UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA MECCANICA

MODELLAZIONE E ANALISI PARAMETRICA IN SIMULAZIONE DI UN SENSORE TATTILE PER LA MISURA DI GAP E FLUSH

SIMULATION-BASED MODELLING AND PARAMETRIC ANALYSIS OF A TACTILE SENSOR FOR GAP AND FLUSH MEASUREMENT

Tesi di laurea di

Filippo Ilari

Relatore: Prof. Paolo Castellini

Correlatore: Dott.ssa Vittoria Medici

A.A. 2025/2026

Indice

Lista delle Figure **3**
Lista delle Tabelle **4**
Introduzione **5**
Argomento della tesi 5
Scopo della tesi 5
Struttura della tesi 6
Capitolo 1 Misure di Gap & Flush **7**
1.1 Gap e flush nel settore automotive 7
1.2 Controllo tattile della qualità degli accoppiamenti 8
1.3 Metodi tradizionali di misura 10
1.4 Sistemi ottici per la misura di gap e flush 11
1.5 Sistemi portatili per il controllo in linea 12
1.6 Sistemi automatizzati e robotizzati 13
1.7 Altri approcci per la misura 13
1.8 Confronto tra le principali tecniche di misura 14
1.9 Considerazioni sullo stato dell'arte 15
Capitolo 2 Materiali e metodi **16**
2.1 Modello numerico in Working Model 2D 16
2.2 Sospensioni e grandezze misurate 18
2.3 Configurazioni di gap 19
2.4 Configurazioni di flush 20
2.5 Variazione della rigidezza e dello smorzamento 21
2.6 Campagna di simulazioni e nomenclatura delle prove 22
2.7 Acquisizione ed esportazione dei dati 24
2.8 Elaborazione automatica dei dati in MATLAB 24
2.9 Individuazione automatica dell'evento 26
2.10 Confronto delle configurazioni di gap e definizione di Δt 27
Capitolo 3 Analisi dei risultati **30**
3.1 Analisi dei segnali al variare del gap 31
3.2 Analisi della distanza temporale Δt 32
3.3 Considerazioni sull'influenza del gap 34

3.4 Analisi dei segnali al variare del flush 35
3.5 Considerazioni sull'influenza del flush 37
3.6 Analisi dell'influenza della rigidezza 38
3.7 Analisi dell'influenza dello smorzamento 40
Capitolo 4 Conclusioni 42
Bibliografia 44

Lista delle Figure

Figura 1.1 – Definizione geometrica di gap e flush. 7
Figura 1.2 – Rappresentazione schematica del controllo tattile del flush tra due pannelli adiacenti. 9
Figura 1.3 – Esempio di strumenti tradizionali utilizzati per la verifica di gap e flush. 10
Figura 1.4 – Principio di funzionamento di un sistema di misura a triangolazione laser. 11
Figura 2.1 – Modello numerico utilizzato in ambiente Working Model 2D per l'analisi delle differenti configurazioni di gap e flush. 17
Figura 2.2 – Parametri nominali dell'elemento elastico-smorzante utilizzato per modellare le sospensioni. 18
Figura 2.3 – Differenti configurazioni geometriche di gap e flush ottenute modificando la posizione dell'elemento destro in Working Model 2D. 20
Figura 2.4 – Schema delle principali operazioni eseguite dal programma MATLAB. 26
Figura 2.5 – Rappresentazione del parametro Δt utilizzato per il confronto delle differenti configurazioni di gap. 28
Figura 3.1 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni G1, G2 e G3 nella condizione F0 – Rnom – Snom. 31
Figura 3.2 – Confronto della distanza temporale Δt per le configurazioni G1, G2 e G3 nella condizione F0 – Rnom – Snom. 33
Figura 3.3 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni F-1, F0 e F1 nella condizione G2 – Rnom – Snom. 35
Figura 3.4 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni R-15, Rnom e R+15 nella condizione F0 – G2 – Snom. 38
Figura 3.5 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni S-15, Snom e S+15 nella condizione F0 – G2 – Rnom. 40

Lista delle Tabelle

Tabella 1.1 – Confronto qualitativo delle principali tecniche per la misura di gap e flush. 14
Tabella 2.1 – Configurazioni di gap considerate nel modello 19
Tabella 2.2 – Configurazioni di flush considerate nel modello 20
Tabella 2.3 – Configurazioni di rigidezza 21
Tabella 2.4 – Configurazioni di smorzamento 21
Tabella 2.5 – Parametri considerati nella campagna di simulazioni. 23
Tabella 3.1 – Valori di Δt ottenuti al variare del gap nella configurazione F0 – Rnom – Snom. 33

Introduzione

Argomento della tesi

Nel settore automobilistico, il controllo dimensionale e geometrico dei componenti della carrozzeria rappresenta un aspetto fondamentale per garantire la qualità del prodotto finale. In particolare, durante le fasi di assemblaggio è necessario verificare il corretto accoppiamento tra i diversi pannelli che costituiscono la superficie esterna del veicolo, come portiere, cofano, parafanghi e portellone.

Tra i parametri utilizzati per valutare la qualità di tali accoppiamenti assumono particolare importanza il **gap** e il **flush**. Il gap rappresenta la distanza presente tra i bordi di due pannelli adiacenti, mentre il flush indica il loro disallineamento relativo nella direzione perpendicolare alla superficie. Variazioni rispetto ai valori previsti in fase di progettazione possono determinare irregolarità nell'assemblaggio e compromettere la qualità geometrica e visiva della carrozzeria.

La misura di questi parametri può essere effettuata attraverso differenti tecnologie, basate sia su sistemi di misura a contatto sia su tecniche ottiche senza contatto. La possibilità di effettuare misure in maniera rapida, ripetibile e lungo diverse zone della carrozzeria rappresenta pertanto un tema di interesse nell'ambito del controllo qualità del settore automotive.

Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto e riguarda lo studio di un modello numerico finalizzato alla misura delle discontinuità geometriche riconducibili a differenti condizioni di gap e flush. A tale scopo è stato utilizzato un modello numerico sul quale sono state riprodotte diverse configurazioni geometriche, in modo da analizzare la risposta del sistema al variare delle condizioni considerate.

Scopo della tesi

L'obiettivo principale del lavoro è valutare la possibilità di utilizzare i segnali acquisiti dal modello numerico per riconoscere e caratterizzare differenti condizioni di gap e flush, in vista di una possibile applicazione alla verifica degli accoppiamenti tra le lamiere della carrozzeria di un'automobile.

A questo scopo è stata realizzata una campagna di simulazioni nella quale sono state considerate differenti configurazioni di gap e flush. Sono state inoltre introdotte variazioni di alcuni parametri meccanici del modello, con l'obiettivo di valutarne l'influenza sui segnali acquisiti e sulla capacità del sistema di distinguere le diverse configurazioni geometriche.

Per consentire una gestione sistematica dell'elevato numero di acquisizioni è stato sviluppato un apposito programma in ambiente **MATLAB**. Il software permette di importare e organizzare automaticamente i dati delle diverse prove, individuare gli eventi significativi all'interno dei segnali e confrontare le risposte ottenute nelle differenti condizioni di simulaione.

Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi temporale dei segnali provenienti dai sensori e all'individuazione dei picchi associati al superamento delle discontinuità. Attraverso il confronto tra tali eventi è possibile ricavare parametri utili alla caratterizzazione delle differenti configurazioni di gap e flush e verificare la sensibilità del sistema alle variazioni geometriche introdotte.

Il lavoro costituisce quindi una fase di studio e caratterizzazione numerica del principio di misura, finalizzata a valutarne le potenzialità per lo sviluppo di un dispositivo destinato al controllo degli accoppiamenti dei pannelli di carrozzeria.

Struttura della tesi

La tesi è articolata in quattro capitoli, oltre alla presente introduzione.

Nel **Capitolo 1** viene affrontato lo stato dell'arte relativo alla misura di gap e flush, analizzando le principali tecniche attualmente utilizzate per il controllo degli accoppiamenti tra pannelli. Verranno considerate sia tecnologie di misura senza contatto, come i sistemi ottici e a triangolazione laser, sia metodologie di controllo basate sul contatto con la superficie, come il controllo tattile e l'impiego di strumenti manuali, con particolare attenzione alle tecnologie maggiormente attinenti al principio di misura oggetto del presente lavoro.

Nel **Capitolo 2** vengono descritti i materiali e i metodi utilizzati durante l'attività di simulazione. Vengono presentati il modello impiegato per le prove, la disposizione e le caratteristiche dei sensori, le differenti configurazioni di gap e flush considerate e le ulteriori condizioni di simulazione analizzate. Nello stesso capitolo viene inoltre descritto il programma sviluppato in MATLAB per l'importazione, l'elaborazione e il confronto automatico dei segnali acquisiti. Una tabella riassuntiva raccoglie infine l'insieme delle prove effettuate.

Nel **Capitolo 3** vengono presentati e discussi i principali risultati ottenuti dalla campagna di simulazioni. Attraverso il confronto dei segnali e di alcuni grafici rappresentativi viene analizzata l'influenza delle differenti condizioni di gap e flush e degli altri parametri analizzati sulla risposta del sistema.

Infine, nel **Capitolo 4** vengono riportate le conclusioni del lavoro, riassumendo i principali risultati ottenuti e valutando le potenzialità e i limiti del sistema analizzato in relazione al possibile sviluppo di un dispositivo per la misura di gap e flush su carrozzerie automobilistiche. Vengono inoltre indicati eventuali sviluppi futuri del lavoro.

Capitolo 1 Misure di Gap & Flush

1.1 Gap e flush nel settore automotive

Il controllo della qualità geometrica rappresenta una fase fondamentale nel processo di produzione e assemblaggio di un'automobile. La carrozzeria di un veicolo è infatti costituita da numerosi componenti che, una volta assemblati, devono rispettare determinate specifiche dimensionali e geometriche. Tra i parametri maggiormente utilizzati per valutare la qualità dell'accoppiamento tra pannelli adiacenti assumono particolare importanza il **gap** e il **flush**.

