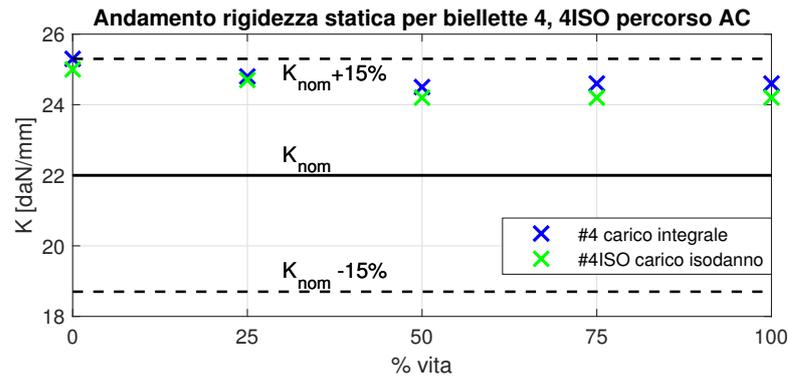


Figura 6.9: Confronto biellette 4, 4ISO AC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

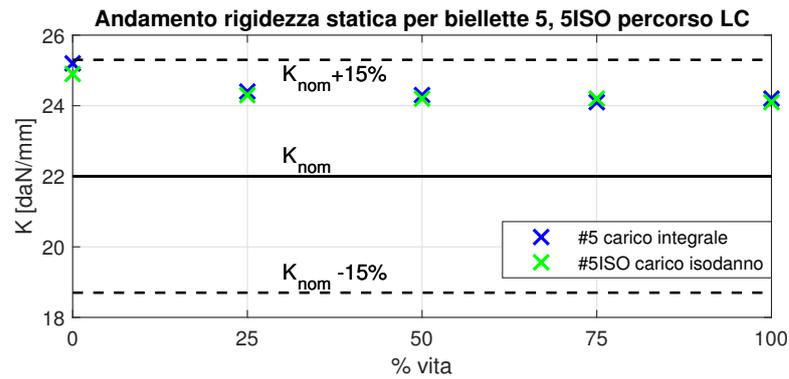


Figura 6.10: Confronto biellette 5, 5ISO LC: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

In Tabella 6.8 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti applicando un carico integrale (attività svolta in [1]), invece in Tabella 6.9 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti applicando un carico isodanno.

Si evidenziano in rosso, i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa; inoltre per entrambe le tabelle nell'ultima colonna è stato calcolato il COV per monitorare un'eventuale dispersione dei dati sperimentali (dati coerenti se: $COV < 10\%$).

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza statica carico integrale [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
$22 \pm 15\%$	0%	25.3	24.6	25.8	25.3	25.2	1.67%
	25%	24.4	23.5	24.6	24.8	24.4	1.97%
	50%	24.4	23.6	24.7	24.5	24.3	1.61%
	75%	24.5	24.1	24.8	24.6	24.1	1.25%
	100%	24.6	24.3	24.7	24.6	24.2	0.92%

Tabella 6.8: Riepilogo risultati rigidezza statica con carico integrale - Valori assoluti [1]

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza statica carico isodanno [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
22±15%	0%	25.1	24.5	25.3	25	24.9	1.19%
	25%	25	23.9	24.7	24.7	24.3	1.74%
	50%	25	23.6	24.6	24.2	24.2	2.14%
	75%	24.7	23.7	24.6	24.2	24.2	1.63%
	100%	24.6	23.8	24.6	24.2	24.1	1.42%

Tabella 6.9: Riepilogo risultati rigidezza statica con carico isodanno - Valori assoluti

Dall'analisi sperimentale è emerso che:

- per ciascuno dei 5 cicli affaticanti, tutte le rigidezze meno una ($K_{0\%}$ della bielletta 3 - AD con carico integrale), ricadono all'interno della banda di tolleranza, ad ogni percentuale di danneggiamento considerata.

Si nota come applicando un carico isodanno anche il valore di rigidezza assoluta della bielletta 3ISO sottoposta a percorso AD rientra all'interno della banda di tolleranza e il suo valore risulta proprio pari al limite superiore del range di tolleranza.

- i risultati relativi al caso statico con applicazione di carico isodanno ribadiscono quanto verificato nell'applicare un carico integrale, ovvero: nè le diverse modalità di carico applicate nè, in particolare, il ciclo LC definito da normativa vanno ad influire in maniera significativa sulla variazione di rigidezza rispetto alla banda del valore nominale.
- considerando i valori del COV ottenuti a parità di percentuale di vita del componente, riportati nell'ultima colonna della Tabella 6.9, le diverse modalità di somministrazione del carico portano a dei risultati pressoché uguali, infatti il massimo valore del COV ottenuto è pari al 2.14%, ciò è indice di una bassissima dispersione dei valori rispetto al loro valor medio. Inoltre la differenza fra il COV allo 0% della vita e quello alle altre percentuali di vita risulta praticamente invariato.

Questo particolare risultato, che deriva dall'applicazione del carico isodanno va quindi a sostegno del criterio di Palmgren-Miner riadattato dimostrato già per quanto concerne l'applicazione del carico integrale.

6.4.2 Rigidezza dinamica a bassa frequenza

In questa sezione si riportano i risultati relativi alle rigidezze dinamiche a bassa frequenza raffrontando l'applicazione del carico integrale con l'applicazione del carico isodanno.

I valori vengono estratti dallo sweep in frequenza considerando come valore di lettura la rigidezza ottenuta a 25 Hz.

Le considerazioni sul tipo di confronto sono le medesime fatte nel paragrafo precedente relativo alle rigidezze statiche.

Nelle Figure 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 sono rappresentati i risultati in forma di grafici; ciascuno di essi riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in

ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto, e la banda di tolleranza.

Andamento rigidezza dinamica a bassa frequenza per biellette 1, 1ISO percorso DD

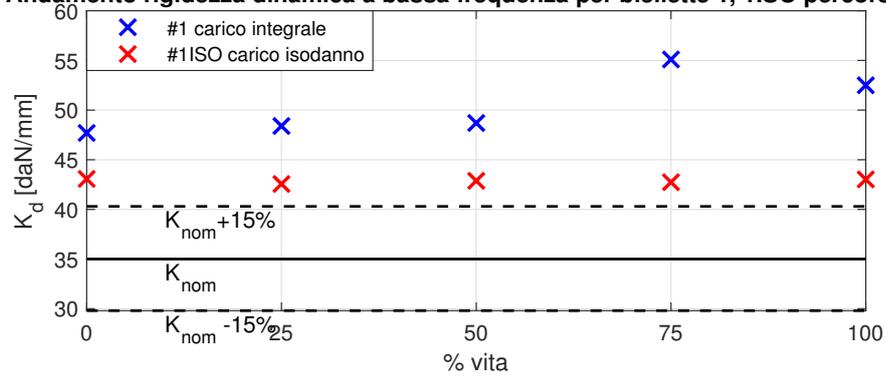


Figura 6.11: Confronto biellette 1, 1ISO DD: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

Andamento rigidezza dinamica a bassa frequenza per biellette 2, 2ISO percorso DC

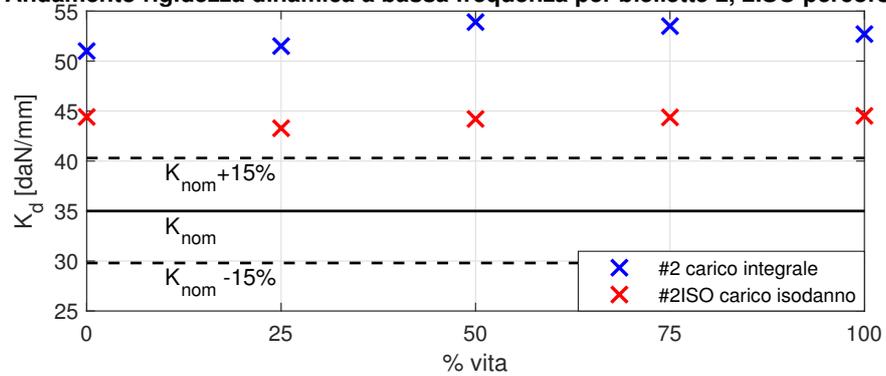


Figura 6.12: Confronto biellette 2, 2ISO DC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

Andamento rigidezza dinamica a bassa frequenza per biellette 3, 3ISO percorso AD

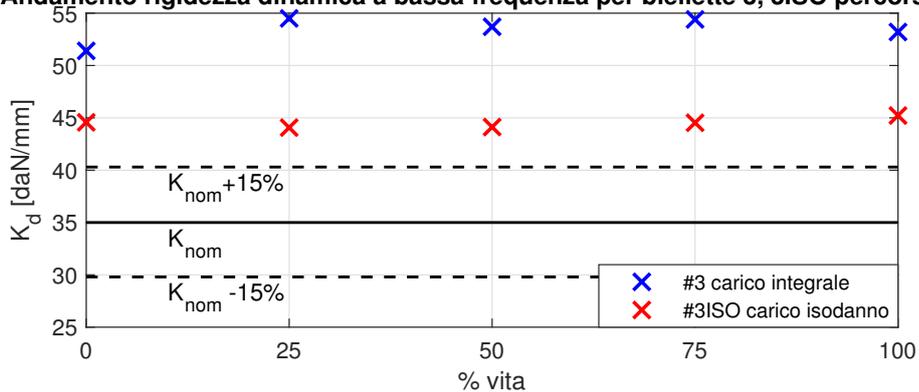


Figura 6.13: Confronto biellette 3, 3ISO AD: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

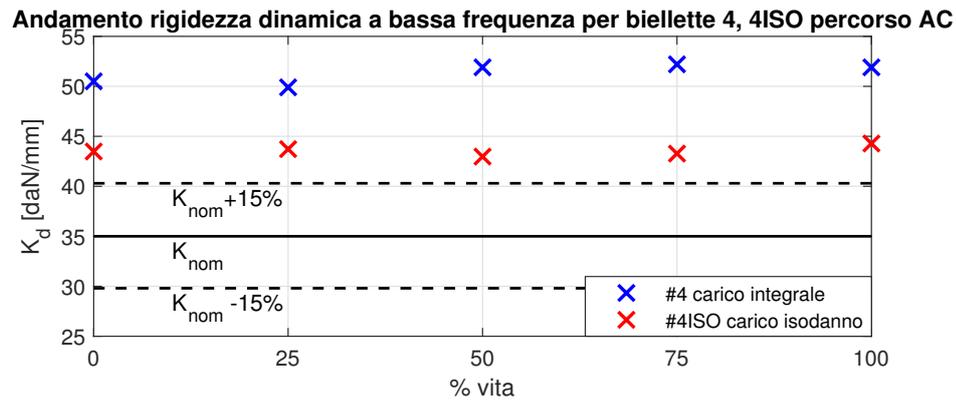


Figura 6.14: Confronto biellette 4, 4ISO AC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

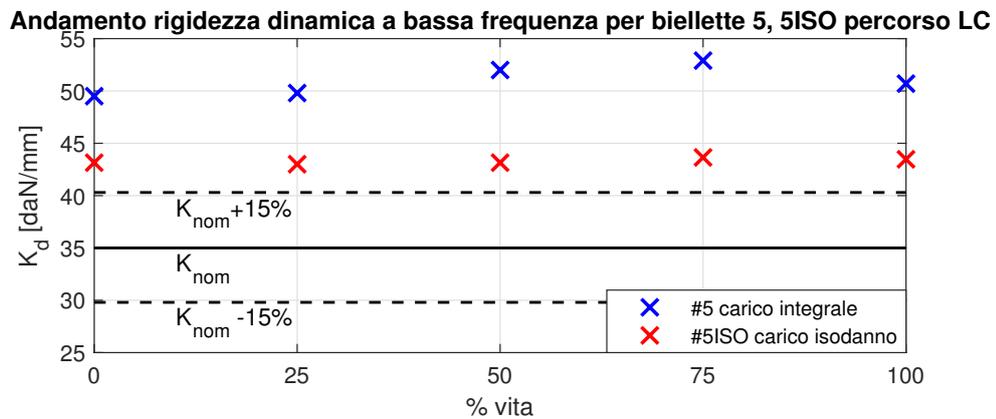


Figura 6.15: Confronto biellette 5, 5ISO LC: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

Nelle Tabelle 6.10, 6.11 sono raccolti in maniera più compatta rispettivamente i risultati ottenuti dall'applicazione di un carico integrale e di un carico isodanno. Si evidenziano in rosso i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza dinamica @ 25Hz carico integrale [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
$35 \pm 15\%$	0%	44.8	43.2	46.4	44.3	44.5	2.56%
	25%	45.3	43.0	47.3	44.1	43.8	3.68%
	50%	47.6	43.1	46.9	46.0	45.8	3.77%
	75%	46.7	48.7	47.9	46.6	46.5	2.02%
	100%	46.0	45.8	46.5	44.8	44.3	2.01%

Tabella 6.10: Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz con carico integrale - Valori assoluti [1]

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza dinamica @ 25Hz carico isodanno [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
35±15%	0%	44.4	43.1	44.6	43.5	43.2	1.59%
	25%	43.3	42.6	44.1	43.7	43	1.35%
	50%	44.2	42.9	44.1	43	43.1	1.46%
	75%	44.4	42.7	44.5	43.3	43.6	1.74%
	100%	44.5	43	45.2	44.3	43.5	1.96%

Tabella 6.11: Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 25 Hz con carico isodanno - Valori assoluti

Dai risultati ottenuti è emerso che:

- i valori a nuovo delle rigidezze risultano più bassi nel caso delle biellette usate per il ciclo affaticante isodanno rispetto a quelle utilizzate per il ciclo affaticante integrale;
- per ciascuno dei 5 percorsi, sia in presenza di carico integrale, sia in presenza di carico isodanno, tutte le rigidezze ricadono all'esterno della banda di tolleranza, ad ogni percentuale di danneggiamento considerata.
- si assiste, sia per il carico integrale che per il carico isodanno, ad uno *shift* di tutti i valori verso il limite superiore della banda di tolleranza, quello relativo allo scostamento massimo ammissibile rispetto al valore nominale di progetto ($K_{nom} + 15\%$).

Tali scostamenti si mostrano più ampi nel caso di applicazione di carico integrale; nel caso di carico isodanno i valori di rigidezza tendono ad avvicinarsi al limite superiore del range di tolleranza. Lo stesso *shift* emerge già sui componenti a nuovo, non solo con l'avanzamento della fatica.

La ragione di questo comportamento risiede nel fatto le curve di level crossing mostrano come il danno tra carico integrale e isodanno non sia identico al 100%.

- i risultati relativi al caso dinamico a bassa frequenza con applicazione di carico isodanno ribadiscono, come accaduto per il caso statico, come le diverse modalità di carico applicate non abbiano un'influenza significativa sulla variazione di rigidezza.
- considerando i valori del COV ottenuti a parità di percentuale vita del componente, riportati nell'ultima colonna della Tabella 6.11, si nota come le diverse modalità di somministrazione del carico portino a dei risultati pressoché uguali, infatti il massimo valore del COV ottenuto è inferiore al 2%, ciò è indice di una bassa dispersione dei valori rispetto al loro valor medio.
- nel caso di applicazione di carico isodanno i valori del COV risultano inferiori, sintomatico di una minore dispersione dei valori attorno al valor medio. Questo particolare risultato va quindi a sostegno del criterio di Palmgren-Miner riadattato, anche nella sua applicazione alla rigidezza dinamica a bassa frequenza con carico isodanno.

6.4.3 Rigidezza dinamica ad alta frequenza

In questa sezione vengono presentati, adoperando le medesime considerazioni fatte per le rigidezze dinamiche a bassa frequenza, i risultati relativi alle rigidezze ad alta frequenza derivanti sia dall'applicazione di un carico integrale, sia dall'applicazione di un carico isodanno.

Nelle Figure 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 sono presentati i risultati grafici; ciascuno di essi riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre è esplicitata la K_{nom} di progetto, e la banda di tolleranza.

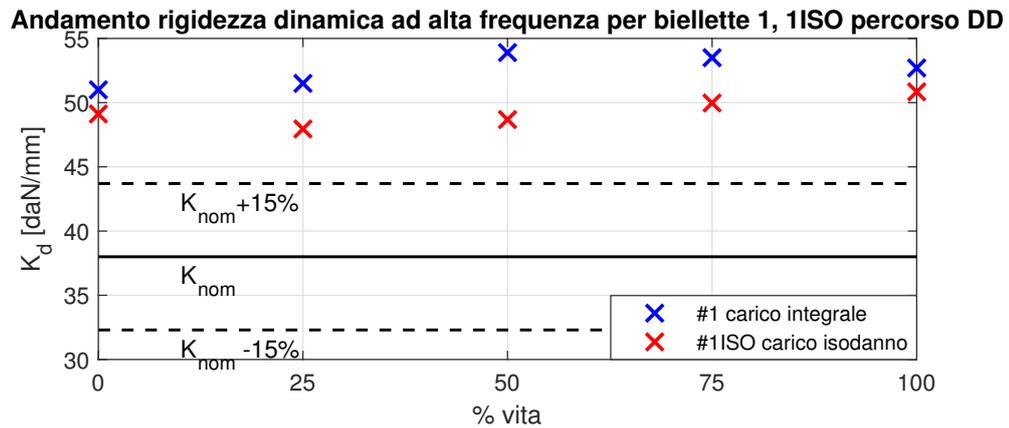


Figura 6.16: Confronto biellette 1, 1ISO DD: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

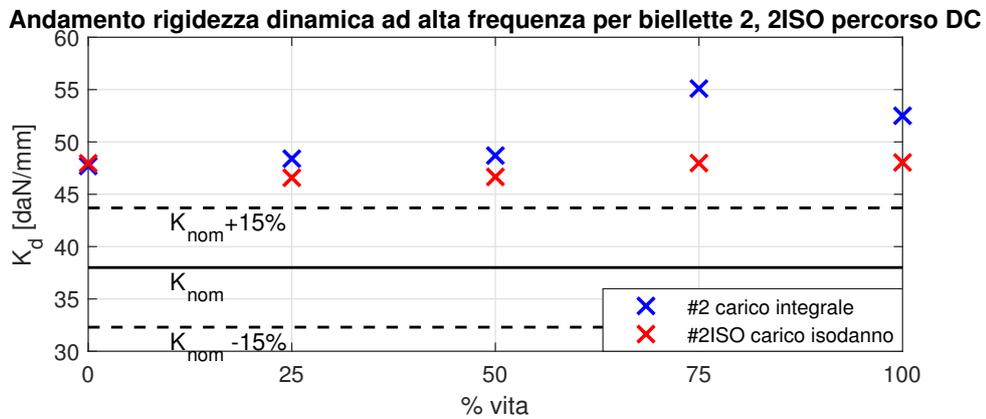


Figura 6.17: Confronto biellette 2, 2ISO DC: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

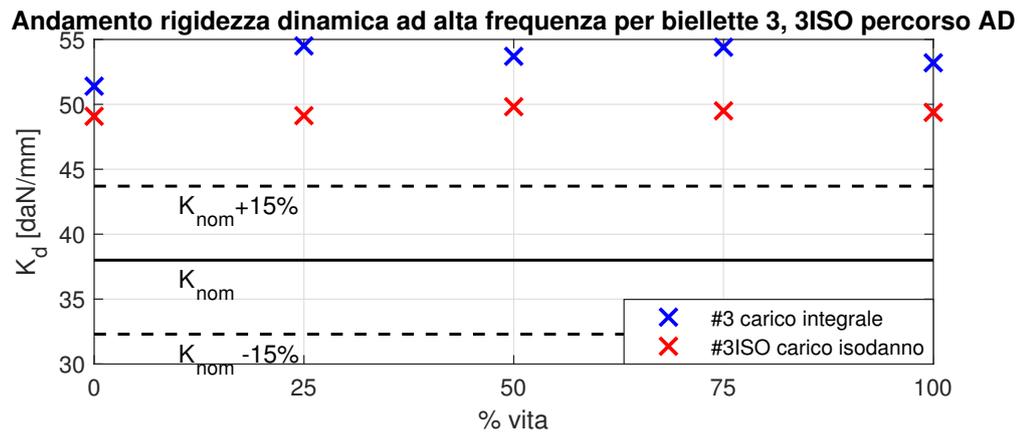


Figura 6.18: Confronto bielle 3, 3ISO AD: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

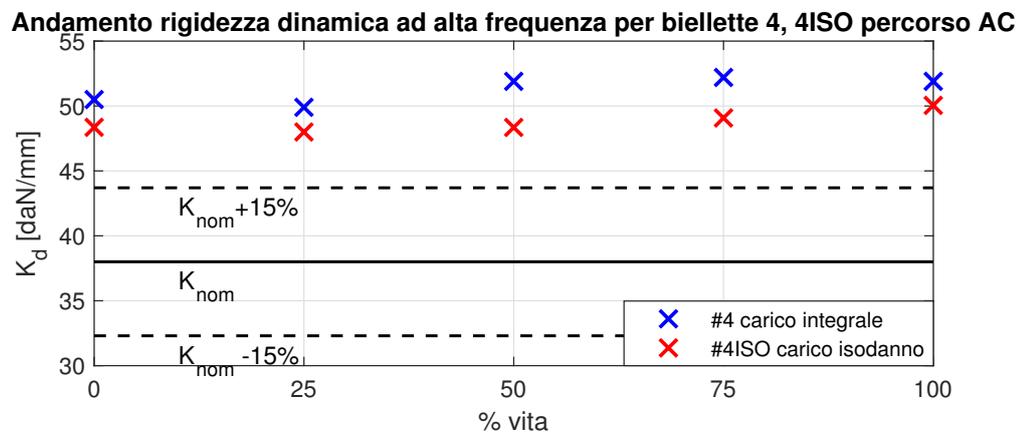


Figura 6.19: Confronto bielle 4, 4ISO AC: rigidezze dinamiche ad alta alle diverse percentuali di vita

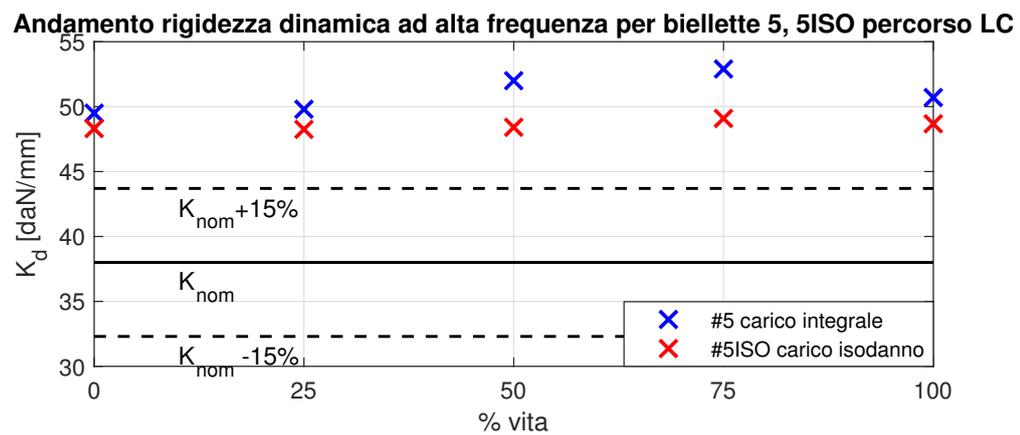


Figura 6.20: Confronto bielle 5, 5ISO LC: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

Nella Tabella 6.12 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti dall'applicazione del carico integrale.

Nella Tabella 6.13 si riportano invece i risultati ottenuti dall'applicazione del carico isodanno.

Per entrambe le tabelle si riportano in rosso i valori delle rigidità che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidità dinamica @ 100Hz carico integrale [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
38±15%	0%	51.0	47.7	51.4	50.5	49.5	2.99%
	25%	51.5	48.4	54.5	49.9	49.8	4.59%
	50%	53.9	48.7	53.7	51.9	52.0	4.05%
	75%	53.5	55.1	54.4	52.2	52.9	2.19%
	100%	52.7	52.5	53.2	51.9	50.7	1.82%

Tabella 6.12: Riepilogo risultati rigidità dinamica @ 100 Hz carico integrale- Valori assoluti [1]

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidità dinamica @ 100Hz carico isodanno [daN/mm]					COV [%]
		bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
38±15%	0%	49.1	48	49.1	48.4	48.3	1.05%
	25%	47.9	46.6	49.1	48	48.3	1.91%
	50%	48.7	46.7	49.8	48.4	48.4	2.34%
	75%	50	47.9	49.5	49.1	49.1	1.49%
	100%	50.8	48	49.4	50.1	48.7	2.23%

Tabella 6.13: Riepilogo risultati rigidità dinamica @ 100 Hz carico isodanno- Valori assoluti

I risultati ottenuti e le considerazioni finali relative alle rigidità dinamiche ad alta frequenza sono del tutto simili, dal punto di vista concettuale, a quelle delle rigidità dinamiche a bassa frequenza. Infatti dai risultati emerge che:

- tutte le rigidità ricadono all'esterno della banda di tolleranza, assistendo alla stessa deriva dei valori verso il limite superiore della banda di tolleranza ($K_{nom} + 15\%$); ciò si verifica sia per il carico integrale, sia per il carico isodanno.
- considerando i valori del COV ottenuti a parità di percentuale vita del componente, riportati nell'ultima colonna della Tabella 6.13, il massimo valore del COV ottenuto è inferiore al 3% indice di una bassa dispersione dei valori rispetto al loro valor medio.

La dispersione dei dati che si ottiene dall'applicazione del carico isodanno anche in tal caso risulta inferiore rispetto a quella ottenuta attraverso l'applicazione del carico integrale.

Questo risultato va a sostegno del criterio di Palmgren-Miner riadattato, dimostrato per il carico integrale, anche nella sua applicazione alla rigidità dinamica ad alta frequenza.

6.4.4 Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica a bassa frequenza)

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi alle fase a bassa frequenza derivanti sia dall'applicazione di un carico integrale, sia dall'applicazione di un carico isodanno.

Nelle Figure 6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25 sono presentati i risultati grafici; ciascuno di essi riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la fase in valore assoluto; inoltre è esplicitata la $Phase_{nom}$ di progetto, e la banda di tolleranza.

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 25Hz) per biellette 1, 1ISO percorso DD

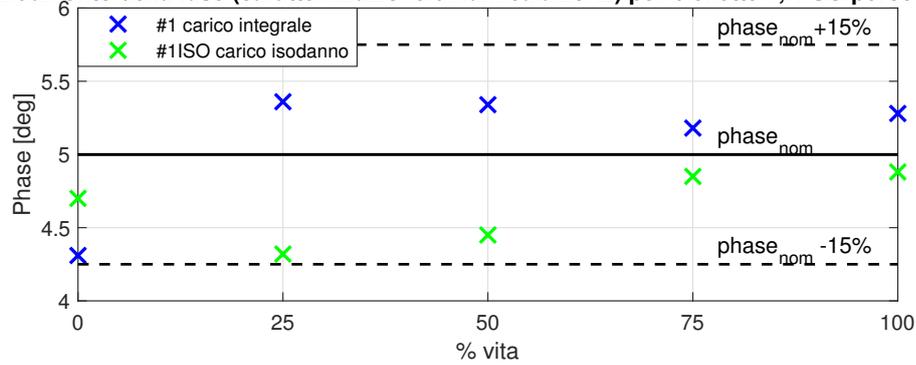


Figura 6.21: Confronto biellette 1, 1ISO DD: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 25Hz) per biellette 2, 2ISO percorso DC

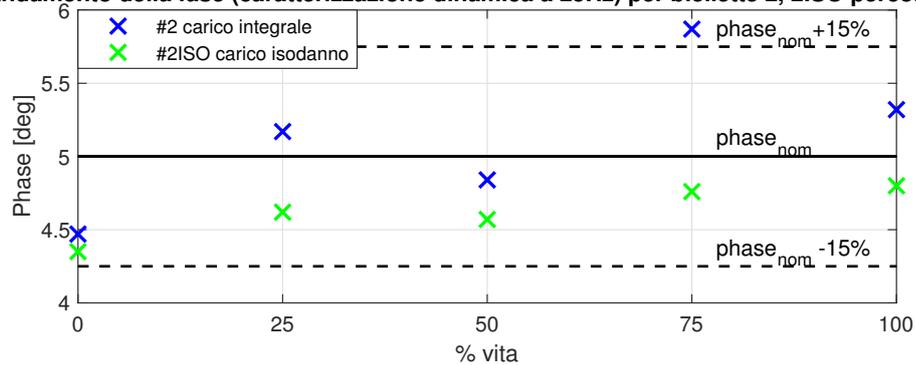


Figura 6.22: Confronto biellette 2, 2ISO DC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 25Hz) per biellette 3, 3ISO percorso AD

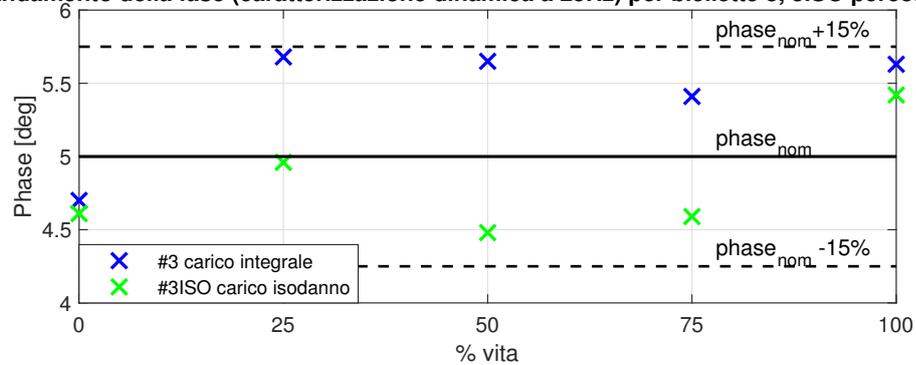


Figura 6.23: Confronto biellette 3, 3ISO AD: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 25Hz) per biellette 4, 4ISO percorso AC

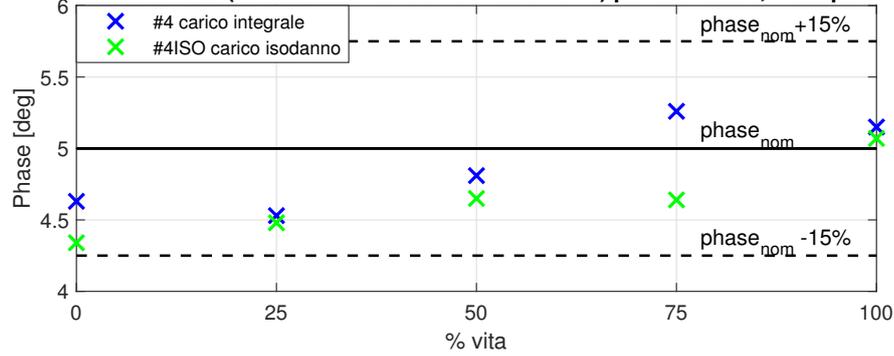


Figura 6.24: Confronto biellette 4, 4ISO AC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 25Hz) per biellette 5, 5ISO percorso LC

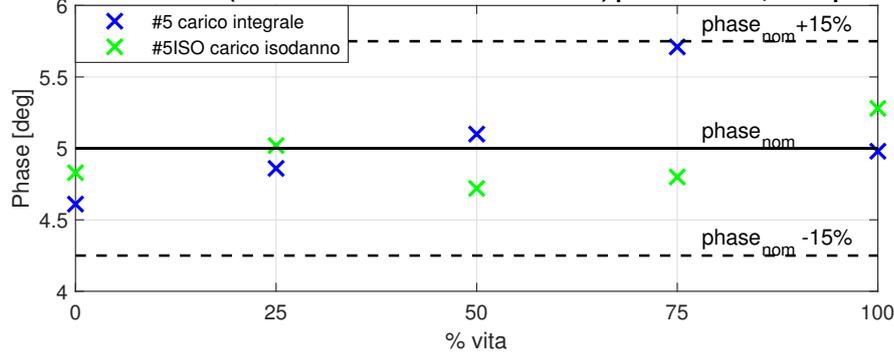


Figura 6.25: Confronto biellette 5, 5ISO LC: fasi (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Nelle Tabelle 6.14 e 6.15 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti rispettivamente dall'applicazione del carico integrale e del carico isodanno.

Phase _{nom} ±15% [deg]	%vita componente	Fase, caratterizzazione dinamica @ 25Hz carico integrale [deg]					
		bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	COV [%]
5±15%	0%	4.31	4.47	4.7	4.63	4.61	3.41%
	25%	5.36	5.17	5.68	4.53	4.86	8.67%
	50%	5.34	4.84	5.65	4.81	5.1	6.87%
	75%	5.18	5.87	5.41	5.26	5.71	5.38%
	100%	5.25	5.32	5.63	5.15	4.98	4.56%

Tabella 6.14: Riepilogo risultati fase @ 25 Hz carico integrale- Valori assoluti

Phase _{nom} ±15% [deg]	%vita componente	Fase, caratterizzazione dinamica @ 25Hz carico isodanno [deg]					
		bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	COV [%]
5±15%	0%	4.70	4.35	4.61	4.34	4.83	4.74%
	25%	4.32	4.62	4.96	4.48	5.02	6.47%
	50%	4.45	4.57	4.48	4.65	4.72	2.47%
	75%	4.85	4.76	4.59	4.64	4.80	2.31%
	100%	4.88	4.80	5.42	5.07	5.28	5.14%

Tabella 6.15: Riepilogo risultati fase, @ 25 Hz carico isodanno- Valori assoluti

Dai risultati ottenuti è emerso che:

- per ciascuno dei 5 percorsi, in presenza di carico isodanno, tutte le fasi ricadono all'interno della banda di tolleranza, ad ogni percentuale di danneggiamento considerata. Per quanto concerne invece il carico integrale i valori numerici rientrano tutti all'interno del range ammissibile a meno che il valore al 75% relativo al percorso DC.
- si assiste, per il carico isodanno, ad uno *shift* di tutti i valori verso il limite inferiore della banda di tolleranza, quello relativo allo scostamento minimo ammissibile rispetto al valore nominale di progetto ($phase_{nom} - 15\%$). Al contrario, nel caso di carico integrale i valori sono più prossimi al limite superiore della banda.
- i risultati relativi al 100% della vita del componente tendono a sovrapporsi tra caso integrale e isodanno per tutti i percorsi.
- considerando i valori del COV ottenuti a parità di percentuale vita del componente, riportati nell'ultima colonna della Tabella 6.15, si nota come le diverse modalità di somministrazione del carico portino a dei risultati pressoché uguali, infatti il massimo valore del COV ottenuto è inferiore al 9%, ciò è indice di una bassa dispersione dei valori rispetto al loro valor medio.
- nel caso di applicazione di carico isodanno i valori del COV risultano inferiori, sintomatico di una minore dispersione dei valori attorno al valor medio.

6.4.5 Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica ad alta frequenza)

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi alle fase ad alta frequenza derivanti sia dall'applicazione di un carico integrale, sia dall'applicazione di un carico isodanno.

Nelle Figure 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30 sono presentati i risultati grafici; ciascuno di essi riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la fase in valore assoluto; inoltre è esplicitata la $Phase_{nom}$ di progetto, e la banda di tolleranza.

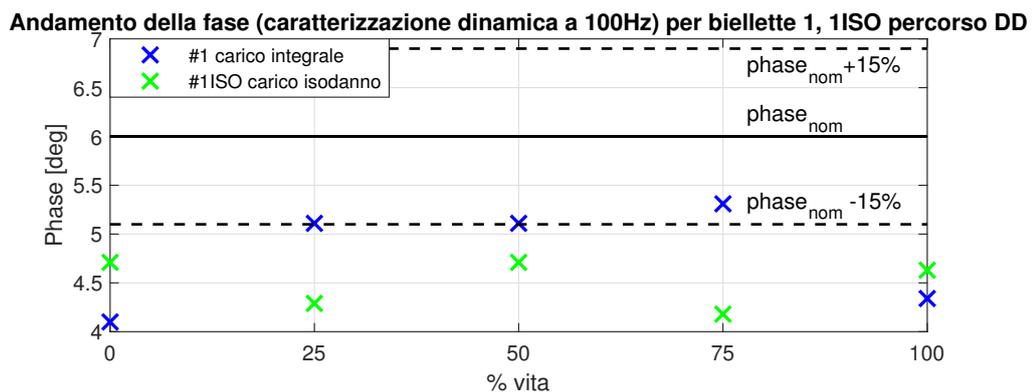


Figura 6.26: Confronto biellette 1, 1ISO DD: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 100Hz) per biellette 2, 2ISO percorso DC

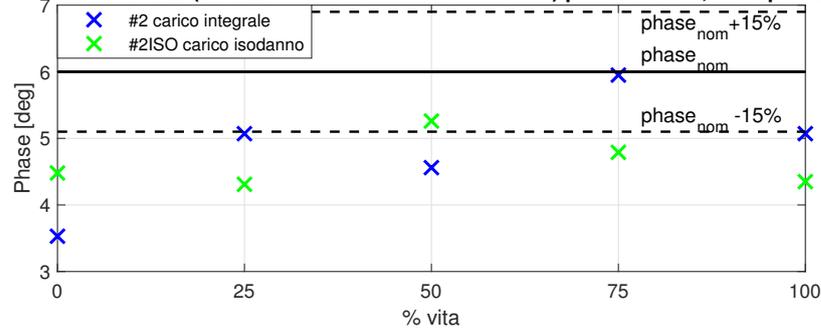


Figura 6.27: Confronto biellette 2, 2ISO DC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 100Hz) per biellette 3, 3ISO percorso AD

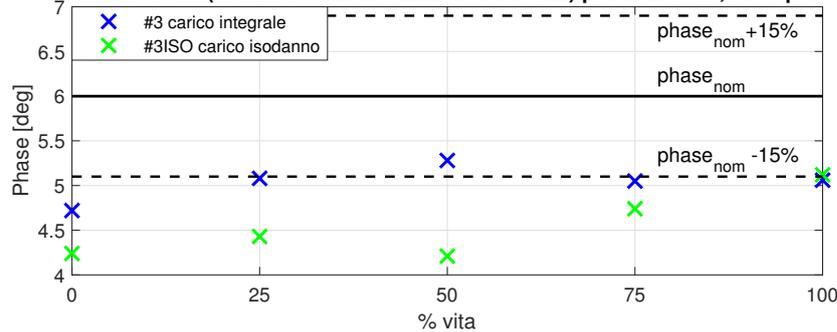


Figura 6.28: Confronto biellette 3, 3ISO AD: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 100Hz) per biellette 4, 4ISO percorso AC

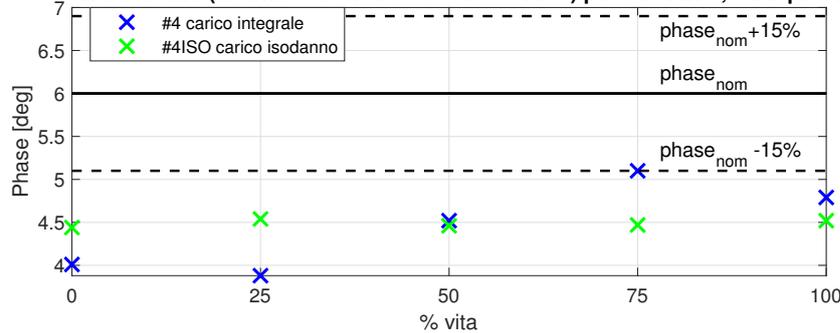


Figura 6.29: Confronto biellette 4, 4ISO AC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Andamento della fase (caratterizzazione dinamica a 100Hz) per biellette 5, 5ISO percorso LC

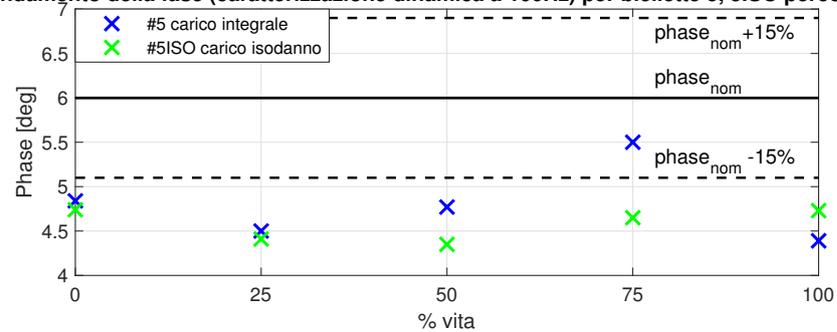


Figura 6.30: Confronto biellette 5, 5ISO LC: fasi (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Nella Tabella 6.16 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti dall'applicazione del carico integrale. Nella Tabella 6.17 si riportano invece i risultati ottenuti dall'applicazione del carico isodanno.