Con il termine *gap* si indica la distanza presente tra due superfici adiacenti, misurata lungo una direzione appartenente al piano tangente alle superfici considerate. Il *flush* rappresenta invece il disallineamento tra le due superfici e viene quindi valutato lungo la direzione ortogonale al piano tangente alle superfici stesse [3].

In termini semplificati, il gap può essere associato alla larghezza della separazione tra due componenti della carrozzeria, mentre il flush descrive la differenza di quota tra le loro superfici esterne. Tali grandezze possono essere valutate, ad esempio, in corrispondenza dell'accoppiamento tra portiera e parafango, cofano e parafanghi oppure tra portellone e pannelli posteriori.

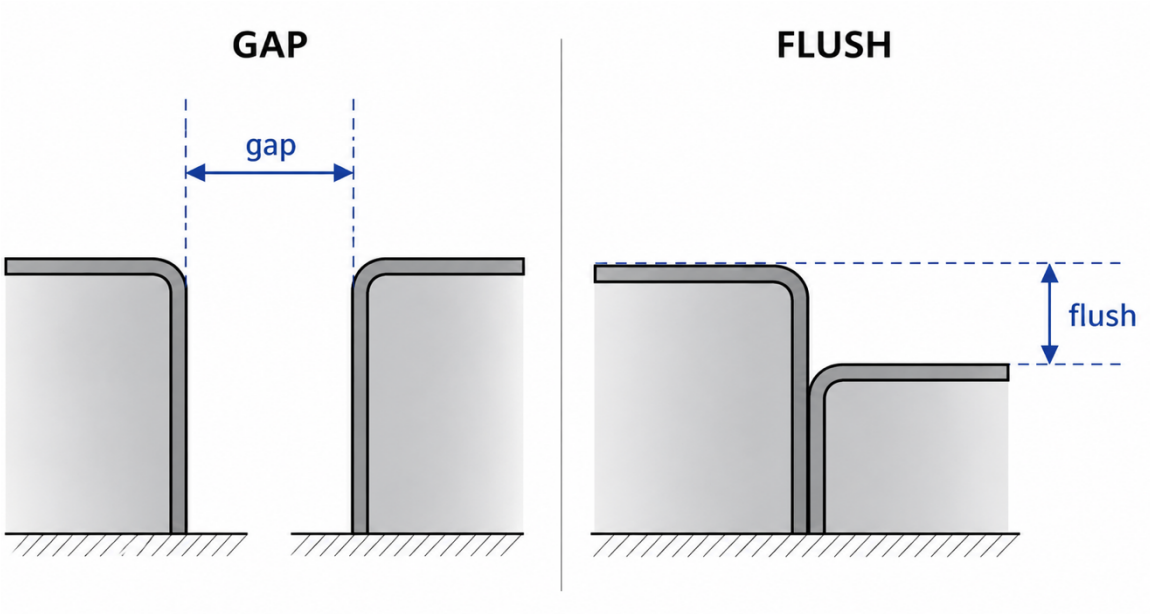


Figura 1.1 – Definizione geometrica di gap e flush.

Il rispetto delle tolleranze previste per queste grandezze non risponde esclusivamente a esigenze estetiche. Un accoppiamento non corretto tra i pannelli può infatti influenzare anche le caratteristiche funzionali del veicolo, con possibili conseguenze sulle prestazioni aerodinamiche e aeroacustiche e sulla capacità di tenuta delle chiusure [3]. Inoltre, la regolarità delle linee di separazione tra i pannelli contribuisce alla qualità percepita del veicolo: la letteratura mostra come la dimensione e la regolarità del gap possano influenzare la valutazione estetica dell'assemblaggio [2].

La misura di gap e flush rappresenta pertanto un'importante operazione di controllo durante il processo di assemblaggio della carrozzeria.

In un contesto produttivo caratterizzato da un elevato numero di veicoli e da tempi ciclo ridotti, risulta inoltre importante poter effettuare tali controlli in maniera rapida e ripetibile. L'evoluzione dei sistemi produttivi verso i paradigmi dell'Industria 4.0 ha ulteriormente aumentato l'interesse verso sistemi capaci non soltanto di effettuare la misura, ma anche di memorizzare e trasmettere automaticamente i dati raccolti. Ciò consente di associare le informazioni dimensionali al singolo veicolo e rende possibile un controllo più esteso della produzione [3].

1.2 Controllo tattile della qualità degli accoppiamenti

Prima dell'introduzione di sistemi di misura automatizzati, e ancora oggi in alcune operazioni di controllo e verifica, una delle modalità più immediate per valutare la qualità dell'accoppiamento tra pannelli adiacenti consiste nell'utilizzo della percezione tattile dell'operatore. In particolare, il *flush* può essere valutato qualitativamente facendo scorrere un dito attraverso la zona di giunzione tra due pannelli, in modo da percepire eventuali differenze di quota tra le rispettive superfici [1].

Il principio alla base di questo controllo deriva dall'elevata sensibilità del tatto umano nei confronti delle discontinuità superficiali. Durante il passaggio del dito attraverso la giunzione, un disallineamento tra i pannelli produce infatti una variazione della superficie che può essere percepita dall'operatore. La valutazione tattile può quindi fornire una prima indicazione sulla continuità superficiale dell'accoppiamento e sulla presenza di un eventuale disallineamento.

L'utilizzo di questo tipo di controllo è documentato anche nell'ambito della produzione automobilistica. Nell'ambito di attività dedicate allo sviluppo di nuove tecnologie di misura per il settore manifatturiero è stata descritta una procedura nella quale il gap viene controllato mediante uno strumento dedicato, mentre il flush viene valutato facendo scorrere un dito sulla superficie dei pannelli [1]. Tale procedura rappresenta un metodo particolarmente semplice e rapido, ma presenta alcuni limiti legati alla natura soggettiva della valutazione.

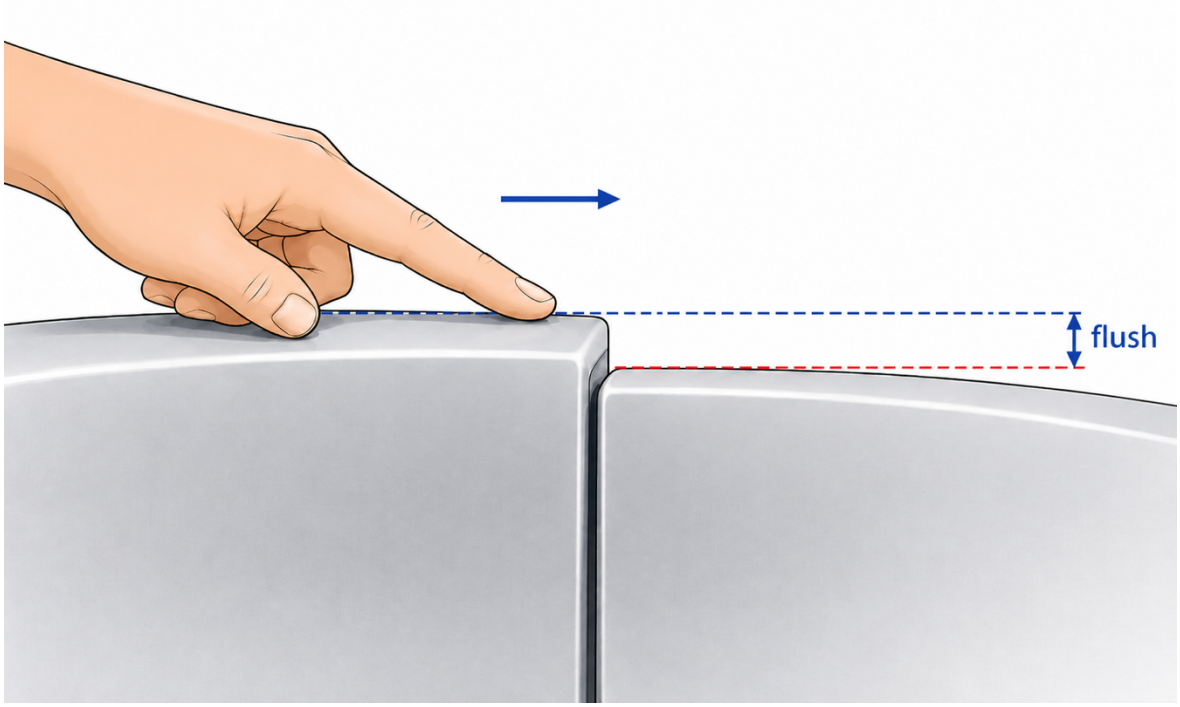


Figura 1.2 – Rappresentazione schematica del controllo tattile del flush tra due pannelli adiacenti.

Il risultato dipende infatti dalla sensibilità, dall'esperienza e dalla modalità di esecuzione del controllo da parte dell'operatore. Inoltre, una valutazione esclusivamente tattile non restituisce direttamente un valore numerico del disallineamento e rende difficile la registrazione sistematica delle informazioni ottenute durante il processo produttivo [1].

La qualità dell'accoppiamento tra i pannelli assume inoltre una notevole importanza dal punto di vista della qualità percepita del veicolo. Irregolarità nelle linee di separazione e nelle dimensioni dei gap possono infatti influenzare la percezione complessiva della qualità costruttiva del prodotto [2].

Questo tipo di controllo risulta particolarmente interessante nell'ambito del presente lavoro poiché il principio alla base del dispositivo oggetto di studio presenta, pur con modalità differenti, un'analogia con il controllo effettuato dall'operatore. L'obiettivo è infatti analizzare la risposta generata dal passaggio di un sistema sensorizzato attraverso una discontinuità geometrica, cercando di trasformare una percezione della variazione superficiale in un'informazione misurabile e quantitativamente analizzabile.

L'introduzione di un sistema strumentato permetterebbe quindi, in prospettiva, di mantenere alcuni vantaggi propri di un controllo locale della superficie, superando allo stesso tempo la soggettività della valutazione umana e consentendo l'acquisizione, l'elaborazione e la memorizzazione dei dati.

1.3 Metodi tradizionali di misura

Oltre al controllo tattile, la verifica di gap e flush può essere effettuata mediante strumenti manuali. Per la misura del gap possono essere utilizzati **spessimetri**, costituiti da elementi di spessore noto che vengono inseriti all'interno dello spazio presente tra i due componenti [3], [4].

La misura viene effettuata individuando lo spessore compatibile con la separazione tra i pannelli. Si tratta di un metodo semplice, economico e facilmente applicabile direttamente sulla linea di produzione. Tuttavia, il risultato può essere influenzato dall'operatore e, in particolare, dal corretto orientamento dello strumento rispetto alla geometria da misurare.

Per la valutazione quantitativa del flush possono invece essere impiegati comparatori o altri strumenti meccanici in grado di determinare la differenza di quota tra due superfici.



Figura 1.3 – Esempio di strumenti tradizionali utilizzati per la verifica di gap e flush.

Nonostante la semplicità di queste tecniche, la misura manuale presenta alcuni limiti. La qualità del risultato dipende dalla modalità con cui lo strumento viene posizionato e dall'esperienza dell'operatore. Nei sistemi basati sul contatto esiste inoltre la possibilità che l'interazione tra strumento e componente influenzi la misura stessa, soprattutto quando vengono considerate geometrie caratterizzate da piccole distanze.

Un ulteriore limite riguarda la gestione dei dati. Un controllo effettuato mediante semplici strumenti manuali non permette necessariamente di generare automaticamente un flusso continuo di informazioni relativo a tutti i veicoli prodotti. La disponibilità di dati dimensionali digitalizzati rappresenta invece un elemento importante per l'implementazione di strategie di controllo qualità in linea e per l'identificazione di eventuali derive del processo produttivo [3].

Queste problematiche hanno favorito lo sviluppo di sistemi di misura alternativi, in particolare di tipo ottico, capaci di effettuare il controllo senza contatto con la superficie.

1.4 Sistemi ottici per la misura di gap e flush

Le tecniche ottiche costituiscono una delle principali soluzioni per automatizzare la misura di gap e flush. In letteratura sono stati studiati differenti approcci basati, ad esempio, sulla riflessione laser, su sistemi di visione e sulla triangolazione laser [3], [4].

Il principale vantaggio di una tecnica ottica è rappresentato dalla possibilità di ricostruire la geometria della zona analizzata senza richiedere necessariamente il contatto meccanico tra il sensore e il componente. Questo aspetto permette di ridurre alcuni degli effetti associati all'interazione tra strumento e superficie e rende tali sistemi particolarmente interessanti per applicazioni automatizzate.

Tra le tecniche maggiormente utilizzate per questo tipo di applicazione si trovano i sistemi basati sulla **triangolazione laser**. In questi dispositivi una sorgente laser proietta un punto o, più frequentemente, una linea sulla superficie da misurare. La radiazione diffusa dalla superficie viene acquisita da una telecamera posizionata secondo una geometria nota rispetto alla sorgente.

Lo spostamento della linea laser all'interno dell'immagine acquisita è correlato alla posizione della superficie rispetto al sistema di misura. Dopo un'opportuna procedura di calibrazione è quindi possibile ricostruire il profilo geometrico della zona interessata.

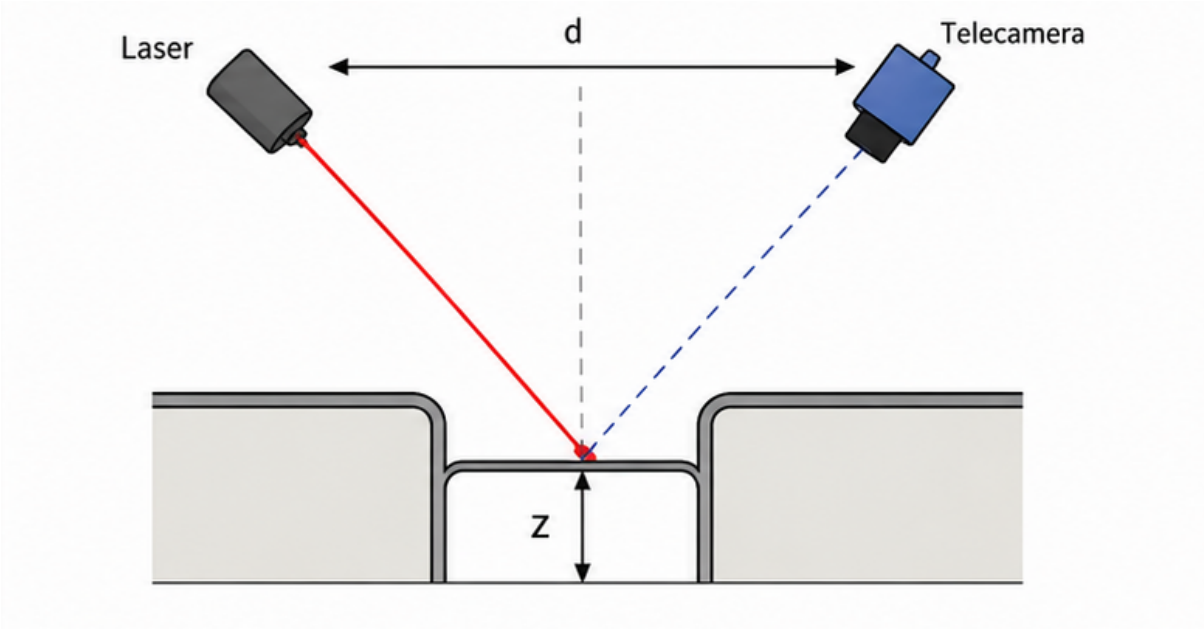


Figura 1.4 – Principio di funzionamento di un sistema di misura a triangolazione laser.

Nel caso della misura di gap e flush, la linea laser viene proiettata trasversalmente rispetto alla zona di giunzione dei pannelli. Il profilo acquisito contiene quindi informazioni relative alle superfici dei due componenti e alla regione di separazione tra essi. Mediante opportuni algoritmi di elaborazione è possibile identificare i bordi dei pannelli e determinare sia la distanza associata al gap sia il disallineamento associato al flush [3].

I sistemi di triangolazione laser possono tuttavia essere influenzati dalle caratteristiche ottiche delle superfici. Nel settore automotive questo aspetto assume particolare rilevanza poiché le misure possono essere effettuate su pannelli verniciati con colori e finiture differenti. Le diverse proprietà di riflessione possono modificare la quantità di radiazione acquisita dalla telecamera e rendere necessario un adattamento dei parametri di acquisizione [3].

1.5 Sistemi portatili per il controllo in linea

Una possibile evoluzione delle tecniche ottiche consiste nella realizzazione di dispositivi portatili utilizzabili direttamente dagli operatori presenti sulla linea di assemblaggio.

Minnetti et al. [3] hanno sviluppato e caratterizzato un sistema portatile per la misura di gap e flush basato sulla triangolazione laser e integrato all'interno di uno smartphone. Il dispositivo combina una sorgente laser miniaturizzata con la fotocamera e le capacità di elaborazione dello smartphone.

La linea laser proiettata sui pannelli viene acquisita dalla fotocamera e successivamente elaborata per ricostruire il profilo della superficie e determinare le grandezze di interesse. L'utilizzo dello smartphone permette inoltre di sfruttare capacità di calcolo, display, interfaccia utente, batteria e connettività wireless già presenti nel dispositivo.

Un aspetto particolarmente interessante di questo approccio riguarda l'integrazione della misura con l'infrastruttura digitale dello stabilimento. I valori acquisiti possono infatti essere elaborati localmente e successivamente trasmessi attraverso una connessione wireless, permettendo l'archiviazione dei risultati e la loro associazione al processo produttivo [3].

Il dispositivo incorpora inoltre sensori e funzioni ausiliarie finalizzate a supportare l'operatore durante l'esecuzione della misura e a ridurre gli effetti di un posizionamento non corretto. Questo aspetto risulta importante poiché, anche utilizzando un principio di misura ottico, un dispositivo portatile continua a essere influenzato dalle modalità con cui viene utilizzato.

La caratterizzazione sperimentale effettuata dagli autori evidenzia infatti come l'incertezza associata all'intera catena di misura in condizioni reali possa risultare superiore a quella ottenuta durante la sola calibrazione dello strumento in laboratorio. Il comportamento complessivo dipende non soltanto dal sensore, ma anche dall'operatore, dal misurando e dalle condizioni presenti sulla linea produttiva [3].

Un'ulteriore soluzione portatile è stata proposta da Pham et al. [5], attraverso lo sviluppo di un sistema basato su smartphone e proiezione laser per la valutazione di gap e flush. Anche in questo caso l'obiettivo è combinare la capacità di acquisizione ed elaborazione di un dispositivo mobile con un principio di misura ottico, ottenendo un sistema compatto utilizzabile direttamente nelle operazioni di controllo.

1.6 Sistemi automatizzati e robotizzati

Un approccio differente consiste nell'eliminare o ridurre l'intervento dell'operatore integrando il sistema di misura all'interno di una stazione automatizzata.

Kholkhujaev et al. [4] hanno proposto un sistema ottico senza contatto destinato all'integrazione con un robot antropomorfo. Il dispositivo utilizza una sorgente laser a linea e una telecamera, mantenute in posizione relativa nota attraverso una struttura installata sull'estremità del robot.