Phase _{nom} ±15% [deg]	%vita componente	Fase, caratterizzazione dinamica @ 100Hz carico integrale [deg]					COV [%]
		bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
6±15%	0%	4.1	3.53	4.72	4.01	4.84	12.74%
	25%	5.11	5.07	5.08	3.88	4.5	11.4%
	50%	5.11	4.56	5.28	4.52	4.77	6.94%
	75%	5.31	5.95	5.05	5.10	5.5	6.77%
	100%	4.34	5.07	5.06	4.79	4.39	7.44%

Tabella 6.16: Riepilogo risultati fase @ 100 Hz carico integrale- Valori assoluti

Phase _{nom} ±15% [deg]	%vita componente	Fase, caratterizzazione dinamica @ 100Hz carico isodanno [deg]					COV [%]
		bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
6±15%	0%	4.71	4.48	4.24	4.44	4.74	4.57%
	25%	4.29	4.31	4.43	4.54	4.41	2.29%
	50%	4.71	5.26	4.21	4.46	4.35	8.97%
	75%	4.18	4.79	4.74	4.47	4.65	5.43%
	100%	4.63	4.35	5.12	4.52	4.73	6.17%

Tabella 6.17: Riepilogo risultati fase, @ 100 Hz carico isodanno- Valori assoluti

Dai risultati ottenuti è emerso che:

- per ciascuno dei 5 percorsi, in presenza di carico isodanno, tutte le fasi ricadono all'esterno della banda di tolleranza, ad ogni percentuale di danneggiamento considerata ad eccezione del 50% con percorso DC e del 100% con AD. Per quanto concerne invece il carico integrale i valori numerici rientrano tutti all'esterno del range ammissibile a meno che il valore al 75% relativo al percorso DC. Nel caso di carico integrale tutti gli altri valori che rientrano nel range di tolleranza sono comunque spostati verso il limite inferiore della banda.
- si assiste, sia per il carico isodanno sia per il carico integrale, ad uno *shift* di tutti i valori che non rientrano nella banda al di sotto del limite inferiore ammissibile.
- considerando i valori del COV ottenuti a parità di percentuale vita del componente, riportati nell'ultima colonna della Tabella 6.16, si nota come le diverse modalità di somministrazione del carico portino a dei risultati pressoché uguali, infatti il massimo valore del COV ottenuto è inferiore al 13%, ciò è indice di una bassa dispersione dei valori rispetto al loro valor medio. Si nota inoltre come i valori del COV relativi alle fasi ottenute dalla caratterizzazione ad alta frequenza siano più alti, ciò è sintomo di un comportamento smorzante più efficace del materiale a basse frequenze.
- nel caso di applicazione di carico isodanno i valori del COV risultano inferiori, sintomatico di una minore dispersione dei valori attorno al valor medio.

6.5 ANALISI DEI RISULTATI SU TUTTE LE BIELLETTE: CONFRONTO CON I VALORI A NUOVO

In questa sezione il confronto delle rigidità statiche e dinamiche fra le 5 diverse modalità di somministrazione del carico è finalizzato a valutare se, anche per il caso di una storia di carico isodanno, l'ordine di applicazione dei carichi ha effetto sul danneggiamento complessivo del provino.

Nello specifico il confronto dei risultati è stato fatto per mezzo di rapporti adimensionali di rigidità così da uniformare i risultati delle diverse biellette. Infatti l'obiettivo, in questo caso, è quello di poter effettuare un confronto incrociato fra esse che sia indipendente dal valore assoluto della rigidità a nuovo di ciascuna bielletta.

I rapporti adimensionali in termini percentuali tenuti in considerazione sono stati ricavati rapportando il valore "attuale" di rigidità con quello di rigidità a nuovo, come segue:

$$\text{Variazione \%} = \frac{K_{\text{attuale}}}{K_{0\%}} \cdot 100$$

Si ribadisce che questa operazione è necessaria per poter normalizzare i dati sperimentali e fare un confronto incrociato fra biellette differenti, ciò è dovuto al fatto che non vi è nessuna garanzia che le rigidità a nuovo di ciascun componente siano esattamente uguali fra loro, in quanto i processi produttivi possono indurre delle oscillazioni del valore della rigidità nominale, anche considerevoli ai fini del confronto che si vuole effettuare in questo lavoro.

Quanto descritto si ripete anche per la fase al fine di valutare come si modifica la capacità di smorzamento del materiale.

6.5.1 Rigidezza statica

Di seguito nelle Figure 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35 si riportano le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova raffrontando storia di carico integrale e isodanno.

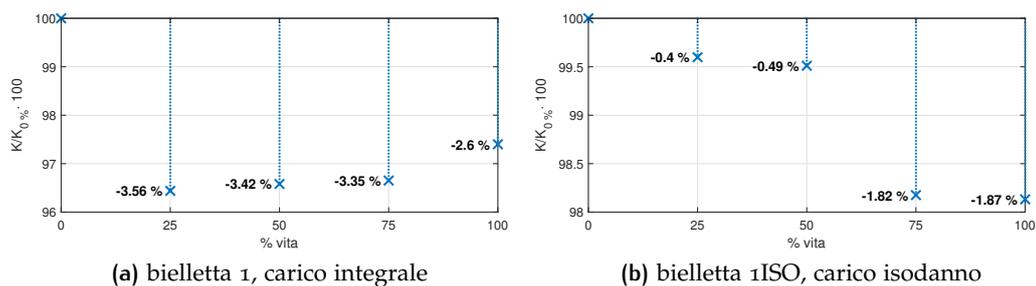


Figura 6.31: Confronto bielletta 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidità statica rispetto al valore a nuovo

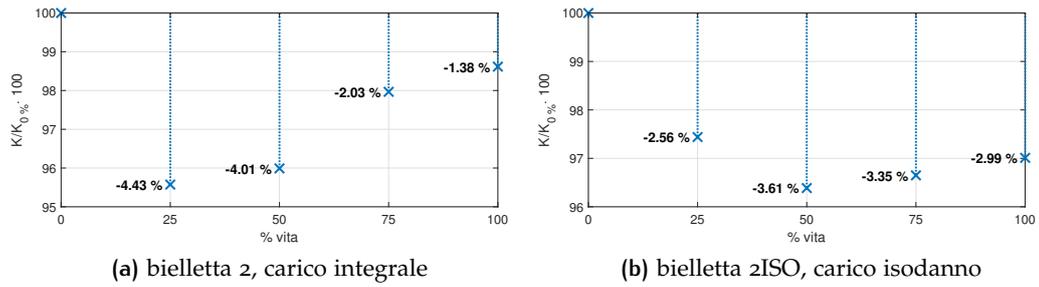


Figura 6.32: Confronto bielletta 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidezza statica rispetto al valore a nuovo

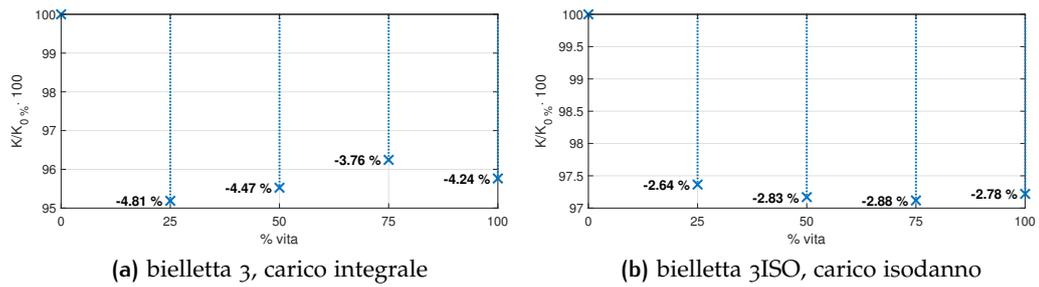


Figura 6.33: Confronto bielletta 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidezza statica rispetto al valore a nuovo

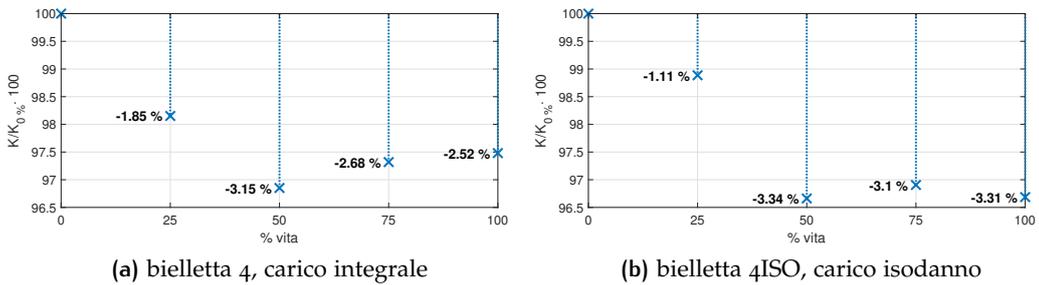


Figura 6.34: Confronto bielletta 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidezza statica rispetto al valore a nuovo

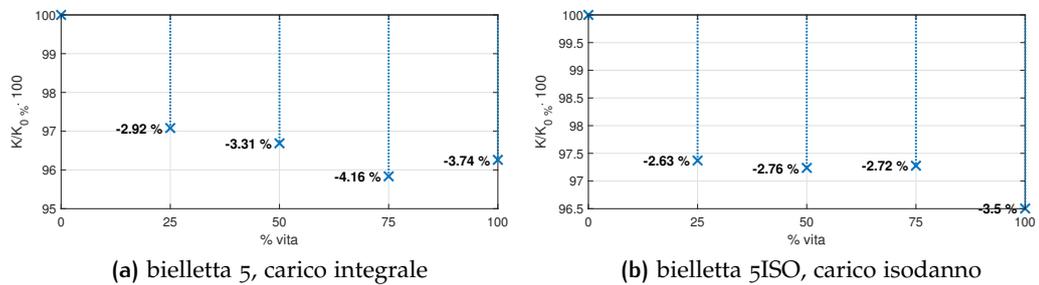


Figura 6.35: Confronto bielletta 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidezza statica rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione %					MEDIA
	Rigidezza statica con carico integrale					
	bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-3.56%	-4.43%	-4.81%	-1.85%	-2.92%	-3.51%
50%	-3.42%	-4.01%	-4.47%	-3.15%	-3.31%	-3.67%
75%	-3.35%	-2.03%	-3.76%	-2.68%	-4.16%	-3.20%
100%	-2.60%	-1.38%	-4.24%	-2.52%	-3.74%	-2.90%

Tabella 6.18: Riepilogo risultati rigidezza statica, carico integrale - Variazione percentuale [1]

%vita componente	Variazione %					MEDIA
	Rigidezza statica con carico isodanno					
	bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-0.4%	-2.56%	-2.64%	-1.11%	-2.63%	-1.87%
50%	-0.49%	-3.61%	-2.83%	-3.34%	-2.76%	-2.61%
75%	-1.82%	-3.35%	-2.88%	-3.1%	-2.72%	-2.77%
100%	-1.87%	-2.99%	-2.78%	-3.31%	-3.5%	-2.89%

Tabella 6.19: Riepilogo risultati rigidezza statica, carico isodanno - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti, come risultato comune per ciascuno dei 5 cicli affaticanti, è emerso che:

- a seguito del primo quarto di fatica raggiunta dal componente, si registra un decadimento medio della rigidezza pari al -3.51% per quanto concerne la storia di carico integrale e pari all' -1.87% per quanto concerne la storia di carico isodanno.
- per il carico integrale, al 50% della vita, il decadimento medio presenta il suo minimo ($\approx -4\%$), tornando poi a valori compresi fra il -2.5% ed il -3.5% nella seconda metà della vita (rispettivamente al 75% e fine vita).

Per il carico isodanno, al 50% della vita, il decadimento medio è pari -2.61% , presenta poi il suo minimo nella seconda metà della vita (rispettivamente al 75% pari a -2.77% e poi ritorna al -2.89% a fine vita).

Si nota come i valori del decadimento medio a fine vita tra caso integrale e caso isodanno sono i medesimi (-2.9%).

- Dai risultati delle rigidezze statiche ottenuti, per le prove con carichi isodanno, riorganizzati in Tabella 6.19, si evince che il criterio di Palmgren-Miner riadattato, dimostrato per il carico integrale, è ampiamente verificato.

Si nota infatti come l'ordine di somministrazione dei carichi non ha influenza sulla modalità di decadimento della rigidezza statica.

6.5.2 Rigidezza dinamica a bassa frequenza

Nelle Figure 6.36, 6.37, 6.38, 6.39, 6.40 si riportano, le variazioni percentuali relative alla rigidezza dinamica a bassa frequenza a nuovo (25 Hz).

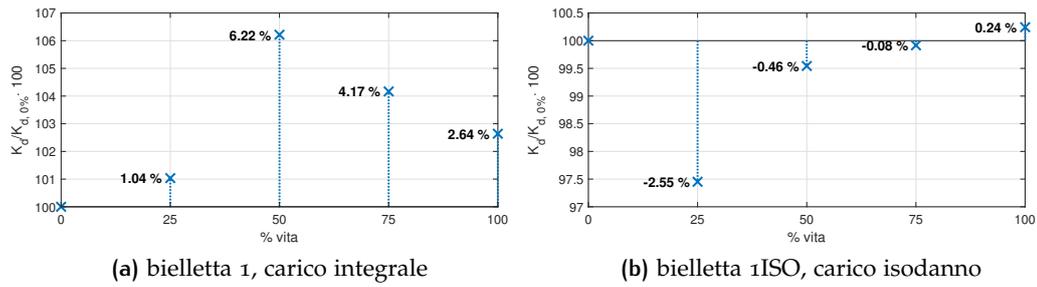


Figura 6.36: Confronto bielletta 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidezza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

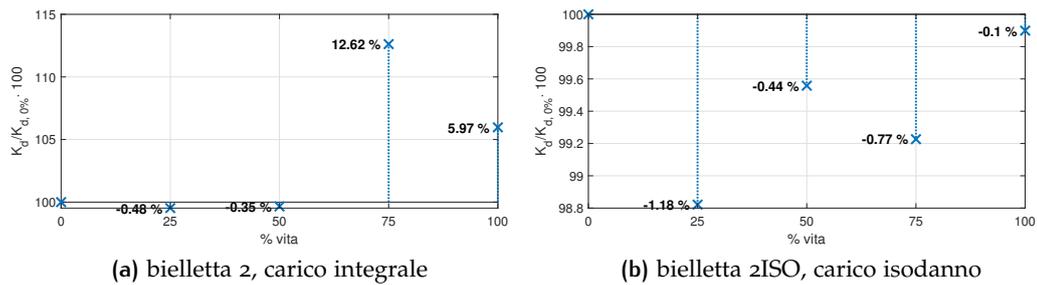


Figura 6.37: Confronto bielletta 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidezza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

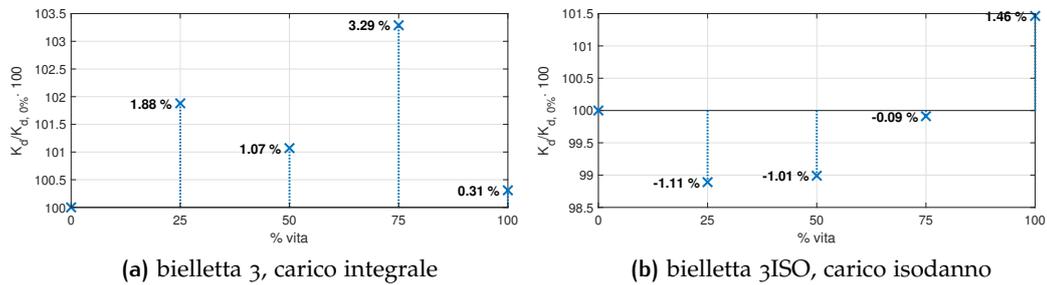


Figura 6.38: Confronto bielletta 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidezza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

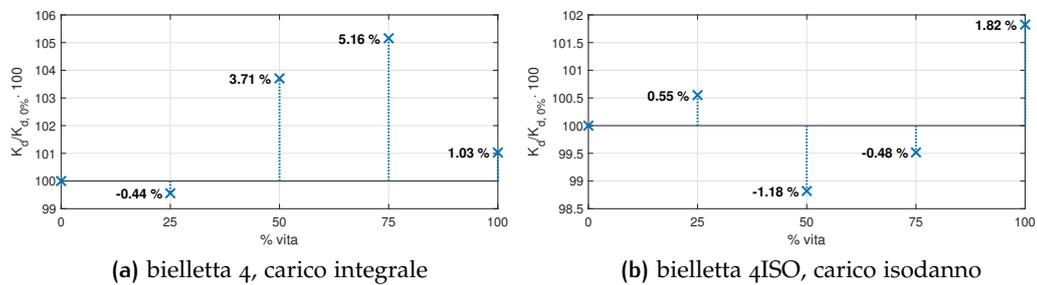


Figura 6.39: Confronto bielletta 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidezza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

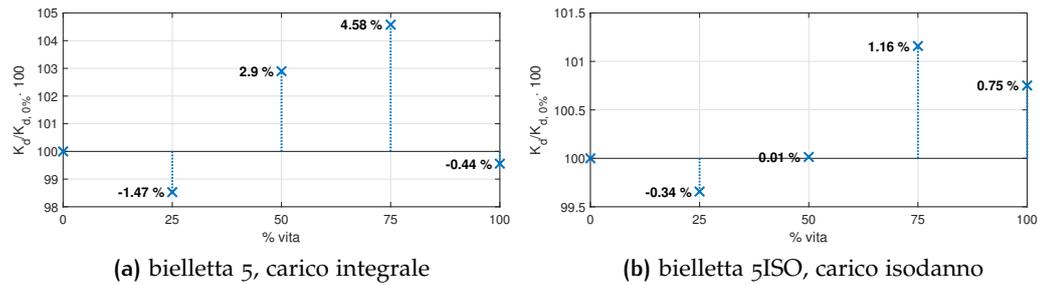


Figura 6.40: Confronto bielletta 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidità dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

In Tabella 6.20 sono riorganizzati i dati dei grafici in forma compatta, con i relativi valori medi del decadimento di ciascuna delle biellette durante il ciclo affaticante integrale, in Tabella 6.21 sono riorganizzati i dati relativi al ciclo affaticante isodanno.

%vita componente	Variazione % rigidezza dinamica @25 Hz con carico integrale					MEDIA
	bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	+1.04%	-0.48%	+1.88%	-0.44%	-1.47%	+0.11%
50%	+6.22%	-0.35%	+1.07%	+3.71%	+2.90%	+2.71%
75%	+4.17%	+12.62%	+3.29%	+5.16%	+4.58%	+5.96%
100%	+2.64%	+5.97%	+0.31%	+1.03%	-0.44%	+1.90%

Tabella 6.20: Riepilogo risultati rigidità dinamica @ 25 Hz carico integrale - Variazione percentuale [1]

%vita componente	Variazione % rigidezza dinamica @25 Hz con carico isodanno					MEDIA
	bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-2.55%	-1.18%	-1.11%	+0.55%	-0.34%	-0.93%
50%	-0.46%	-0.44%	-1.01%	-1.18%	+0.01%	-0.62%
75%	-0.08%	-0.77%	-0.09%	-0.48%	+1.16%	-0.05%
100%	+0.24%	-0.1%	+1.46%	+1.82%	+0.75%	+0.83%

Tabella 6.21: Riepilogo risultati rigidità dinamica @ 25 Hz carico isodanno - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti, come risultato comune per ciascuno dei 5 cicli affaticanti, sia per il carico integrale, sia per il carico isodanno è emerso globalmente un irrigidimento del componente a fine vita.

Questo irrigidimento è verificato per tutte le biellette in prova nel caso di applicazione di storia di carico integrale, mentre per il carico isodanno ciò si verifica per tutti i percorsi eccetto uno, ovvero il DC.

L'irrigidimento che si ha con l'applicazione di un carico isodanno risulta più blando rispetto a quello che si ha per il carico integrale.

In particolare:

- per il carico integrale, al seguito del primo quarto di fatica raggiunta dal componente, si registrano dei casi in cui vi è un leggero decadimento, mentre per quanto riguarda le prove 1-DD e 3-AD si nota fin da subito un irrigidimento.
- nel caso di carico isodanno invece l'irrigidimento iniziale si esplica solo per la bielletta 4ISO-AC.

Questo risultato è indice del fatto che le biellette sottoposte a specifici ordini di somministrazione del carico (DD, AD ed LC) manifestano l'irrigidimento a percentuali di vita più avanzate.

- Per il caso di carico integrale, al 50% della vita, si manifesta un irrigidimento medio più accentuato (+2.71%) che tocca il suo massimo (+5.96%) al 75% della vita del componente per poi tornare a valori relativamente contenuti.
- Per il caso di carico isodanno invece, al 50% della vita, si manifesta un decadimento medio lieve (-0.62%) che si attesta pari al -0.05% al 75% della vita del componente.

6.5.3 Rigidezza dinamica ad alta frequenza

Nelle Figure 6.41, 6.42, 6.43, 6.44, 6.45 si riportano, le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette, in riferimento alla rigidezza dinamica ad alta frequenza a nuovo (100 Hz).

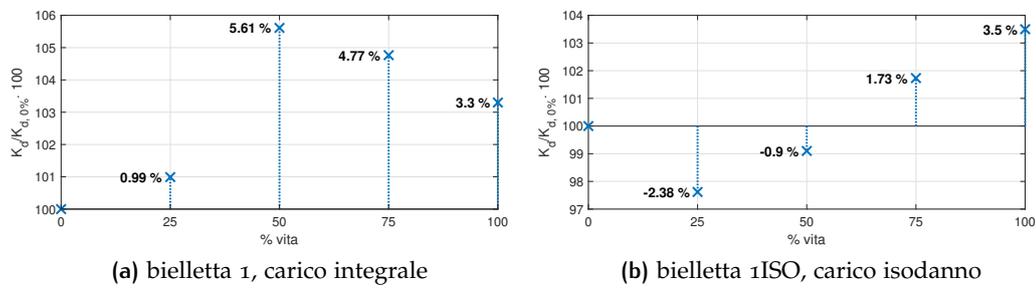


Figura 6.41: Confronto bielletta 1 [1], 1ISO DD: variazione percentuale della rigidezza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

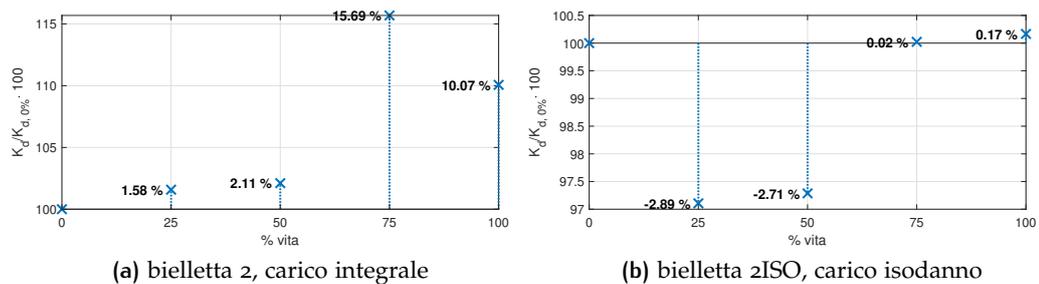


Figura 6.42: Confronto bielletta 2 [1], 2ISO DC: variazione percentuale della rigidezza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

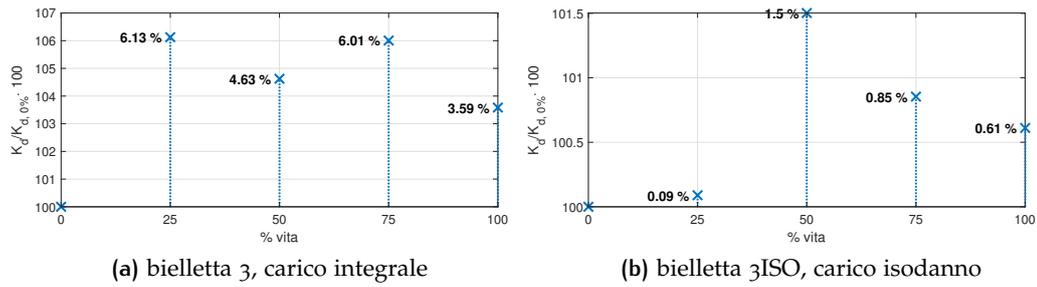


Figura 6.43: Confronto bielle 3 [1], 3ISO AD: variazione percentuale della rigidità dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

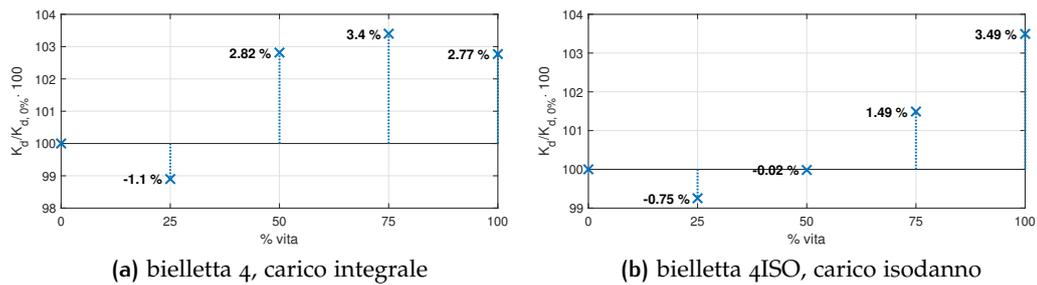


Figura 6.44: Confronto bielle 4 [1], 4ISO AC: variazione percentuale della rigidità dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

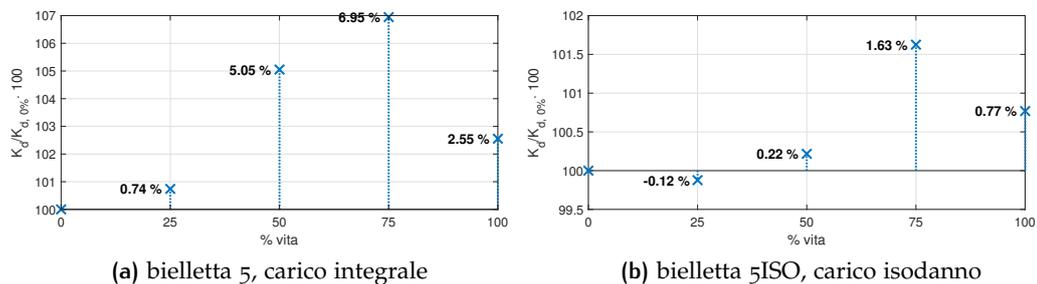


Figura 6.45: Confronto bielle 5 [1], 5ISO LC: variazione percentuale della rigidità dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

In Tabella 6.22 sono riorganizzati i dati dei grafici in forma compatta, con i relativi valori medi del decadimento di ciascuna delle bielle durante il ciclo affaticante integrale. In Tabella 6.23 vengono riportati i dati per il ciclo affaticante isodanno.

%vita componente	Variazione % rigidità dinamica @100 Hz con carico integrale					MEDIA
	bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	+0.99%	+1.58%	+6.13%	-1.10%	+0.74%	+1.67%
50%	+5.61%	+2.11%	+4.63%	+2.82%	+5.05%	+4.04%
75%	+4.77%	+15.69%	+6.01%	+3.40%	+6.95%	+7.36%
100%	+3.30%	+10.07%	+3.59%	+2.77%	+2.55%	+4.46%

Tabella 6.22: Riepilogo risultati rigidità dinamica @ 100 Hz carico integrale - Variazione percentuale [1]

%vita componente	Variazione % rigidezza dinamica @100 Hz con carico isodanno					MEDIA
	bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-2.38%	-2.89%	+0.09%	-0.75%	-0.12%	-1.21%
50%	-0.9%	-2.71%	+1.5%	-0.02%	+0.22%	-0.38%
75%	+1.73%	+0.02%	+0.85%	+1.49%	+1.63%	+1.15%
100%	+3.5%	+0.17%	+0.61%	+3.49%	+0.77%	+1.71%

Tabella 6.23: Riepilogo risultati rigidezza dinamica @ 100 Hz carico isodanno - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti, come risultato comune per ciascuno dei 5 cicli affaticanti è emerso globalmente un irrigidimento del componente analogamente a quanto ottenuto per le rigidezze dinamiche a bassa frequenza sia in presenza di carico integrale, sia in presenza di carico isodanno.

- Per quanto riguarda le prove con carico integrale, in termini di media, si nota fin da subito un irrigidimento che aumenta fino a raggiungere un picco medio pari a +7.36%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 75% del danneggiamento.

Infine nell'ultimo quarto di vita si assiste ad un leggero rilassamento del materiale che riporta i valori di rigidezza dinamica rispetto a quelli a nuovo a valori leggermente più grandi solo di qualche punto percentuale ($\approx +4\%$).

- Per quanto riguarda le prove con carico isodanno, in termini di media, si nota inizialmente un rilassamento, successivamente il valore di rigidezza aumenta fino a raggiungere un picco medio pari a +1.71%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 100% del danneggiamento.

6.5.4 Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica a bassa frequenza

Nelle Figure 6.46, 6.47, 6.48, 6.49, 6.50 si riportano, le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette, in riferimento allo smorzamento, ovvero alla fase in relazione alla caratterizzazione dinamica a bassa frequenza a nuovo (25 Hz).

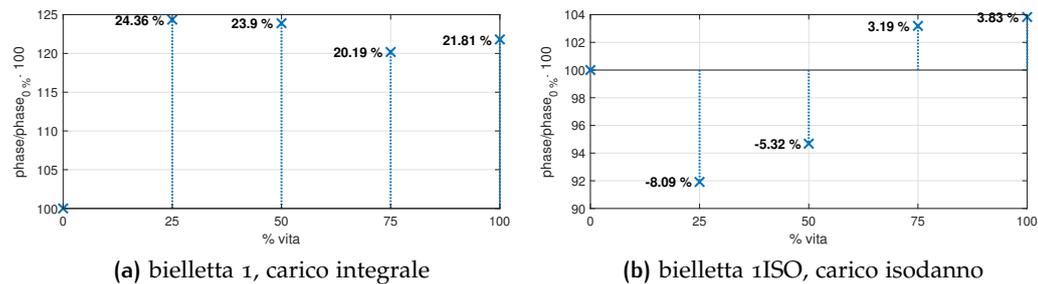


Figura 6.46: Confronto bielletta 1, 1ISO DD: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

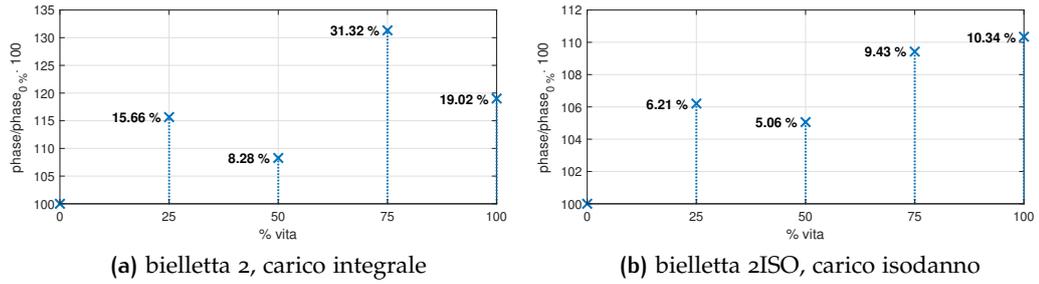


Figura 6.47: Confronto biellette 2, 2ISO DC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

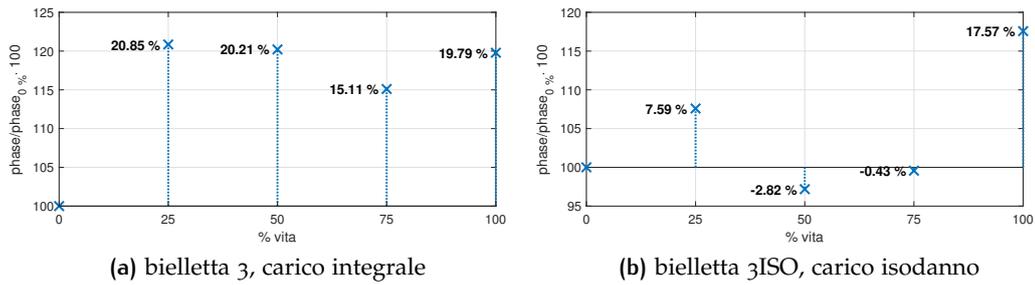


Figura 6.48: Confronto biellette 3, 3ISO AD: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

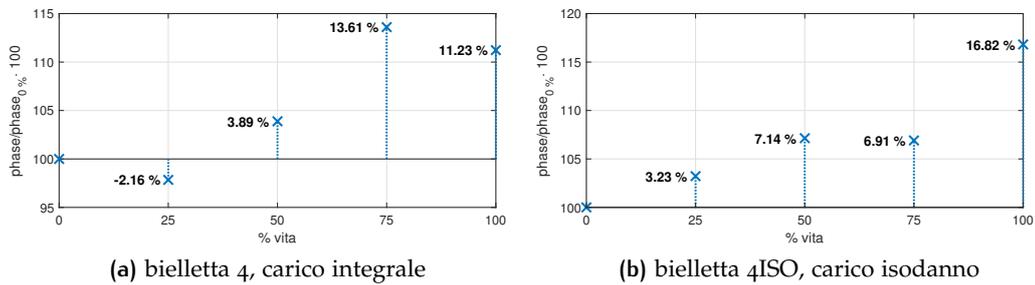


Figura 6.49: Confronto biellette 4, 4ISO AC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

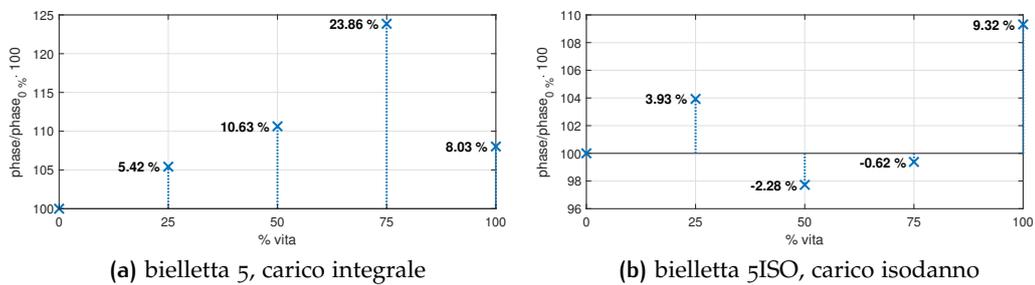


Figura 6.50: Confronto biellette 5, 5ISO LC: variazione percentuale della fase dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

In Tabella 6.24 sono riorganizzati i dati grafici in forma compatta, con i relativi valori medi del decadimento di ciascuna delle biellette durante il ciclo affaticante integrale.

In Tabella 6.25 vengono riportati i dati per il ciclo affaticante isodanno.

%vita componente	Variazione % fase dinamica @25 Hz con carico integrale					MEDIA
	bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	+24.36%	+15.66%	+20.85%	-2.16%	+5.42%	+12.83%
50%	+23.9%	+8.28%	+20.21%	+3.89%	+10.63%	+13.38%
75%	+20.19%	+31.32%	+15.11%	+13.61%	+23.86%	+20.82%
100%	+21.81%	+19.02%	+19.79%	+11.23%	+8.03%	+15.98%

Tabella 6.24: Riepilogo risultati fase dinamica @ 25 Hz carico integrale - Variazione percentuale

%vita componente	Variazione % fase dinamica @25 Hz con carico isodanno					MEDIA
	bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-8.09%	+6.21%	+7.59%	+3.23%	+3.93%	+2.57%
50%	-5.32%	+5.06%	-2.82%	+7.14%	-2.28%	+0.36%
75%	+3.19%	+9.43%	-0.43%	+6.91%	-0.62%	+3.69%
100%	+3.83%	+10.34%	+17.57%	+16.82%	+9.32%	+11.57%

Tabella 6.25: Riepilogo risultati fase dinamica @ 25 Hz carico isodanno - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti, come risultato comune per ciascuno dei 5 cicli affaticanti è emerso globalmente un aumento della fase.

Ciò implica che la capacità di smorzamento del materiale diminuisce e il ritardo tra carico e risposta del materiale aumenta.

Ciò accade sia in presenza di carico integrale sia in presenza di carico isodanno.

- Per quanto riguarda le prove con carico integrale, in termini di media, si nota fin da subito un aumento dello sfasamento che aumenta fino a raggiungere un picco medio pari a +20.82%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 75% del danneggiamento.

Infine nell'ultimo quarto di vita si assiste ad un leggero rilassamento del materiale che riporta i valori della fase rispetto a quelli a nuovo a valori leggermente più grandi del $\approx +15\%$.

- Per quanto riguarda le prove con carico isodanno, in termini di media, si nota inizialmente un aumento della fase, il valore scende poi al 25% per poi aumentare nuovamente fino a raggiungere un picco medio pari a +11.57%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 100% del danneggiamento.
- In termini di media, a fine vita si ottiene approssimativamente lo stesso aumento di fase tra carico isodanno e carico integrale che si attesta pari a $\approx 12 \div 15\%$.

6.5.5 Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica ad alta frequenza

Nelle Figure 6.51, 6.52, 6.53, 6.54, 6.55 si riportano, le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette, in riferimento allo smorzamento, ovvero alla fase in relazione alla caratterizzazione dinamica ad alta frequenza a nuovo (100 Hz).