Il robot permette di posizionare il sistema di misura in corrispondenza delle diverse zone della carrozzeria da controllare, mentre un algoritmo di *machine vision* elabora le immagini acquisite e determina i valori di gap e flush.

L'automazione del posizionamento permette di ridurre la variabilità introdotta dall'operatore e rende possibile l'esecuzione di sequenze di misura programmate. Gli autori hanno sviluppato il sistema per applicazioni di controllo di tipo *Stop-and-Go*, nelle quali il veicolo viene controllato in specifiche stazioni del processo di assemblaggio [4].

La caratterizzazione metrologica del sistema ha fornito valori di incertezza estesa pari a circa **0,221 mm per il gap e 0,177 mm per il flush** in condizioni di laboratorio [4]. Questi risultati mostrano le potenzialità dei sistemi ottici automatizzati per il controllo dimensionale della carrozzeria.

L'introduzione di robot e sistemi di visione comporta tuttavia un aumento della complessità e dei costi dell'impianto. Per questo motivo, nella produzione automobilistica possono coesistere sistemi completamente automatizzati e dispositivi portatili utilizzati dagli operatori, a seconda delle esigenze della specifica fase produttiva.

1.7 Altri approcci per la misura

Oltre alla triangolazione laser, la letteratura riporta ulteriori tecniche per la misura automatica delle discontinuità tra componenti.

Sono stati studiati sistemi basati sulla riflessione laser e differenti tecniche di visione e ricostruzione del profilo [3], [4]. I diversi approcci presentano caratteristiche differenti in termini di precisione, velocità di acquisizione, complessità hardware e sensibilità alle proprietà della superficie.

Più recentemente sono state sviluppate anche soluzioni che sfruttano sistemi di acquisizione ed elaborazione sempre più compatti. Tali sistemi permettono di ricostruire la geometria della zona di accoppiamento e di determinare automaticamente la posizione dei bordi dei componenti.

Pham et al. [5], ad esempio, hanno proposto un sistema portatile basato su smartphone per la misura di gap e flush della carrozzeria. Il sistema sfrutta un principio di misura laser e l'elaborazione delle informazioni acquisite per determinare le grandezze geometriche di interesse. L'integrazione con lo smartphone permette inoltre di disporre di un dispositivo compatto dotato delle capacità necessarie per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

La ricerca nel settore mostra quindi una progressiva evoluzione da semplici strumenti meccanici verso dispositivi digitali e sistemi di misura automatici, con l'obiettivo di aumentare la ripetibilità delle misure e integrare il controllo dimensionale direttamente nel processo produttivo.

1.8 Confronto tra le principali tecniche di misura

Le tecnologie analizzate presentano vantaggi e limitazioni differenti. Il controllo tattile rappresenta la soluzione più semplice e immediata, ma fornisce prevalentemente una valutazione qualitativa ed è fortemente dipendente dalla sensibilità e dall'esperienza dell'operatore.

I sistemi manuali a contatto sono caratterizzati da semplicità, basso costo e facilità di utilizzo, ma sono anch'essi dipendenti dall'operatore e risultano poco adatti all'acquisizione automatizzata di grandi quantità di dati.

I sistemi ottici portatili rappresentano una soluzione intermedia. Mantengono la flessibilità dell'operatore umano ma permettono di digitalizzare la misura, elaborare automaticamente il dato e trasferirlo ai sistemi informativi dello stabilimento. Rimane tuttavia una possibile influenza dovuta al posizionamento manuale del dispositivo.

I sistemi robotizzati permettono invece un'elevata automazione del processo e una maggiore ripetibilità del posizionamento, a fronte di una maggiore complessità dell'impianto e dei relativi costi.

Tabella 1.1 – Confronto qualitativo delle principali tecniche per la misura di gap e flush.

Metodo	Contatto	Automazione	Principali vantaggi	Principali criticità
Controllo tattile	Sì	Nessuna	Immediatezza, semplicità, assenza di strumentazione	Valutazione soggettiva e prevalentemente qualitativa
Spessimetro/comparatore	Sì	Bassa	Semplicità e basso costo	Dipendenza dall'operatore
Sistema ottico portatile	No	Media	Rapidità, digitalizzazione del dato, flessibilità	Posizionamento dell'operatore e proprietà ottiche delle superfici
Triangolazione laser robotizzata	No	Alta	Ripetibilità e automazione	Maggiore complessità e costo
Sistemi di visione	No	Alta	Ricostruzione geometrica senza contatto	Elaborazione e calibrazione del sistema

1.9 Considerazioni sullo stato dell'arte

Dall'analisi della letteratura emerge come la misura di gap e flush rappresenti ancora un tema di interesse nell'ambito del controllo qualità automotive. Le tecniche tradizionali risultano semplici e consolidate, ma presentano limitazioni legate alla dipendenza dall'operatore e alla difficoltà di integrare automaticamente i risultati all'interno del processo produttivo.

Il controllo tattile costituisce un esempio particolarmente significativo. La capacità dell'operatore di percepire una discontinuità attraverso il passaggio del dito consente una verifica estremamente semplice e immediata, ma non permette di ottenere direttamente una misura quantitativa e ripetibile. La possibilità di trasformare un principio di interazione con la superficie in una misura strumentale rappresenta pertanto un'interessante direzione di sviluppo.

Le tecniche ottiche, e in particolare la triangolazione laser, permettono invece di ottenere misure senza contatto e rappresentano una soluzione particolarmente adatta all'automazione. Allo stesso tempo, lo sviluppo di sistemi portatili mostra l'interesse verso soluzioni capaci di mantenere la flessibilità dell'operatore integrandola con strumenti di misura digitali.

I sistemi robotizzati costituiscono un'ulteriore evoluzione verso il controllo automatico della carrozzeria, consentendo di effettuare misure ripetibili in differenti punti del veicolo.

In questo contesto si inserisce il lavoro numerico oggetto della presente tesi, nel quale viene studiato un approccio differente basato sull'analisi della risposta di sensori durante il passaggio su discontinuità geometriche rappresentative di differenti condizioni di gap e flush. Lo scopo è verificare se le caratteristiche dei segnali acquisiti possano essere correlate alle variazioni geometriche presenti tra due elementi adiacenti.

Il principio studiato si differenzia pertanto dai sistemi ottici descritti precedentemente e presenta, allo stesso tempo, un'analogia concettuale con il controllo tattile effettuato dall'operatore: in entrambi i casi l'informazione relativa alla discontinuità viene ottenuta attraverso l'interazione con la superficie. Nel sistema oggetto del presente lavoro tale interazione viene però acquisita attraverso sensori, rendendo possibile l'analisi quantitativa del segnale.

Il lavoro costituisce una fase preliminare finalizzata alla valutazione della possibilità di sviluppare un dispositivo destinato al controllo degli accoppiamenti tra pannelli di carrozzeria. La descrizione del modello numerico, delle configurazioni di prova e delle procedure sviluppate per l’elaborazione dei segnali viene affrontata nel capitolo successivo.

Capitolo 2 Materiali e metodi

Nel presente capitolo vengono descritti gli strumenti, il modello numerico e le procedure utilizzate per l'analisi delle differenti configurazioni di gap e flush considerate nel presente lavoro.

L'attività è stata svolta mediante un modello dinamico bidimensionale realizzato in ambiente **Working Model 2D**, fornito dal relatore e successivamente utilizzato per effettuare le diverse simulazioni. Il modello riproduce schematicamente un sistema assimilabile a una piccola vettura costituita da un corpo centrale, due ruote e due sospensioni, una anteriore e una posteriore.

L'obiettivo delle simulazioni è stato quello di analizzare la risposta del modello durante il superamento di una discontinuità geometrica rappresentativa dell'accoppiamento tra due superfici. Sono state considerate differenti configurazioni di **gap** e **flush** e, successivamente, differenti valori dei parametri meccanici delle sospensioni, in particolare rigidezza e smorzamento.

Le grandezze utilizzate per l'analisi sono costituite dalle forze rilevate nei **Pin Joint** associati alle sospensioni anteriore e posteriore. I segnali ottenuti mediante Working Model 2D sono stati successivamente esportati e utilizzati come dati di ingresso per il programma di elaborazione sviluppato in ambiente MATLAB.

2.1 Modello numerico in Working Model 2D

Per lo svolgimento delle simulazioni è stato utilizzato il software **Working Model 2D**, un ambiente dedicato alla simulazione della dinamica di sistemi meccanici bidimensionali.

Il modello utilizzato nel presente lavoro è stato fornito dal relatore ed è rappresentato schematicamente come una piccola vettura costituita da un corpo centrale collegato a due ruote mediante due sistemi di sospensione. Una sospensione è associata alla ruota anteriore, mentre la seconda è associata alla ruota posteriore.

Le due ruote utilizzate nel modello hanno un **diametro pari a 800 mm**, corrispondente a un raggio di **400 mm**.

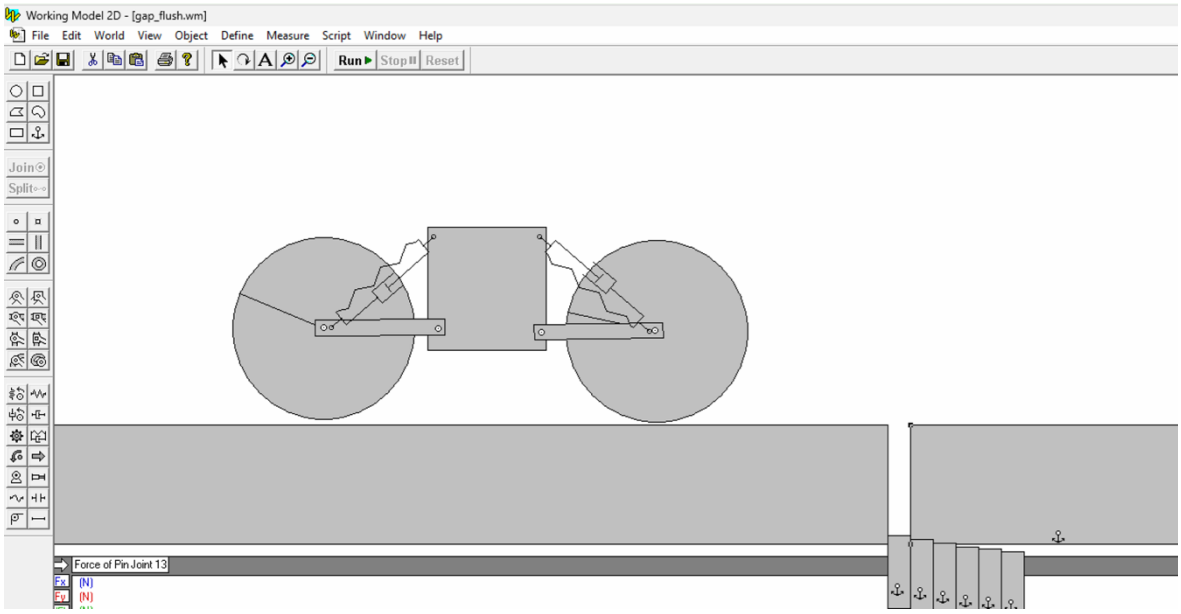


Figura 2.1 – Modello numerico utilizzato in ambiente Working Model 2D per l'analisi delle differenti configurazioni di gap e flush.

Il sistema viene fatto avanzare lungo una superficie orizzontale sulla quale è presente una discontinuità geometrica. Questa è costituita da due elementi rettangolari la cui posizione relativa può essere modificata all'interno del software. Agendo sulla posizione dell'elemento posto sulla destra è quindi possibile riprodurre differenti condizioni di gap e flush.

Durante l'avanzamento, la prima ruota incontra la discontinuità e, successivamente, la stessa zona viene attraversata dalla seconda ruota. Il superamento della giunzione modifica la risposta dinamica del sistema e produce variazioni nelle forze trasmesse attraverso le sospensioni.

Tali variazioni vengono registrate mediante i punti di misura associati ai Pin Joint presenti nel modello e costituiscono i segnali successivamente utilizzati per l'elaborazione.

Il principio di funzionamento presenta un'analogia con il controllo tattile descritto nel Capitolo 1. In entrambi i casi la presenza di una discontinuità geometrica viene rilevata attraverso l'interazione meccanica con la superficie. Nel modello numerico questa interazione viene però trasformata in un segnale quantitativo, rendendo possibile il confronto tra differenti configurazioni geometriche.

2.2 Sospensioni e grandezze misurate

Le due ruote sono collegate al corpo centrale mediante sistemi elastico-smorzanti che simulano il comportamento delle sospensioni. Ciascuna sospensione è caratterizzata da una componente elastica, rappresentata mediante una molla, e da una componente dissipativa, rappresentata mediante uno smorzatore.

All'interno di Working Model 2D è possibile modificare direttamente i parametri caratteristici di tali elementi. La configurazione nominale utilizzata nel presente lavoro è caratterizzata dai seguenti valori:

- **rigidezza nominale: 500 N/m**;
- **smorzamento nominale: 10 N·s/m**;
- **lunghezza della molla: 0,638 m**.

Questi valori rappresentano la configurazione di riferimento del sistema e costituiscono la base rispetto alla quale sono state successivamente introdotte le variazioni dei parametri meccanici.

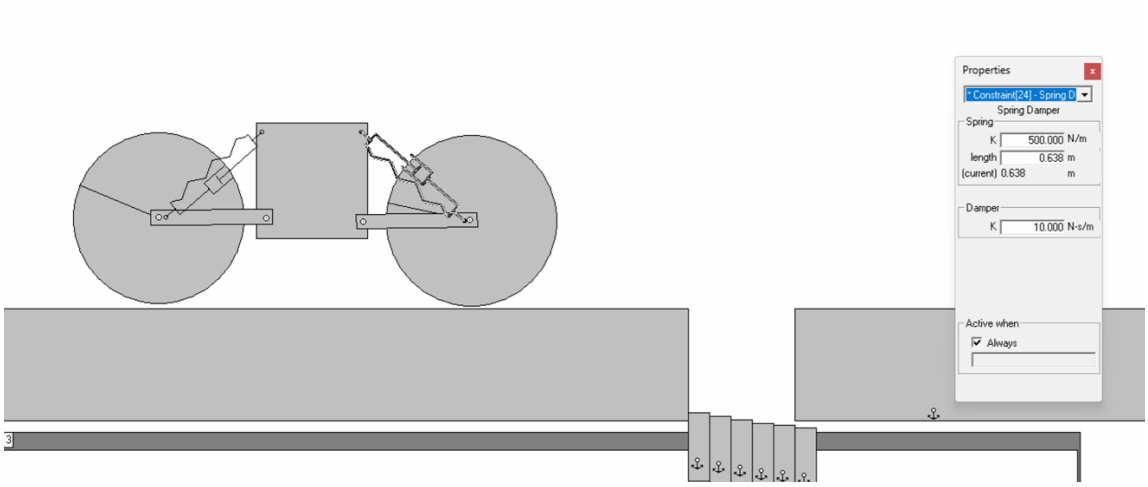


Figura 2.2 – Parametri nominali dell'elemento elastico-smorzante utilizzato per modellare le sospensioni.

Le grandezze considerate per l'analisi sono costituite dalle **forze nei Pin Joint** associati alle due sospensioni.

Working Model 2D consente di visualizzare durante la simulazione l'andamento temporale delle forze nei due punti di misura. Per ciascun Pin Joint sono disponibili le componenti della forza nelle due direzioni del piano e la relativa risultante, espresse in newton.

La presenza di due punti di misura permette di osservare la risposta del sistema in corrispondenza del passaggio delle due ruote sulla stessa discontinuità. I due segnali risultano quindi temporalmente separati e possono essere successivamente confrontati durante la fase di elaborazione.

2.3 Configurazioni di gap

La discontinuità geometrica utilizzata durante le simulazioni è costituita da due elementi rettangolari separati. Le differenti configurazioni di gap sono state ottenute modificando la posizione orizzontale dell'elemento posto sulla destra del modello.

Nel corso del lavoro sono state considerate tre configurazioni, indicate mediante le sigle:

- **G1**;
- **G2**;
- **G3**.

Tra una configurazione e quella successiva è stato imposto uno spostamento orizzontale pari a **100 mm**.

La configurazione G1 corrisponde a un gap di **100 mm**. Tale valore rappresenta un quarto del raggio della ruota utilizzata nel modello: essendo il diametro della ruota pari a 800 mm, il raggio è pari a 400 mm e quindi G1 corrisponde a **R/4**.

Le configurazioni considerate risultano pertanto:

Tabella 2.1 – Configurazioni di gap considerate nel modello

Configurazione	Gap	Rapporto rispetto al raggio della ruota
G1	100 mm	R/4
G2	200 mm	R/2
G3	300 mm	3R/4

La variazione progressiva del gap consente di valutare l'effetto della distanza tra le due superfici sulla risposta dinamica del sistema, mantenendo invariati gli altri parametri della configurazione analizzata.

2.4 Configurazioni di flush

La variazione del flush è stata ottenuta modificando la posizione verticale dell'elemento rettangolare posto sulla destra, mantenendo invece invariata la relativa posizione orizzontale.

Sono state considerate tre differenti configurazioni:

- **F-1**;
- **F0**;
- **F1**.

La configurazione **F0** rappresenta la condizione centrale di riferimento, mentre le configurazioni F-1 e F1 sono ottenute mediante uno spostamento verticale dell'elemento destro nelle due direzioni opposte.

Tra due configurazioni consecutive è stata imposta una variazione verticale pari a **100 mm**. Prendendo F0 come riferimento, le configurazioni possono quindi essere descritte attraverso uno spostamento relativo pari a:

Tabella 2.2 – Configurazioni di flush considerate nel modello

Configurazione	Spostamento verticale relativo
F-1	-100 mm
F0	0 mm
F1	+100 mm

Tali valori rappresentano gli spostamenti introdotti nel **modello numerico** rispetto alla configurazione di riferimento e non devono essere interpretati come valori tipici delle tolleranze di flush di una carrozzeria reale.

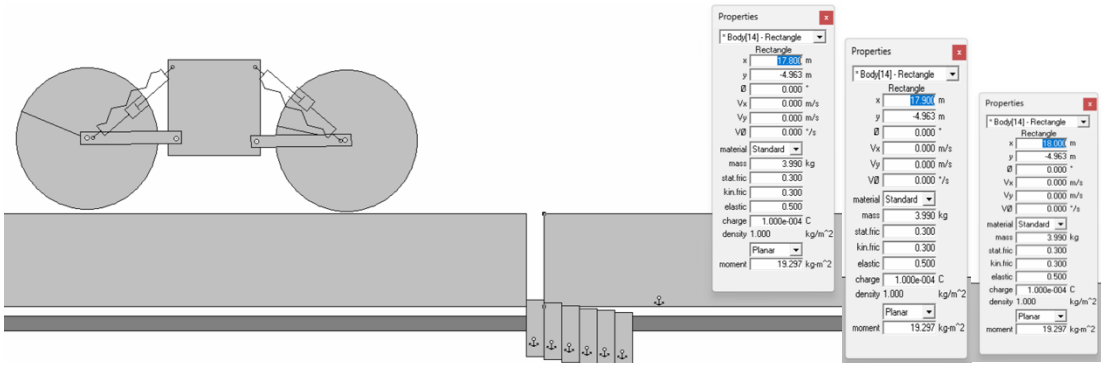


Figura 2.3 – Differenti configurazioni geometriche di gap e flush ottenute modificando la posizione dell'elemento destro in Working Model 2D.