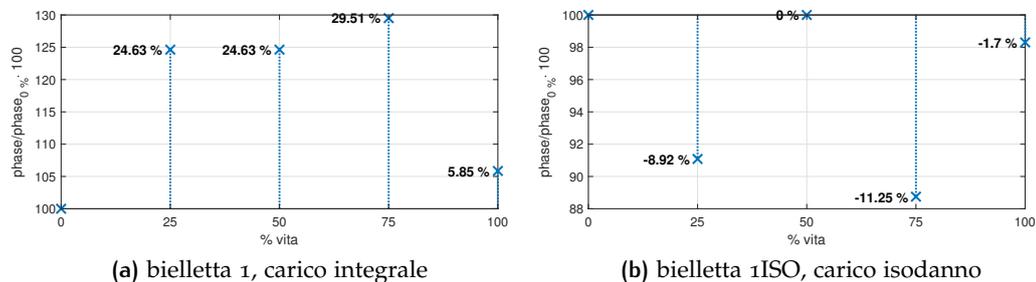


Figura 6.51: Confronto biellette 1, 1ISO DD: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

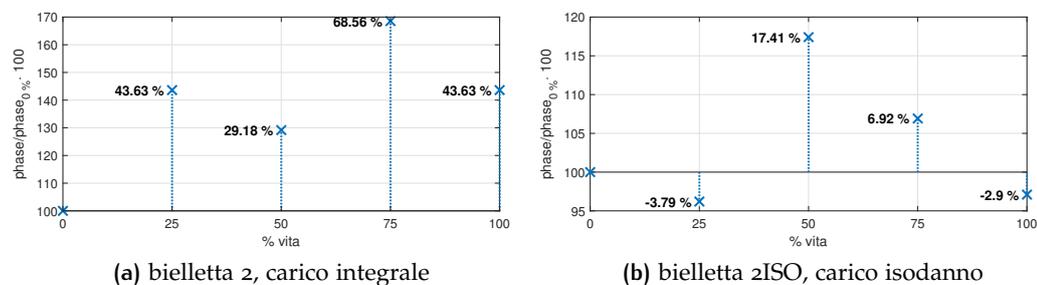


Figura 6.52: Confronto biellette 2, 2ISO DC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

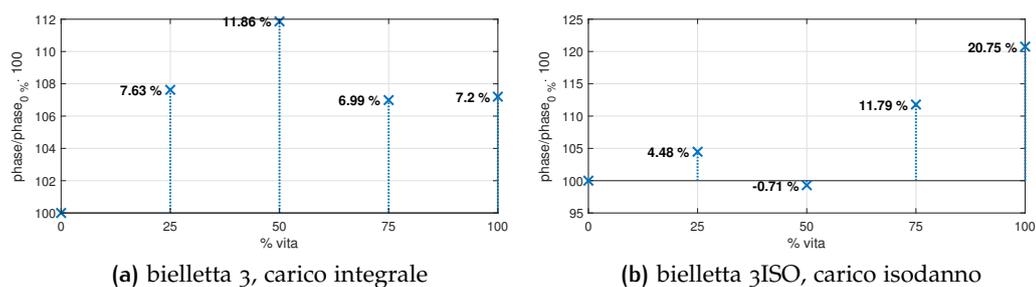


Figura 6.53: Confronto biellette 3, 3ISO AD: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

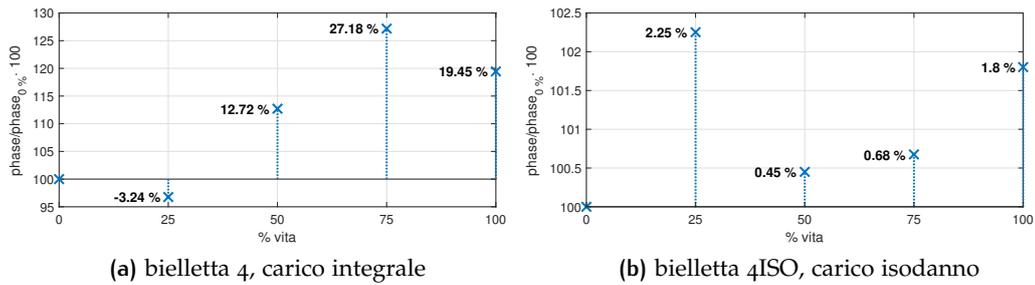


Figura 6.54: Confronto bielle 4, 4ISO AC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

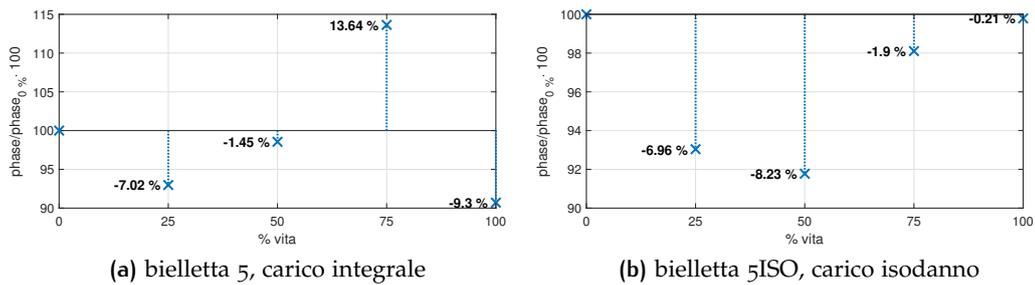


Figura 6.55: Confronto bielle 5, 5ISO LC: variazione percentuale della fase dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

In Tabella 6.26 sono riorganizzati i dati grafici in forma compatta, con i relativi valori medi del decadimento di ciascuna delle bielle durante il ciclo affaticante integrale.

In Tabella 6.27 vengono riportati i dati per il ciclo affaticante isodanno.

%vita componente	Variazione % fase dinamica @100 Hz con carico integrale					MEDIA
	bielletta 1 DD	bielletta 2 DC	bielletta 3 AD	bielletta 4 AC	bielletta 5 LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	+24.6%	+43.63%	+7.63%	-3.24%	-7.02%	+13.12%
50%	+24.63%	+29.18%	+11.86%	+12.72%	-1.45%	+15.39%
75%	+29.51%	+68.56%	+6.99%	+27.18%	+13.64%	+29.17%
100%	+5.85%	+43.63%	+7.2%	+19.45%	-9.3%	+13.37%

Tabella 6.26: Riepilogo risultati fase dinamica @ 100 Hz carico integrale - Variazione percentuale

%vita componente	Variazione % fase dinamica @100 Hz con carico isodanno					MEDIA
	bielletta 1ISO DD	bielletta 2ISO DC	bielletta 3ISO AD	bielletta 4ISO AC	bielletta 5ISO LC	
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-8.92%	-3.79%	4.48%	+2.25%	-6.96%	-2.59%
50%	0%	+17.41%	-0.71%	+0.45%	-8.23%	+1.78%
75%	-11.25%	+6.92%	+11.79%	+0.68%	-1.9%	+1.25%
100%	-1.7%	-2.9%	+20.75%	+1.8%	-0.21%	+3.55%

Tabella 6.27: Riepilogo risultati fase dinamica @ 100 Hz carico isodanno - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti, come risultato comune per ciascuno dei 5 cicli affaticanti è emerso globalmente un aumento della fase per quanto concerne il carico integrale, ad eccezione del solo percorso LC. Ciò implica che la capacità di smorzamento del materiale diminuisce e il ritardo tra carico e risposta del materiale aumenta.

L'aumento della fase si ha invece per il carico isodanno solo ed esclusivamente per i percorsi AD e AC.

- Per quanto riguarda le prove con carico integrale, in termini di media, si nota fin da subito un aumento dello sfasamento che incrementa fino a raggiungere un picco medio pari a +29.17%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 75% del danneggiamento.

Infine nell'ultimo quarto di vita si assiste ad un leggero rilassamento del materiale che riporta i valori della fase rispetto a quelli a nuovo a valori leggermente più grandi del +13.37%.

L'andamento dello sfasamento per la dinamica a bassa frequenza si ripete dunque per la dinamica ad alta frequenza, ma con valori più alti.

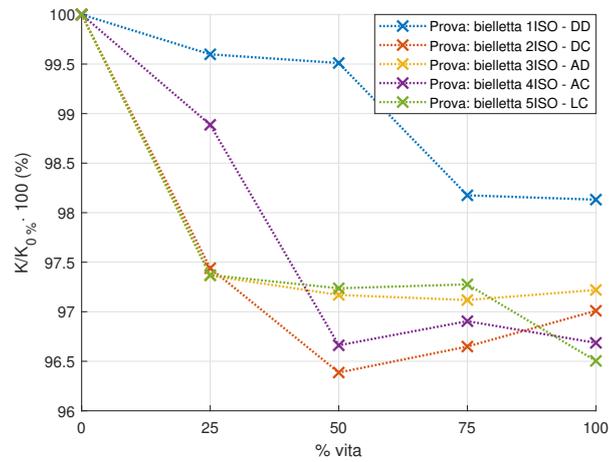
- Per quanto riguarda le prove con carico isodanno, in termini di media, si nota inizialmente una riduzione della fase. Lo sfasamento tende poi ad aumentare fino a raggiungere un picco medio pari a +3.55%, nel momento in cui le biellette hanno accumulato il 100% del danneggiamento.
- In termini di media, a differenza del caso dinamico a bassa frequenza, a fine vita si ottengono valori differenti di aumento della fase rispetto alla condizione a nuovo per carico isodanno e integrale: l'incremento di fase risulta più critico nel caso del carico integrale ($\approx 14\%$) e più contenuta nel caso del carico isodanno ($\approx 4\%$).

6.6 IL DANNEGGIAMENTO COME FUNZIONE DI STATO

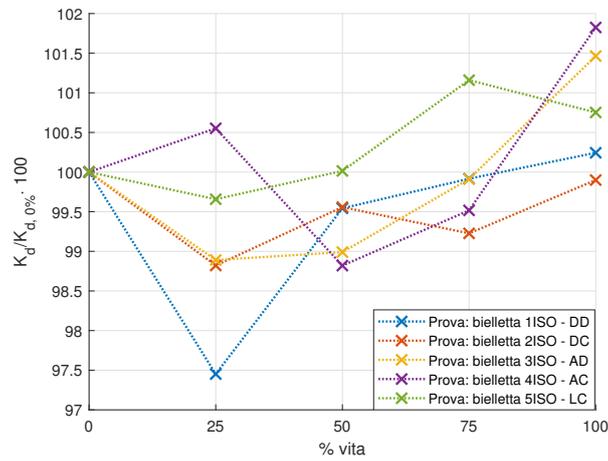
In questa sezione sono stati utilizzati i risultati relativi alle variazioni percentuali viste nel paragrafo 6.5 con l'obiettivo di individuare un effetto della fatica analogo ad una funzione di stato. Visti i risultati ottenuti dal paragrafo precedente, secondo i quali l'ordine di somministrazione dei carichi non ha praticamente influenza sul decadimento della rigidità, si è pensato di fare un confronto monte-valle dei decadimenti ottenuti con tutte e 5 le prove affaticanti: così come nella funzione di stato si guarda solo agli estremi di una qualsivoglia trasformazione, allo stesso modo in questa analisi si vuole ignorare tutto ciò che è compreso fra inizio e fine vita del componente e considerare solamente gli stati estremi appena menzionati.

Termodinamicamente parlando, la funzione di stato è una grandezza, la cui variazione nel passare da uno stato iniziale "A" ad uno stato finale "B" dipende solamente dalle condizioni degli stessi stati "A" e "B", e non dal particolare percorso seguito durante la trasformazione. Adattando idealmente la definizione termodinamica a questa situazione, si vuole indagare se, partendo da delle condizioni iniziali di rigidità (stato "A"), le quali sono comuni fra tutte le prove, il decadimento raggiunto a fine vita (stato "B") risulta essere indipendente dal tipo di ciclo affaticante (*percorso di trasformazione*) cui il componente è stato sottoposto. Quanto detto per la rigidità verrà ripetuto anche per lo smorzamento.

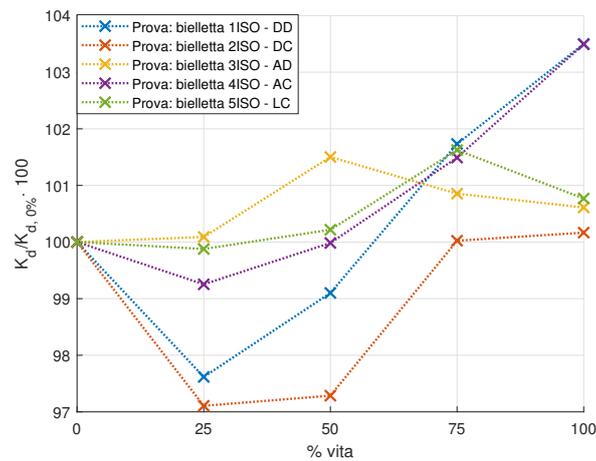
6.6.1 Confronti fra le rigidezze statiche e dinamiche



(a) Rigidezza statica, carico isodanno

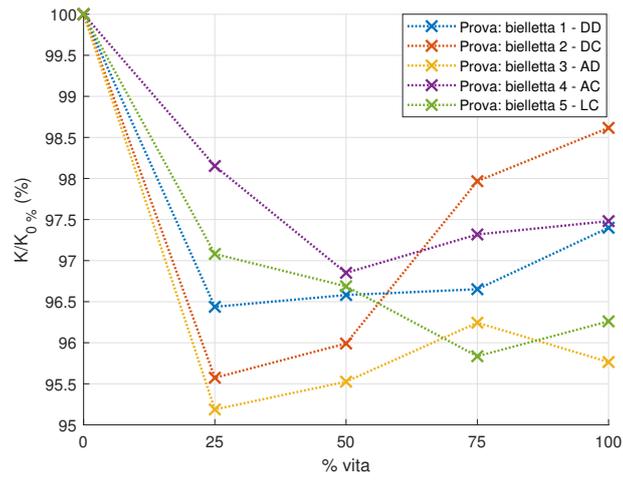


(b) Rigidezza dinamica @25 Hz, carico isodanno

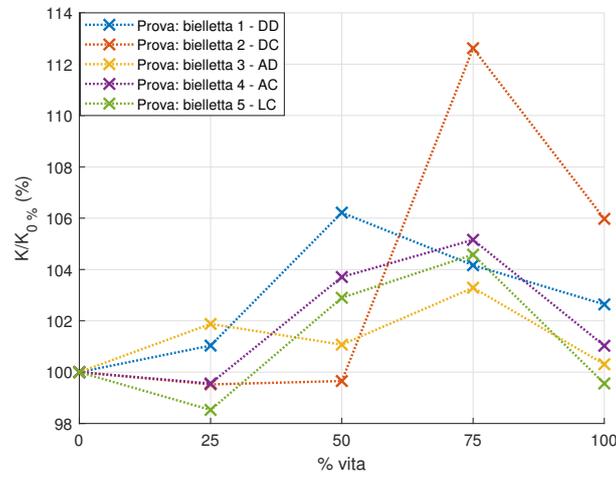


(c) Rigidezza dinamica @100 Hz, carico isodanno

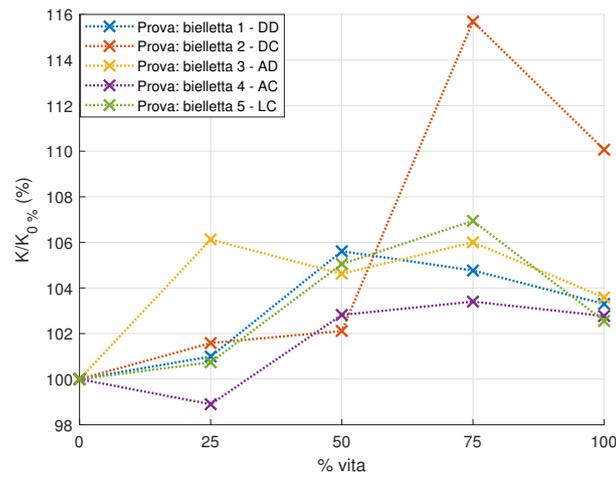
Figura 6.56: Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezze, carico isodanno



(a) Rigidezza statica, carico integrale



(b) Rigidezza dinamica @25 Hz, carico integrale



(c) Rigidezza dinamica @100 Hz, carico integrale

Figura 6.57: Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza, carico integrale [1]

Da un esame approfondito degli andamenti ottenuti nelle Figure 6.56 e 6.57, emerge che l'aumento della frequenza alla quale vengono effettuati i cicli durante le caratterizzazioni (si consideri che la caratterizzazione statica è assimilabile ad una prova dinamica con frequenza che tende allo zero) ha un ruolo chiave nel far risaltare l'effetto funzione di stato cercato sia nel caso di applicazione di un ciclo affaticante integrale che isodanno.

Difatti ponendo l'attenzione sui valori delle variazioni in corrispondenza allo stato finale (ovvero al 100% della vita), si nota come ci sia un progressivo raggruppamento dei valori sperimentali ottenuti nell'intorno di un valore finale comune man mano che aumenta la frequenza a cui la caratterizzazione è effettuata, eccetto per le prove 1ISO-DD e 4ISO-AC nel caso isodanno, eccetto la prova 2-DC nel caso di carico integrale.

Appare evidente come tutti i risultati, ed in particolar modo quelli relativi alle rigidità dinamiche ottenuti con la prova 2-DC (carico integrale), subiscano una deriva durante la seconda metà della prova. Si tratta della modalità di somministrazione del carico secondo durate crescenti.

Il fenomeno di deriva può essere spiegato pensando al fatto che la bielletta durante questo ciclo vita specifico viene sottoposta nella parte iniziale della prova ad una serie di storie di carico le cui durate sono ridotte rispetto a quelle somministrate a fine prova; di conseguenza si deduce che:

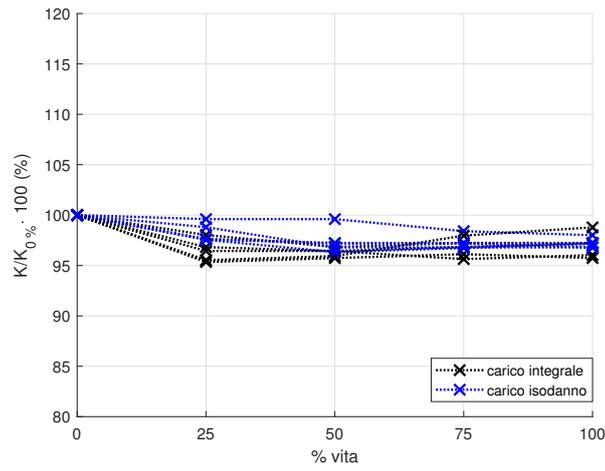
- In un primo tempo (storie di carico brevi) il materiale viene sollecitato in maniera discontinua e quindi il tempo in cui esso risulta sottoposto a delle deformazioni è anch'esso discontinuo. Per cui negli istanti di transizione fra i diversi cicli potrebbe verificarsi un recupero dello stress accumulato fino a quel momento.
- Progredendo con la prova (storie di carico lunghe) si avranno come prima delle piccole discontinuità fra un ciclo e l'altro, tuttavia, poiché le durate delle storie di carico si fanno sempre più lunghe, è possibile che il materiale riesca ad accumulare uno stato di stress maggiore rispetto a prima. Questo potrebbe essere un motivo che porta al tipo di deriva emersa dai risultati ottenuti.

Tale deriva invece non si manifesta nel caso di applicazione di carico isodanno per lo stesso percorso DC, questo perchè le durate dei vari percorsi sono in generale tutte estremamente ridotte, per cui non vi è un gap forte tra le varie durate.

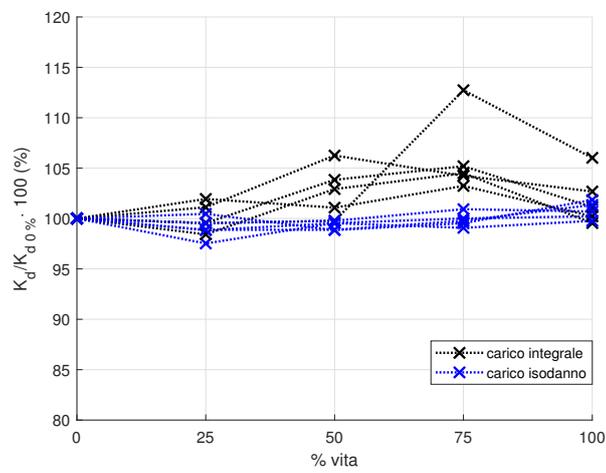
Dalla figura 6.58 emerge come globalmente l'applicazione di un ciclo affaticante isodanno porti a delle variazioni percentuali di rigidità che ricalcano quelle arretrate dall'applicazione di un carico integrale e risultano più stabili di queste ultime.

Introducendo una scala differente per quanto concerne l'asse delle ordinate (Figura 6.59), si nota che questo comportamento è vero tanto più aumenta la frequenza, per frequenza nulla (prova statica) vi è maggiore dispersione che invece non si riscontra per prove condotte a 25Hz e 100Hz.

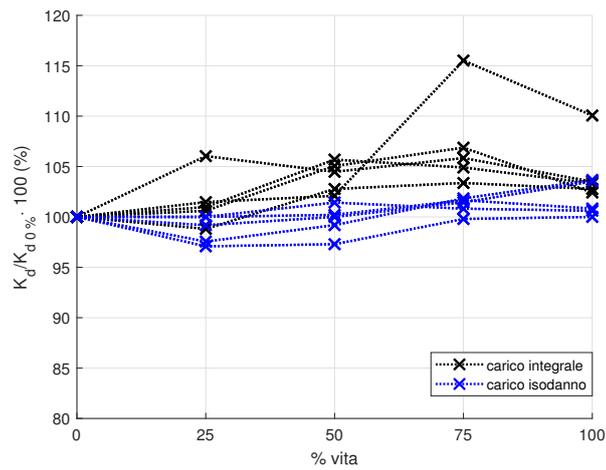
Nelle figure 6.58, 6.59 (a) e (b) l'unico dato che mostra deriva è quello relativo, come detto anche precedentemente, alla prova 2-DC (carico integrale).



(a) Rigidezza statica

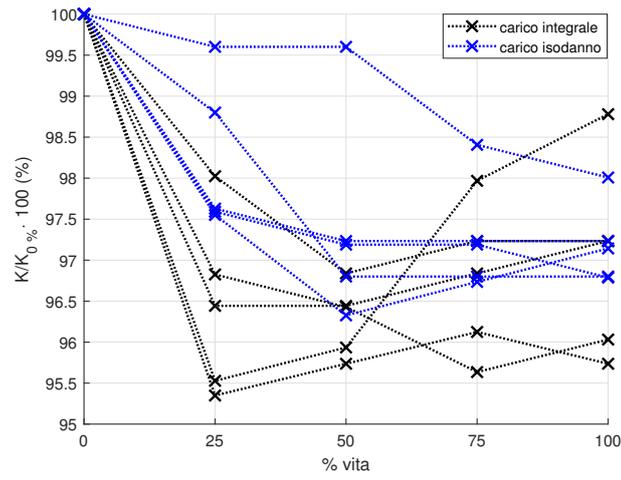


(b) Rigidezza dinamica @25 Hz

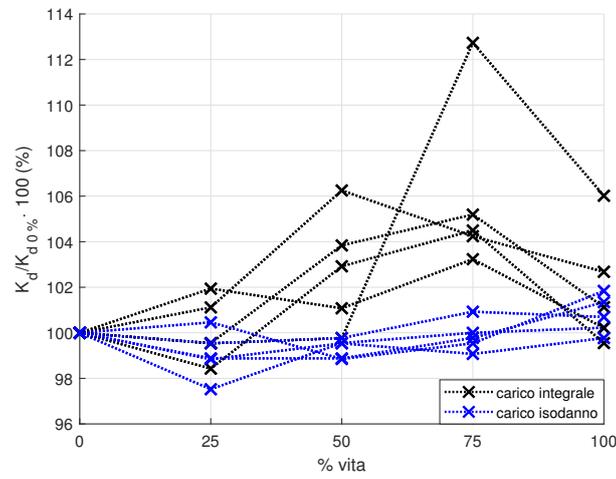


(c) Rigidezza dinamica @100 Hz

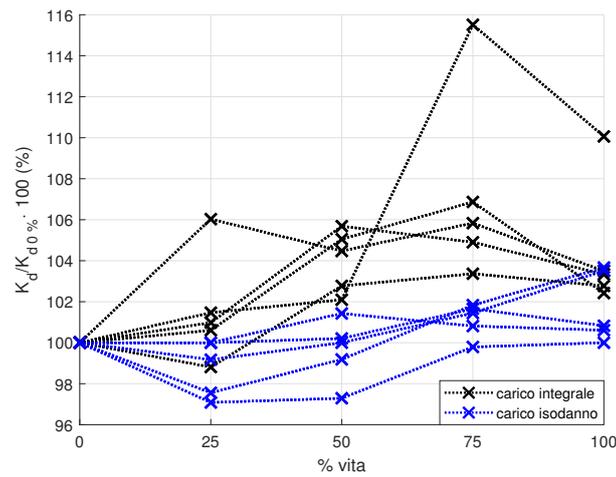
Figura 6.58: Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza tra carico integrale e isodanno



(a) Rigidezza statica



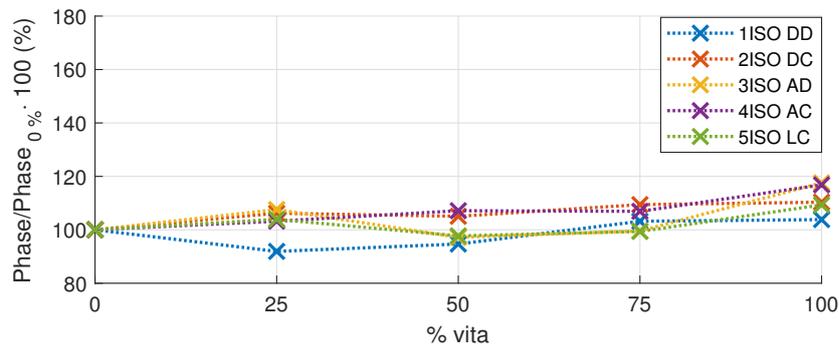
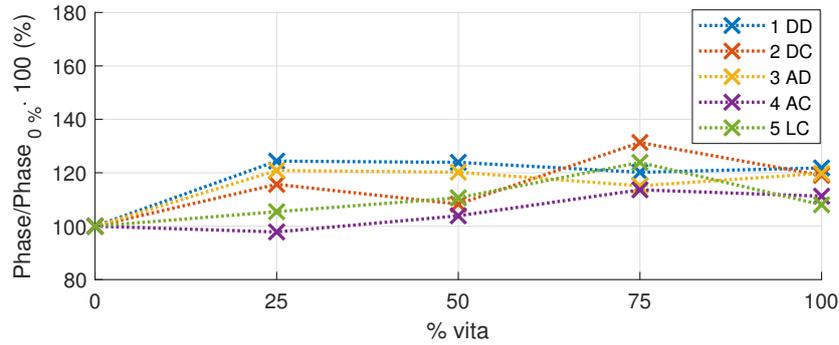
(b) Rigidezza dinamica @25 Hz



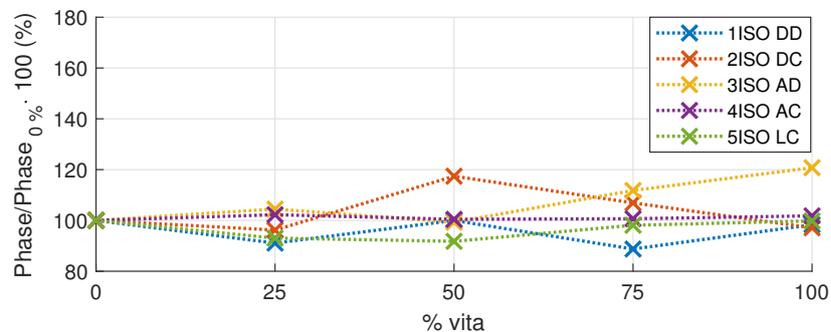
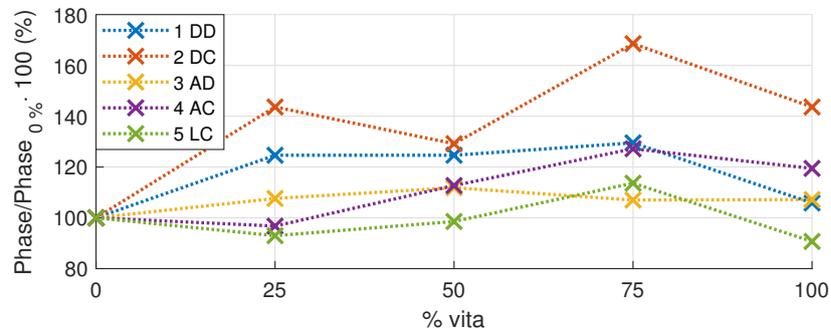
(c) Rigidezza dinamica @100 Hz

Figura 6.59: Zoom: Figura 6.58

6.6.2 Confronti fra smorzamento a bassa e ad alta frequenza



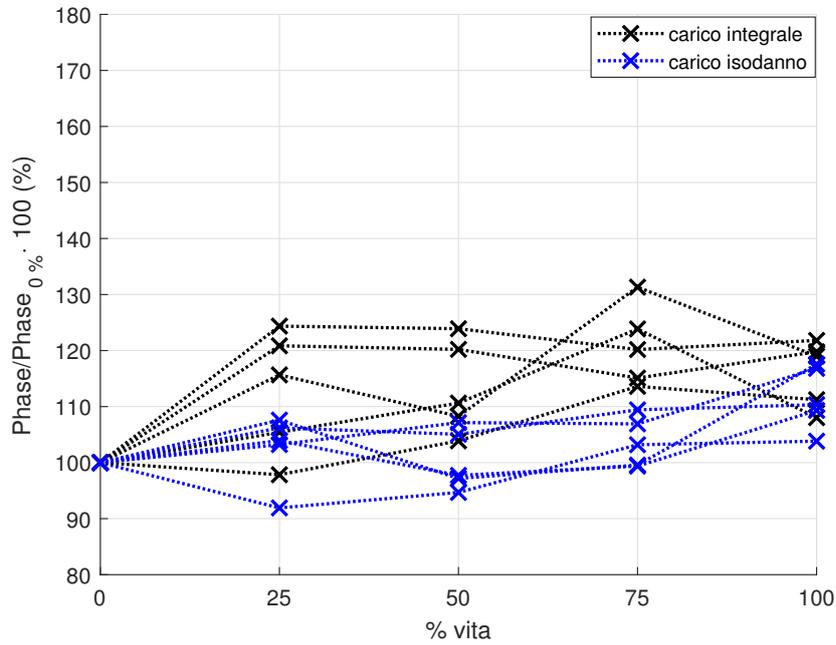
(a) Fase caratterizzazione dinamica @25 Hz



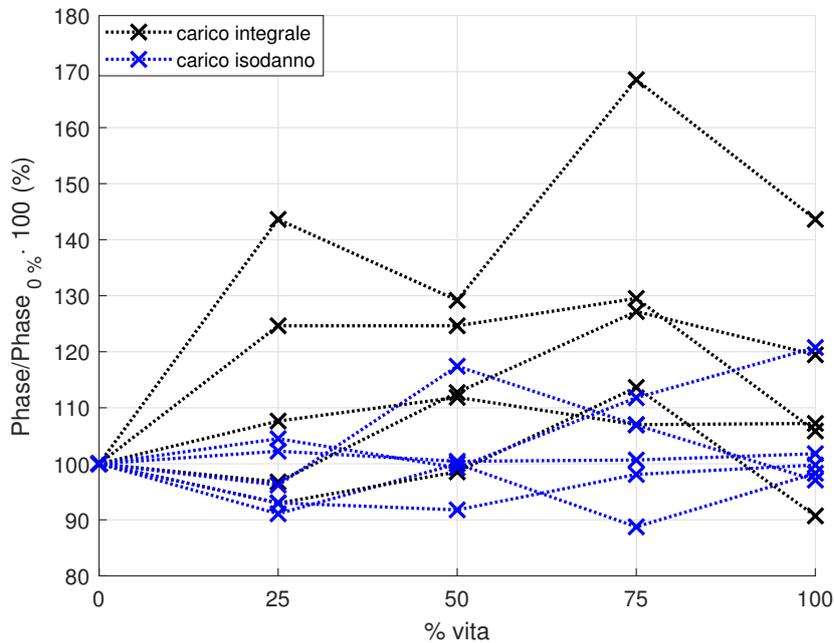
(b) Fase caratterizzazione dinamica @100 Hz

Figura 6.60: Confronto globale delle variazioni percentuali della fase tra carico integrale e isodanno

Per quanto concerne la fase anche in tal caso si nota come vi sia un progressivo raggruppamento dei valori sperimentali ottenuti nell'intorno di un valore finale. Man mano che aumenta la frequenza tale intorno aumenta. In particolare il carico isodanno consente di ottenere dei valori più stabili anche ad alta frequenza.



(a) Fase caratterizzazione dinamica @25 Hz



(b) Fase caratterizzazione dinamica @100 Hz

Figura 6.61: Confronto globale delle variazioni percentuali della fase tra carico integrale e isodanno

Da Figura 6.61 si nota come i valori percentuali di fase al 100% della vita della bielletta rientrano nello stesso range compreso tra 90 ÷ 120% sia nel caso del carico

isodanno sia nel caso del carico integrale.

6.7 CONCLUSIONI

Dalla campagna di prove condotta con carichi isodanno descritta in questo capitolo, è emerso che dal punto di vista del confronto delle rigidità ottenute con quelle nominali i risultati sono decisamente sovrapponibili, anche se i casi dinamici sono leggermente più affetti da dispersione. Questi ultimi inoltre non risultano in linea con valori nominali definiti da normativa, ma si avvicinano molto di più al limite superiore del range di tolleranza rispetto all'applicazione del ciclo affaticante integrale.

Nel caso della rigidità statica si assiste sia per il carico integrale sia per il carico isodanno ad un decadimento; per quanto riguarda le rigidità dinamiche si ottiene invece un irrigidimento.

Per quanto concerne la fase (smorzamento) sia a bassa che alta frequenza i valori non rientrano nella banda di tolleranza ma i valori del COV sono minori del 10% indice del fatto che la distribuzione dei valori risulta coerente. Dall'analisi del danneggiamento come funzione di stato è emerso che i valori percentuali di fase al 100% della vita della bielletta rientrano nello stesso range compreso tra $90 \div 120\%$ sia nel caso del carico isodanno sia nel caso del carico integrale.

È stato verificato anche per il carico isodanno il criterio di Palmgren-Miner riadattato per tutti e 4 i cicli modificati proposti, così come era già stato dimostrato per il caso di carico integrale. Ciò permette, in linea teorica, di svincolarsi dallo specifico ordine di esecuzione delle prove, definito da normativa.

A questo punto, avendo dimostrato che l'ordine di somministrazione del carico non ha influenza sulla modalità di decadimento della rigidità, si è legittimati a scegliere, per lo svolgimento delle successive prove a temperatura controllata, una qualsiasi delle 5 modalità presentate all'inizio del capitolo. In particolare, per restare quanto più allineati possibile alla normativa in vigore, è stato utilizzato il ciclo LC per le successive prove a temperatura controllata. Inoltre, l'analisi delle curve di level crossing ha messo in evidenza che storia di carico integrale e isodanno hanno lo stesso contenuto energetico in termini di danneggiamento. A questo si aggiunge che il decadimento tra monte e valle esplicito dall'applicazione del carico isodanno ha ricalcato per la maggior parte delle biellette in prova quello esplicito dal carico integrale.

Alla luce di tali considerazioni, le successive prove verranno condotte con ciclo affaticante isodanno LC.

7

I MATERIALI ELASTOMERICI

Il capitolo si prefigge di fornire una panoramica sugli elastomeri e su come si modifica il loro comportamento con la variabile temperatura; tale comportamento è stato analizzato in [23]. Con il termine elastomeri (gomma naturale o sintetica) si indica quella classe di macromolecole appartenente alla famiglia dei polimeri, che mostra caratteristiche di elasticità elevate [24]. Sono materiali che presentano una evidente deformazione se sottoposti a sforzi relativamente piccoli, ma che sono in grado di recuperare rapidamente lo stato iniziale (forma e dimensioni) appena lo sforzo imposto viene rimosso. Sono, inoltre, in grado di dissipare energia grazie alla loro natura viscoelastica. Per ottenere queste proprietà specifiche è necessario che il polimero venga sottoposto a un processo di reticolazione chiamato vulcanizzazione. Tramite questo processo si creano dei legami chimici tra le macromolecole e si genera la struttura tridimensionale tipica degli elastomeri riportata in Figura 7.2. I punti di unione che si generano andranno ad ostacolare lo scorrimento viscoso sotto carico e di conseguenza anche la capacità del componente di tornare ad una conformazione casuale.

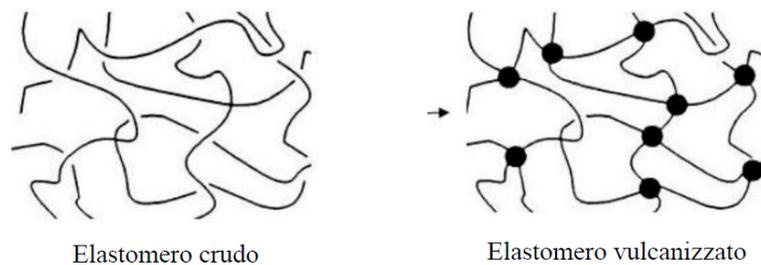


Figura 7.1: elastomeri prima e dopo vulcanizzazione [25]

La struttura chimica dei polimeri è caratterizzata da lunghe catene composte da un'unità ripetitiva chiamata monomero che, tramite reazioni di polimerizzazione, reagisce creando la struttura base del polimero. Nel caso degli elastomeri la struttura che si crea sarà completamente o prevalentemente amorfa cioè le molecole avranno una conformazione a gomitolo statistico e saranno caratterizzate da sufficiente flessibilità e libera rotazione. Per quanto concerne il componente in questione si tratta di una gomma naturale NW63 con durezza IRHD = $62(\pm 5)$. Essa è una gomma resistente alla temperatura di 100°C con picchi a 110°C .

7.1 CLASSIFICAZIONE

Una prima classificazione vede la suddivisione della classe in due sottogruppi:

- Elastomeri termoplastici (TPE);
- Elastomeri termoindurenti (TSE).

I due sottogruppi si differenziano per le proprietà e la struttura chimica che si ottengono e per il processo di vulcanizzazione. La principale differenza che deve essere evidenziata è la possibilità per gli elastomeri termoplastici di essere dissolti in determinati solventi e di rammollire se vengono sottoposti a fonti di calore. Questa importante caratteristica permette ai componenti di essere rilavorati. La categoria degli elastomeri termoindurenti invece racchiude quelle gomme che, sottoposte a fonti di calore, tendono a formare composti carbonizzati e se poste a contatto con solventi rigonfiano senza dissolversi. In secondo luogo, questi sottogruppi si possono distinguere per i legami presenti tra le catene, infatti è possibile notare come i termoindurenti abbiano legami covalenti primari che permettono di creare delle reti tridimensionali mentre i termoplastici presentano solo interazioni dipolo-dipolo deboli o legami idrogeno che consentono il rammollimento a temperature sufficientemente alte.

La seconda classificazione possibile si basa sulla composizione chimica: ed è il metodo di classificazione alla base della normativa internazionale nata per la designazione delle gomme e definita dall'ASTM (American Society for Testing and Materials International). Le classi evidenziate dalla normativa sono:

- M, gomme con catene sature di polietilene;
- N, gomme con azoto, ma senza ossigeno e fosforo nella catena polimerica;
- O, gomme con ossigeno nella catena polimerica;
- R, gomme con carbonio insaturo nella catena;
- Q, gomme con silice e ossigeno nella catena polimerica;
- T, gomme con zolfo nella catena;
- U, gomme con ossigeno, azoto e carbonio nella catena;
- Z, gomme con fosforo e azoto nella catena polimerica.

Dopo tipo e classe vengono indicati 2 numeri che rappresentano la durezza. Dunque la gomma naturale in questione è una gomma con azoto e senza ossigeno nella catena polimerica con durezza IRHD pari a 62 ± 5 .

7.2 MESCOLE

I materiali elastomerici che vengono utilizzati per la produzione di componenti, specialmente in campo automotive, presentano una composizione molto varia. Infatti, non si utilizza mai la gomma "pura", cioè senza additivi e cariche perché essa non presenta le caratteristiche richieste dal materiale. Gli additivi, inoltre, facilitano la lavorazione e in alcuni casi abbassano il costo della materia prima. gli agenti più comuni sono:

- Cariche / agenti rinforzanti;
- Pigmenti e coloranti;
- Agenti di masticazione;
- Agenti di peptizzazione;
- Ritardanti di fiamma;
- Lubrificanti;

- Agenti di omogenizzazione;
- Agenti disperdenti;
- Plastificanti;
- Stabilizzanti;
- Antinvecchianti;
- Antiossidanti;
- Componenti antidegradanti;
- Promotori di adesione;
- Agenti antistatici;
- Agenti vulcanizzanti;
- Acceleranti di vulcanizzazione;
- Attivanti;
- Ritardanti di vulcanizzazione.

7.3 PROCESSO DI VULCANIZZAZIONE

Il processo di vulcanizzazione è lo stadio finale della produzione di un componente elastomerico infatti, dopo aver eseguito questo passaggio, la forma del componente non sarà più modificabile. Nello specifico, la configurazione finale del componente torque rod (componente di EMS) si ottiene portando ad alte temperature (processo di vulcanizzazione) in un forno sia la parte in gomma con l'anima in metallo sia lo scheletro metallico.

La vulcanizzazione dunque è quel processo che permette:

- alla gomma di ancorarsi allo scheletro metallico della bielletta attraverso la superficie delle razze;
- la formazione di specifici legami chimici o legami fisici (come legami idrogeno o interazioni polari trasversali tra le macromolecole del materiale) così da formare una rete con una frequenza di nodi tra 50-100 unità monomeriche.

I legami formati andranno a variare la natura del materiale trasformandolo da un liquido viscoso a un solido elastico insolubile e modificando anche alcune proprietà fisiche e meccaniche come:

- il modulo elastico statico e dinamico (che aumentano);
- la durezza (che aumenta);
- il compression set (che diminuisce);
- il carico di rottura (che presenta un massimo);
- la resistenza a lacerazione (che presenta un massimo);
- la resistenza a fatica (che presenta un massimo).

Tutte queste proprietà varieranno in funzione del grado di vulcanizzazione, ovvero dipenderanno dal grado di avanzamento della vulcanizzazione che è influenzato dagli additivi, acceleranti o ritardanti utilizzati e dal numero e dal tipo di nodi che

a loro volta dipendono dalla temperatura e dal tempo impiegato per la vulcanizzazione. Il tempo è un fattore di notevole importanza perché inizialmente la reazione procede in modo non lineare e solo dopo il raggiungimento di una vulcanizzazione ottimale si otterranno il numero di cross-link ottimale.

7.4 PROPRIETÀ MECCANICHE

Per descrivere l'elasticità del materiale è possibile andare a confrontare il comportamento delle macromolecole quando queste vengono sollecitate da uno sforzo a trazione, confrontando il caso di un elastomero vulcanizzato con quello di un polimero termoplastico.

Partendo da un componente a riposo è possibile osservare la conformazione casuale dei termoplastici e a gomitolato statistico delle gomme (Fig. 7.2.a, 7.2.e). Se ad essi viene applicato un carico unidirezionale si verificano comportamenti differenti: nel termoplastico le macromolecole si srotolano e si orientano direzionalmente al senso di stiro, questo causa una diminuzione dell'entropia del sistema dovuta a una limitazione delle possibili configurazioni (Fig. 7.2.b). Il sistema evolve nel tempo anche senza rimuovere la forza applicata perché, non essendo presenti dei punti di giunzione, i tratti di catena slittano gli uni rispetto agli altri e i moti browniani ripristinano la conformazione di partenza con minor entropia possibile (Fig.7.2.c). Il componente che ne risulta presenta una deformazione macroscopica esterna, ma con una struttura interna che ha riacquisito la forma iniziale. Questa conformazione rimarrà tale anche quando verrà tolta la forza applicata perché, durante lo scorrimento viscoso delle macromolecole che ha portato al ripristino della struttura interna iniziale, è stata dissipata tutta l'energia fornita al sistema dalla deformazione (Fig. 7.2.d).

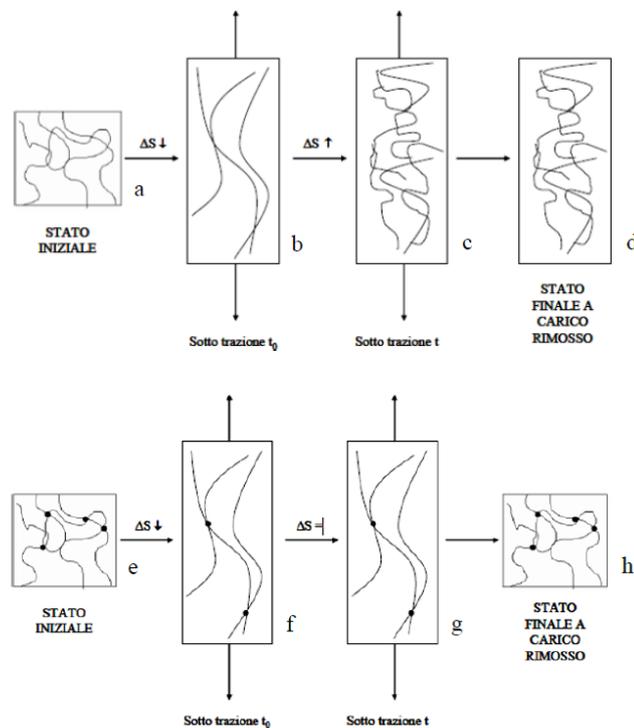


Figura 7.2: Confronto tra elastomero e termoplastico sotto sforzo unidirezionale [26]

Differentemente, negli elastomeri, dopo l'applicazione dello sforzo unidirezionale, le catene assumono comunque una conformazione casuale andando sì ad orientarsi nella direzione di stiro (Fig. 7.2.f), con conseguente riduzione del termine entropico, ma grazie alla presenza dei punti di giunzione tra le catene, lo scorrimento viscoso sotto carico è impedito e si mantiene un ΔS costante per tutto il periodo di sollecitazione (Fig. 7.2.g). Proprio grazie a questa impossibilità di rilassamento dovuta ai legami chimici, solo quando lo sforzo elongazionale verrà rimosso, il sistema riacquisterà lo stato iniziale sia a livello strutturale microscopico che macroscopicamente (Fig. 7.2.h).

È bene ricordare che questo tipo di comportamento elastomerico è osservabile solo dopo il trattamento di vulcanizzazione della gomma, infatti una miscela cruda è caratterizzata da un comportamento principalmente viscoso e non presenta la componente elastica come per i vulcanizzati. Inoltre le condizioni ambientali in cui si trova l'oggetto in esame influenzano notevolmente questa proprietà perché gli elastomeri sono particolarmente sensibili alla temperatura. Il comportamento meccanico della gomma è quindi caratterizzato da un grafico sforzo-deformazione come rappresentato in Figura 7.3. In esso si nota come, applicando uno sforzo, la deformazione che si genera inizialmente aumenterà a causa delle possibili conformazioni accessibili, ma continuando ad incrementare lo sforzo la deformazione imposta sarà sempre più limitata a causa dell'estensione massima che viene raggiunta delle catene presenti. Se confrontata con quella del grafico di un elastomero non vulcanizzato si osserva come questa variazione ad alti stress non sia visibile.

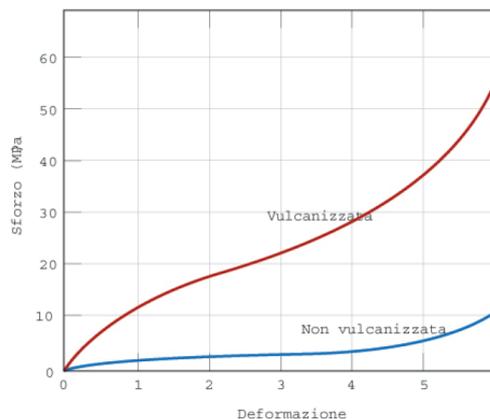


Figura 7.3: Grafico sforzo-deformazione [27]

7.5 PROPRIETÀ DINAMO-MECCANICHE

Per approfondire il comportamento elastico degli elastomeri ci si deve addentrare nello studio della *reologia* ovvero la scienza che studia la deformazione e lo scorrimento della materia. Nel caso di polimeri amorfi come gli elastomeri, il comportamento che si osserva è intermedio tra viscoso e elastico.

Gli ingredienti che vengono aggiunti all'elastomero durante la preparazione della miscela conferiscono a quest'ultima un'eterogeneità responsabile di comportamenti reologici molto particolari, non facilmente investigabili. In generale la correlazione

tra le proprietà della matrice polimerica e quelle finali dell'elastomero vulcanizzato è molto difficoltosa. Tramite un'analisi reologica è possibile notare come vi siano tempi di rilassamento notevolmente più lunghi rispetto alle materie plastiche e per questo è più adeguato parlare di viscoelasticità piuttosto che di elasticità [23]. La viscosità di un elastomero è influenzata da diversi fattori: se si considera la presenza di cariche in quantità superiore ad una certa percentuale, inevitabile nelle mescole elastomeriche, si avrà un notevole aumento della viscosità durante lo scorrimento. Al contempo anche la temperatura porta a una variazione notevole della viscosità, infatti se si lavora a temperature inferiori alla T_g o temperatura di transizione vetrosa, ovvero quando la viscosità è elevata, il comportamento principale sarà quello del solido elastico, mentre ad alte temperature, ovvero quando la viscosità è bassa, il comportamento sarà più simile a quello di un fluido viscoso [28]. I materiali viscoelastici sono modellizzati combinando componenti elastici e viscosi in serie o in parallelo: le disposizioni più comuni riscontrabili sono quelle di Maxwell e di Voigt.

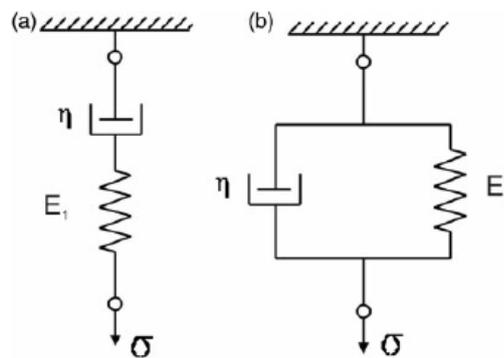


Figura 7.4: Modelli di Maxwell (a) e Voigt (b) [29]

Il modello di Voigt presenta una molla e un pistone in parallelo quindi quando si applica uno sforzo σ lo sforzo viene suddiviso tra i due componenti fino a quando la molla non raggiunge la massima estensione, logicamente durante la rimozione dello sforzo sarà il pistone a controllare il recupero senza una retrazione istantanea. Il suo comportamento può essere descritto dalla relazione:

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (7.1)$$

dove:

- σ è la tensione (o stress) [MPa];
- E è il modulo di elasticità di Young [MPa];
- ϵ è il coefficiente di deformazione (o strain), un coefficiente adimensionale che esprime la frazione di deformazione dell'oggetto;
- η una costante dipendente dal materiale.

Questo modello presenta però il limite di non descrivere adeguatamente il rilassamento degli sforzi. Il modello di Maxwell invece presenta una configurazione in serie dei componenti, per questo lo sforzo applicato risulta uguale per molla e pistone mentre la deformazione sarà rappresentata dalla somma delle deformazioni. Questo

modello è in grado di calcolare il rilassamento degli sforzi e può essere descritto dalla equazione:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7.2)$$

Un metodo di misura largamente utilizzato per determinare le proprietà di un materiale polimerico in campo viscoelastico lineare è quello in cui un campione di polimero è sottoposto a una deformazione sinusoidale di scorrimento semplice. Dopo pochi cicli di avviamento, lo sforzo comincia a oscillare sinusoidalmente con la stessa frequenza della deformazione, ma non in fase con la deformazione. È possibile scomporre lo sforzo in componenti in fase e in quadratura con la deformazione, introducendo i due moduli dinamici G' e G'' , misura rispettivamente dell'energia immagazzinata e dell'energia dissipata dal materiale per ciclo di deformazione e per unità di volume; il rapporto G''/G' è denominato fattore di smorzamento ed è comunemente noto come *tand* o *loss tangent*, mentre i moduli G' e G'' sono denominati rispettivamente modulo elastico (*storage modulus*) e modulo viscoso (*loss modulus*) [30]. La capacità di un elastomero vulcanizzato di modificare il proprio comportamento in funzione della frequenza imposta permette di prevederne le applicazioni, una volta note le condizioni a cui sarà sollecitato; inoltre, conoscendo l'influenza dei vari parametri molecolari sulle caratteristiche dinamiche, è possibile sintetizzare i materiali in funzione dell'applicazione finale [30].

Gli elastomeri e i relativi composti con cariche e oli di varia natura sono materiali reologicamente complessi i cui comportamenti sono meglio indagati attraverso un approccio reologico non lineare in quanto, per deformazioni grandi o rapide, la teoria della viscoelasticità lineare non è più valida e la risposta a una deformazione imposta dipende dall'ampiezza, dalla velocità e dalla cinematica della deformazione [30]. Sebbene sia possibile che due polimeri, con differente struttura molecolare, abbiano comportamenti viscoelastici lineari confrontabili, è anche possibile che essi differiscano alquanto in termini di risposta non lineare [30].

7.6 RESISTENZA ALLE BASSE TEMPERATURE

Analizzando il comportamento a basse temperature è possibile notare come al di sotto di una temperatura di transizione gli elastomeri possano diventare fragili e aumentare la loro rigidità, perdendo quindi tutta la loro componente elastica. Ogni elastomero è caratterizzato da una temperatura di transizione vetrosa specifica che varia in base al tipo di polimero di base ed è in relazione con la sua struttura molecolare. Dal punto di vista meccanico è possibile osservare un incremento della rigidità e del modulo elastico e una variazione significativa del creep e del rilassamento degli sforzi. Infatti, considerando il comportamento dinamico elastomerico, è possibile osservare come la temperatura di transizione vetrosa (T_g) possa aumentare se la frequenza e l'ampiezza di sollecitazione subiscono un incremento. Utilizzando elastomeri a basse temperature è possibile riscontrare fenomeni di cristallizzazione, processo comune per elastomeri come il policloroprene e la gomma naturale che presentano temperature di cristallizzazione di -10°C e -25°C rispettivamente. Questa possibilità permette alla gomma di ottenere una buona resistenza a fatica grazie alla possibilità di generare una struttura cristallina nella zona di cricca alla temperatura di esercizio utilizzata, ma per sfruttare questo vantaggio è necessario un controllo

accurato del processo di produzione del componente. Infatti, in base al sistema di vulcanizzazione utilizzato, è possibile favorire o meno la cristallizzazione. I cambiamenti di proprietà che il componente subisce durante il lavoro a basse temperature non sono permanenti, infatti tornando a temperatura ambiente si ottiene nuovamente l'oggetto iniziale.

A prova di quanto detto, si riassumono i risultati della caratterizzazioni effettuate nel capitolo 5 in tabella 7.1. Si ricorda che tali risultati sono derivanti dai test di caratterizzazione eseguiti sul componente a nuovo e a temperatura ambiente.

Bielletta	Rigidezza statica [daN/mm]	Rigidezza dinamica @25Hz [daN/mm]	Rigidezza dinamica @100Hz [daN/mm]
#1ISO	25.1	44.4	49.1
#2ISO	24.5	43.1	48
#3ISO	25.3	44.6	49.1
#4ISO	25	43.5	48.4
#5ISO	24.9	43.2	48.3

Tabella 7.1: Riepilogo rigidezze statiche e dinamiche allo 0% ciclo affaticante (Capitolo 5)

I valori riportati in tabella comprovano quanto detto precedentemente: a parità di bielletta si nota come la rigidezza aumenta all'aumentare della frequenza. L'aumento della frequenza amplifica il campo in cui l'elastomero ha un comportamento vetroso e questo fa sì che vi sia una tendenza del componente ad essere più rigido. L'effetto della frequenza è quello di aumentare la T_g e con essa estendere il campo in cui il comportamento dell'elastomero è vetroso.

La transizione vetroso può essere descritta come un movimento cooperativo delle molecole all'interno di un polimero e dipende dalla frequenza a cui tale polimero viene sottoposto [31]. Essa può essere studiata sottoponendo il materiale ad una scansione DMA misurata a frequenze diverse [31]. In Figura 7.5 si riporta un esempio relativo all'analisi condotta su un elastomero NBR/CR a quattro diverse frequenze [31]. In tale figura è possibile visionare come all'aumentare della frequenza la T_g si sposti verso valori più alti.

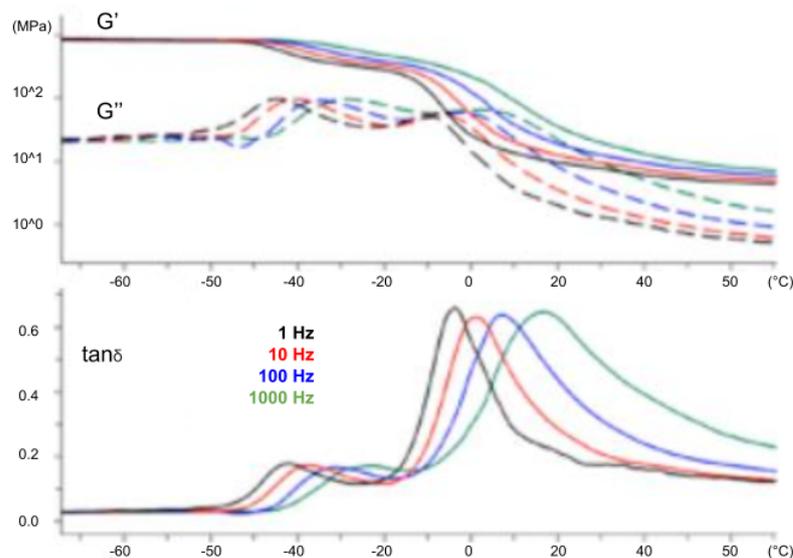


Figura 7.5: Transizione vetroso: G' modulo di shear conservativo, G'' modulo di shear dissipativo, $\tan\delta$ fattore di perdita [31]

7.7 RESISTENZA ALLE ALTE TEMPERATURE

Gli elastomeri che vengono sottoposti a temperature elevate vanno tipicamente incontro a reazioni di degradazione e perdita delle proprietà meccaniche.

Questo fenomeno è dovuto a una variazione dei legami presenti nella struttura chimica o alla loro eventuale creazione, che comporta un incremento della rigidità, ma alcune volte è possibile notare come a temperature superiori si abbia una scissione delle reticolazioni e quindi un ammorbidimento del componente. Infine, il mantenimento a temperature notevolmente elevate, può invece comportare una carbonizzazione e infragilimento della gomma. Un fattore essenziale che influenza la resistenza ad alte temperature è la presenza di ossigeno, essa causa una degradazione molto più rapida e a temperature inferiori.

Ovviamente non è l'unico fattore da tenere in considerazione, come l'ossigeno anche lo spessore del componente e i componenti della formulazione influenzano le proprietà. Ogni componente quindi mostra un comportamento differente, in alcuni si può creare uno strato superficiale protettivo che limita l'ingresso di ossigeno e quindi rallenta la degradazione, in componenti di grandi dimensioni si può addirittura avere una buona resistenza grazie alla bassa conducibilità termica e alla possibilità di presentare un comportamento intumescente.

È possibile per qualunque gomma evidenziare una temperatura massima di esercizio, oltre la quale il componente degrada e assume una consistenza appiccicosa [28].

8

MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA A 100°C

8.1 INTRODUZIONE

La seconda campagna di prove condotta nella presente attività si prefigge l'obiettivo di analizzare e di indagare il comportamento del gommato in termini di decadimento della sua rigidità, sia statica che dinamica, quando esso risulta sottoposto ad un ciclo affaticante isodanno a temperatura costante pari a 100°C. Tale analisi verrà trattata e descritta nel dettaglio nel capitolo 9.

Anche in tale scenario, preliminarmente al ciclo affaticante a temperatura controllata è bene effettuare test di caratterizzazione: si ripete cioè lo stesso iter adottato per le prove di fatica condotte a temperatura ambiente.

Per l'esecuzione di prove di fatica a temperatura controllata, sono state usate 4 bielle nuove.

Per insufficienza di campioni con lo stesso *part number* dei lotti usati per le prove di fatica a temperatura ambiente, in tale campagna di prove si è fatto ricorso a 4 bielle aventi *part number* differente.

La scelta di utilizzare bielle aventi *part number* differente è legittimata in quanto le 4 bielle scelte hanno caratteristiche definite a progetto simili al lotto di bielle usate per la prima campagna di test.

Risulta opportuno verificare che le condizioni a nuovo dei vari componenti adoperati siano simili o comunque non vi siano differenze troppo evidenti, in modo da garantire dei risultati allineati in partenza.

In tale ottica si è scelto di caratterizzare a nuovo quattro bielle, di cui tre a 100°C, che verranno poi sottoposte al ciclo di fatica, e una a 22°C, che invece serve solo come termine di paragone e che pertanto non verrà affaticata.

In tal modo è possibile effettuare un primo raffronto tra le 3 bielle a nuovo e un secondo raffronto per comprendere come varia la rigidità a nuovo con la temperatura. Ciascuna delle bielle nuove è stata numerata con un numero progressivo; per il momento non si tenga conto del codice (di cui si parlerà nel capitolo 9), ma solo del numero progressivo.

8.2 ESECUZIONE DEI TEST

In questo paragrafo si riportano le specifiche, definite a disegno, con cui le caratterizzazioni statiche e dinamiche sono state effettuate per la biella usata in questa campagna di prove.

Prove statiche

Le caratterizzazioni statiche hanno i seguenti parametri da impostare:

- Intervallo forze: ± 700 daN;

- Velocità di movimento attuatori: 20 mm/min;
- Calcolo rigidezza nel range di forza: ± 50 daN.

Prove dinamiche

La procedura di caratterizzazione dinamica viene effettuata due volte, a bassa (LF) ed alta frequenza (HF), adoperando differenti specifiche nei due casi, i cui valori sono riportati in Tabella 8.1.

Sweep	Ampiezza senoide [mm]	Intervallo frequenze [Hz]	Step frequenze [Hz]	Frequenza indicata per la lettura della rigidezza dinamica [Hz]
#1 (LF)	$\pm 0,1$	1 ÷ 50	1	25
#2 (HF)	$\pm 0,05$	5 ÷ 110	5	100

Tabella 8.1: Specifiche degli sweep relativi alle caratterizzazioni dinamiche

8.3 RISULTATI CARATTERIZZAZIONI A NUOVO A 100°C

Risultati prove statiche a 100°C

Gli andamenti ottenuti con i cicli statici sono riportati in Figura 8.1.

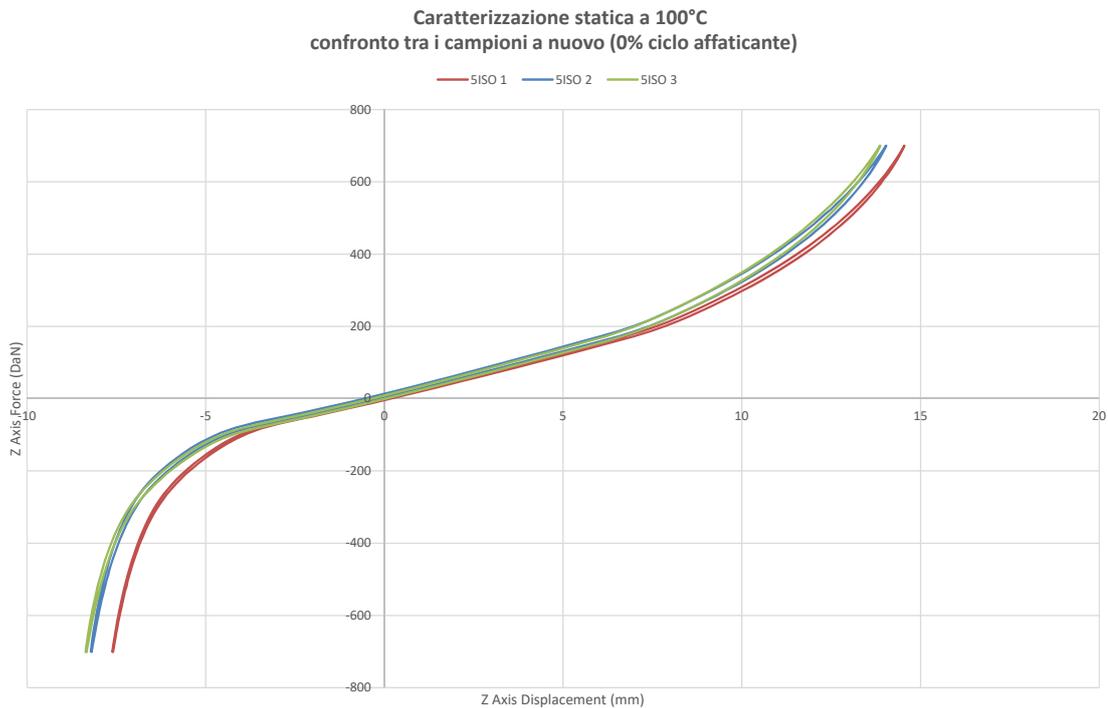


Figura 8.1: Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo a 100°C

Di seguito in Tabella 8.2 sono raccolti i valori delle rigidzze statiche in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni, insieme ad esse, sono stati calcolati e riportati ulteriori parametri, tipicamente adoperati nell'analisi di dati sperimentali.

Nel caso specifico si tratta di:

- valore nominale di progetto della rigidezza (K_{nom});
- scostamenti massimo e minimo ammissibili rispetto al valore nominale di progetto ($K_{nom} \pm 15\%$);
- *COV* (*coefficient of variation*) della rosa di prove.

Il *COV* è un indice che permette di valutare la dispersione dei valori sperimentali ottenuti attorno alla media degli stessi; in particolare la coerenza dei dati è considerata ammissibile se:

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 < 10\% \quad \text{con: } \begin{cases} \sigma : \text{deviazione standard} \\ \mu : \text{media} \end{cases}$$

Nelle tabelle relative a questo capitolo, in rosso sono evidenziati i valori delle rigidezze che non cadono all'interno della banda di tolleranza delle rigidezze ammissibili sopracitata.

Test	Rigidezza statica (100°C) K_{stat} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: +/- 700daN K calcolata in: +/-50daN
K_{nom} [daN/mm]	21
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	17.85
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	24.15
K- bielletta 5ISO 1 [daN/mm]	23.15
K- bielletta 5ISO 2 [daN/mm]	23.52
K- bielletta 5ISO 3 [daN/mm]	23.95
COV	1.7%

Tabella 8.2: Rigidezze statiche a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Le rigidezze statiche a nuovo ottenute a 100°C sono tutte spostate verso il limite superiore della banda ($K_{nom} - 15\% < K - \text{bielletta } \#n < K_{nom} + 15\%$);
2. I valori ottenuti sono coerenti tra loro, infatti il *COV* ottenuto è molto basso (1.7%) e anche visivamente la sovrapposizione delle curve di isteresi non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi, indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le biellette sono simili.

Risultati prove dinamiche - rigidezza a 100°C

In questa sezione si riportano i risultati grafici relativi a:

- Curve dinamiche a 0.2mm picco-picco, nel range 1 ÷ 50 Hz (Figura 8.2);
- Curve dinamiche a 0.1mm picco-picco, nel range 5 ÷ 110 Hz (Figura 8.3).

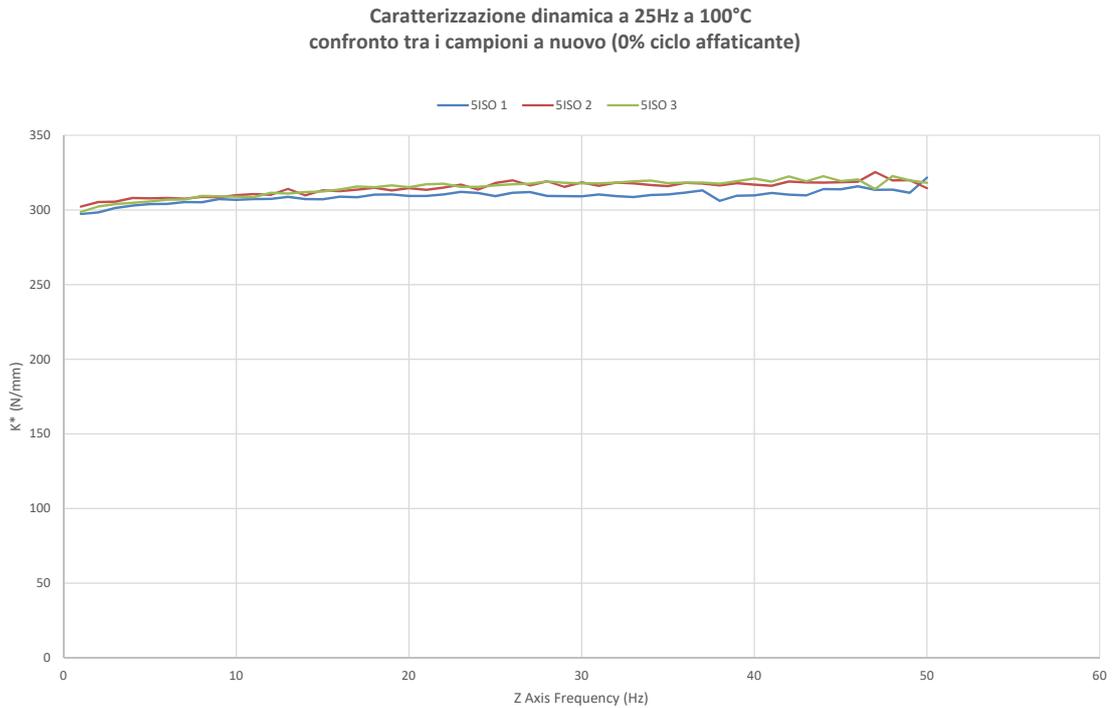


Figura 8.2: Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C

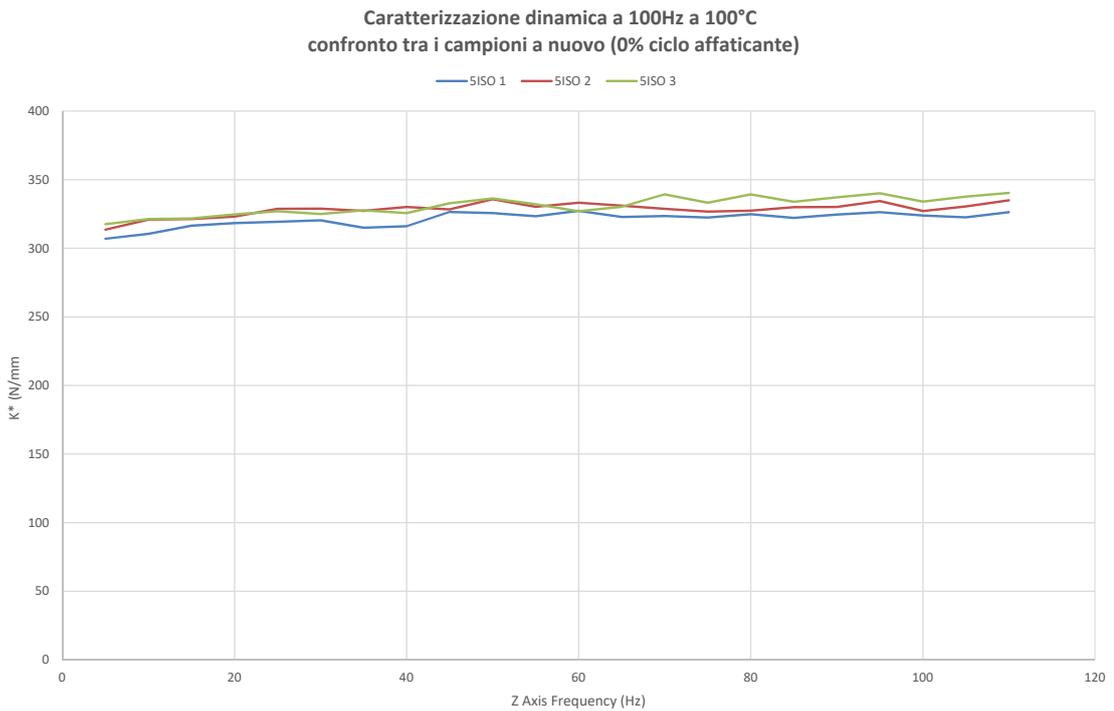


Figura 8.3: Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C

Di seguito nelle Tabelle 8.3 e 8.4 sono raccolte le rigidezze dinamiche, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; analogamente al caso statico insieme a questi valori sono riportati rigidezza nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Rigidezza dinamica a bassa frequenza a 100°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz K letta a: 25Hz
K_{nom} [daN/mm]	32.5
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	27.63
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	37.37
K- bielletta 5ISO 1 [daN/mm]	30.92
K- bielletta 5ISO 2 [daN/mm]	31.81
K- bielletta 5ISO 3 [daN/mm]	31.65
COV	1.51%

Tabella 8.3: Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)

Test	Rigidezza dinamica ad alta frequenza a 100°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz K letta a: 100Hz
K_{nom} [daN/mm]	36
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	30.6
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	41.4
K- bielletta 5ISO 1 [daN/mm]	32.39
K- bielletta 5ISO 2 [daN/mm]	32.71
K- bielletta 5ISO 3 [daN/mm]	33.40
COV	1.57%

Tabella 8.4: Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)

Dai risultati relativi alle caratterizzazioni dinamiche, sia a bassa che ad alta frequenza si può notare:

1. Una buona sovrapposizione degli andamenti. Considerando le Figure 8.2 e 8.3, si nota come essi siano contenuti entro una banda di variabilità abbastanza limitata e abbiano anche un andamento crescente.
Inoltre, riferendosi ai valori dei COV calcolati nelle Tabelle 8.3 e 8.4 (rispettivamente 1.51% e 1.57%) si ha conferma numerica della bassa dispersione anche dei valori di rigidezza dinamica.
2. I valori delle rigidezze dinamiche sono in linea con i valori nominali definiti a progetto, per tutte le biellette.

Risultati prove dinamiche - smorzamento (fase) a 100°C

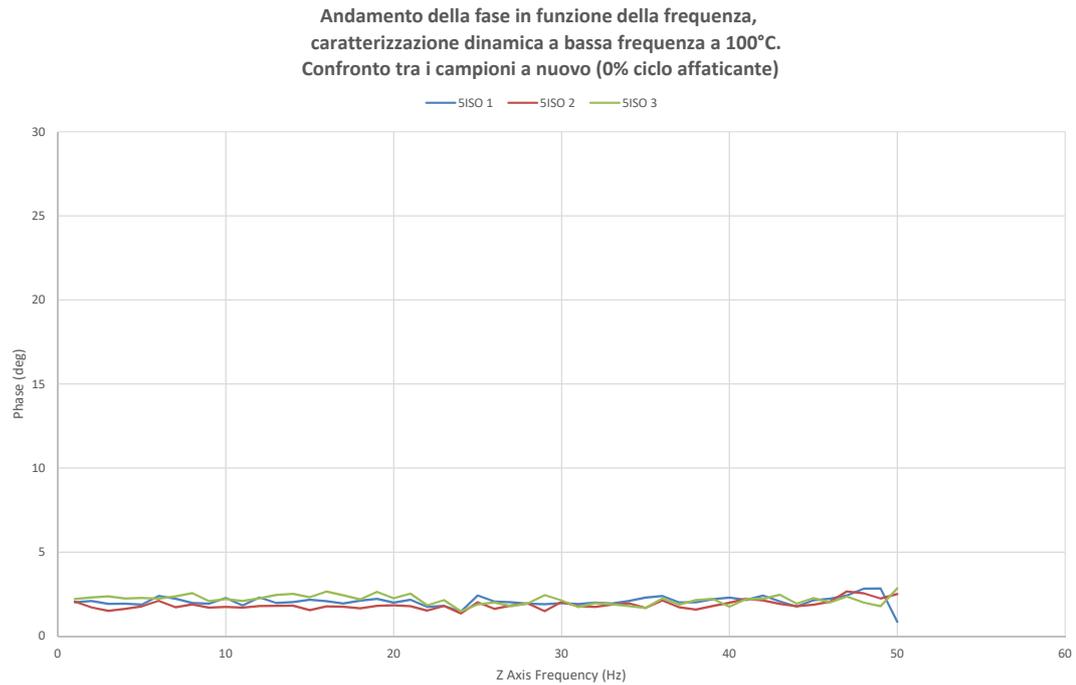


Figura 8.4: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 100°C a nuovo

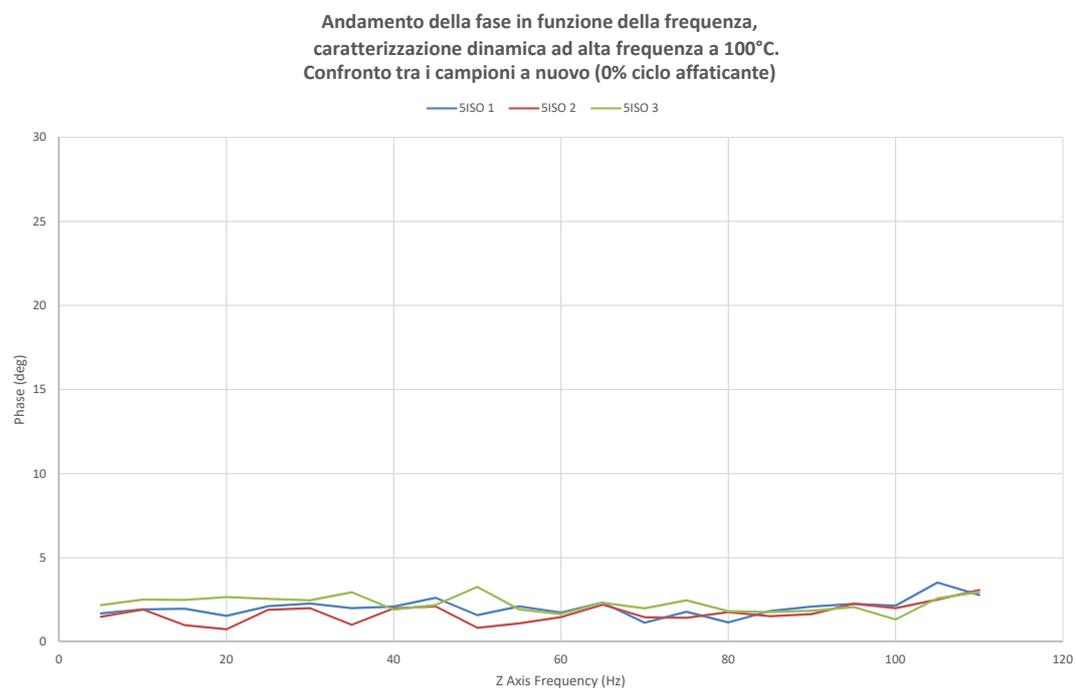


Figura 8.5: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 100°C a nuovo

Di seguito nelle Tabelle 8.5 e 8.6 sono raccolte fasi, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; insieme a questi valori sono riportati fase nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Fase caratterizzazione dinamica a bassa frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz fase letta a: 25Hz
Phase _{nom} [deg]	5
Phase _{nom} -15% [deg]	4.25
Phase _{nom} +15% [deg]	5.75
Phase- bielletta 5ISO 1 [deg]	2.42
Phase- bielletta 5ISO 2 [deg]	2.02
Phase- bielletta 5ISO 3 [deg]	1.89
COV	13.09%

Tabella 8.5: Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)

Test	Fase caratterizzazione dinamica ad alta frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz fase letta a: 100Hz
Phase _{nom} [deg]	6
Phase _{nom} -15% [deg]	5.1
Phase _{nom} +15% [deg]	6.9
Phase- bielletta 5ISO 1 [deg]	2.15
Phase- bielletta 5ISO 2 [deg]	2.00
Phase- bielletta 5ISO 3 [deg]	1.33
COV	23.90%

Tabella 8.6: Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 100°C (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Le fasi ottenute dalle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza sono tutte fuori dalla banda di tolleranza e sono tutte al di sotto del limite inferiore della banda di tolleranza ($phase_{nom} - 15\% < phase - bielletta \#n < phase_{nom} + 15\%$);
2. Dal COV ottenuto con le fasi a bassa frequenza (13.09%) emerge sicuramente una dispersione maggiore rispetto a quella che si ottiene con la rigidità. Vedremo poi dal confronto con la fase a temperatura ambiente cosa emergerà.
3. la dispersione della fase cresce ulteriormente e questo può essere spiegato guardando la fase a 100 Hz: si nota come la fase della bielletta 5ISO 3 presenta un valore più basso rispetto alle altre due; ciò fa sì che il valore del COV aumenti portandosi a 23.90%.

8.4 RISULTATI: CONFRONTO TRA CARATTERIZZAZIONI A NUOVO A 22°C E 100°C

Risultati prove statiche

Gli andamenti ottenuti con i cicli statici sono riportati in Figura 8.6.