L'utilizzo delle sigle G1, G2, G3 e F-1, F0, F1 consente di identificare in maniera univoca le diverse condizioni geometriche considerate durante le simulazioni.

2.5 Variazione della rigidezza e dello smorzamento

Oltre ai parametri geometrici, sono state analizzate differenti condizioni delle sospensioni, in modo da verificare l'influenza delle caratteristiche dinamiche del sistema sulla risposta misurata.

Sono stati considerati separatamente due parametri:

- la **rigidezza della molla**;
- lo **smorzamento**.

Per entrambi sono state utilizzate tre condizioni: valore nominale, riduzione del 15% e aumento del 15%.

La rigidezza è identificata mediante la lettera **R**. A partire dal valore nominale pari a 500 N/m sono state considerate le seguenti configurazioni:

Tabella 2.3 – Configurazioni di rigidezza

Configurazione	Variazione	Rigidezza
R-15	-15%	425 N/m
Rnom	nominale	500 N/m
R+15	+15%	575 N/m

Lo smorzamento è invece identificato mediante la lettera **S**. A partire dal valore nominale di 10 N·s/m sono state considerate le seguenti configurazioni:

Tabella 2.4 – Configurazioni di smorzamento

Configurazione	Variazione	Smorzamento
S-15	-15%	8,5 N·s/m
Snom	nominale	10 N·s/m
S+15	+15%	11,5 N·s/m

Le variazioni sono state introdotte direttamente nella finestra delle proprietà degli elementi elastico-smorzanti presenti in Working Model 2D.

La modifica di tali parametri consente di verificare quanto la risposta del sistema sia influenzata non soltanto dalla geometria della discontinuità, ma anche dalle caratteristiche dinamiche delle sospensioni.

Nelle prove dedicate alla variazione della rigidezza, lo smorzamento viene mantenuto nella configurazione nominale, mentre nelle prove dedicate allo smorzamento viene mantenuta nominale la rigidezza. In questo modo è possibile valutare separatamente l'effetto prodotto dalla variazione dei due parametri.

2.6 Campagna di simulazioni e nomenclatura delle prove

La campagna di simulazioni è stata organizzata combinando le differenti configurazioni geometriche e meccaniche precedentemente descritte.

A ciascuna prova sono quindi associate quattro informazioni principali:

- configurazione di gap;
- configurazione di flush;
- valore della rigidezza;
- valore dello smorzamento.

Per consentire un'identificazione immediata delle condizioni utilizzate, tali informazioni sono state inserite direttamente nel nome dei file generati.

Ad esempio, una prova identificata mediante le sigle:

F-1 – G2 – R-15 – Snom

corrisponde a una simulazione effettuata utilizzando:

- configurazione di flush F-1;
- configurazione di gap G2;
- rigidezza ridotta del 15%;
- smorzamento nominale.

La stessa convenzione è stata mantenuta per tutte le simulazioni effettuate. Questa scelta ha successivamente permesso di automatizzare il riconoscimento delle diverse configurazioni durante l'elaborazione dei dati in MATLAB.

In Tabella 2.5 sono riassunte le principali configurazioni utilizzate.

Tabella 2.5 – Parametri considerati nella campagna di simulazioni.

Parametro	**Configurazioni**
Gap	G1 = 100 mm; G2 = 200 mm; G3 = 300 mm
Flush	F-1; F0; F1, con passo di 100 mm
Rigidezza	R-15; Rnom; R+15
Smorzamento	S-15; Snom; S+15
Rigidezza nominale	500 N/m
Smorzamento nominale	10 N·s/m
Lunghezza della molla	0,638 m
Diametro ruota	800 mm
Raggio ruota	400 mm

Le differenti prove sono state organizzate in modo da poter confrontare configurazioni nelle quali viene modificato un determinato parametro mantenendo invariati gli altri. Questa modalità consente di isolare l'effetto prodotto dalle variazioni di gap, flush, rigidezza e smorzamento sulla risposta del modello.

2.7 Acquisizione ed esportazione dei dati

Per ciascuna simulazione sono stati registrati gli andamenti temporali delle forze nei due Pin Joint associati alle sospensioni.

Working Model 2D permette di visualizzare direttamente tali segnali durante l'esecuzione della simulazione. I grafici presenti nel modello riportano le componenti della forza nelle direzioni X e Y e la relativa risultante.

Al termine delle simulazioni i dati sono stati esportati in file con estensione **.dta**, successivamente utilizzati per l'elaborazione in ambiente MATLAB.

I file sono stati denominati mantenendo la convenzione descritta nella sezione precedente, in modo che ciascun nome contenesse le informazioni necessarie per identificare automaticamente la configurazione di gap, flush, rigidezza e smorzamento associata alla prova.

I dati esportati da Working Model 2D costituiscono quindi il punto di partenza della procedura di elaborazione sviluppata in MATLAB, descritta nelle sezioni successive.

2.8 Elaborazione automatica dei dati in MATLAB

Per gestire in maniera sistematica l'insieme dei dati ottenuti dalle simulazioni è stato sviluppato un programma in ambiente **MATLAB**, costituito da un file principale e da diverse funzioni dedicate alle singole fasi dell'elaborazione.

Lo scopo del programma è automatizzare l'importazione, l'organizzazione e il confronto delle prove, riducendo la necessità di intervenire manualmente sui singoli file. La procedura permette inoltre di identificare automaticamente le differenti configurazioni di gap, flush, rigidezza e smorzamento attraverso la nomenclatura assegnata ai file.

Il file **main.m** costituisce il punto di partenza dell'intera procedura. All'avvio, il programma ricerca automaticamente tutti i file con estensione `.dta` presenti nella cartella di lavoro e procede alla loro importazione.

Per ciascun file viene innanzitutto analizzato il nome attraverso la funzione **riconosciNome.m**. La nomenclatura adottata è composta da quattro elementi separati dal carattere _, secondo la struttura:

Flush_Gap_Rigidezza_Smorzamento

Ad esempio, un file denominato:

F0_G2_R+15_Snom.dta

corrisponde a una prova caratterizzata da flush F0, gap G2, rigidezza aumentata del 15% e smorzamento nominale.

La funzione di riconoscimento suddivide automaticamente il nome del file nei quattro parametri e associa tali informazioni alla struttura contenente i dati della prova.

L'importazione dei dati numerici viene effettuata mediante la funzione **leggiDTA.m**. I file prodotti da Working Model 2D contengono, oltre al vettore temporale, le componenti delle forze associate ai due Pin Joint. Per ciascun punto di misura vengono quindi importate le componenti nelle direzioni X e Y e il modulo della forza.

Prima delle successive elaborazioni viene eliminata la parte iniziale di ogni acquisizione. In particolare, vengono scartati i primi **0,20 s** della simulazione, allo scopo di escludere il transitorio iniziale del modello. Dopo tale operazione, il vettore temporale viene nuovamente riportato a zero.

Le prove importate vengono successivamente ordinate automaticamente attraverso la funzione **ordinaProve.m**. L'ordinamento considera inizialmente la configurazione delle sospensioni e successivamente i valori di flush e gap.

Le cinque famiglie di configurazioni meccaniche considerate sono:

1. Rnom – Snom;
2. R+15 – Snom;
3. R-15 – Snom;
4. Rnom – S+15;
5. Rnom – S-15.

Per ciascuna famiglia vengono considerate le tre configurazioni di flush e le tre configurazioni di gap, ottenendo complessivamente **45 prove**.

L'organizzazione automatica dei file permette quindi di disporre di una struttura dati ordinata e direttamente utilizzabile dalle successive funzioni di analisi e confronto.

Al termine della procedura il programma salva la struttura contenente le prove importate e le informazioni associate in un file MATLAB denominato **prove_importate.mat**. Viene inoltre generato il file **ordine_prove.xlsx**, contenente una tabella riepilogativa delle prove e delle relative configurazioni.

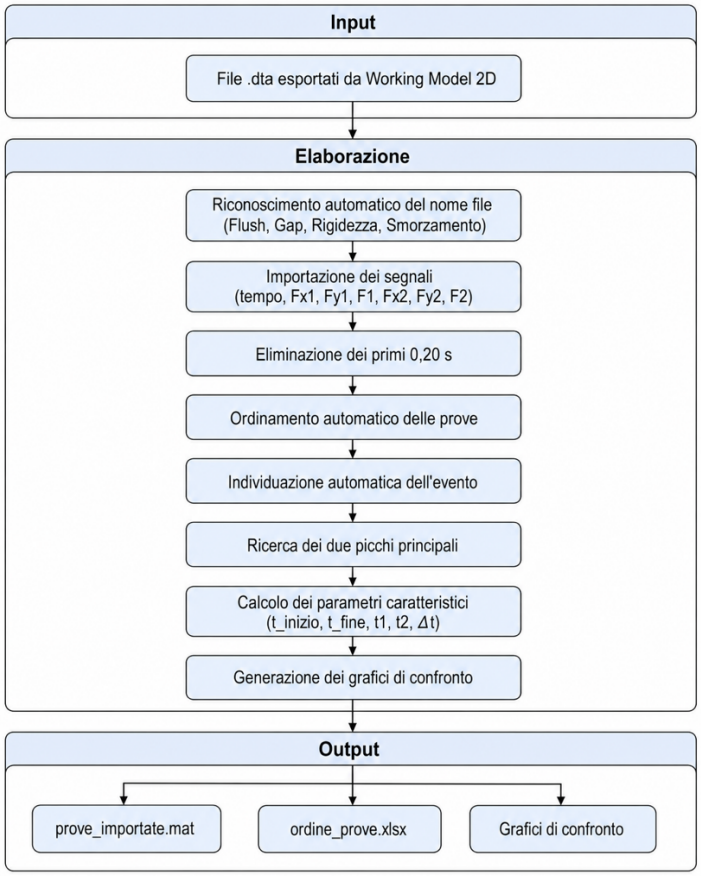


Figura 2.4 – Schema delle principali operazioni eseguite dal programma MATLAB.