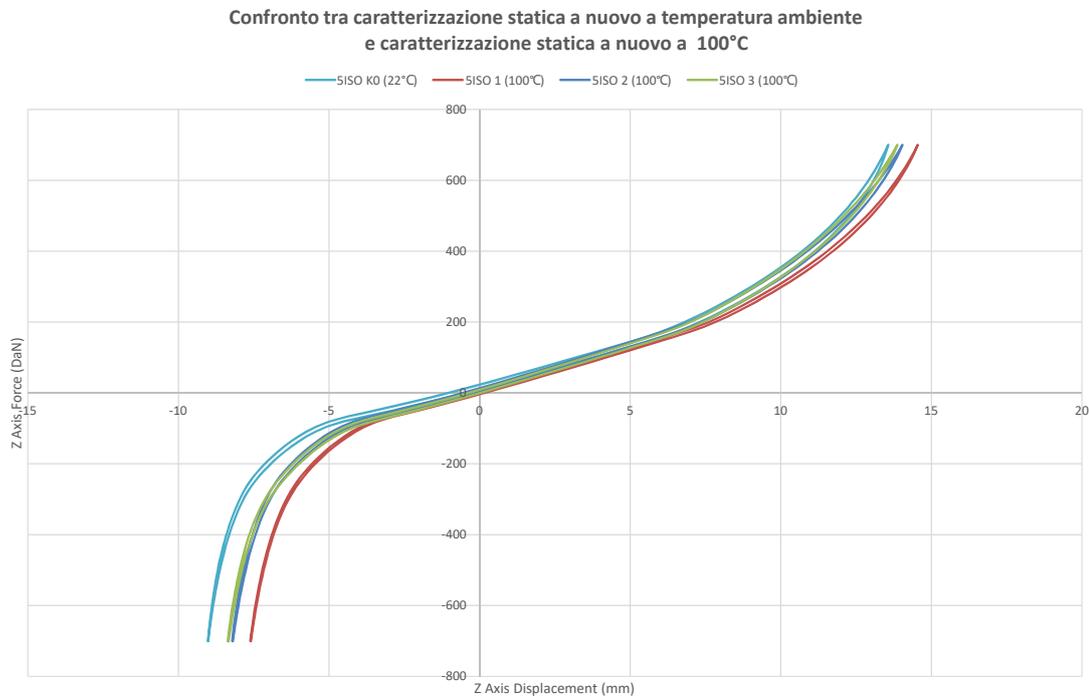


Figura 8.6: Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo a 22°C e 100°C

Di seguito in Tabella 8.7 sono riportati i valori delle rigidzze statiche ottenute a 22°C e 100°C in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni, insieme a questi valori sono riportati rigidzza nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Rigidzza statica (100°C) K_{Stat} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: +/- 700daN K calcolata in: +/-50daN
K_{nom} [daN/mm]	21
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	17.85
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	24.15
K- bielletta 5ISO 1 (100°C) [daN/mm]	23.15
K- bielletta 5ISO 2 (100°C) [daN/mm]	23.52
K- bielletta 5ISO 3 (100°C) [daN/mm]	23.95
K- bielletta 5ISO k0 (22°C) [daN/mm]	21.75
COV	4.13%

Tabella 8.7: Rigidzze statiche a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)

Da questi risultati si può notare che:

1. La rigidezza statiche a nuovo ottenute a 100°C sono tutte maggiori rispetto al valore di rigidezza statica che si ha invece a temperatura ambiente; il componente, a livello statico, si mostra dunque più cedevole a temperatura ambiente e più resistente ad alta temperatura.
2. Introducendo il valore di rigidezza a 22°C il valore del COV aumenta passando da 1.7% a 4.13%. Questo dato mette in evidenza che il valore di rigidezza a temperatura ambiente si discosta dagli altri risultati.

Risultati prove dinamiche - rigidezza

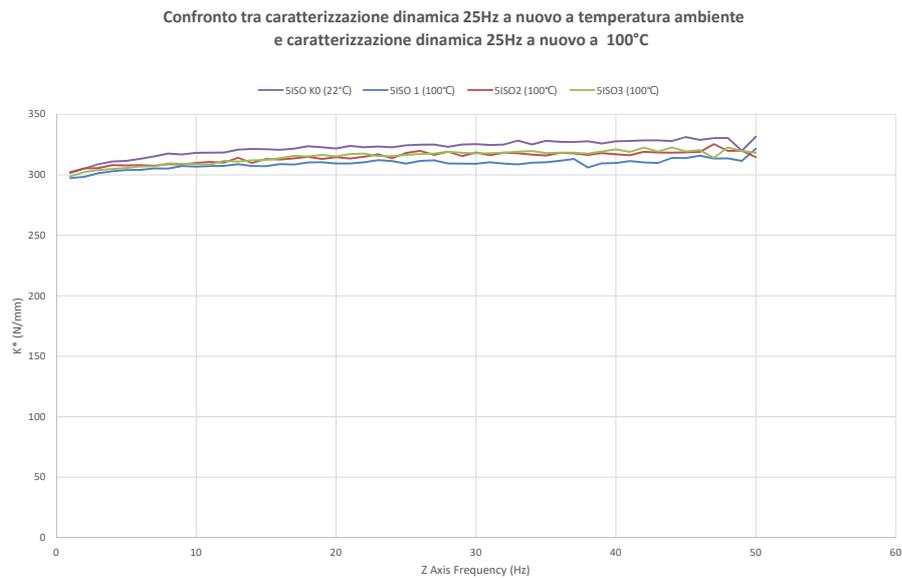


Figura 8.7: Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo 22°C e 100°C

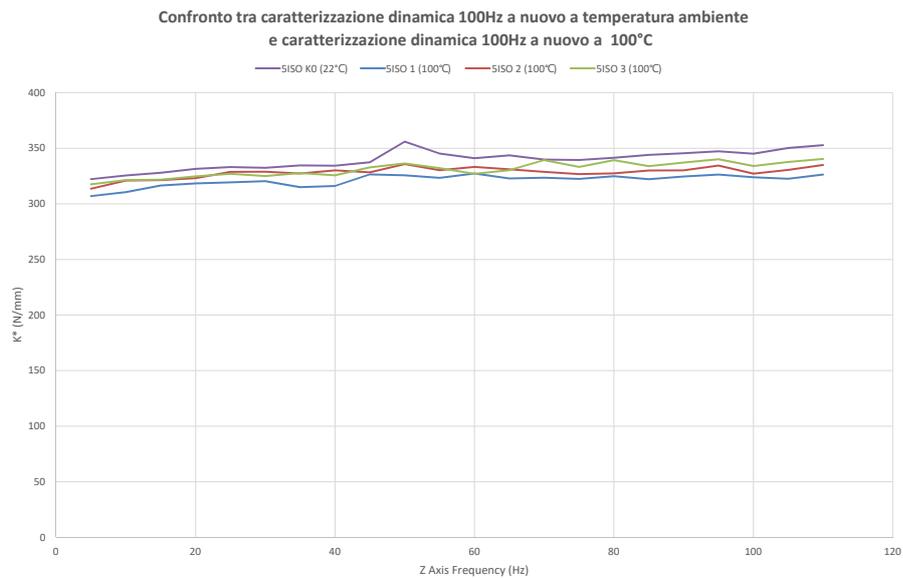


Figura 8.8: Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo 22°C e 100°C

Test	Rigidezza dinamica a bassa frequenza a 100°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz K letta a: 25Hz
K_{nom} [daN/mm]	32.5
$K_{nom} -15%$ [daN/mm]	27.63
$K_{nom} +15%$ [daN/mm]	37.37
K- bielletta 5ISO 1 (100°C) [daN/mm]	30.92
K- bielletta 5ISO 2 (100°C) [daN/mm]	31.81
K- bielletta 5ISO 3 (100°C) [daN/mm]	31.65
K- bielletta 5ISO k0 (22°C) [daN/mm]	32.43
COV	1.95%

Tabella 8.8: Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)

Test	Rigidezza dinamica ad alta frequenza a 100°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz K letta a: 100Hz
K_{nom} [daN/mm]	36
$K_{nom} -15%$ [daN/mm]	30.6
$K_{nom} +15%$ [daN/mm]	41.4
K- bielletta 5ISO 1 (100°C) [daN/mm]	32.39
K- bielletta 5ISO 2 (100°C) [daN/mm]	32.71
K- bielletta 5ISO 3 (100°C) [daN/mm]	33.40
K- bielletta 5ISO k0 (22°C) [daN/mm]	34.51
COV	2.82%

Tabella 8.9: Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)

Dai risultati relativi alle caratterizzazioni dinamiche, sia a bassa che ad alta frequenza si può notare:

1. I valori di rigidezza risultano più alti nel caso della temperatura ambiente. Ciò significa che alle alte temperature, il componente dinamicamente si mostra più cedevole.
2. I valori delle rigidezze dinamiche (sia a 22°C sia a 100°C) sono in linea con i valori nominali definiti a progetto, per tutte le biellette.
3. Introducendo i valori di rigidezza dinamica a 22°C il valore del COV aumenta passando da 1.51% a 1.95% nel caso di caratterizzazione dinamica a bassa frequenza e da 1.57% a 2.82% nel caso di caratterizzazione dinamica ad alta frequenza. Questo dato mette in evidenza che il valore di rigidezza a temperatura ambiente si discosta dagli altri risultati.

Risultati prove dinamiche - smorzamento (fase)

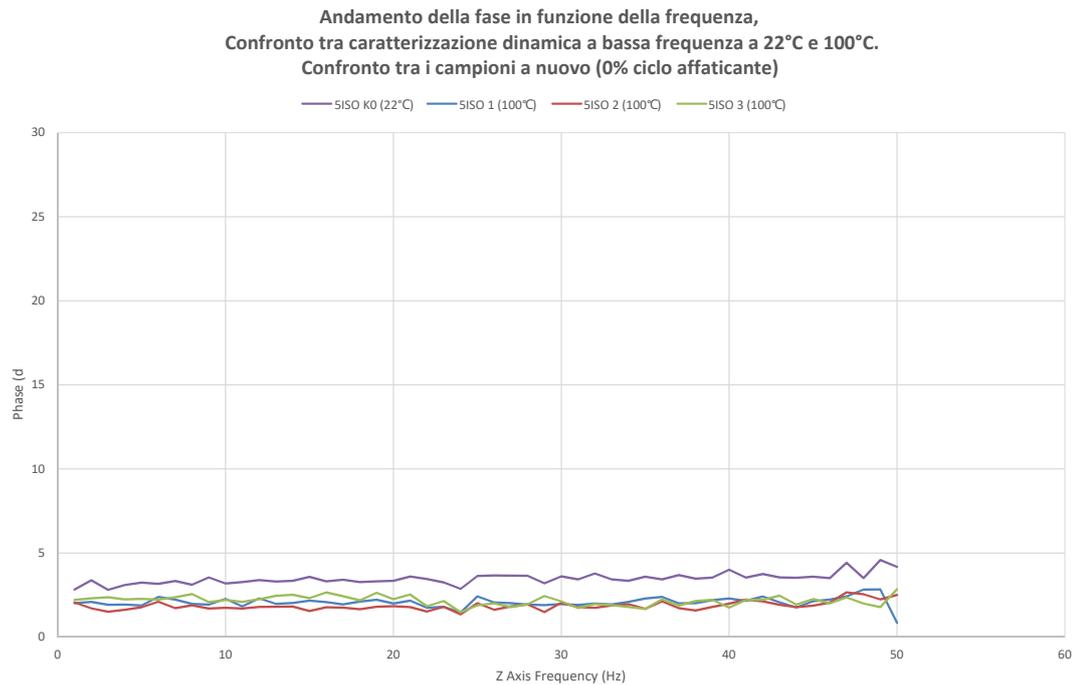


Figura 8.9: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 22°C e 100°C a nuovo

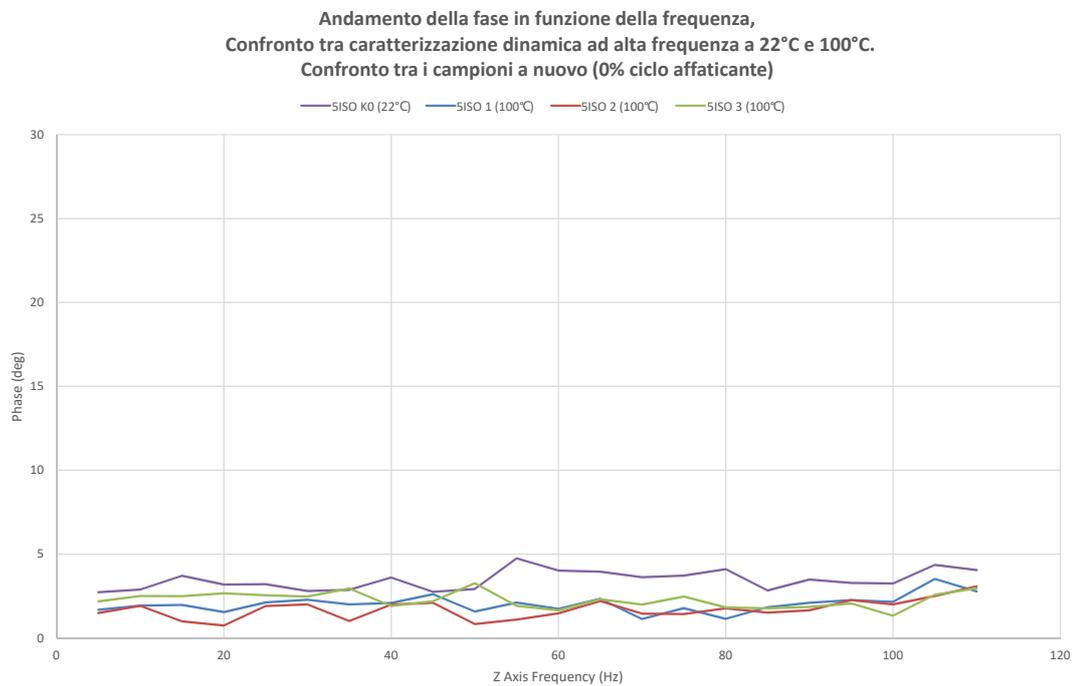


Figura 8.10: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 22°C e 100°C a nuovo

Di seguito nelle Tabelle 8.10 e 8.11 sono raccolte fasi, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; insieme a questi valori sono riportati fase nominale,

banda di tolleranza e COV.

Test	Fase caratterizzazione dinamica a bassa frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz fase letta a: 25Hz
Phase _{nom} [deg]	5
Phase _{nom} -15% [deg]	4.25
Phase _{nom} +15% [deg]	5.75
Phase- bielletta 5ISO 1 (100°C) [deg]	2.42
Phase- bielletta 5ISO 2 (100°C) [deg]	2.02
Phase- bielletta 5ISO 3 (100°C) [deg]	1.89
Phase- bielletta 5ISO k0 (22°C) [deg]	3.64
COV	31.99%

Tabella 8.10: Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)

Test	Fase caratterizzazione dinamica ad alta frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz fase letta a: 100Hz
Phase _{nom} [deg]	6
Phase _{nom} -15% [deg]	5.1
Phase _{nom} +15% [deg]	6.9
Phase- bielletta 5ISO 1 (100°C) [deg]	2.15
Phase- bielletta 5ISO 2 (100°C) [deg]	2.00
Phase- bielletta 5ISO 3 (100°C) [deg]	1.33
Phase- bielletta 5ISO k0 (22°C) [deg]	3.25
COV	36.47%

Tabella 8.11: Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a a 22°C e 100°C (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Per quanto la bielletta "5ISO k0" abbia una fase a nuovo maggiore delle altre tre, tuttavia, esattamente come quelle a 100°C, non rientra nella banda di tolleranza ed è al di sotto del limite inferiore. Quindi questo vuol dire che la fase non viene controllata a dovere durante il processo produttivo e la sua fuoriuscita dalla banda non è dovuta alla sola temperatura. Ciò accade sia a bassa sia ad alta frequenza.
2. Le fasi ottenute a temperatura ambiente sia nel caso di bassa sia per l'alta frequenza sono più alte rispetto alle fasi ottenute ad alta temperatura. Se la fa-

se aumenta vuol dire che incrementa il ritardo tra la sollecitazione sinusoidale applicata sul materiale e la sua risposta.

Ciò ci permette di asserire che la bielletta risponde meglio quando smorza di più, quindi risponde meglio a temperatura ambiente e a basse frequenze.

3. I valori ottenuti, sia a bassa che ad alta frequenza sono poco coerenti tra loro, infatti i COV ottenuti sono alti (31.99% e 36.47%) e anche visivamente la sovrapposizione delle curve permette di distinguere fra loro fasi a 100°C e a temperatura ambiente.

Alla luce dei risultati ottenuti relativamente ai valori a nuovo segue che è possibile effettuare solo considerazioni sul decadimento della rigidità ad alte temperature e non sullo smorzamento. I valori piccoli di smorzamento sono difficili da stimare sperimentalmente, dunque non deve allarmare una dispersione più elevata rispetto a quella ottenuta per la rigidità.

I COV relativi alle rigidità sono bassi, dunque vi è bassa dispersione dei valori, i COV relativi alla fase sono invece alti, sintomo del fatto che i valori non risultano confrontabili.

8.5 RISULTATI: CONCLUSIONI

Si riassumono in Tabella 8.12 i risultati ottenuti dalle caratterizzazioni dei paragrafi precedenti al fine di avvalorare la tesi esplicita nei paragrafi 7.6 e 7.7.

Bielletta	Rigidità statica [daN/mm]	Rigidità dinamica @25Hz [daN/mm]	Rigidità dinamica @100Hz [daN/mm]	Fase @25Hz [deg]	Fase @100Hz [deg]
#5ISO 1 (100°C)	23.15	30.9	32.39	2.42	2.15
#5ISO 2 (100°C)	23.52	31.81	32.71	2.02	2.00
#5ISO 3 (100°C)	23.95	31.65	33.4	1.89	1.33
#5ISO k0 (22°C)	21.75	32.43	34.51	3.64	3.25

Tabella 8.12: Riepilogo rigidità (statiche e dinamiche) e della fase allo 0% ciclo affaticante

1. CONSIDERAZIONI SULLA RIGIDITÀ STATICA E DINAMICA

Lettura della tabella per righe, ovvero al variare della frequenza a parità di temperatura:

Guardando i valori relativi alla bielletta 5ISO k0, si nota che viene confermato quanto detto nel paragrafo 7.6: a temperatura ambiente la rigidità aumenta all'aumentare della frequenza. Questo accade anche per le caratterizzazioni effettuate a 100°C. Si ha lo stesso trend verificato a temperatura ambiente: a parità di bielletta la rigidità aumenta con l'aumento della frequenza. Ciò ci permette di dire che, fissata la temperatura di esercizio, è il solo aumento di frequenza che determina l'irrigidimento del componente.

Come asserito nei paragrafi precedenti, l'aumento dell'ampiezza provoca aumento di rigidità. Nonostante il passaggio da bassa ad alta frequenza sia

accompagnato da una diminuzione dell'ampiezza di sollecitazione, la rigidità aumenta; l'effetto sulla rigidità da parte della frequenza risulta dunque prevalente rispetto a quello dovuto all'ampiezza.

Letture della tabella per colonne, ovvero al variare della temperatura a parità di frequenza:

- **STATICA:** per le prove statiche si nota che a 100°C la rigidità statica aumenta rispetto alle condizioni di temperatura ambiente. Il comportamento della gomma risulta termindurente in campo statico.

Questo può essere spiegato come segue: in campo statico la sollecitazione viene applicata in modo molto lento, tale da poter considerare il carico costante (o indipendente dal tempo).

L'applicazione lenta del carico combinata con l'elevata temperatura (che conferisce maggiore mobilità alle molecole) comporta una variazione dei legami presenti nella struttura chimica e la creazione di nuovi.

L'effetto della formazione di nuovi legami fa sì che si abbia una maggiore rigidità della catena e al crescere del grado di reticolazione (numero di legami tra le catene per unità di volume) aumenta la rigidità della fase gommosa e la temperatura massima di esercizio (Figura 8.11).

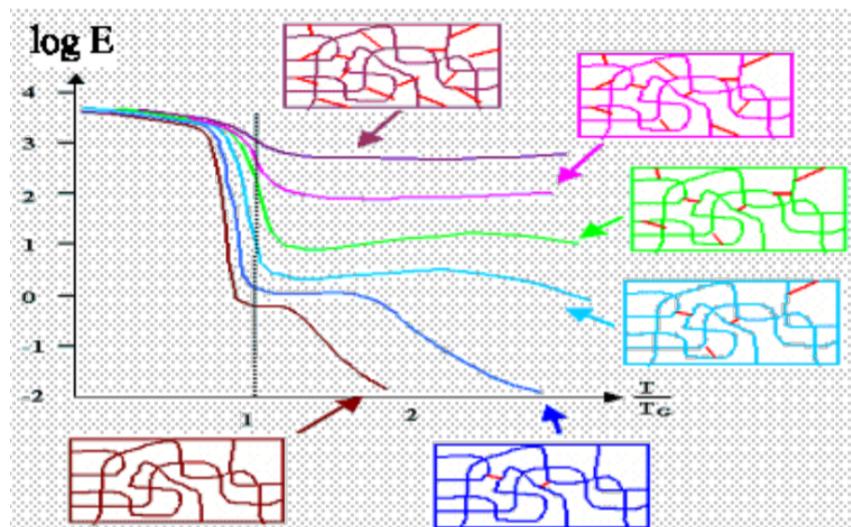


Figura 8.11: grado di reticolazione e rigidità della fase gommosa [32]

Per confermare quanto detto si ricorre ad un esempio numerico: si confrontano tra loro le biellette 5ISO 1 100°C e 5ISO k0 22°C :

- la rigidità statica aumenta passando da 21.75 daN/mm (5ISO k0 22°C) a 23.15 daN/mm (5ISO 1 100°C). La bielletta 5ISO 1 100°C vede un incremento del 6.44% rispetto al valore della bielletta caratterizzata a temperatura ambiente.

- **DINAMICA:** per le prove dinamiche, sia a bassa sia ad alta frequenza, si nota che a 100°C la rigidità dinamica diminuisce rispetto alla rigidità dinamica a temperatura ambiente.

Una spiegazione di questo andamento può essere riconducibile alla diversa tipologia di carico: in campo dinamico la sollecitazione, a differenza del caso statico, è variabile nel tempo. L'applicazione del carico combinato con la variabile tempo e la variabile elevata temperatura (che conferisce maggiore mobilità alle molecole) comporta un indebolimento dei legami presenti nella struttura chimica senza che vi sia creazione di nuovi (affinchè vi sia la creazione di legami vi deve essere un certo tempo a disposizione).

Inoltre, si nota che il decadimento della rigidità dinamica ad alta frequenza risulta maggiore del decadimento che si ha a bassa frequenza, il decadimento è dunque amplificato all'aumentare della frequenza. Il comportamento della gomma risulta termoplastico in campo dinamico ed è tanto più verificato quanto più aumenta la frequenza di applicazione del carico.

Per confermare quanto detto si ricorre ad un esempio numerico: si confrontano tra loro le bielle 5ISO 1 100°C e 5ISO k0 22°C :

- la rigidità dinamica a bassa frequenza passa da 32.43 daN/mm (5ISO k0 22°C) a 30.92 daN/mm (5ISO 1 100°C). La biella 5ISO 1 100°C vede una riduzione del 4.65% rispetto al valore della biella caratterizzata a temperatura ambiente.
- la rigidità dinamica ad alta frequenza passa da 34.51 daN/mm (5ISO k0 22°C) a 32.39 daN/mm (5ISO 1 100°C). La biella 5ISO 1 100°C vede una riduzione del 6.15% rispetto al valore della biella caratterizzata a temperatura ambiente.

2. CONSIDERAZIONI SULLO SMORZAMENTO (FASE)

Lettura della tabella per righe, ovvero al variare della frequenza a parità di temperatura:

Guardando i valori relativi alla biella 5ISO k0, si nota che a temperatura ambiente la fase diminuisce all'aumentare della frequenza e al ridursi dell'ampiezza; questo accade anche per le caratterizzazioni effettuate a 100°C . Ciò permette di dire che fissata la temperatura di esercizio l'aumento di frequenza combinato con la riduzione dell'ampiezza determina l'irrigidimento del componente e una riduzione della fase.

Lettura della tabella per colonne, ovvero al variare della temperatura a parità di frequenza:

La temperatura porta a una variazione notevole della viscosità, ad alte temperature, ovvero quando la viscosità è bassa, il comportamento sarà più simile a quello di un fluido viscoso [28]. Per le prove dinamiche si nota che a 100°C la fase diminuisce rispetto alle condizioni di temperatura ambiente. Questo comportamento risulta anomalo perchè, come asserito precedentemente, il comportamento della gomma risulta termoplastico in campo dinamico e dunque una diminuzione della rigidità rispetto alle condizioni ambiente dovrebbe essere accompagnata da un aumento della fase. I risultati dello smorzamento si possono attribuire al fattore di smorzamento della gomma, che non è costante con

la temperatura e la frequenza. Tipicamente il loss factor ha un massimo la cui posizione in frequenza e temperatura dipende dalla mescola della gomma. É dunque possibile che la combinazione di rigidità (crescente con la frequenza) e loss factor (anch'esso crescente) producano i risultati della tabella. Pertanto questo argomento potrebbe essere oggetto di un approfondimento futuro.

9

PROVA DI FATICA A 100°C

9.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si vuole valutare l'impatto della storia di carico sulla rigidità ad alta temperatura. Le prove in temperatura sono state svolte, come preannunciato nella sezione 3.3, con l'ausilio di una cella climatica e sfruttando il controllo in feedback della termocoppia. In particolare è stato scelto come ciclo affaticante, per i motivi già descritti nei capitoli precedenti, il ciclo 5-LC isodanno. Il valore di temperatura a cui sono state condotte le prove risulta pari a 100°C in linea con la normativa.

Si sottolinea che a ciascuna prova corrisponde univocamente una bielletta nuova come riportato in Tabella 9.1.

Numero bielletta	Modalità di somministrazione del carico	temperatura
5ISO 1	Ciclo da normativa (LC)	100°C
5ISO 2	Ciclo da normativa (LC)	100°C
5ISO 3	Ciclo da normativa (LC)	100°C

Tabella 9.1: Corrispondenza fra bielletta e modalità di somministrazione del carico isodanno e temperatura della prova

9.2 MODALITÀ DI ROTTURA

Nella presente sezione si anticipano le modalità di rottura che subiscono i 3 provini sottoposti al ciclo affaticante isodanno LC a 100°C al fine di condurre un'analisi più approfondita nelle sezioni successive.

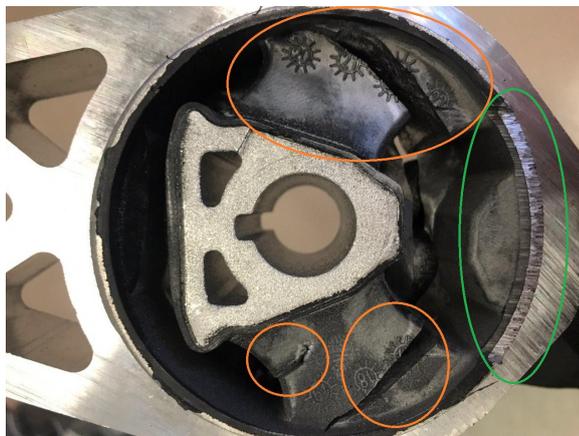


Figura 9.1: Modalità di rottura della bielletta 5ISO 1 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C



Figura 9.2: Modalità di rottura della bielletta 5ISO 2 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C



Figura 9.3: Modalità di rottura della bielletta 5ISO 3 in seguito al ciclo affaticante LC isodanno a 100°C

Dalle Figure 9.1, 9.2, 9.3 emerge come le possibili modalità di rottura possano essere riassunte come segue:

1. una prima modalità di rottura, relativa alla bielletta 5ISO 1 (Figura 9.1) vede ben visibili due cricche nelle razze (porzioni di gommato che collegano il canotto all'anello esterno), delle quali soltanto una progredisce fino al completo distacco (cricca locata nella parte superiore in Figura 9.1);
2. una seconda modalità di rottura, relativa alla bielletta 5ISO 2 (Figura 9.2) vede l'innesco di una cricca in una sola delle due razze che collegano il canotto all'anello esterno; tuttavia essa non ha progredito fino al completo distacco del gommato.

3. una terza modalità di rottura, relativa alla bielletta 5ISO 3 (Figura 9.3) vede ben visibili due cricche nelle razze. In tale casistica entrambe le cricche propagano fino al completo distacco;

In particolare, le biellette 5ISO 1 e 3, più simili tra loro per modalità di rottura, divergono rispetto all'innesco di una terza cricca all'incipit della sua propagazione presente solo per la bielletta 5ISO 1. Inoltre, una seconda caratteristica anomala che si denota solo nel caso della bielletta 5ISO 1 è parte di metallo abrasa cerchiata in verde in Figura 9.1 dovuta allo sfregamento metallo-metallo tra bielletta e forcella di supporto.

9.3 ANALISI DEI RISULTATI SULLA SINGOLA BIELLETTA: CONFRONTO CON I VALORI NOMINALI

In questa sezione si riportano gli andamenti della rigidezza, sia statica che dinamica, allo scopo di indagare il loro decadimento rispetto alle condizioni nominali nel corso del ciclo vita dovuto al percorso LC isodanno a 100°C . Nello specifico la modalità di confronto dei risultati è quella sulla singola bielletta: ovvero considerando una stessa modalità di somministrazione del carico, si confronta la rigidezza e la fase ai diversi istanti di vita (ogni 25% del ciclo di vita) con la rigidezza nominale.

9.3.1 Rigidezza statica

I procedimenti riportati in questo paragrafo sono del tutto analoghi a quelli illustrati nel capitolo 6, relativo alle prova di fatica a temperatura ambiente. Quindi si considerano gli scostamenti fra i valori nominali e quelli dei dati sperimentali, e la dispersione di questi ultimi, monitorata tramite il COV. In Figura 9.4 sono presentati i risultati grafici di quanto appena descritto. Ciascun grafico riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto e la rispettiva banda di tolleranza che secondo normativa deve essere pari a $\pm 15\%$ del valore nominale indicato da progetto. Ne segue che, affinché la rigidezza sia ancora accettabile secondo progetto, si dovrebbe ottenere che tutti i valori ricavati sperimentalmente, a ciascuna percentuale di vita della bielletta, siano compresi entro la sopraddetta banda di tolleranza.

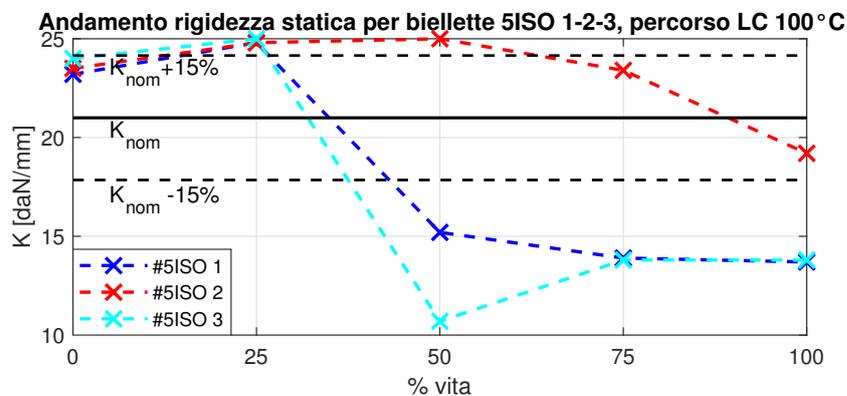


Figura 9.4: Confronto biellette 5ISO 1-2-3: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

In Tabella 9.2 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza statica a 100°C carico isodanno [daN/mm]				
		bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	COV [%] 5ISO 1-2-3	COV [%] 5ISO 1-3
21±15%	0%	23.15	23.52	23.95	1.7%	2.42%
	25%	24.76	24.81	24.99	0.48%	0.64%
	50%	15.25	24.98	10.67	43.07%	24.24%
	75%	13.94	23.40	13.78	35.02%	0.81%
	100%	13.73	19.15	13.80	19.98%	0.35%

Tabella 9.2: Riepilogo risultati rigidezza statica a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti

Dall'analisi sperimentale è emerso che:

- per ciascuno dei 3 provini, tutte le rigidezze rilevate allo 0% del ciclo affaticante rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto. I rilievi effettuati al termine del ciclo vita dei componenti mostrano come solo la rigidezza della bielletta 5ISO 2 rientra all'interno della banda ammissibile.
- per quanto concerne la bielletta 5ISO 2 la comparsa dell'unica cricca si ha tra un 50% e un 75% della vita del componente dato che proprio in questo passaggio si assiste ad una riduzione in termini di valore assoluto della rigidezza: da 24.98 daN/mm a 23.40 daN/mm.
- per quanto concerne le biellette 5ISO 1 e 5ISO 3 che hanno una modalità di rottura simile tra loro, la comparsa della prima cricca si manifesta tra il 25% e il 50% della vita del componente. Per la bielletta 5ISO 1 si passa infatti da 24.76 daN/mm a 15.25 daN/mm, per la 5ISO3 da 24.99 daN a 10.67%.
- guardando i valori del COV essi risultano più bassi se si prende in considerazione solo la bielletta 5ISO 1 e 5ISO 3 a conferma delle similarità che i componenti hanno subito in merito alla loro modalità di rottura.

9.3.2 Rigidezza dinamica a bassa frequenza

In questa sezione si riportano i risultati relativi alle rigidezze dinamiche a bassa frequenza, i cui valori vengono estratti dallo sweep in frequenza considerando come valore di lettura la rigidezza ottenuta a 25 Hz.

Le considerazioni sul tipo di confronto sono le medesime fatte nel paragrafo precedente relativo alle rigidezze statiche.

In Figura 9.5 sono rappresentati i risultati in forma grafica; si riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto, e la banda di tolleranza.

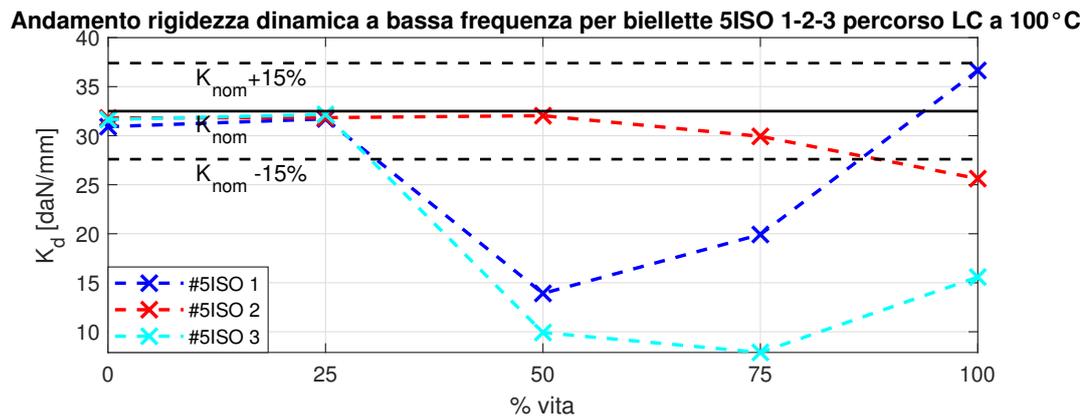


Figura 9.5: Confronto bielle 5ISO 1-2-3: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

In Tabella 9.3 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza dinamica @25Hz a 100°C carico isodanno [daN/mm]				
		bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	COV [%] 5ISO 1-2-3	COV [%] 5ISO 1-3
$32.5 \pm 15\%$	0%	30.92	31.81	31.65	1.51%	1.65%
	25%	31.70	31.83	32.04	0.76%	1.04%
	50%	13.91	32.04	9.92	63.30%	23.67%
	75%	19.92	29.93	7.89	57.34%	61.17%
	100%	36.65	25.62	15.58	40.62%	57.05%

Tabella 9.3: Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti

Dall'analisi sperimentale è emerso che:

- per ciascuno dei 3 provini, tutte le rigidezze rilevate allo 0% del ciclo affaticante rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto. I rilievi effettuati al termine del ciclo vita dei componenti mostrano come solo la rigidezza della bielletta 5ISO 1 rientra all'interno della banda ammissibile.
- al 100% della fatica il valore di rigidezza dinamica a bassa frequenza relativo alla bielletta 5ISO 1 risulta pari a 36.65 daN/mm e rientra all'interno della banda di tolleranza come preannunciato al punto precedente. In realtà il drastico aumento che si ha, passando dal 75% al 100% della vita, da 19.92 daN/mm a 36.65 daN/mm è imputabile al contatto metallo-metallo (Figura 9.1, parte cerchiata in verde) e non al solo gommato.
- per quanto concerne la bielletta 5ISO 2 la comparsa dell'unica cricca si ha tra un 50% e un 75% della vita del componente si riconferma anche osservando i valori delle rigidezze dinamiche. Si può asserire quanto detto in quanto passando dal 50% al 75% della vita si assiste ad una riduzione in termini di valore assoluto della rigidezza dinamica: da 32.04 daN/mm a 29.93 daN/mm.

- per quanto concerne le biellette 5ISO 1 e 5ISO 3 che hanno una modalità di rottura simile tra loro, la caratterizzazione dinamica a bassa frequenza conferma quanto osservato per la statica: la comparsa della prima cricca si manifesta tra il 25% e il 50% della vita del componente. Per la bielletta 5ISO 1 si passa infatti da 31.70 daN/mm a 13.91 daN/mm, per la 5ISO3 da 32.04 daN a 9.02%.
- guardando i valori del COV essi risultano più bassi se si prende in considerazione solo la bielletta 5ISO 1 e 5ISO 3 a conferma delle similarità che i componenti hanno subito in merito alla loro modalità di rottura. Questa similarità si verifica fino al 25% della vita del componente, i COV dal 50% in poi aumentano brutalmente. La divergenza tra i due campioni è imputabile al contatto metallo-metallo, che si verifica per la bielletta 5ISO 1 e non per la bielletta 5ISO 3, che fa sì che la rigidezza dal 75% al 100% cresca brutalmente per la bielletta 5ISO1. Dal 50% al 75% della vita si ha che per la bielletta 5ISO1 la rigidezza cresce e per la bielletta 5ISO3 cala. La rigidezza cala per la bielletta 5ISO 3 in quanto in questo arco di vita è probabile che si sia innescata la seconda cricca, la rigidezza aumenta per la bielletta 5ISO 1 in quanto è probabile che in questo lasso di vita del componente vi sia l'incipit del contatto metallo-metallo.

9.3.3 Rigidezza dinamica ad alta frequenza

In questa sezione si riportano i risultati relativi alle rigidezze dinamiche ad alta frequenza, i cui valori vengono estratti dallo sweep in frequenza considerando come valore di lettura la rigidezza ottenuta a 100 Hz. In Figura 9.6 sono rappresentati i risultati in forma grafica; si riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto, e la banda di tolleranza.

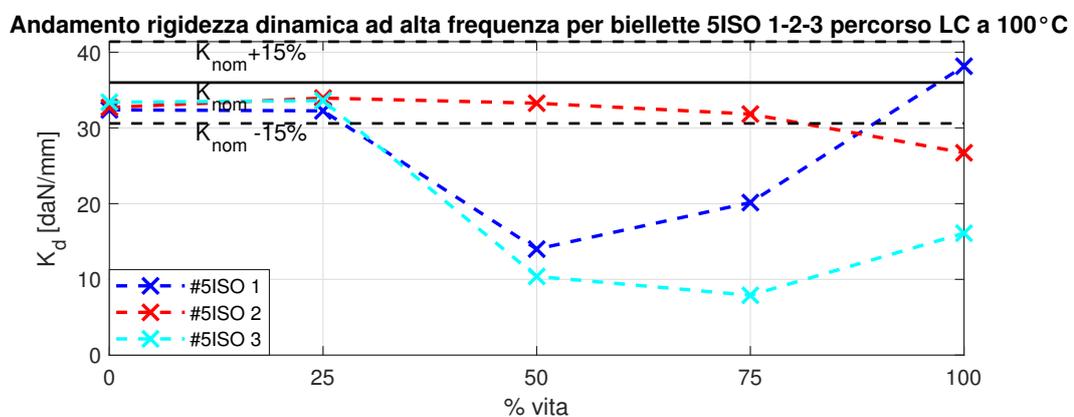


Figura 9.6: Confronto biellette 5ISO 1-2-3: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

In Tabella 9.4 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidità dinamica @100Hz a 100°C carico isodanno [daN/mm]				
		bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	COV [%] 5ISO 1-2-3	COV [%] 5ISO 1-3
36±15%	0%	32.39	32.71	33.40	1.57%	2.17%
	25%	32.26	33.95	33.61	2.63%	2.90%
	50%	14.00	33.27	10.39	64.00%	20.93%
	75%	20.15	31.84	7.90	59.96%	61.76%
	100%	38.16	26.71	16.10	40.87%	57.49%

Tabella 9.4: Riepilogo risultati rigidità dinamica ad alta frequenza a 100°C con carico isodanno - Valori assoluti

I risultati ottenuti e le considerazioni finali relative alle rigidità dinamiche ad alta frequenza sono del tutto simili, dal punto di vista concettuale, a quelle delle rigidità dinamiche a bassa frequenza. Infatti dai risultati emerge che:

- per ciascuno dei 3 provini, tutte le rigidità rilevate allo 0% del ciclo affaticante rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto. I rilievi effettuati al termine del ciclo vita dei componenti mostrano come solo la rigidità della bielletta 5ISO 1 rientra all'interno della banda ammissibile.
- Il valore di rigidità dinamica ad alta frequenza relativo alla bielletta 5ISO 1 risulta pari a 38.16 daN/mm e rientra all'interno della banda di tolleranza come preannunciato al punto precedente. In realtà il drastico aumento che si ha, passando dal 75% al 100% della vita, da 20.15 daN/mm a 38.16 daN/mm è imputabile al contatto metallo-metallo (Figura 9.1, parte cerchiata in verde) e non al solo gommato.
- per quanto concerne la bielletta 5ISO 2 la comparsa dell'unica cricca si ha tra un 50% e un 75% della vita del componente si riconferma anche osservando i valori delle rigidità dinamiche ad alta frequenza.
Si può asserire quanto detto in quanto passando dal 50% al 75% della vita si assiste ad una riduzione in termini di valore assoluto della rigidità dinamica: da 33.27 daN/mm a 31.84 daN/mm.
- per quanto concerne le biellette 5ISO 1 e 5ISO 3 che hanno una modalità di rottura simile tra loro, la caratterizzazione dinamica ad alta frequenza conferma quanto osservato per la statica e per la dinamica a bassa frequenza: la comparsa della prima cricca si manifesta tra il 25% e il 50% della vita del componente.
Per la bielletta 5ISO 1 si passa infatti da 32.26 daN/mm a 14.00 daN/mm, per la 5ISO3 da 33.61 daN a 10.39%.
- guardando i valori del COV essi risultano più bassi se si prende in considerazione solo la bielletta 5ISO 1 e 5ISO 3 a conferma delle similarità che i componenti hanno subito in merito alla loro modalità di rottura. Questa similarità si verifica fino al 25% della vita del componente, i COV dal 50% in poi aumentano brutalmente.

La divergenza tra i due campioni è imputabile alle stesse cause menzionate per la caratterizzazione dinamica a bassa frequenza.

9.4 ANALISI DEI RISULTATI SU TUTTE LE BIELLETTE: CONFRONTO CON I VALORI A NUOVO

In questa sezione il confronto delle rigidzze statiche e dinamiche fra le 3 prove a temperatura controllata è finalizzato a valutare se la temperatura di esecuzione della prova ha effetto sul danneggiamento complessivo del provino. Nello specifico il confronto dei risultati è stato fatto per mezzo di rapporti adimensionali di rigidzza così da uniformare i risultati delle diverse biellette. Infatti l'obiettivo, in questo caso, è quello di poter effettuare un confronto incrociato fra esse che sia indipendente dal valore assoluto della rigidzze a nuovo di ciascuna bielletta. I rapporti adimensionali in termini percentuali tenuti in considerazione sono stati ricavati rapportando il valore "attuale" di rigidzza con quello di rigidzza a nuovo, come segue:

$$\text{Variazione \%} = \frac{K_{\text{attuale}}}{K_{0\%}} \cdot 100$$

Si ribadisce, come fatto nell'analogia sezione delle prove affaticanti a temperatura ambiente, che questa operazione è necessaria per poter normalizzare i dati sperimentali e fare un confronto incrociato fra biellette differenti. Ciò è dovuto al fatto che non vi è nessuna garanzia che le rigidzze a nuovo di ciascun componente siano esattamente uguali fra loro, in quanto i processi produttivi possono indurre delle variazioni del valore della rigidzza nominale, anche considerevoli ai fini del confronto che si vuole effettuare in questo lavoro.

9.4.1 Rigidezza statica

Di seguito nella Figura 9.7 si riportano le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

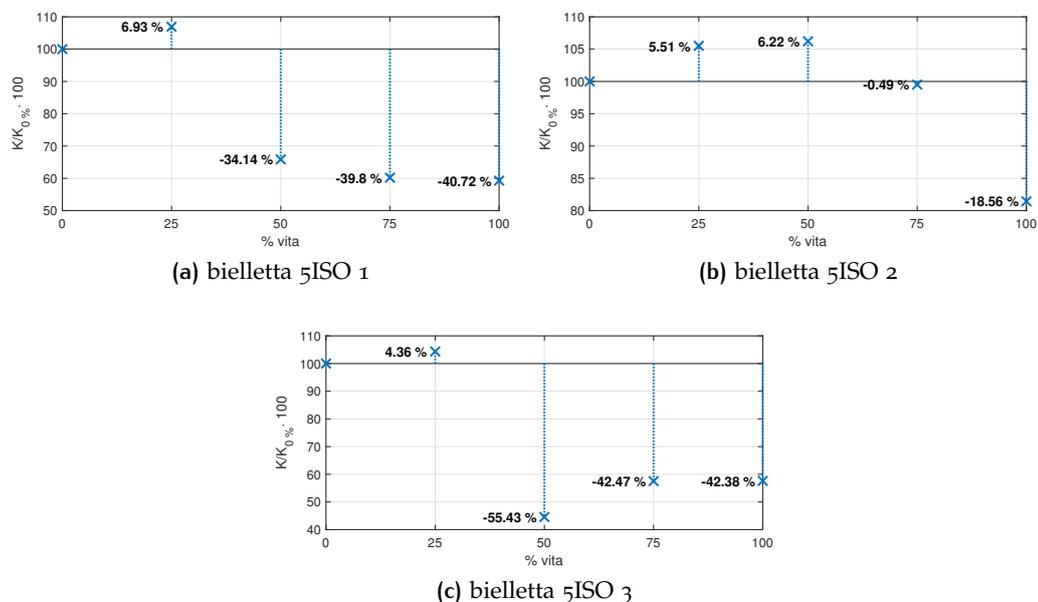


Figura 9.7: Confronto biellette 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidzza statica rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Rigidità statica 100°C con carico isodanno LC			
	bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	MEDIA
0%	-	-	-	-
25%	+6.93%	+5.51%	+4.36%	+5.6%
50%	-34.14%	+6.22%	-55.43%	-27.78%
75%	-39.8%	-0.49%	-42.47%	-27.58%
100%	-40.72%	-18.56%	-42.38%	-33.88%

Tabella 9.5: Riepilogo risultati rigidità statica, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti è emerso che:

- a seguito del primo quarto di fatica raggiunta da tutti e tre i componenti, si registra un irrigidimento medio della rigidità pari al 5.6%.
- al 50% della vita, la bielletta 5ISO 2 non presenta innesco di frattura per cui continua ad irrigidirsi del +6.22% rispetto al valore a nuovo. Le biellette 5ISO 1 e 3 presentano frattura per cui si ha un decadimento della rigidità rispettivamente pari a -34.14% e -55.43% rispetto al valore a nuovo.
- al fine vita, il decadimento percentuale presenta valori simili per le biellette 5ISO 1 e 5ISO 3, rispettivamente pari a $\approx -41\%$ e $\approx -42\%$.

9.4.2 Rigidità dinamica a bassa frequenza

Nella Figura 9.8 si riportano le variazioni percentuali relative alla rigidità dinamica a bassa frequenza a nuovo (25 Hz).

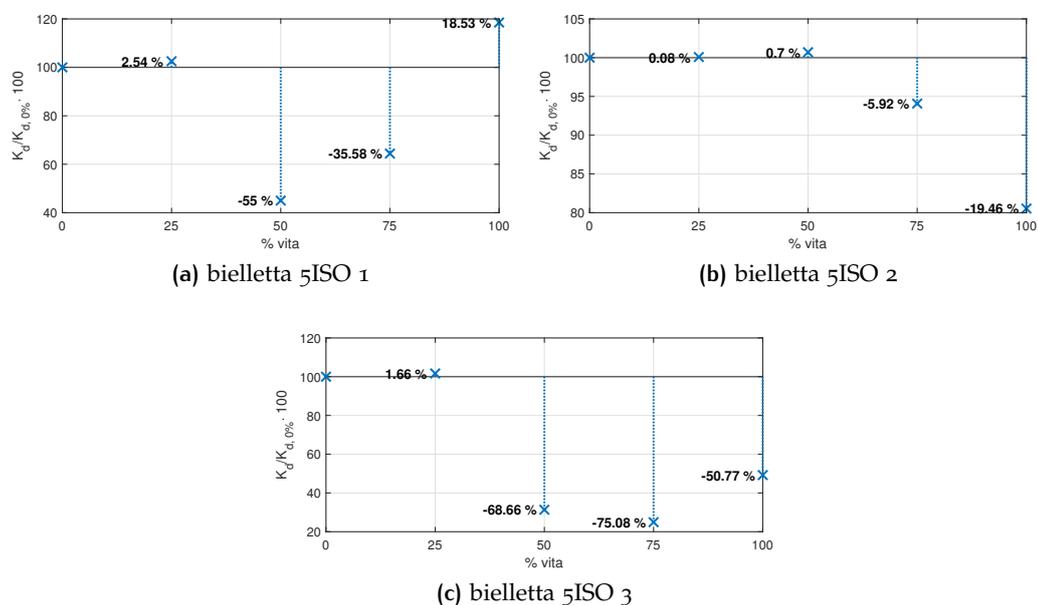


Figura 9.8: Confronto biellette 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidità dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione %			
	Rigidezza dinamica @25Hz 100°C con carico isodanno LC			
	bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	MEDIA
0%	-	-	-	-
25%	+2.54%	+0.08%	+1.66%	+1.43%
50%	-55.00%	+0.70%	-68.66%	-40.98%
75%	-35.58%	-5.92%	-75.08%	-38.86%
100%	+18.53%	-19.46%	-50.77%	-17.23%

Tabella 9.6: Riepilogo risultati rigidezza dinamica @25Hz, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti è emerso che:

- a seguito del primo quarto di fatica raggiunta da tutti e tre i componenti, si registra un irrigidimento medio della rigidezza pari a 1.43%.
- al 50% della vita, per le biellette 5ISO 1 e 3 si assiste ad un decadimento percentuale rispettivamente pari a -55% e $\approx -69\%$.

Tra il 25% e il 50% della vita per queste biellette si ha infatti l'insacco della prima cricca presente sulla razza.

- Al 50% della vita, al contrario, per la bielletta 5ISO 2 si assiste ad un debole irrigidimento pari a 0.7%; ciò dimostra che in questo arco di vita il componente non presenta andamenti anomali, dunque si può asserire che non si è ancora innescata la frattura.
- al 75% della vita si ha un decadimento della rigidezza per tutti e tre i provini, le cricche continuano a propagare per le biellette 5ISO 1 e 3 mentre si innescano per la bielletta 5ISO 2.
- In particolare al 75% della vita dei componenti, il decadimento percentuale che si ha per la bielletta 5ISO 3 risulta maggiore del decadimento che si ha per la bielletta 5ISO 1.

Questo avviene per due ragioni:

1. in primo luogo perchè per la bielletta 5ISO 1 si innesca il contatto metallo-metallo che fa aumentare il valore della rigidezza rispetto al 50% della vita;
 2. in secondo luogo perchè la bielletta 5ISO 3 esplica due cricche che propagano fino al completo distacco a differenza della bielletta 5ISO 1 che vede la frattura completa solo per una delle due cricche. È probabile che il secondo insacco di frattura si espliciti proprio tra il 50% e il 75% della vita per il provino 5ISO 3.
- al 100% della vita si ha un decadimento della rigidezza per le biellette 5ISO 2 e 3 mentre si ha un comportamento anomalo per la bielletta 5ISO 1 che vede un irrigidimento percentuale pari a 18.53%.

Tale irrigidimento non è da imputarsi al gommato, ma al contatto metallo-metallo tra provino e attrezzatura.

9.4.3 Rigidezza dinamica ad alta frequenza

Nella Figura 9.9 si riportano le variazioni percentuali relative alla rigidezza dinamica ad alta frequenza a nuovo (100 Hz).

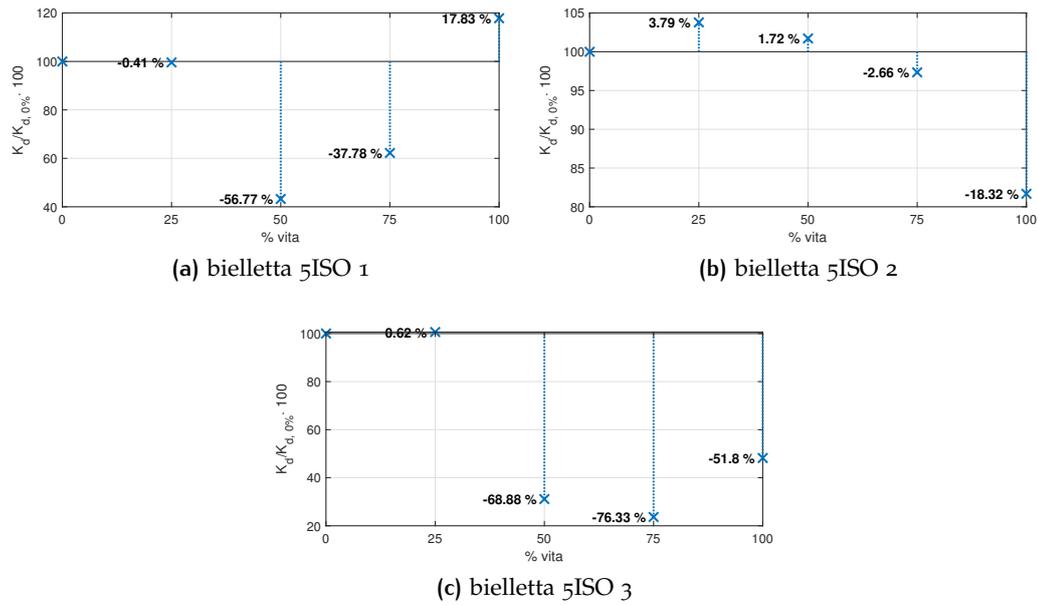


Figura 9.9: Confronto bielletta 5ISO 1-2-3: variazione percentuale della rigidezza dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Rigidezza dinamica @100Hz 100°C con carico isodanno LC			
	bielletta 5ISO 1	bielletta 5ISO 2	bielletta 5ISO 3	MEDIA
0%	-	-	-	-
25%	-0.41%	+3.79%	+0.62%	+1.33%
50%	-56.77%	+1.72%	-68.88%	-41.31%
75%	-37.78%	-2.66%	-76.33%	-38.92%
100%	+17.83%	-18.32%	-51.80%	-17.43%

Tabella 9.7: Riepilogo risultati rigidezza dinamica @100Hz, carico isodanno LC 100°C - Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti è emerso che i decadimenti percentuali relativi alla caratterizzazione dinamica a 100Hz ricalcano quelli ottenuti a 25Hz:

- a seguito del primo quarto di fatica raggiunta da tutti e tre i componenti, si registra un irrigidimento medio della rigidezza pari a 1.33%.
- al 50% della vita, per le bielletta 5ISO 1 e 3 si assiste ad un decadimento percentuale rispettivamente pari a $\approx -57\%$ e $\approx -69\%$. Tra il 25% e il 50% della vita per queste bielletta si ha infatti l'innescò della prima cricca presente sulla razza. Al 50% della vita, al contrario, per la bielletta 5ISO 2 si assiste ad un debole irrigidimento pari a 1.72%; ciò dimostra che in questo arco di vita il componente non presenta andamenti anomali, dunque, come già detto per la dinamica a bassa frequenza, si può asserire che non si è ancora innescata la frattura.
- al 75% della vita si ha un decadimento della rigidezza per tutti e tre i provini, le cricche continuano a propagare per le bielletta 5ISO 1 e 3 mentre si innescano per la bielletta 5ISO 2. In particolare al 75% della vita, il decadimento percentuale che si ha per la bielletta 5ISO 3 risulta maggiore del decadimento che si ha per la bielletta 5ISO 1 per le stesse ragioni esplicate nel caso della caratterizzazione dinamica a 25Hz.

- al 100% della vita si ha un decadimento della rigidezza per le biellette 5ISO 2 e 3 mentre si ha un irrigidimento anomalo per la bielletta 5ISO pari a 17.83% da imputare al contatto metallo-metallo tra provino e attrezzatura.

9.5 IL DANNEGGIAMENTO COME FUNZIONE DI STATO

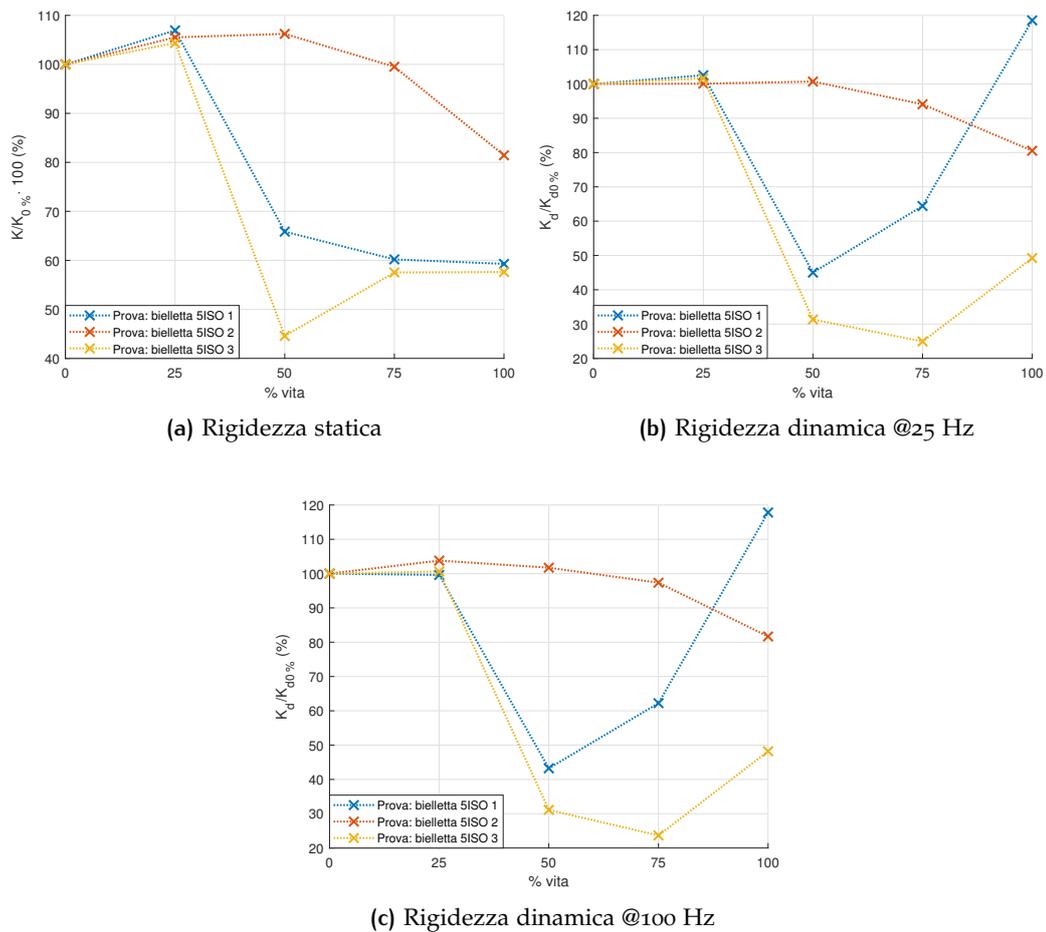


Figura 9.10: Confronto globale delle variazioni percentuali delle rigidezza, carico isodanno LC 100°C

Il comportamento stabile si ha fino al 25% della vita dei 3 componenti. Al 25% infatti tutti i valori di rigidezza ricadono nello stesso intorno. Fino al 25 % della vita è garantita infatti ripetibilità delle prove. A partire dal 25% in poi i comportamenti divergono: un crollo significativo fino al 75% per le biellette 5ISO 1 e 3, un decadimento più blando per la 5ISO2. Nell'ultimo quarto di vita si ha un successivo irrigidimento graduale per la bielletta 5ISO 3, più brusco per la 5ISO1 anche se i componenti risultano già criccati.

9.6 CONCLUSIONI

Dalla campagna di prove condotta con carichi isodanno a temperatura costante pari a 100°C descritta in questo capitolo, è emerso che vi sono tre modalità di rottura differenti per i provini e che, a seconda del numero di cricche propagate e di quanto hanno propagato, l'andamento delle rigidzze risulta differente.

In particolare se le cricche formatesi sono due allora il comportamento anomalo si ha tra il 25% e il 50% della vita del componente; se l'innesco di rottura si ha in una sola delle due razze il comportamento anomalo della rigidzza si presenta più tardi tra un 50% e un 75% della vita del componente.

Dal punto di vista del confronto delle rigidzze ottenute con quelle nominali i risultati non sono sovrapponibili. Solo le rigidzze statiche allo 0% di vita del componente rientrano all'interno della banda ammissibile, quelle dinamiche fino al 25% della vita. Ciò accade perchè come detto nei capitoli precedenti, a fronte delle elevate temperature le rigidzze statiche tendono ad aumentare e le dinamiche a ridursi.

Il confronto con i valori a nuovo per ogni bielletta ribadisce i momenti in cui si ha divergenza di comportamento e il danneggiamento come funzione di stato permette di verificare come a valle del ciclo affaticante non vi sia sovrapposizione dei risultati: la divergenza nei valori è da ricondursi alle diverse modalità di rottura che i componenti hanno subito. Alla luce di quanto detto è possibile asserire che risulta necessario ampliare la rosa di campioni al fine di trovare maggiore ripetibilità dei risultati.

10

MISURE PRELIMINARI PER PROVE DI FATICA CON CLIMI MISTI

10.1 INTRODUZIONE

La terza campagna di prove condotta nella presente attività si prefigge l'obiettivo di analizzare e di indagare il comportamento del gommato in termini di decadimento della sua rigidità, sia statica che dinamica, e del suo smorzamento quando esso risulta sottoposto ad un ciclo affaticante isodanno con climi misti, ovvero quando il componente è sottoposto ad un ciclo termico che rappresenta uno scenario quanto più reale sul componente con climi freddi, miti e caldi. Tale analisi verrà trattata e descritta nel dettaglio nel capitolo 11. Per l'esecuzione di prove di fatica con climi misti sono state usate 3 bielle nuove aventi stesso part number delle bielle utilizzate per i test di fatica a 100°C ; a queste si aggiunge una quarta a cui è stato somministrato il ciclo affaticante a temperatura ambiente. Risulta opportuno verificare che le condizioni a nuovo dei vari componenti adoperati siano simili o comunque non vi siano differenze troppo evidenti, in modo da garantire dei risultati allineati in partenza. Ciascuna delle bielle nuove è stata numerata con un numero progressivo; per il momento non si tenga conto del codice (di cui si parlerà nel capitolo 11), ma solo del numero progressivo. Le specifiche, definite a disegno, con cui le caratterizzazioni statiche e dinamiche sono state effettuate per la biella usata in questa campagna di prove sono le stesse riportate nel paragrafo 8.2 del capitolo 8.

10.2 RISULTATI CARATTERIZZAZIONI A NUOVO

Risultati prove statiche a 22°C

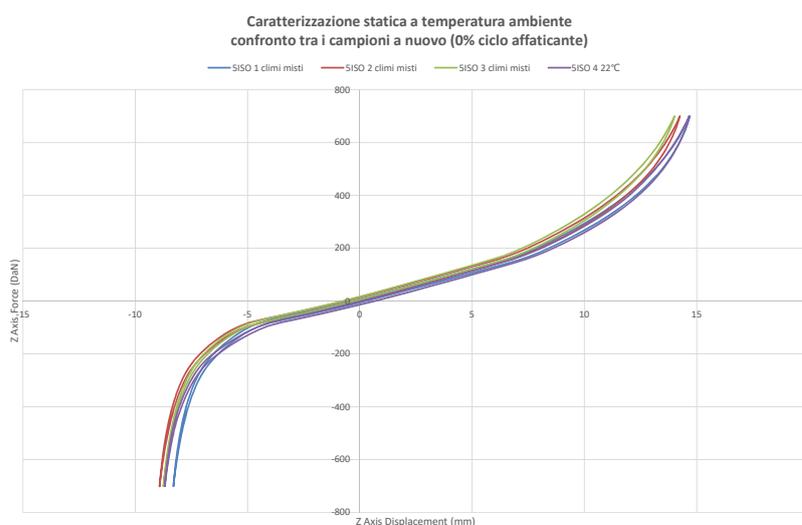


Figura 10.1: Andamenti delle caratterizzazioni statiche a nuovo

Gli andamenti ottenuti con i cicli statici sono riportati in Figura 10.1; si ricorda che le prove di caratterizzazioni sono state condotte per tutte le bielletto a temperatura ambiente.

Di seguito in Tabella 10.1 sono raccolti i valori delle rigidzze statiche in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni, insieme ad esse, sono stati calcolati e riportati ulteriori parametri quali il valore nominale di progetto della rigidzza (K_{nom}), gli scostamenti massimo e minimo ammissibili ($K_{nom} \pm 15\%$) e COV.

Nelle tabelle relative a questo capitolo, in rosso sono evidenziati i valori delle rigidzze che non cadono all'interno della banda di tolleranza delle rigidzze ammissibili definita a progetto.

Test	Rigidzza statica (22°C) K_{stat} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: +/- 700daN K calcolata in: +/-50daN
K_{nom} [daN/mm]	21
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	17.85
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	24.15
K- bielletta 5ISO 1 climi misti [daN/mm]	20.84
K- bielletta 5ISO 2 climi misti [daN/mm]	20.97
K- bielletta 5ISO 3 climi misti [daN/mm]	21.31
K- bielletta 5ISO 4 22°C [daN/mm]	21.19
COV	1.00%

Tabella 10.1: Rigidzze statiche a nuovo (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si puà notare che:

1. Le rigidzze statiche a nuovo ottenute a 22°C rientrano tutte all'interno della banda di tolleranza definita a progetto;
2. I valori ottenuti sono coerenti tra loro, infatti il COV ottenuto è molto basso (1.00%) e anche visivamente la sovrapposizione delle curve di isteresi non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi.
3. Tali risultati sono indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le bielletto sono simili.

Risultati prove dinamiche - rigidzza a 22°C

In questa sezione si riportano i risultati grafici relativi a:

- Curve dinamiche a 0.2mm picco-picco, nel range 1 ÷ 50 Hz (Figura 10.2);
- Curve dinamiche a 0.1mm picco-picco, nel range 5 ÷ 110 Hz (Figura 10.3).

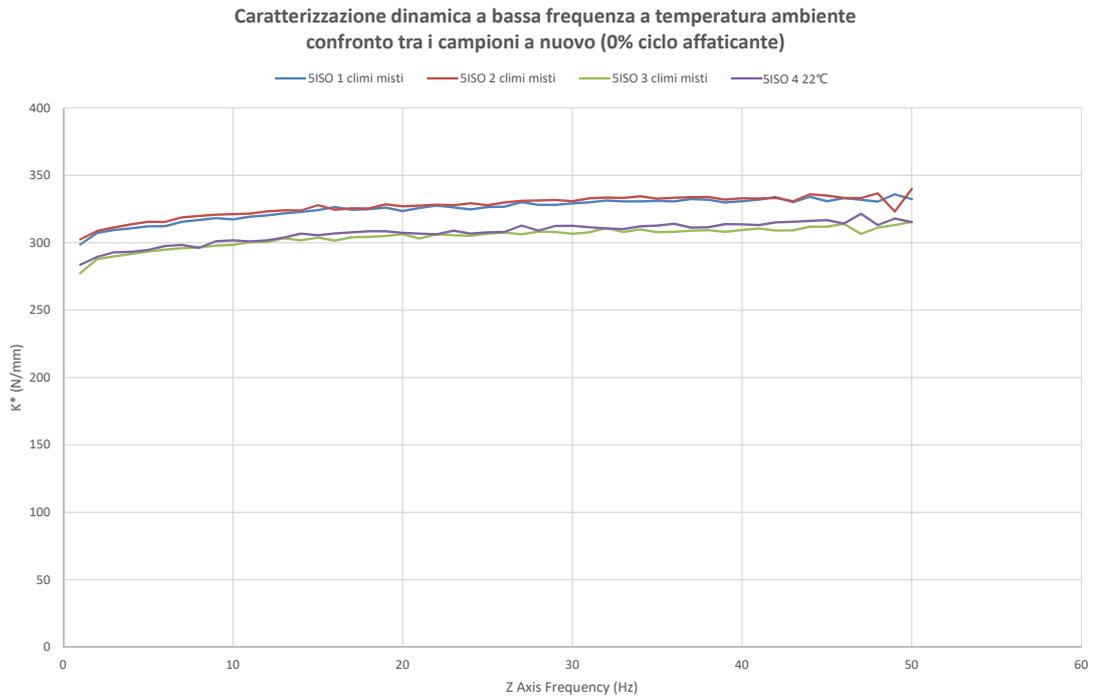


Figura 10.2: *Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo*

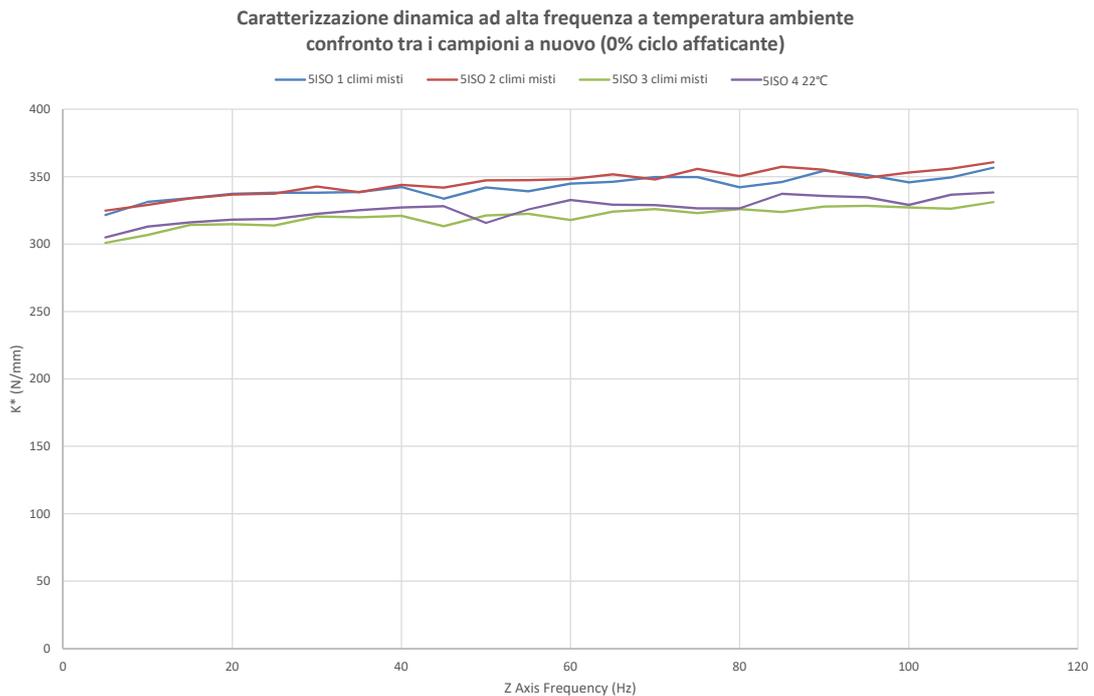


Figura 10.3: *Andamenti delle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo*

Di seguito nelle Tabelle 10.2 e 10.3 sono raccolte le rigidità dinamiche, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; analogamente al caso statico insieme a questi valori sono riportati rigidità nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Rigidezza dinamica a bassa frequenza a 22°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz K letta a: 25Hz
K_{nom} [daN/mm]	32.5
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	27.63
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	37.37
K- bielletta 5ISO 1 climi misti [daN/mm]	32.65
K- bielletta 5ISO 2 climi misti [daN/mm]	32.79
K- bielletta 5ISO 3 climi misti [daN/mm]	30.70
K- bielletta 5ISO 4 22°C [daN/mm]	30.77
COV	3.62%

Tabella 10.2: Rigidezze dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)

Test	Rigidezza dinamica ad alta frequenza a 22°C K_{dyn} [daN/mm]
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz K letta a: 100Hz
K_{nom} [daN/mm]	36
$K_{nom} -15\%$ [daN/mm]	30.6
$K_{nom} +15\%$ [daN/mm]	41.4
K- bielletta 5ISO 1 climi misti [daN/mm]	34.58
K- bielletta 5ISO 2 climi misti [daN/mm]	35.31
K- bielletta 5ISO 3 climi misti [daN/mm]	32.72
K- bielletta 5ISO 4 22°C [daN/mm]	32.91
COV	3.74%

Tabella 10.3: Rigidezze dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)

Dai risultati relativi alle caratterizzazioni dinamiche, sia a bassa che ad alta frequenza si può notare:

1. I valori delle rigidezze dinamiche sono in linea con i valori nominali definiti a progetto, per tutte le biellette.
2. Una buona sovrapposizione degli andamenti: nello specifico, considerando le Figure 10.2 e 10.3, si nota come essi siano contenuti entro una banda di variabilità abbastanza limitata e abbiano anche un andamento crescente. Si nota inoltre come le biellette "5ISO 1 climi misti" e "5ISO 2 climi misti" siano molto più simili tra loro rispetto alla bielletta "5ISO 3 climi misti". La bielletta "5ISO 3 climi misti" risulta più simile invece alla "5ISO 4 22°C".

Inoltre, riferendosi ai valori dei COV calcolati nelle Tabelle 10.2 e 10.3 (rispettivamente 3.62% e 3.74%) si ha conferma numerica della bassa dispersione anche dei valori di rigidezza dinamica.

Risultati prove dinamiche - smorzamento (fase) a 22°C

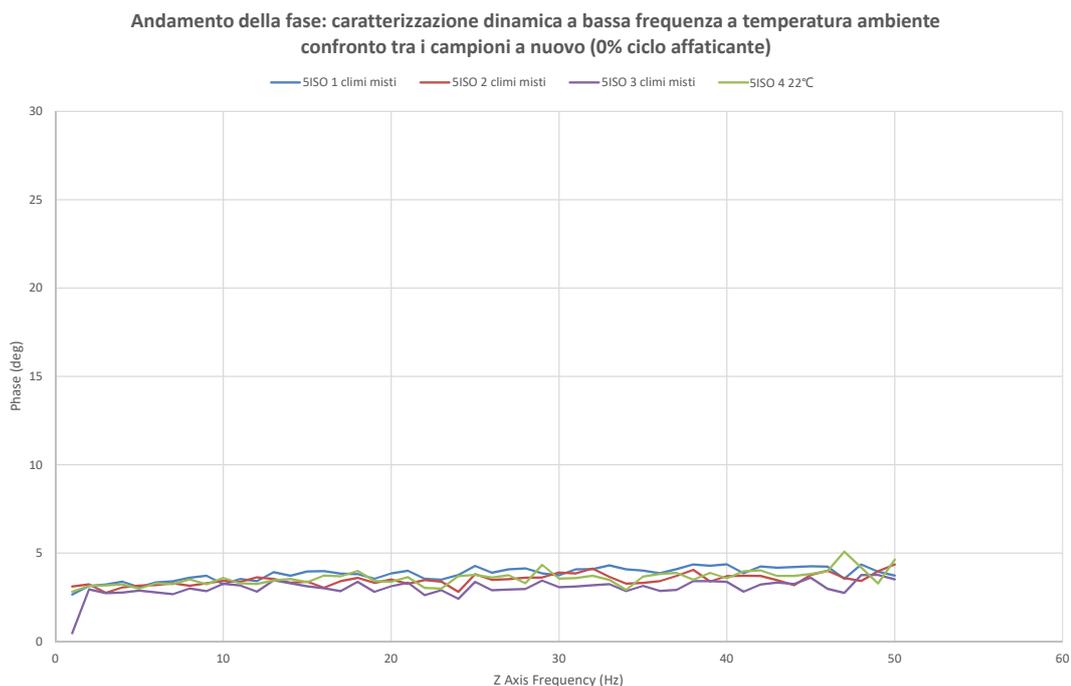


Figura 10.4: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a 22°C a nuovo

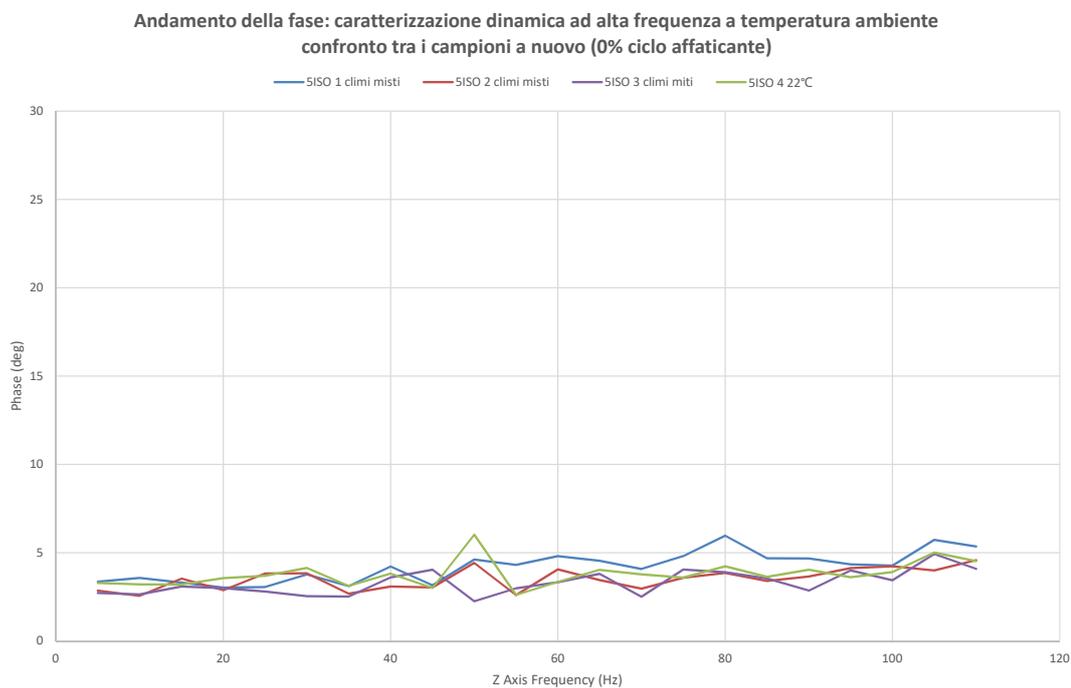


Figura 10.5: Andamenti della fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a 22°C a nuovo

Di seguito nelle Tabelle 10.4 e 10.5 sono raccolte fasi, in valore assoluto, ottenute dalle relative caratterizzazioni; insieme a questi valori sono riportati fase nominale, banda di tolleranza e COV.

Test	Fase caratterizzazione dinamica a bassa frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.2mm P-P, range sweep: 1 ÷ 50Hz fase letta a: 25Hz
Phase _{nom} [deg]	5
Phase _{nom} -15% [deg]	4.25
Phase _{nom} +15% [deg]	5.75
Phase- bielletta 5ISO 1 climi misti [deg]	4.27
Phase- bielletta 5ISO 2 climi misti [deg]	3.81
Phase- bielletta 5ISO 3 climi misti [deg]	3.36
Phase- bielletta 5ISO 4 22°C [deg]	3.76
COV	9.80%

Tabella 10.4: Fase, caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)

Test	Fase caratterizzazione dinamica ad alta frequenza
Condizioni di test	Range prova: 0.1mm P-P, range sweep: 5 ÷ 110Hz fase letta a: 100Hz
Phase _{nom} [deg]	6
Phase _{nom} -15% [deg]	5.1
Phase _{nom} +15% [deg]	6.9
Phase- bielletta 5ISO 1 climi misti [deg]	4.27
Phase- bielletta 5ISO 2 climi misti [deg]	4.23
Phase- bielletta 5ISO 3 climi misti [deg]	3.34
Phase- bielletta 5ISO 4 22°C [deg]	3.91
COV	9.81%

Tabella 10.5: Fase, caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza a nuovo a 22°C (0% ciclo affaticante)

Da questi primi risultati si può notare che:

1. Le fasi ottenute dalle caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza sono tutte fuori dalla banda di tolleranza e sono tutte al di sotto del limite inferiore della banda di tolleranza ($0.85 \text{ phase}_{\text{nom}} < \text{phase} - \text{bielletta } \#n < 1.15 \text{ phase}_{\text{nom}}$). L'unica eccezione è rappresentata dalla fase della bielletta "5ISO 1 climi misti": il suo valore pari a 4.27 deg rientra all'interno della banda di tolleranza, ma è spostata verso il limite inferiore della stessa pari a 4.25 deg.
2. I valori ottenuti a bassa frequenza sono coerenti tra loro, infatti il COV ottenuto è pari al 9.80% e anche visivamente la sovrapposizione delle curve non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi, indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le biellette sono simili.
3. Le fasi ottenute dalle caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza sono tutte fuori dalla banda di tolleranza e sono tutte al di sotto del limite inferiore della banda di tolleranza ($0.85 \text{ phase}_{\text{nom}} < \text{phase} - \text{bielletta } \#n < 1.15 \text{ phase}_{\text{nom}}$).