2.9 Individuazione automatica dell'evento

Dopo l'importazione e l'ordinamento delle prove, il programma procede all'individuazione automatica dell'intervallo temporale associato al superamento della discontinuità.

Questa operazione viene effettuata mediante la funzione **trovaOstacolo.m**, sviluppata con l'obiettivo di identificare automaticamente i due eventi principali presenti nei segnali senza richiedere una selezione manuale da parte dell'utente.

Come primo passaggio viene costruito un segnale combinato a partire dai moduli delle forze registrate nei due punti di misura. Per ogni istante temporale viene considerato il valore massimo tra i due segnali.

Il segnale così ottenuto viene successivamente sottoposto a un'operazione di smussamento mediante una finestra mobile di **11 campioni**. Tale operazione permette di ridurre le piccole oscillazioni presenti nel segnale e di rendere più robusta l'individuazione dei massimi locali.

Successivamente vengono ricercati i massimi locali del segnale smussato. Non tutti i massimi individuati vengono però considerati significativi: il programma determina automaticamente una soglia che permette di distinguere gli eventi principali dalle oscillazioni di minore ampiezza.

La soglia viene calcolata considerando il livello mediano del segnale e la sua dispersione. Viene inoltre imposto un valore minimo della soglia pari al 20% dell'escursione tra il livello di base e il massimo del segnale.

Tra i massimi che superano tale soglia vengono quindi selezionati i due eventi principali. Per evitare che due oscillazioni appartenenti allo stesso fenomeno vengano interpretate come eventi distinti, viene imposta una distanza temporale minima tra i due picchi pari a **0,40 s**.

Una volta individuati i due eventi, questi vengono ordinati in base alla loro posizione temporale e vengono definiti un primo e un secondo picco principale.

La finestra temporale utilizzata per le successive analisi viene costruita considerando un intervallo che inizia **0,30 s prima del primo picco** e termina **0,25 s dopo il secondo picco**.

In questo modo viene isolata automaticamente la porzione del segnale maggiormente significativa ai fini dello studio, eliminando le parti che precedono e seguono il superamento della discontinuità.

Per ogni prova vengono memorizzati:

- l'istante di inizio dell'evento;
- l'istante del primo picco;
- l'istante del secondo picco;
- l'istante di fine dell'evento;
- i segnali delle forze dei due punti di misura limitati alla finestra temporale individuata.

L'utilizzo della stessa procedura automatica per tutte le simulazioni permette di mantenere un criterio uniforme nell'individuazione degli eventi e rende possibile il confronto tra le differenti configurazioni.

2.10 Confronto delle configurazioni di gap e definizione di Δt

Una volta individuato l'intervallo temporale di interesse, i segnali vengono utilizzati per confrontare le differenti configurazioni geometriche.

Per l'analisi del gap sono state sviluppate funzioni specifiche che permettono di confrontare le configurazioni **G1, G2 e G3** mantenendo invariati flush, rigidezza e smorzamento.

I segnali relativi alle tre configurazioni vengono rappresentati utilizzando lo stesso riferimento temporale. In particolare, il primo evento principale individuato dalla procedura automatica viene posto in corrispondenza di **t = 0**.

Questo allineamento permette di confrontare direttamente la posizione temporale degli eventi successivi e di evidenziare eventuali differenze associate alla variazione del gap.

Particolare attenzione è stata dedicata alla distanza temporale tra i due eventi principali. A tale scopo è stata definita la grandezza **Δt**, calcolata come differenza tra l'istante temporale del secondo picco e quello del primo picco:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

dove t_1 rappresenta l'istante del primo evento principale e t_2 rappresenta l'istante del secondo evento principale.

Il programma calcola automaticamente Δt per le configurazioni G1, G2 e G3 e ne riporta il valore direttamente nei grafici di confronto.

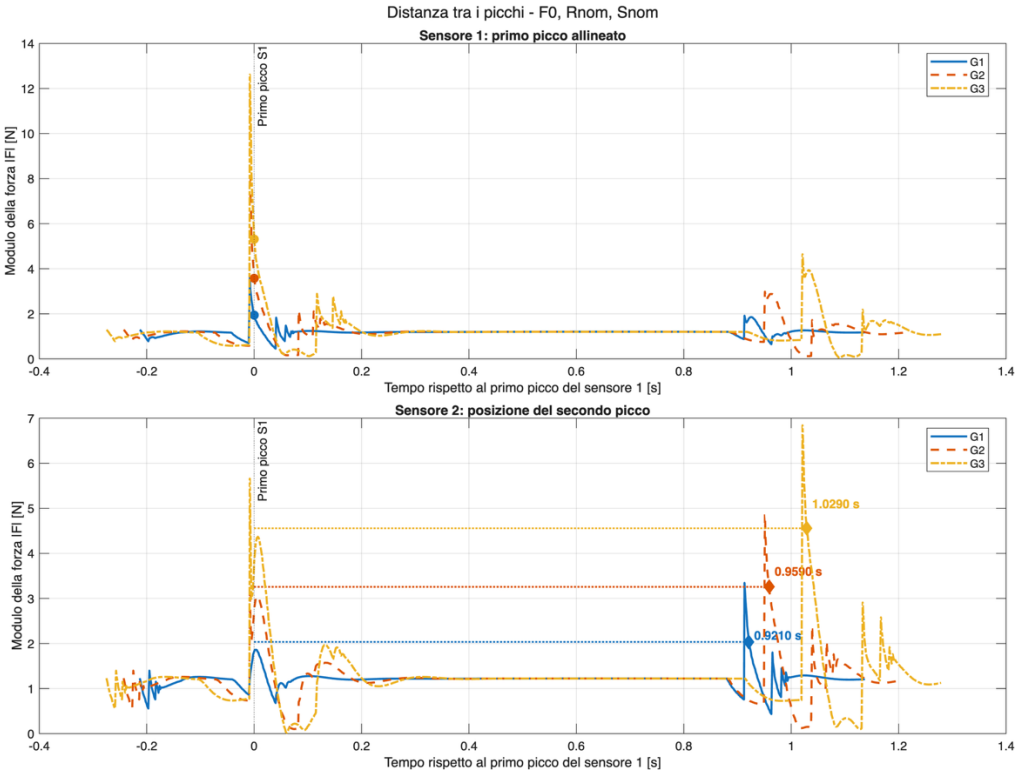


Figura 2.5 – Rappresentazione del parametro Δt utilizzato per il confronto delle differenti configurazioni di gap.

Nella rappresentazione grafica, il primo evento viene utilizzato come riferimento temporale comune, mentre sul segnale relativo al secondo punto di misura viene evidenziata la posizione del secondo evento. La distanza orizzontale tra i due istanti rappresenta il valore di Δt.

L'analisi di tale parametro è particolarmente utile per lo studio del gap, poiché una modifica della distanza geometrica tra le superfici determina una variazione della dinamica con cui il sistema attraversa la discontinuità e può quindi riflettersi sulla distanza temporale tra gli eventi rilevati.

Oltre ai grafici dedicati alla distanza temporale, il programma genera confronti delle curve complete relative ai due punti di misura. Per ciascuna combinazione di flush e parametri delle sospensioni vengono sovrapposti i segnali relativi a G1, G2 e G3, consentendo di confrontarne direttamente forma, ampiezza ed evoluzione temporale.

Una procedura analoga è stata predisposta per il confronto delle configurazioni di flush, mantenendo costanti gap, rigidezza e smorzamento e confrontando le condizioni F-1, F0 e F1.

I grafici ottenuti attraverso tali procedure costituiscono la base per l'analisi e la discussione dei risultati presentati nel capitolo successivo.

Capitolo 3 Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono analizzati e discussi i principali risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate in Working Model 2D e successivamente elaborate mediante il programma sviluppato in MATLAB.

In una prima fase l'attenzione viene concentrata sull'influenza del **gap** sulla risposta del sistema. A tale scopo vengono confrontate le configurazioni G1, G2 e G3 mantenendo invariati gli altri parametri del modello, in modo da isolare l'effetto prodotto dalla sola variazione della distanza tra le due superfici.

Come configurazione di riferimento è stata scelta la condizione caratterizzata da **flush F0, rigidezza nominale Rnom e smorzamento nominale Snom**. In tali condizioni, le configurazioni G1, G2 e G3 corrispondono rispettivamente a gap pari a 100 mm, 200 mm e 300 mm.

L'analisi viene effettuata inizialmente confrontando qualitativamente l'andamento temporale delle forze nei due punti di misura e, successivamente, considerando la distanza temporale Δt tra i due eventi principali individuati dal programma.

3.1 Analisi dei segnali al variare del gap

In una prima fase è stata analizzata l'influenza del **gap** sulla risposta dinamica del sistema. A tale scopo sono state confrontate le configurazioni G1, G2 e G3 mantenendo invariati gli altri parametri del modello, in modo da ricondurre le differenze osservate alla sola variazione della distanza orizzontale tra le due superfici.

Come caso rappresentativo è stata scelta la configurazione caratterizzata da **flush F0, rigidezza nominale Rnom e smorzamento nominale Snom**. In tali condizioni, G1, G2 e G3 corrispondono rispettivamente a gap pari a 100 mm, 200 mm e 300 mm.

In Figura 3.1 sono riportati i segnali relativi alle tre configurazioni per entrambi i sensori associati alle sospensioni.