4. ad alta frequenza visivamente la sovrapposizione delle curve non permette praticamente di distinguere fra loro i vari casi, indice del fatto che le condizioni a nuovo di tutte le biellette sono simili. In realtà andando a valutare la fase a 100Hz si nota come la fase della bielletta "5ISO 3 climi misti" e della "5ISO 4 22°C " presenta un valore più basso rispetto alle altre due; ciò fa sì che il valore del COV aumenti portandosi a 9.81%.

11.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si vuole valutare l'impatto della storia di carico sulla rigidità, sia statica sia dinamica, e sullo smorzamento sottoponendo i provini a climi misti. Le prove in temperatura sono state svolte, come preannunciato nella sezione 3.3, con l'ausilio di una cella climatica e sfruttando il controllo in feedback della termocoppia.

In particolare è stato scelto come ciclo affaticante, per i motivi già descritti nei capitoli precedenti, il ciclo 5-LC isodanno.

Nello specifico, lo svolgimento della campagna di prove è avvenuta come segue:

1. La storia di carico viene applicata un numero di volte tale da ottenere la durata corrispondente al ciclo vita del componente che nel caso in esame è di circa 44 ore.
Tale storia di carico risulta ridotta della metà in termini di durata rispetto al carico integrale applicato in [1] che invece ammonta a 88ore.
2. Simultaneamente al ciclo affaticante precedentemente descritto il componente viene sottoposto ad un ciclo termico in modo da rappresentare uno scenario quanto più reale sul componente in esame con climi freddi, miti e caldi.
3. L'applicazione del carico del ciclo vita viene intervallata da caratterizzazioni statiche e dinamiche condotte a temperatura ambiente, in modo da valutare l'andamento della rigidità e dello smorzamento (fase) ogni 25% della vita del componente (ovvero ogni 25% della fatica accumulata).

Di seguito un riepilogo degli istanti in cui sono state fatte le caratterizzazioni:

- componente nuovo (0%);
- 25%;
- 50%;
- 75%;
- fine vita (100%).

Le percentuali indicate nella lista precedente sono riferite alla durata della vita del componente, esse possono essere quindi interpretate anche come percentuale di affaticamento dello stesso.

Come anticipato al punto 2 ogni 25% della vita il componente subisce, simultaneamente al ciclo affaticante, un ciclo termico.

Il ciclo termico con cui sono state condotte le prove viene descritto di seguito in tabella 11.1.

Temperature ciclo termico	durata	% di avanzamento della prova
0°C	1600 (s)	4.03%
15°C	1600 (s)	8.07%
30°C	1600 (s)	12.10%
50°C	3400 (s)	20.68%
60°C	3400 (s)	29.25%
75°C	3400 (s)	37.83%
85°C	14200 (s)	73.64%
100°C	10427 (s)	100%

Tabella 11.1: ciclo termico

Si sottolinea che a ciascuna prova corrisponde univocamente una bielletta nuova come riportato in Tabella 11.2.

Numero bielletta	Modalità di somministrazione del carico	temperatura
5ISO 1 climi misti	Ciclo da normativa (LC)	ciclo termico
5ISO 2 climi misti	Ciclo da normativa (LC)	ciclo termico
5ISO 3 climi misti	Ciclo da normativa (LC)	ciclo termico

Tabella 11.2: Corrispondenza fra biellette e modalità di somministrazione del carico isodanno e temperatura della prova

11.2 ANALISI DEI RISULTATI SULLA SINGOLA BIELLETTA: CONFRONTO CON I VALORI NOMINALI

In questa sezione si riportano gli andamenti della rigidità, sia statica che dinamica, e dello smorzamento allo scopo di indagare il loro decadimento rispetto alle condizioni nominali nel corso del ciclo vita dovuto al percorso LC isodanno con climi misti. Nello specifico la modalità di confronto dei risultati è quella sulla singola bielletta: ovvero considerando una stessa modalità di somministrazione del carico, si confronta la rigidità e la fase ai diversi istanti di vita (ogni 25% del ciclo di vita) con la rigidità nominale.

11.2.1 Rigidità statica

I procedimenti riportati in questo paragrafo sono del tutto analoghi a quelli illustrati nel capitolo 6, relativo alle prove di fatica a temperatura ambiente. Quindi si considerano gli scostamenti fra i valori nominali e quelli dei dati sperimentali, e la dispersione di questi ultimi, monitorata tramite il COV. In Figura 11.1 sono presentati i risultati grafici di quanto appena descritto. Ciascun grafico riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidità in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto e la rispettiva banda di tolleranza che secondo normativa deve essere pari a $\pm 15\%$ del valore nominale indicato da progetto.

Ne segue che, affinché la rigidità sia ancora accettabile secondo progetto, si dovrebbe ottenere che tutti i valori ricavati sperimentalmente, a ciascuna percentuale di vita della bielletta, siano compresi entro la sopraddetta banda di tolleranza.

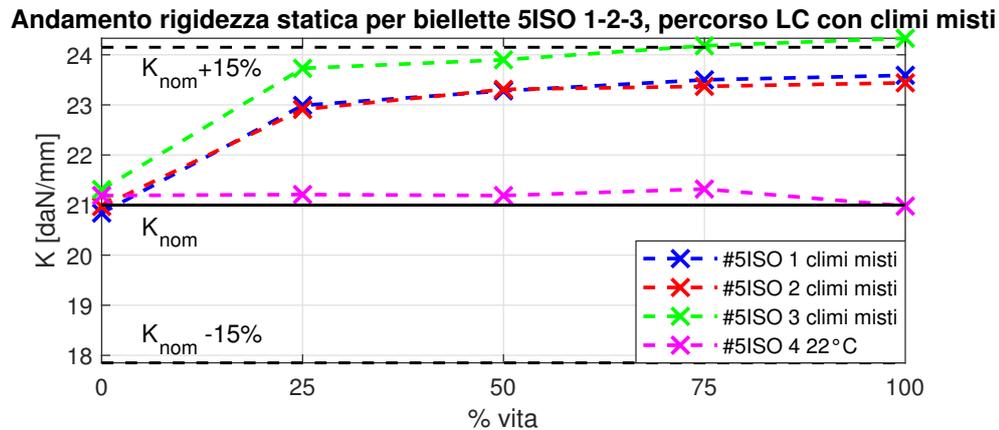


Figura 11.1: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidità statiche alle diverse percentuali di vita

In Tabella 11.3 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidità che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidità statica con climi misti carico isodanno [daN/mm]					
		bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	COV [%] totale	COV [%] 5ISO 1-2-3 climi misti
$21 \pm 15\%$	0%	20.84	20.97	21.31	21.19	1.00%	1.15%
	25%	22.99	22.91	23.73	21.21	4.79%	1.94%
	50%	23.28	23.31	23.90	21.19	5.18%	1.48%
	75%	23.50	23.37	24.18	21.32	5.34%	1.83%
	100%	23.59	23.44	24.33	20.98	6.30%	2.00%

Tabella 11.3: Riepilogo risultati rigidità statica con climi misti e con carico isodanno - Valori assoluti

Dall'analisi sperimentale è emerso che:

- per ciascuno dei 4 provini, tutte le rigidità rilevate allo 0% del ciclo affaticante rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto. I rilievi effettuati al termine del ciclo vita dei componenti mostrano come solo la rigidità della bielletta "5ISO 3 climi misti" non rientra all'interno della banda ammissibile; in particolare essa supera il limite superiore del range ammissibile.
- se si guarda l'andamento delle curve delle sole biellette che hanno subito sia ciclo affaticante sia ciclo termico, si nota che le curve non solo indicano un irrigidimento progressivo con la fatica ma sono anche ben sovrapposte: il campione, anche se piccolo in quanto formato solo da 3 componenti, si è mostrato sufficiente per mostrare la ripetibilità del fenomeno. A conferma di ciò, il valore del COV (ultima colonna) che è sempre inferiore al 2% per ogni percentuale di avanzamento della fatica.

- la bielletta che invece esegue il ciclo affaticante a temperatura costante pari a 22°C non registra alcuna variazione significativa della rigidezza rispetto a quella registrata a nuovo. Per questo motivo, è giusto aspettarsi che il COV riferito al campione intero delle quattro biellette aumenti rispetto al caso precedente.
- dunque è possibile confermare quanto detto nel capitolo 8, ovvero che dal punto di vista statico il comportamento del gommato di nostro interesse, qualora esposto ad un ciclo di fatica e ad un ciclo termico, può essere assimilato a quello degli elastomeri termoindurenti.

11.2.2 Rigidezza dinamica a bassa frequenza

In questa sezione si riportano i risultati relativi alle rigidezze dinamiche a bassa frequenza, i cui valori vengono estratti dallo sweep in frequenza considerando come valore di lettura la rigidezza ottenuta a 25 Hz.

In Figura 11.2 sono rappresentati i risultati in forma grafica; si riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la rigidezza in valore assoluto; inoltre sono esplicitate la K_{nom} di progetto, e la banda di tolleranza.

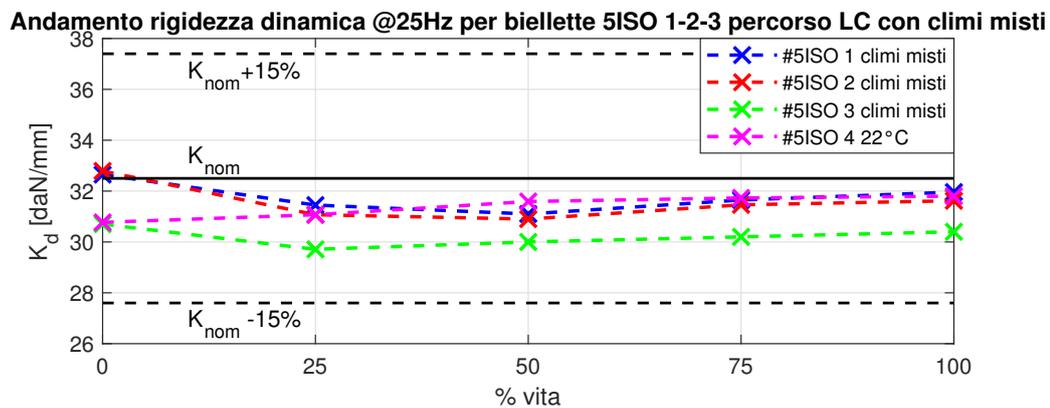


Figura 11.2: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

In Tabella 11.4 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidezze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza dinamica @25Hz con climi misti carico isodanno [daN/mm]						
		bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	COV [%] totale	COV [%] 5ISO 1-2-3 climi misti	COV [%] 5ISO 1-2 climi misti
32.5±15%	0%	32.65	32.79	30.70	30.77	3.62%	3.64%	0.30%
	25%	31.45	31.07	29.71	31.07	2.48%	2.99%	0.85%
	50%	31.10	30.90	30.00	31.59	2.15%	1.91%	0.45%
	75%	31.65	31.46	30.20	31.77	2.32%	2.53%	0.42%
	100%	31.96	31.62	30.40	31.80	2.26%	2.62%	0.75%

Tabella 11.4: Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza climi misti e carico isodanno - Valori assoluti

Dall'analisi sperimentale è emerso che:

- per ciascuno dei 4 provini, tutte le rigidzze rilevate rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto.
- sebbene vi sia un offset tra le bielle "5ISO 1 climi misti", "5ISO 2 climi misti" e la biella "5ISO 3 climi misti", le tre bielle hanno andamento simile.
- questo andamento prevede un crollo della rigidzza al 25% per poi recuperare durante il 75% rimanente per la biella "5ISO 3 climi misti". Si ha invece un crollo della rigidzza fino al 50% per poi recuperare durante il 50% rimanente per le bielle "5ISO 1 climi misti" e "5ISO 2 climi misti". Tutte e tre le bielle mostrano un primo calo seguito da un recupero. Il recupero non è tale da ripristinare le condizioni iniziali.
- quanto detto al punto precedente permette di asserire che il comportamento è complessivamente termoplastico e che le prove con ciclo termico sono ripetibili.
- la biella "5ISO 4 22°C" ha andamento diverso dalle altre tre. L'andamento della rigidzza ha infatti un trend crescente alle diverse percentuali di vita del componente.
- tuttavia non si registra, a differenza del caso statico, un divario netto tra le bielle che subiscono ciclo termico e la biella a 22°C. Questo fa sì che al 100% della fatica le rigidzze dinamiche delle quattro bielle possano essere molto vicine tra loro, e questo è tanto più vero quanto più sono simili le condizioni iniziali (bielle a nuovo).

11.2.3 Rigidezza dinamica ad alta frequenza

In questa sezione si riportano i risultati relativi alle rigidzze dinamiche ad alta frequenza, i cui valori vengono estratti dallo sweep in frequenza considerando come valore di lettura la rigidzza ottenuta a 100 Hz. In Figura 11.3 sono rappresentati i risultati in forma grafica.

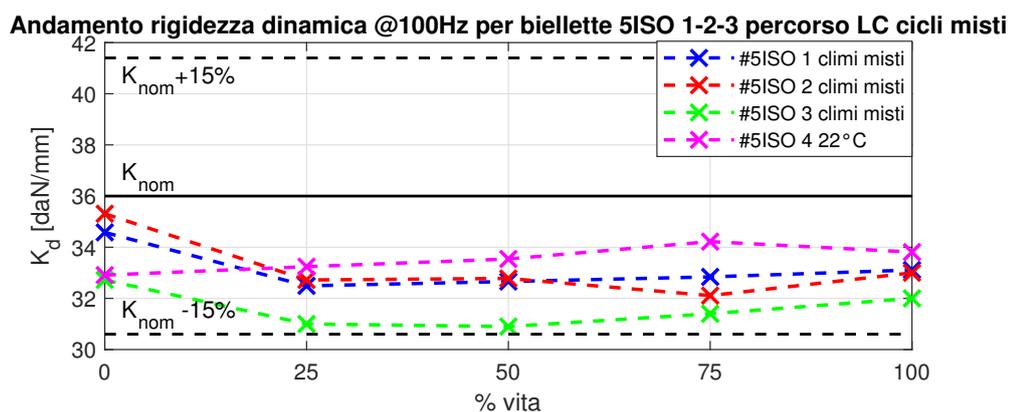


Figura 11.3: Confronto bielle 5ISO 1-2-3 climi misti: rigidzze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

In Tabella 11.5 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti; mantenendo la stessa chiave di lettura dei capitoli precedenti sono evidenziati in rosso i valori delle rigidzze che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

$K_{nom} \pm 15\%$ [daN/mm]	%vita componente	Rigidezza dinamica @100Hz con climi misti carico isodanno [daN/mm]						
		bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	COV [%] totale	COV [%] 5ISO 1-2-3 climi misti	COV [%] 5ISO 1-2 climi misti
36±15%	0%	34.58	35.31	32.72	32.91	3.74%	3.90%	1.47%
	25%	32.49	32.72	31.00	33.24	2.97%	2.91%	0.49%
	50%	32.66	32.78	30.90	33.54	3.44%	3.27%	0.26%
	75%	32.84	32.11	31.40	34.22	3.69%	2.24%	1.59%
	100%	33.11	33.00	32.00	33.81	2.25%	1.87%	0.24%

Tabella 11.5: *Riepilogo risultati rigidezza dinamica ad alta frequenza con climi misti e carico isodanno - Valori assoluti*

I risultati ottenuti e le considerazioni finali relative alle rigidezze dinamiche ad alta frequenza sono del tutto simili, dal punto di vista concettuale, a quelle delle rigidezze dinamiche a bassa frequenza. Infatti dai risultati emerge che:

- per ciascuno dei 4 provini, tutte le rigidezze rilevate ad ogni percentuale del ciclo affaticante rientrano all'interno della banda di tolleranza definita a progetto. I rilievi effettuati mostrano come tutti i valori siano locati nel range di tolleranza nominale.
- anche nel caso della caratterizzazione dinamica ad alta frequenza vi è un offset tra le biellette "5ISO 1 climi misti", "5ISO 2 climi misti" e la bielletta "5ISO 3 climi misti"; tale offset però nel caso di caratterizzazione dinamica ad alta frequenza risulta ancora più evidente del caso della caratterizzazione dinamica a bassa frequenza. Nonostante l'offset iniziale, le tre biellette presentano andamento simile.
- l'andamento vede un crollo della rigidezza al 25% per poi recuperare durante il 75% rimanente per la bielletta "5ISO 1 climi misti", un crollo fino al 50% per poi recuperare durante il rimanente 50% della vita per la bielletta "5ISO 3 climi misti", un primo crollo al 25%, un recupero trascurabile al 50%, un secondo crollo fino al 75% e un recupero nell'ultimo quarto di vita per la bielletta "5ISO 2 climi misti". Il recupero non è tale da ripristinare le condizioni iniziali per tutte e tre le biellette: i valori di rigidezza finali sono infatti più bassi rispetto ai valori di rigidezza a nuovo. Il decadimento rispetto alle condizioni a nuovo è maggiore nella caratterizzazione dinamica ad alta frequenza rispetto alla caratterizzazione dinamica a bassa frequenza.
- quanto detto al punto precedente permette di asserire che il comportamento è termoplastico e che le prove con ciclo termico sono complessivamente ripetibili, esse vedono un primo crollo della rigidezza seguito da un recupero della stessa.
- la bielletta "5ISO 4 22°C" ha andamento diverso dalle altre tre. L'andamento della rigidezza ha infatti un trend crescente fino al 75% della vita del componente per poi decadere nell'ultimo quarto di vita.
- tuttavia al 100% della vita non si registra, a differenza del caso statico, un gap netto tra le biellette che subiscono ciclo termico e la bielletta a 22°C. Questo fa sì che al 100% della fatica le rigidezze dinamiche delle quattro biellette sono simili tra loro, e questo è tanto più verificato quanto più vicine sono le condizioni iniziali (bielletta a nuovo).

11.2.4 Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica a bassa frequenza)

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi alle fase a bassa frequenza.

Nella Figura 11.4 sono presentati i risultati grafici; si riporta in ascissa la percentuale di fatica della bielletta ed in ordinata la fase in valore assoluto; inoltre è esplicitata la $Phase_{nom}$ di progetto, e la banda di tolleranza.

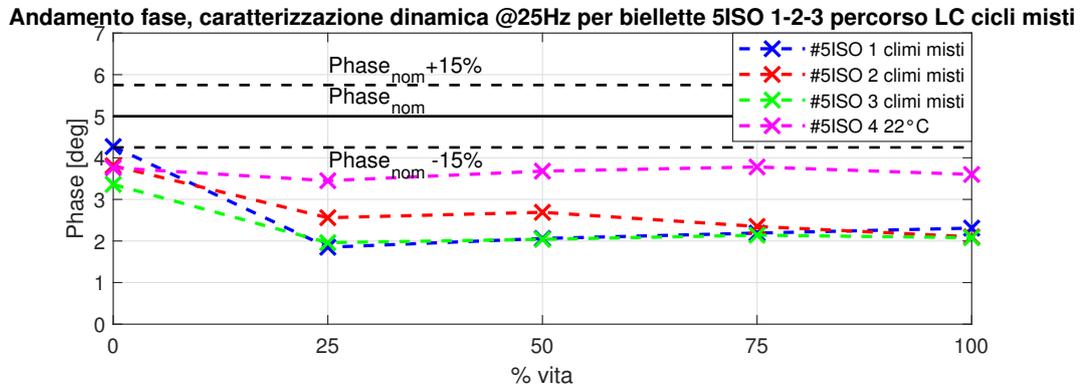


Figura 11.4: Confronto bielletta 5ISO 1-2-3 climi misti: fase (bassa frequenza) alle diverse percentuali di vita

Nella Tabella 11.6 sono raccolti in maniera più compatta i risultati ottenuti. Sono evidenziati in rosso i valori delle fasi che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

Phase _{nom} ±15% [daN/mm]	%vita componente	Fase caratterizzazione dinamica @25Hz con climi misti carico isodanno [daN/mm]					
		bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	COV [%] totale	COV [%] 5ISO 1-2-3 climi misti
5±15%	0%	4.27	3.81	3.36	3.76	9.80%	11.93%
	25%	1.85	2.56	1.96	3.45	29.85%	17.99%
	50%	2.06	2.69	2.04	3.68	29.41%	16.33%
	75%	2.19	2.35	2.14	3.78	29.89%	4.93%
	100%	2.31	2.10	2.08	3.60	28.77%	5.85%

Tabella 11.6: Riepilogo risultati fase, @ 25 Hz climi misti e carico isodanno- Valori assoluti

Dai risultati ottenuti è emerso che:

- per ciascuna bielletta la fase esce dalla banda di tolleranza: questo vuol dire che la fase è molto sensibile alla fatica e alla temperatura, e lo è a maggior ragione se già le condizioni iniziali escono dal range di tolleranza.
- le tre bielletta che hanno subito ciclo termico hanno curve che seguono stesso andamento. La fase si riduce nel primo quarto di vita per poi rimanere pressoché costante nel restante 75% di vita del componente. Al 100% della vita si nota un forte gap rispetto alle condizioni a nuovo del componente, ma tutte le fasi delle diverse bielletta si sovrappongono: allo 0% del ciclo vita il valore del COV delle bielletta a cui è stato somministrato sia il ciclo termico che il ciclo affaticante risulta pari a 11.93%, a fine vita il valore del COV scende a 5.85%. Ciò significa che a fine vita del componente i valori della fase hanno bassa dispersione e tendono a convergere.

- la bielletta che invece esegue il ciclo affaticante sempre alla temperatura di 22°C non registra alcuna variazione significativa della fase rispetto a quella registrata a nuovo. Per tale ragione il COV riferito al campione intero delle quattro biellette aumenta rispetto al considerare le sole tre biellette che subiscono ciclo termico.

11.2.5 Smorzamento - Fase (caratterizzazione dinamica ad alta frequenza)

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi alle fase ad alta frequenza derivanti dall'applicazione di un carico isodanno combinato ad un ciclo termico.

Nella Figura 11.5 sono presentati i risultati grafici.

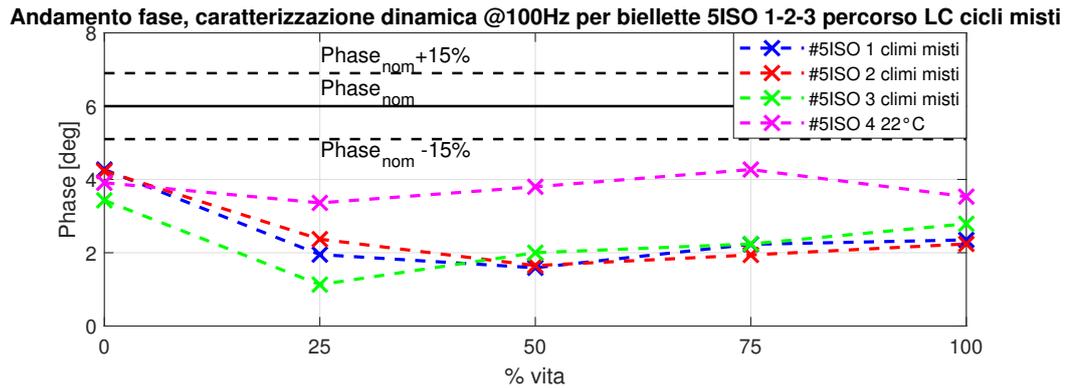


Figura 11.5: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: fase (alta frequenza) alle diverse percentuali di vita

Nella Tabella 11.7 si riportano i risultati ottenuti dall'applicazione del carico isodanno. Sono evidenziati in rosso i valori delle fasi che non ricadono nella banda di ammissibilità secondo normativa.

Phase _{nom} ±15% [daN/mm]	%vita componente	Fase caratterizzazione dinamica @100Hz con climi misti carico isodanno [daN/mm]					
		bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	COV [%] totale	COV [%] 5ISO 1-2-3 climi misti
6±15%	0%	4.27	4.23	3.43	3.91	9.80%	11.91%
	25%	1.95	2.37	1.13	3.36	42.12%	34.71%
	50%	2.59	1.65	2.00	3.80	37.58%	12.68%
	75%	2.23	1.94	2.24	4.27	40.28%	7.97%
	100%	2.35	2.24	2.79	3.53	21.46%	11.83%

Tabella 11.7: Riepilogo risultati fase, @ 100 Hz con climi misti e carico isodanno- Valori assoluti

I risultati ottenuti e le considerazioni finali relative alle fasi dinamiche ad alta frequenza sono del tutto simili, dal punto di vista concettuale, a quelle delle fasi dinamiche a bassa frequenza. Infatti dai risultati emerge che:

- per ciascuno dei 4 provini, tutte le fasi rilevate ad ogni percentuale del ciclo affaticante cadono all'esterno della banda di tolleranza definita a progetto.

In particolare tutti i valori sono locati al di sotto del limite inferiore della banda di tolleranza, ciò dimostra quanto già detto per la dinamica a bassa frequenza, vale a dire che la fase è molto sensibile alla fatica e alla temperatura.

- le tre biellette che hanno subito ciclo termico seguono il seguente andamento: la fase si riduce nel primo quarto di vita per tutte e tre le biellette. Successivamente continua a ridursi fino al 50% della vita per le biellette "5ISO 1 climi misti" e "5ISO 2 climi misti", mentre per la bielletta "5ISO 3 climi misti" si assiste ad un incremento della fase. Dopo il 50% della vita gli andamenti si riallineano e in particolare si assiste ad una crescita della fase fino al 100% della vita per tutte e tre le biellette. A fine vita i valori si sovrappongono, ma vi è comunque un gap rispetto alle condizioni a nuovo delle biellette.
- infatti allo 0% del ciclo vita il valore del COV delle biellette a cui è stato somministrato sia il ciclo termico che il ciclo affaticante risulta pari a 11.91%. A fine vita ad un valore pari a 11.83%. Ciò significa che a fine vita del componente i valori della fase hanno bassa dispersione e tendono a convergere.
- la bielletta che invece esegue il ciclo affaticante sempre alla temperatura di 22°C non esplica nessuna variazione significativa della fase rispetto a quella registrata a nuovo. Per tale ragione il COV riferito al campione intero delle quattro biellette aumenta rispetto al considerare le sole tre biellette che subiscono ciclo termico.

11.3 ANALISI DEI RISULTATI SU TUTTE LE BIELLETTE: CONFRONTO CON I VALORI A NUOVO

In questa sezione il confronto dei risultati è stato fatto per mezzo di rapporti adimensionali di rigidezza così da uniformare i risultati delle diverse biellette.

Infatti l'obiettivo, in questo caso, è quello di poter effettuare un confronto incrociato fra esse che sia indipendente dal valore assoluto della rigidezza a nuovo di ciascuna bielletta.

I rapporti adimensionali in termini percentuali tenuti in considerazione sono stati ricavati rapportando il valore "attuale" di rigidezza con quello di rigidezza a nuovo, come segue:

$$\text{Variazione \%} = \frac{K_{\text{attuale}}}{K_{0\%}} \cdot 100$$

Si ribadisce che questa operazione è necessaria per poter normalizzare i dati sperimentali e fare un confronto incrociato fra biellette differenti, ciò è dovuto al fatto che non vi è nessuna garanzia che le rigidezze a nuovo di ciascun componente siano esattamente uguali fra loro, in quanto i processi produttivi possono indurre delle oscillazioni del valore della rigidezza nominale, anche considerevoli ai fini del confronto che si vuole effettuare in questo lavoro.

Quanto descritto si ripete anche per la fase al fine di valutare come si modifica la capacità di smorzamento del materiale.

11.3.1 Rigidezza statica

Di seguito nella Figura 11.6 si riportano le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

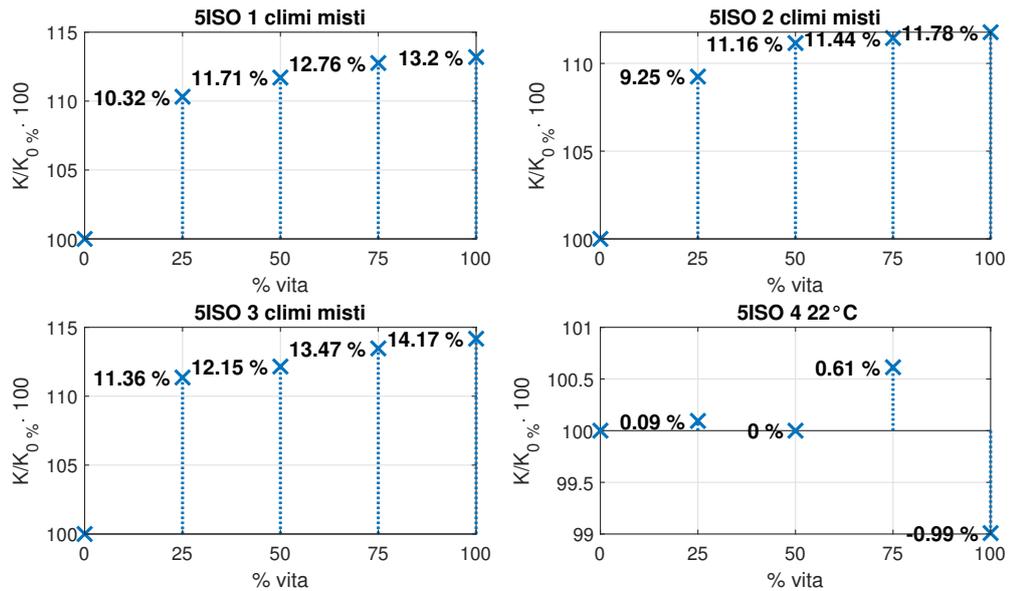


Figura 11.6: Confronto bielle 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidità statica rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Rigidità statica climi misti con carico isodanno LC					
	bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	MEDIA TOTALE	MEDIA bielle 5ISO 1-3
0%	-	-	-	-	-	-
25%	+10.32%	+9.25%	+11.36%	+0.09%	7.75%	10.31%
50%	+11.71%	+11.16%	+12.15%	0%	8.75%	11.67%
75%	+12.76%	+11.44%	+13.47%	+0.61%	9.57%	12.56%
100%	+13.2%	+11.78%	+14.17%	-0.99%	9.53%	13.04%

Tabella 11.8: Riepilogo risultati rigidità statica, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti è emerso che:

- è possibile generalizzare l'andamento della rigidità statica per le tre bielle che hanno subito ciclo termico. Si manifesta per tutte e tre le bielle un brusco irrigidimento del componente al 25% della vita, nel restante 75% della vita la rigidità cresce lentamente. Inoltre il valore di irrigidimento percentuale al 100% è circa lo stesso per tutte le bielle. Dunque non solo ricalcano lo stesso andamento ma anche gli stessi valori numerici percentuali, questo rende il fenomeno ripetibile.
- l'andamento della rigidità per la biella sottoposta a temperatura ambiente è pressochè costante: a seguito del primo quarto di fatica raggiunta dal componente, per la biella affaticata a temperatura ambiente, si registra un incremento della rigidità pari al +0.09%. Al 50% della vita si assiste ad un rilassamento della rigidità che torna esattamente al valore iniziale, per poi irrigidirsi nuovamente al 75% con una variazione percentuale pari allo +0.61%. A fine vita si assiste ad un crollo di rigidità con un decadimento percentuale pari a -0.99%.
- mentre la rigidità statica aumenta per i componenti sottoposti a ciclo affaticante e ciclo termico, per la prova condotta a temperatura ambiente il decadimento è talmente ridotto che lo si può ritenere trascurabile.

11.3.2 Rigidezza dinamica a bassa frequenza

Di seguito nella Figura 11.7 si riportano le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

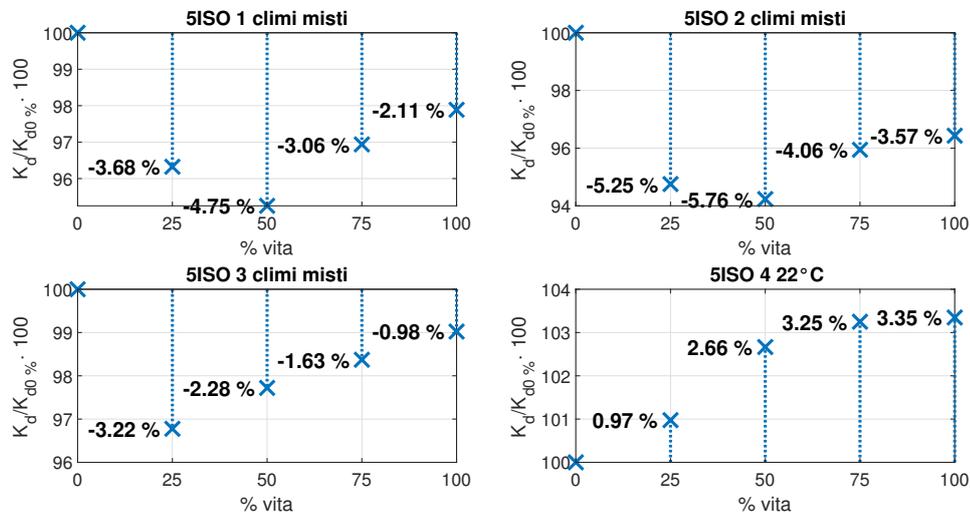


Figura 11.7: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidezza dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Rigidezza dinamica @25Hz climi misti con carico isodanno LC					
	bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	MEDIA TOTALE	MEDIA biellette climi misti
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-3.68%	-5.25%	-3.22%	+0.97%	-2.79%	-4.05%
50%	-4.75%	-5.76%	-2.28%	+2.66%	-2.53%	-4.26%
75%	-3.06%	-4.06%	-1.63%	+3.25%	-1.37%	-2.92%
100%	-2.11%	-3.57%	-0.98%	+3.35%	-0.81%	-2.2%

Tabella 11.9: Riepilogo risultati rigidezza dinamica a bassa frequenza, carico isodanno LC climi misti-Variazione percentuale

Dai dati sperimentali ottenuti è emerso che:

- L'andamento della rigidezza dinamica a bassa frequenza per le tre biellette che hanno subito ciclo termico risulta il seguente: si manifesta per tutte e tre le biellette un primo brusco decadimento medio della rigidezza del componente pari a -4.05%, la rigidezza poi continua a decadere fino al 50% per le biellette "5ISO 1 climi misti" e "5ISO 2 climi misti" per poi avere un recupero nel 50% rimanente della vita, per la bielletta "5ISO 3 climi misti" si assiste ad un recupero a partire dal 50% della vita.

A termine vita globalmente si assiste ad un decadimento della rigidezza per tutte e tre le biellette.

- i valori del decadimento percentuale a fine vita rispetto alle condizioni a nuovo non sono gli stessi, sicuramente il fenomeno non è stabile da questo punto di vista, ma l'andamento è lo stesso per le tre biellette, crolla e successivamente recupera ma senza ripristinare le condizioni iniziali.

- la bielletta affaticata a temperatura ambiente assume andamento differente: a seguito del primo quarto di fatica raggiunta dal componente si registra un incremento della rigidità pari al +0.97%. Al 50% e al 75% della vita si assiste ancora ad un irrigidimento pari rispettivamente a 2.66% e +3.25%. A fine vita si assiste all'irrigidimento massimo pari a +3.35%.
- sebbene la rigidità dinamica temperatura ambiente abbia trend crescente e le tre biellette sottoposte a cicli misti esplichino dapprima un andamento decrescente e poi crescente, i valori numerici a fine vita coincidono.

11.3.3 Rigidità dinamica ad alta frequenza

Di seguito nella Figura 11.8 si riportano le variazioni percentuali ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

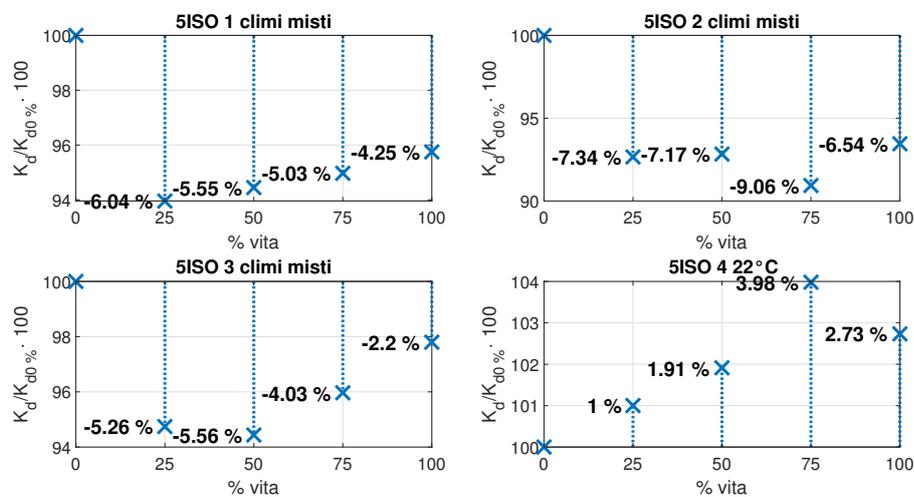


Figura 11.8: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della rigidità dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Rigidità dinamica @100Hz climi misti con carico isodanno LC					
	bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	MEDIA TOTALE	MEDIA biellette climi misti
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-6.04%	-7.34%	-5.26%	+1.00%	-4.41%	-6.21%
50%	-5.55%	-7.17%	-5.56%	+1.91%	-4.09%	-6.09%
75%	-5.03%	-9.06%	-4.03%	+3.98%	-3.53%	-6.04%
100%	-4.25%	-6.54%	-2.2%	+2.73%	-2.56%	-4.33%

Tabella 11.10: Riepilogo risultati rigidità dinamica ad alta frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale

I dati sperimentali ottenuti per le rigidità ad alta frequenza sostengono quando detto per le rigidità a bassa frequenza. In particolare è emerso che:

- l'andamento delle biellette sottoposte a climi misti vede: un crollo della rigidità al 25% per poi recuperare durante il 75% rimanente per la bielletta "5ISO 1 climi misti", un crollo brusco fino al 25% e un crollo graduale fino al 75% per la bielletta "5ISO 2 climi misti" seguiti da un recupero nell'ultimo quarto di vita,

un crollo fino al 50% e un recupero nella seconda metà della vita per la bielletta "5ISO 3 climi misti". Il recupero non è tale da ripristinare le condizioni iniziali: i valori di rigidità finali sono infatti più bassi rispetto ai valori di rigidità a nuovo. Il decadimento rispetto alle condizioni a nuovo è maggiore nella caratterizzazione dinamica ad alta frequenza rispetto alla caratterizzazione dinamica a bassa frequenza: il decadimento medio percentuale per l'alta frequenza risulta pari a -4.33%, mentre per la dinamica a bassa frequenza risulta pari a -2.2%.

- quanto detto al punto precedente permette di asserire che il comportamento è termoplastico e che le prove con ciclo termico pur non avendo gli stessi valori numerici, hanno stesso andamento, vi è un primo crollo seguito da un recupero, per cui sono complessivamente ripetibili.
- trend opposto si ha invece per la bielletta sottoposta a temperatura ambiente, a seguito del primo quarto di fatica raggiunta dal componente si registra un incremento della rigidità pari all'+1%. Al 50% e al 75% della vita si assiste ancora ad un irrigidimento pari rispettivamente a 1.91% e +3.98%, quest'ultimo è il valore minimo dell'andamento. A fine vita si assiste ad un rilassamento e il decadimento diviene pari a +2.73%.
- sebbene la rigidità dinamica a temperatura ambiente abbia trend crescente e le tre biellette sottoposte a cicli misti esplichino dapprima un andamento decrescente e poi crescente, i valori numerici relativi alla rigidità in termini assoluti a fine vita coincidono.

11.3.4 Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica a bassa frequenza

Di seguito nella Figura 11.9 si riportano le variazioni percentuali della fase ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

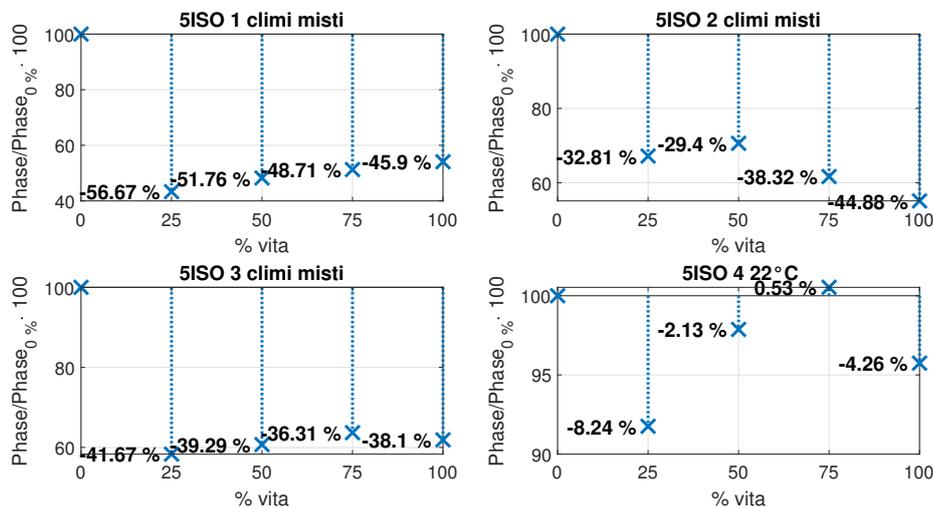


Figura 11.9: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della fase, caratterizzazione dinamica a bassa frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione % Fase, @25Hz climi misti con carico isodanno LC					
	bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	MEDIA TOTALE	MEDIA biellette climi misti
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-56.67%	-32.81%	-41.67%	-8.24%	-34.85%	-43.72%
50%	-51.76%	-29.4%	-39.29%	-2.13%	-30.65%	-40.15%
75%	-48.71%	-38.32%	-36.31%	+0.53%	-30.70%	-41.11%
100%	-45.9%	-44.88%	-38.1%	-4.26%	-33.28%	-42.96%

Tabella 11.11: Riepilogo risultati fase, caratterizzazione dinamica a bassa frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale

Dai dati sperimentali emerge che:

- gli andamenti percentuali relativi alla fase non consentono di generalizzare l'andamento della fase dinamica a bassa frequenza per le tre biellette che hanno subito ciclo termico. Si manifesta per tutte e tre le biellette una prima brusca riduzione della fase, tra il 25% e il 50%, dal 75% della vita in poi l'andamento diverge per le tre. A termine vita globalmente si assiste ad una riduzione brusca per tutte e tre le biellette con valore medio percentuale pari a -42.96%.
- La prova condotte a temperatura ambiente e le prove condotte sottoponendo i provini a ciclo termico hanno andamenti differenti, la prima a fine vita vede una variazione poco significativa della fase (-4.26%), le altre tre biellette presentano invece un gap significativo della fase rispetto al suo valore a nuovo (-42.96%).

11.3.5 Smorzamento (fase), caratterizzazione dinamica ad alta frequenza

Di seguito nella Figura 11.10 si riportano le variazioni percentuali della fase ottenute per ciascuna delle biellette rispetto alla condizione di bielletta nuova.

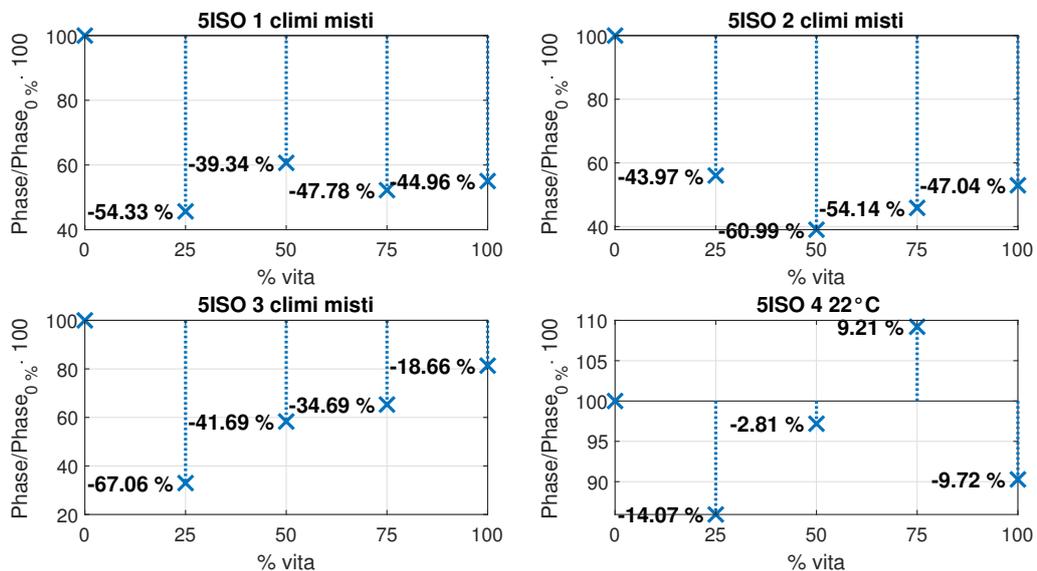


Figura 11.10: Confronto biellette 5ISO 1-2-3 climi misti: variazione percentuale della fase, caratterizzazione dinamica ad alta frequenza rispetto al valore a nuovo

%vita componente	Variazione %					
	Fase, @100Hz climi misti con carico isodanno LC					
	bielletta 5ISO 1 climi misti	bielletta 5ISO 2 climi misti	bielletta 5ISO 3 climi misti	bielletta 5ISO 4 22°C	MEDIA TOTALE	MEDIA biellette climi misti
0%	-	-	-	-	-	-
25%	-54.33%	-43.97%	-67.06%	-14.07%	-44.86%	-55.12%
50%	-39.34%	-60.99%	-41.69%	-2.81%	-36.21%	-47.34%
75%	-47.78%	-54.14%	-34.69%	+9.21%	-31.85%	-45.54%
100%	-44.96%	-47.04%	-18.66%	-9.72%	-30.1%	-36.89%

Tabella 11.12: *Riepilogo risultati fase, caratterizzazione dinamica ad alta frequenza, carico isodanno LC climi misti- Variazione percentuale*

Dai dati sperimentali emerge che:

- gli andamenti percentuali relativi alla fase non consentono di generalizzare l'andamento della rigidità dinamica ad alta frequenza per le tre biellette che hanno subito ciclo termico.

Si manifesta per tutte e tre le biellette una prima brusca riduzione della fase, ma tra il 50% e il 75% della vita l'andamento diverge per le tre:

- la bielletta "5ISO 1 climi misti" vede un incremento di fase fino al 50%, una successiva riduzione lieve fino al 75% seguita nuovamente da un incremento lieve fino al 100%;
- la bielletta "5ISO 2 climi misti" vede ancora una riduzione di fase fino al 50% in cui raggiunge il suo minimo, un successivo incremento nella seconda metà della vita del componente;
- la bielletta "5ISO 3 climi misti" vede un recupero di fase nel restante 75% della vita.

A termine vita globalmente, rispetto alla condizione a nuovo, si assiste ad una riduzione di fase per le biellette "5ISO 1 climi misti" e "5ISO 2 climi misti"; per la bielletta "5ISO 3 climi misti" la riduzione di fase a fine vita risulta più prossima al valore di riduzione di fase che si ha a temperatura ambiente nonostante la differenza di temperatura tra le due prove. Tale comportamento può essere spunto per un'indagine futura.

11.4 IL DANNEGGIAMENTO COME FUNZIONE DI STATO

In questa sezione sono stati utilizzati i risultati relativi alle variazioni percentuali viste nel paragrafo 11.3 con l'obiettivo di individuare un effetto della fatica analogo ad una funzione di stato.

Si è pensato di fare un confronto monte-valle dei decadimenti ottenuti con tutte le prove affaticanti: così come nella funzione di stato si guarda solo agli estremi di una qualsivoglia trasformazione, allo stesso modo in questa analisi si vuole ignorare tutto ciò che è compreso fra inizio e fine vita del componente e considerare solamente gli stati estremi appena menzionati.

Quanto detto verrà analizzato in primo luogo per la rigidità e poi verrà ripetuto anche per lo smorzamento.

11.4.1 Confronti fra le rigidzze statiche e dinamiche

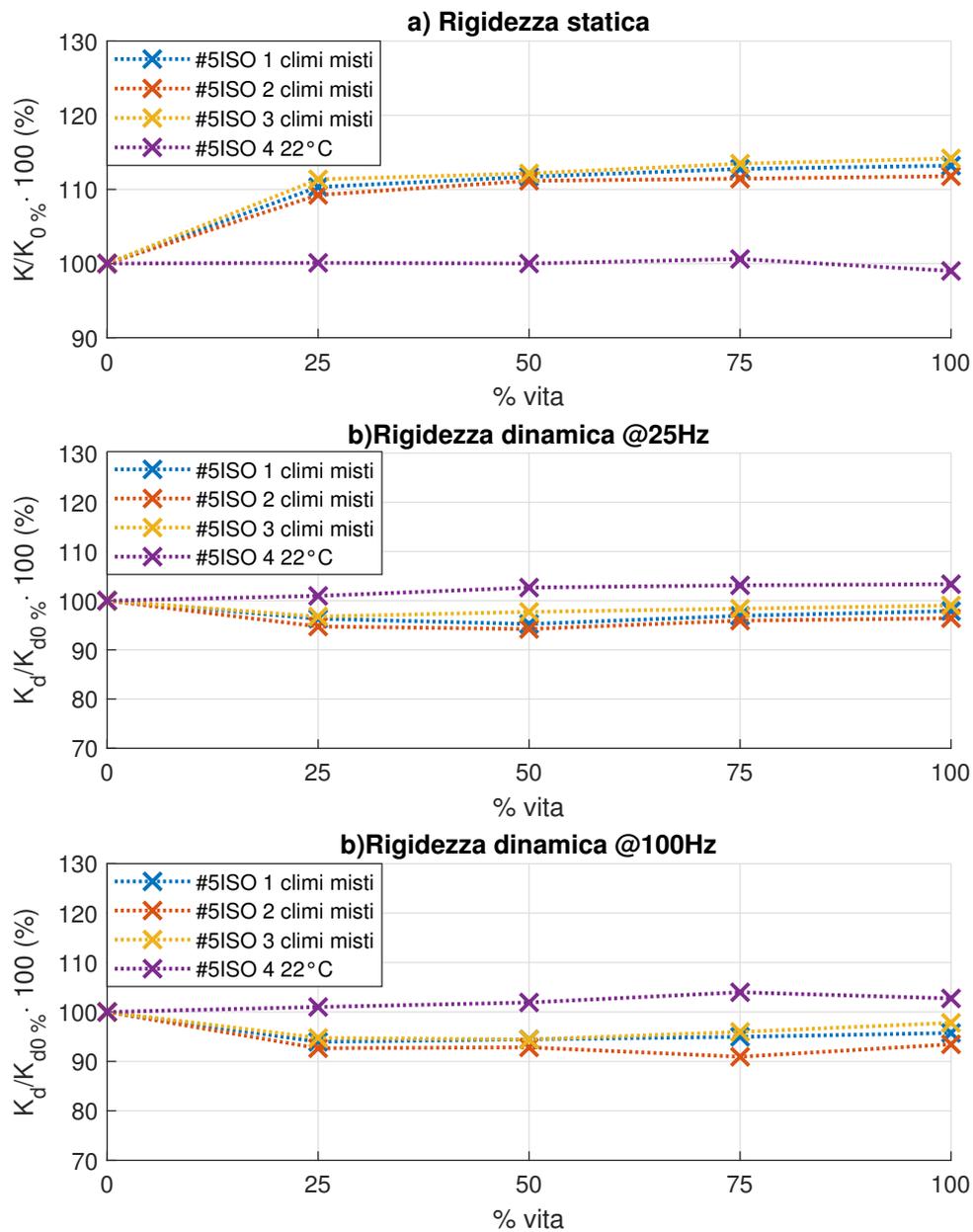


Figura 11.11: Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidzza climi misti e carico isodanno LC

Da un esame approfondito degli andamenti ottenuti in Figura 11.11, ponendo l'attenzione sui valori delle variazioni in corrispondenza allo stato finale (ovvero al 100% della vita), si nota come ci sia una progressivo raggruppamento dei valori sperimentali ottenuti nell'intorno di un valore finale comune.

Quanto detto accade sia in campo statico che in campo dinamico:

- in campo statico le tre biellette sottoposte a ciclo termico vedono un incremento del 10% rispetto al valore iniziale posto pari a 100%. I tre campioni sono dunque caratterizzati da ripetibilità. Osservando il grafico si vede come la ripetibilità dei valori di rigidezza non è garantita solo al 100% della vita del componente ma anche alle altre percentuali.
- in campo dinamico le tre biellette sottoposte a ciclo termico presentano in termini assoluti un offset iniziale. Tale offset viene oscurato facendo sì che le prove partano tutte dal 100%. A fine vita si nota come i valori ricadono tutti tra il 90% e il 100% e sono tutti shiftati al di sotto della prova a temperatura ambiente. La ripetibilità delle prove con ciclo termico è dunque garantita anche in tal caso.

La Figura 11.11 consente inoltre di mettere in risalto come:

- in campo statico, sottoponendo le biellette a ciclo termico, la rigidezza aumenta globalmente del 10%. Ciò diverge da quanto accade per la bielletta sottoposta a ciclo affaticante a temperatura ambiente che invece vede un leggero decadimento della rigidezza, essa rimane sempre locata attorno al 100%.
- le rigidzze dinamiche seguono un trend diametralmente opposto a quanto accade in statica: le rigidzze diminuiscono. Il gap rispetto alla prova a temperatura ambiente è più evidente per la statica.
- a temperatura ambiente sia statica che dinamica non evidenziano una variazione significativa in termini percentuali.

11.4.2 Confronti fra smorzamento a bassa e ad alta frequenza

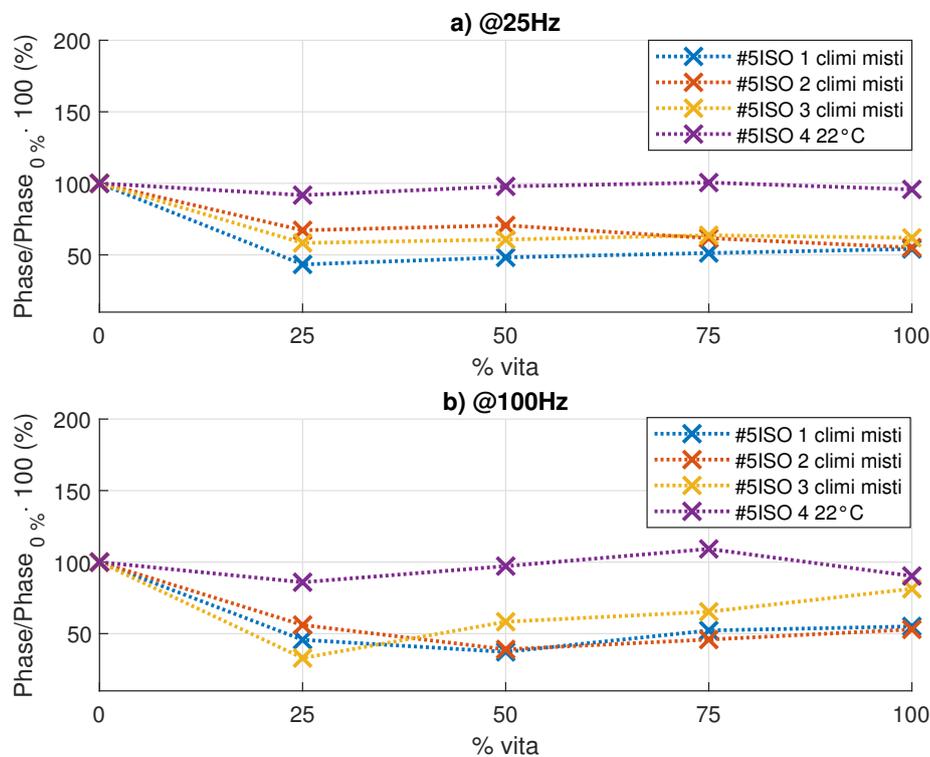


Figura 11.12: Confronto globale delle variazioni percentuali della fase carico isodanno con climi misti

Per quanto concerne la fase relativa alla caratterizzazione dinamica a bassa frequenza si nota un progressivo raggruppamento dei valori sperimentali ottenuti nell'intorno di -50% sintomo del fatto che i valori sono ripetibili, gli andamenti della fase siano perfettamente sovrapponibili tra le tre bielle.

Ad alta frequenza solo due delle bielle sono ripetibili, la biella "5ISO 3 climi misti" diverge avvicinandosi maggiormente ai valori relativi alla prova a temperatura ambiente. Alla luce del fatto che la ripetibilità non è garantita per tutte le bielle è possibile asserire che è bene ampliare il campione.

Si mette inoltre in risalto come le prove a temperatura ambiente non evidenziano una variazione significativa in termini percentuali tra monte e valle della prova.

11.5 CONFRONTO TRA PROVA A 100°C ,22°C E CLIMI MISTI

Tale paragrafo si prefigge di effettuare un confronto tra prove condotte con la stessa modalità di carico ovvero il carico isodanno LC e a differente temperatura. In particolare si raffrontano tra loro la prova "5ISO 4 22°C " condotta a temperatura costante pari a 22°C , la prova "5ISO 2 100°C " condotta a temperatura costante pari a 100°C e la prova "5ISO 3 climi misti" sottoposta a ciclo termico.

Nello specifico è stata scelta il provino "5ISO 3 climi misti" in quanto come mostrato nel capitolo è quello che esplica valori a monte quanto più simili alla prova condotta a temperatura ambiente. Per quanto concerne le prove a 100°C la scelta verte sulla "5ISO 2 100°C " perchè è la prova che manifesta più tardi l'innescio a frattura e dunque comportamento anomalo.

Dato che la cricca per la biella "5ISO 2 100°C " si manifesta dopo il 50% della vita del componente, l'analisi che segue verrà condotta analizzando gli andamenti della rigidezza fino al 50% della vita dei componenti.

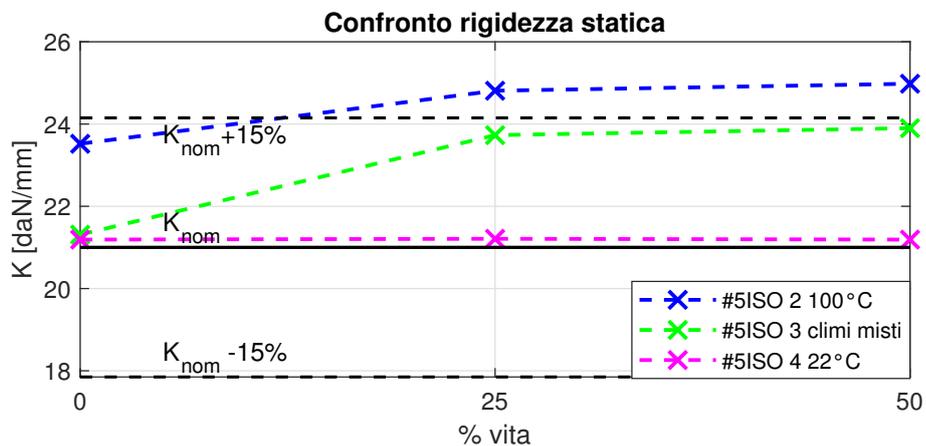


Figura 11.13: Confronto bielle: rigidezze statiche alle diverse percentuali di vita

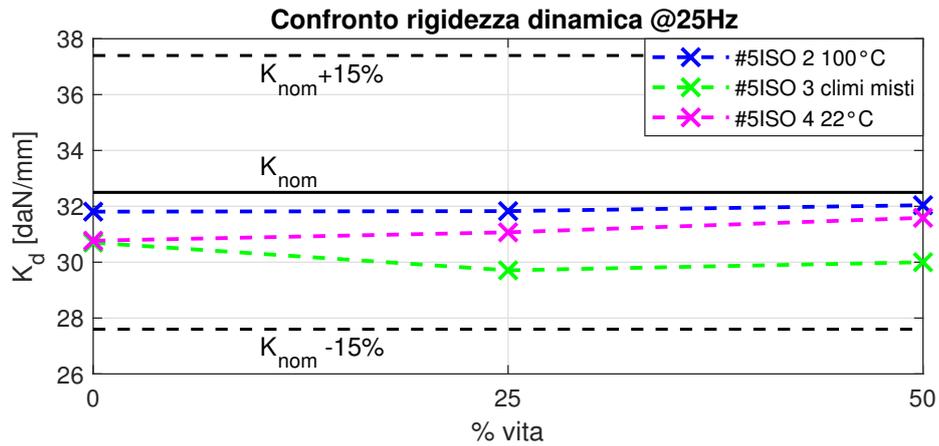


Figura 11.14: Confronto bielle: rigidezze dinamiche a bassa frequenza alle diverse percentuali di vita

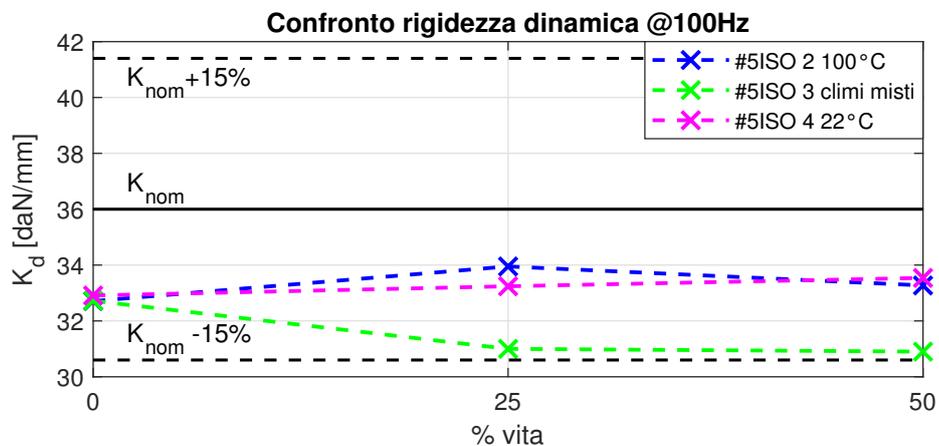


Figura 11.15: Confronto bielle: rigidezze dinamiche ad alta frequenza alle diverse percentuali di vita

È bene ricordare che i valori a nuovo sono rilevati a 22°C per i provini "5ISO 4 22°C" e "5ISO 3 climi misti"; il valore a nuovo della bielletta "5ISO 2 100°C" è rilevato invece a 100°C.

Dalle Figure 11.13, 11.14, 11.15 emerge che:

- in campo statico la prova che esplica in termini di rigidezza assoluta il valore di rigidezza più alto è la prova a 100°C, il valore di rigidezza statica infatti sia al 25%, sia al 50% supera il limite superiore della banda di tolleranza. La prova condotta con climi misti parte da un valore di rigidezza a nuovo più basso rispetto alla prova a 100°C; sebbene il gap iniziale, essa raggiunge con maggiore velocità il valore di rigidezza al 25% rispetto alla prova condotta a 100°C. La pendenza della retta nel tratto 0%-25% è maggiore per la prova a climi misti rispetto alla prova a 100°C. La prova a temperatura ambiente è invece pressoché costante. Quindi è possibile asserire che la prova con climi misti è la prova caratterizzata da irrigidimento maggiore.
- per le caratterizzazioni dinamiche a bassa frequenza, la prova più severa, cioè che restituisce il valore più basso di rigidezza è la prova con climi misti.

- per le caratterizzazioni dinamiche ad alta frequenza, così come per le prove a bassa frequenza, la prova più severa, cioè che restituisce il valore più basso di rigidità è la prova con climi misti.
- è bene notare inoltre come il gap tra le rigidità a nuovo diminuisce all'aumentare della frequenza.
Ciò permette di asserire che all'aumentare della frequenza la variabile temperatura ha un impatto via via sempre meno significativo.

Nelle figure a seguire 11.16, 11.17 e 11.18 viene effettuato un raffronto solo tra monte e valle della prova.

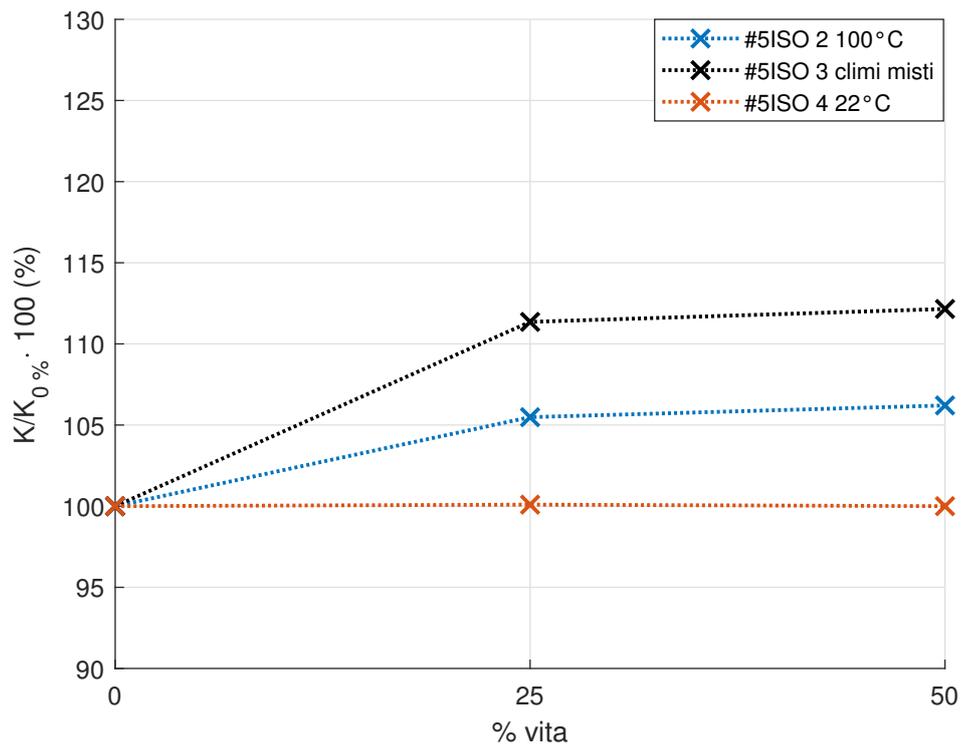


Figura 11.16: Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità statica

In campo statico la prova condotta a temperatura ambiente non mostra variazioni rispetto al valore a monte.

Le prove condotte a temperatura costante 100°C e climi misti mostrano entrambe un irrigidimento.

L'irrigidimento rispetto al valore a monte è più significativo nel caso della prova condotta con climi misti (+12%), meno significativo rispetto alla prova a 100°C che esplica un irrigidimento del 5%.

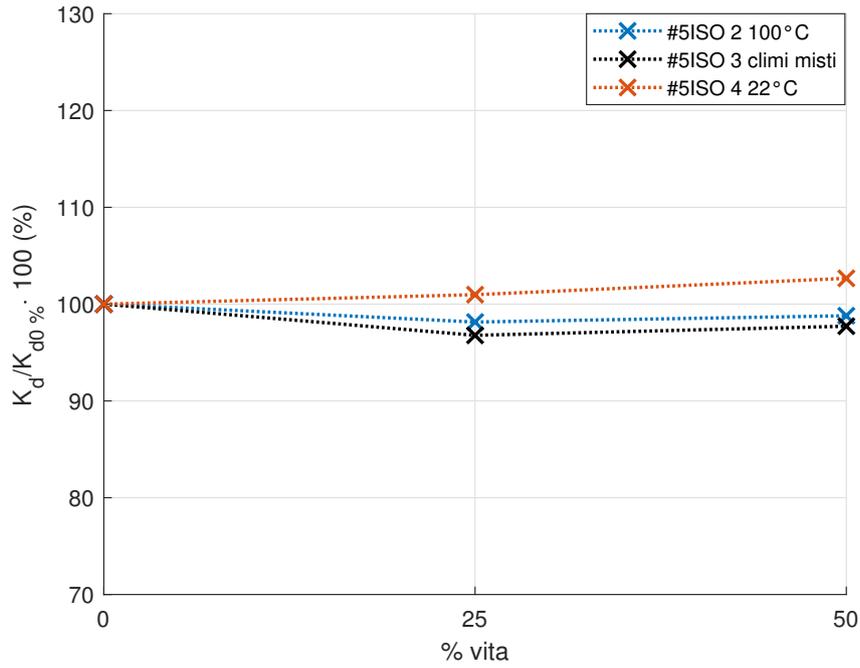


Figura 11.17: Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità dinamica a bassa frequenza

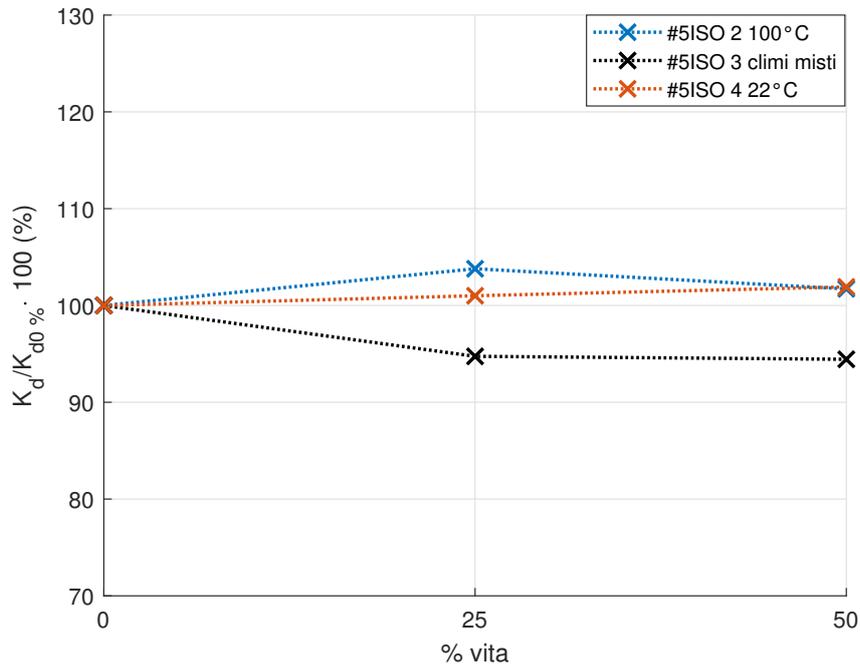


Figura 11.18: Confronto globale delle variazioni percentuali della rigidità dinamica ad alta frequenza

In campo dinamico vi è un leggero irrigidimento per quanto concerne la prova a temperatura ambiente sia a bassa che ad alta frequenza.

I valori di irrigidimento che si ottengono dalla prova a 100°C sono vicini a quelli

ottenuti a temperatura ambiente.

La prova effettuata con ciclo termico risulta la più severa in termini di inflessibilità, in particolare il provino si inflessibilisce tanto più aumenta la frequenza.

La prova con cicli misti cioè presenta un gap rispetto alla prova a 100°C e la prova a 22°C , tale gap diventa tanto più visibile quanto più aumenta la frequenza.

12.1 CONCLUSIONI

Questo lavoro è motivato dalla necessità di esplorare delle soluzioni che possano limitare i tempi banco delle prove di fatica. In tal senso si è valutata la possibilità di utilizzare i criteri isodanno.

Il lavoro di tesi nasce come naturale prosieguo dell'analisi svolta in [1] con lo scopo di indagare l'effetto della fatica e della temperatura sulla variazione della rigidità della bielletta supporto motore del Jeep Renegade con carichi non più integrali, ma isodanno.

I cicli di fatica adoperati nel presente lavoro infatti sono stati ottenuti a partire dalle acquisizioni di segnali strada reali, le stesse acquisizioni di [1], successivamente opportunamente postprocessate e riprodotte sul banco di prova MTS 833. La differenza nel postprocessamento del segnale tra l'attività svolta in [1] e la presente risiede nel tool "autodamage" del software RPC (*Remote Parameter Control*). Il tool consente di ottenere, a partire dalla storia di carico integrale, una storia di carico isodanno che abbia un contenuto equivalente in termini di danneggiamento della storia originale.

Dalle analisi svolte in questo lavoro di tesi è emerso che l'azione congiunta di cicli affaticanti e temperature diverse da quella ambiente provoca sul componente analizzato una variazione anche considerevole della sua rigidità, parametro sul quale ci si è focalizzati.

I risultati relativi alle prove di fatica a temperatura ambiente svolti nella prima parte del lavoro hanno messo in luce come storia di carico integrale e isodanno diano dei danneggiamenti del tutto confrontabili, ragion per cui è lecito far ricorso a storie di carico isodanno per le analisi di fatica. Inoltre, l'intercambiabilità dell'ordine dei cicli affaticanti cui il componente può essere sottoposto, già dimostrata per carichi integrali consente di ottenere danneggiamenti confrontabili anche nel caso di carico isodanno.

A ciò va aggiunto che, mentre per le storie di carico integrale si ha deriva, ovvero un diverso danneggiamento del componente, nel caso in cui le storie di carico siano somministrate secondo un ordine che preveda per primi i segnali di durate più lunghe, nel caso di storia di carico isodanno tale anomalia non si verifica. Le storie di carico isodanno infatti consentono di ottenere risultati più stabili e maggiore ripetibilità delle prove.

Gli effetti della temperatura trattati nella seconda parte del lavoro sono stati analizzati adoperando tutti il medesimo ciclo affaticante isodanno in maniera da poter isolare ed individuare meglio, per quanto possibile, l'effetto della sola temperatura. In prima analisi si valuta il componente sottoposto a temperatura costante pari a 100°C e in seconda analisi si valuta il componente sottoposto a ciclo termico che tiene conto di differenti climi (freddi, miti, caldi) al fine di avere uno scenario quanto più reale sul provino. Le prove condotte con ciclo termico consentono di ottenere buona ripetibilità dei risultati a differenza delle prove condotte a temperatura pari a

100°C essenzialmente perchè durante la fatica a 100°C i componenti si rompono e non arrivano integri a fine prova.

In entrambi i casi, ciò che è emerso è che la bielletta in condizioni statiche assume un comportamento termo-indurente manifestando globalmente un aumento della sua rigidità statica con la temperatura. Viceversa all'aumentare della frequenza prevale una tendenza termo-plastica del componente, infatti si manifestano delle progressive riduzioni di rigidità quando la temperatura è più elevata.

12.2 SVILUPPI FUTURI

Fra i diversi risultati ottenuti alcuni meritano un ulteriore approfondimento. Alcune tra le proposte sono:

- Indagare in maniera dettagliata la fatica alla temperatura di 100°C per capire l'esatto momento della rottura del componente.
- Effettuare attività di diagnosi sui provini derivanti dalla seconda campagna di prove del presente lavoro, ovvero sui provini che hanno subito ciclo affaticante a 100°C. A tale scopo si considera anche un provino a nuovo con cui effettuare il raffronto. Sul provino nuovo si effettuerà il prelievo di campioni in gomma e il rilievo delle seguenti caratteristiche sia a nuovo sia dopo invecchiamento in aria:
 - Microdurezza IRHD;
 - Carico di rottura a trazione;
 - Allungamento a rottura.

Sui provini affaticati si effettuerà allo stesso modo il prelievo di campioni in gomma e il rilievo delle caratteristiche sopracitate al fine di valutare come si modifica il gommato tra monte e valle della prova affaticante ad elevate temperature.

- Indagare in modo più approfondito l'andamento della fase, dunque dello smorzamento a 100°C.
- Ampliare la rosa di campioni relativamente alla prova di fatica a 100°C in modo da ricercare maggiore ripetibilità delle prove.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alessandro La Scola. *Analisi dell'influenza di fatica e temperatura sulla rigidità di un supporto motore tramite prove a banco*. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino.
- [2] Fernando M. D. Ramos. *Vibration analysis of an engine mount*.
- [3] Rao V. Dukkipati Y. Yu Nagi G. Naganathan. *A literature review of automotive vehicle engine mounting systems*. Mechanism e Machine Theory 36, 2001.
- [4] Stefano Gonella. *Ideazione di un supporto motore semi-attivo Modelli e simulazioni*. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino.
- [5] A. Fasana S. Marchesiello. *Meccanica delle vibrazioni*. Clut, Torino, 2006.
- [6] Wahyudi Martono Fadly Jashi Darsivan. *Engine Mounting Characteristic for Vibration Isolation and Active Vibration Control Strategies*. 2006.
- [7] H. C. Lord. *Vibration dampening mounting*. US Patent 1,778,503.
- [8] E.A. Taylor K.A. Browne. *Engine Mount*. US Patent 2,175,825.
- [9] D. M. Alstadt E.W Coleman. *Bonding rubber to metal*. US Patent 2,900,292.
- [10] Aaron A. Geisberger. «Hydraulic Engine Mount Modeling, Parameter Identification and Experimental Validation». In: *A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering* (2000).
- [11] M. Ahmadian L. R. Miller. «Active mounts - a discussion of future technological trends». In: *Internoise conference, Toronto-Canada* (1992), pp. 1-6.
- [12] Fadi Alkhatib. *Techniques for Engine Mount Modeling and Optimization*. University of Wisconsin Milwaukee, 2013.
- [13] Roberto Spinola Barbosa Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo Marcos Rogerio Sanches Barbetti General Motors do Brasil. *Comparative Study between Hydraulic and Elastomeric mount, both applied for automotive engine mount system*.
- [14] D. A. Swanson. *Active engine mounts for vehicles*. SAE paper 932432.
- [15] H. Kojima T. Ushijima K. Takano. *High performance hydraulic mount for improving vehicle noise and vibration*. SAE paper 880073.
- [16] T. Gami et. al T. Shibayama K. Ito. *Active engine mount for a large amplitude of idling vibration*. SAE paper 951298.
- [17] S.Kumakawa T. Ushijima. *Active engine mount with piezo-actuator for vibration control*. SAE paper 930201.
- [18] MTS Systems. (visitato il 07/12/2019). URL: <http://www.mts.com/it/about/index.htm>.
- [19] Model 833 Triaxial Test System for Dynamic Characterization and m Fatigue Testing of Elastomers. (visitato il 07/12/2019). URL: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_002240.pdf.

- [20] *Technical Data Sheet VACFILM 800G Vacuum bagging film.*
- [21] Stefano Pozzi. *Fatica e propagazione dei difetti in campo elastoplastico.* Tesi di Laurea in Ingegneria Aeronautica, Politecnico di Milano.
- [22] J. Wulff W. Hayden W.G. Moffatt. *Struttura e proprietà dei materiali proprietà meccaniche.* Vol. 3. Casa editrice Ambrosiana Milano.
- [23] Actis Comino Paola. *Analisi di mescole elastomeriche per componenti con applicazioni in campo automotive.* Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali, Politecnico di Torino.
- [24] Baccaredda Boy M. *Materie plastiche ed elastomeri.* Casa editrice ambrosiana, Milano, 1976.
- [25] Nocil Limited. *Vulcanization & Accelerators.* URL: <http://www.nocil.com/Downloadfile/DTechnicalNote-Vulcanization-Dec10.pdf>.
- [26] Rizzo R. *Elastomeri ed elasticità della gomma.* URL: <https://slideplayer.it/slide/10276933/>.
- [27] *Polimeri termoplastici e termoindurenti.* URL: https://www.unisalento.it_documents_9_2014_Polimeri+parte2.pdf.
- [28] Gent A.N. *Engineering with rubber, how to design rubber components.* Hanser Publications, Cincinnati, Ohio, 2012.
- [29] *Modeling of dynamic mechanical properties of epoxy and epoxy-phenolic reinforced with multi-wall carbon nanotubes.* URL: https://www.researchgate.net/figure/a-Maxwell-model-b-Voigt-Kelvin-model_fig1_268746626.
- [30] *Elastomeri.* URL: http://www.treccani.it/portale/opencms/handle404?exporturi=/export/sites/default/Portale/sito/altre_ree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_2/789-836ITA3.pdf&%5D.
- [31] *L'industria della gomma.* URL: https://issuu.com/edifis/docs/gomma_613_x_sfoglio/32?ff.
- [32] Antonio Licciulli Alessandra Passaro. *Polimeri.* URL: http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/pdf_2009/polimeri_passaro.pdf.