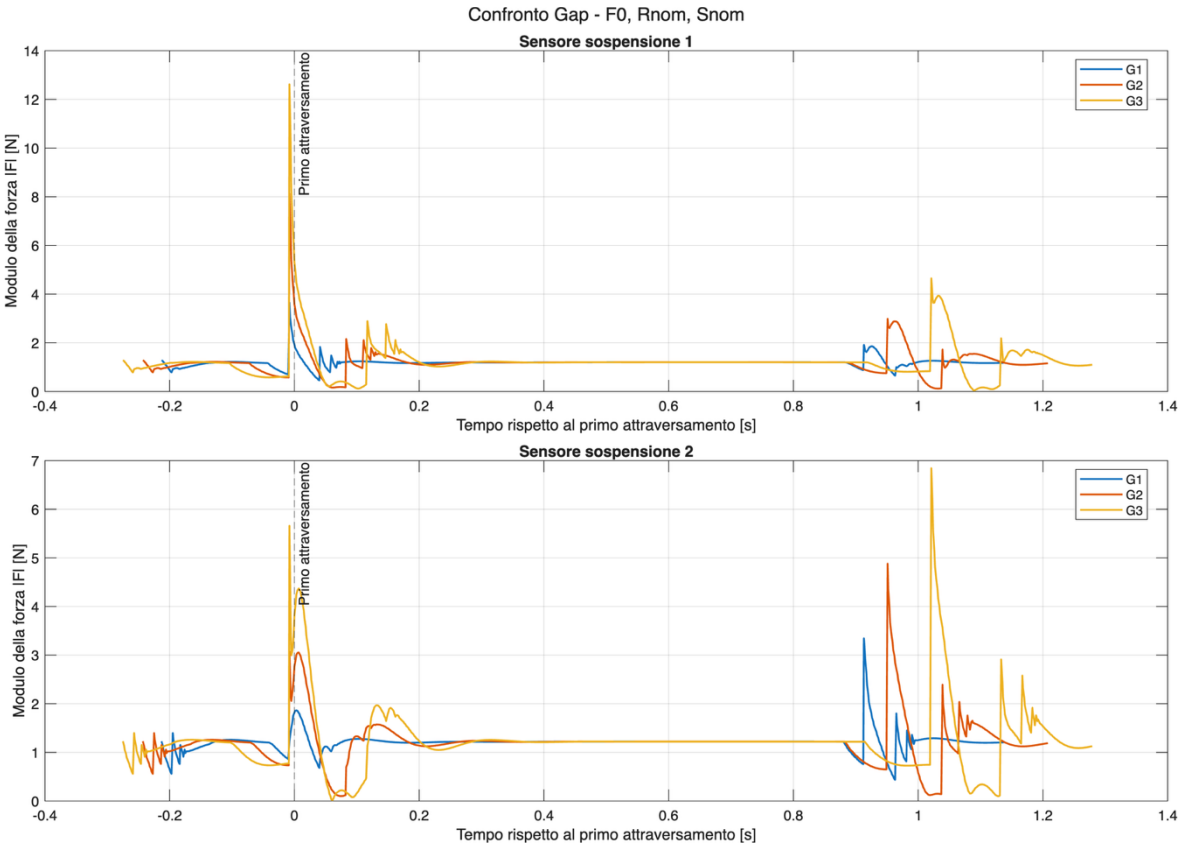


Figura 3.1 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni G1, G2 e G3 nella condizione F0 – Rnom – Snom.

Per rendere direttamente confrontabili le tre prove, i segnali sono stati allineati rispetto al primo evento principale, posto in corrispondenza di $t = 0$.

Dal confronto emerge innanzitutto che la variazione del gap modifica la forma della risposta dinamica del sistema. Le tre configurazioni presentano infatti differenze nell'ampiezza dei transitori e nelle oscillazioni che seguono il superamento della discontinuità. In particolare, la configurazione G3, caratterizzata dal gap maggiore, presenta in diversi tratti una risposta più pronunciata rispetto alle configurazioni G1 e G2.

Un elemento particolarmente interessante è osservabile nel tratto di segnale che precede il primo evento principale. Prima del picco posto in corrispondenza di $t = 0$, si osserva infatti una progressiva diminuzione della forza. L'istante in cui ha inizio tale discesa varia in funzione della configurazione considerata: passando da G1 a G2 e successivamente a G3, il tratto discendente inizia progressivamente in anticipo rispetto al primo picco.

Questo comportamento risulta coerente con l'aumento dell'estensione orizzontale della discontinuità. Un gap maggiore comporta infatti una fase più estesa di attraversamento della zona compresa tra le due superfici e la variazione della forza associata a tale fase diventa visibile più precocemente rispetto all'istante scelto come riferimento.

La stessa caratteristica è osservabile in entrambi i segnali, sebbene con ampiezze e forme differenti. Il momento di inizio della diminuzione della forza costituisce quindi un primo elemento qualitativo attraverso il quale è possibile distinguere le configurazioni G1, G2 e G3.

Un'ulteriore differenza significativa emerge osservando la parte successiva dei segnali. Poiché il primo evento è stato allineato allo stesso istante per tutte le configurazioni, è possibile confrontare direttamente la posizione temporale del secondo evento principale. Quest'ultimo risulta progressivamente spostato verso tempi maggiori all'aumentare del gap.

Nel complesso, il confronto delle forme d'onda evidenzia quindi due effetti principali legati alla variazione del gap: da un lato, l'anticipo progressivo del tratto discendente che precede il primo evento; dall'altro, lo spostamento verso tempi maggiori del secondo evento principale. Quest'ultimo aspetto è stato successivamente analizzato in maniera quantitativa attraverso la definizione del parametro Δt.

3.2 Analisi della distanza temporale Δt

Per quantificare l'effetto della variazione del gap sulla posizione temporale degli eventi è stato considerato il parametro **Δt**, definito nel Capitolo 2 come la distanza temporale tra il primo e il secondo evento principale individuati durante il superamento della discontinuità.

In Figura 3.2 sono riportati i segnali relativi alle configurazioni G1, G2 e G3 nella condizione F0 – Rnom – Snom. Le tre prove sono allineate rispetto al primo evento, mentre nel grafico relativo al secondo sensore viene evidenziata la posizione temporale del secondo evento e il corrispondente valore di Δt.

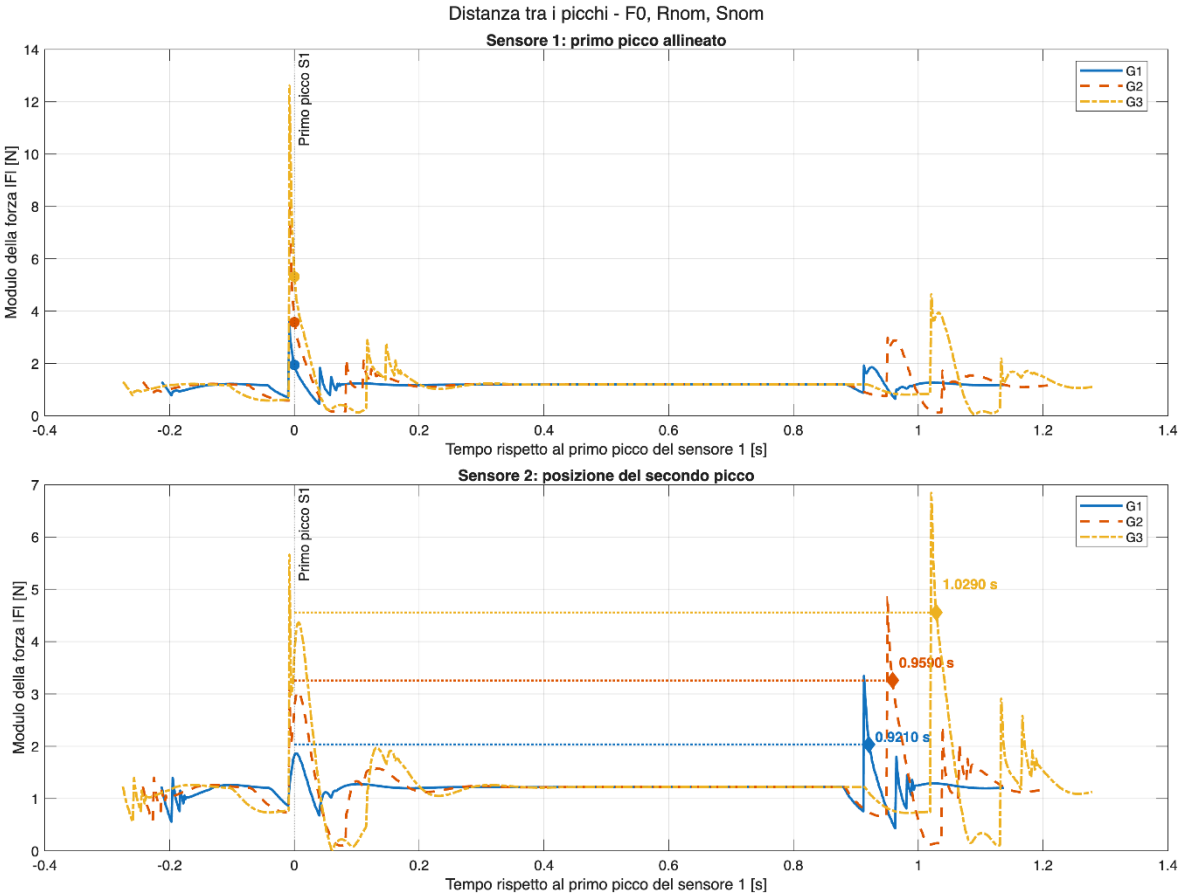


Figura 3.2 – Confronto della distanza temporale Δt per le configurazioni G1, G2 e G3 nella condizione F0 – Rnom – Snom.

I valori ottenuti sono riportati in Tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Valori di Δt ottenuti al variare del gap nella configurazione F0 – Rnom – Snom.

Configurazione	**Gap**	**Δt**
G1	100 mm	0,9210 s
G2	200 mm	0,9590 s
G3	300 mm	1,0290 s

Dai risultati emerge una crescita progressiva della distanza temporale Δt all'aumentare del gap. Per G1 viene infatti ottenuto un valore pari a 0,9210 s, che aumenta a 0,9590 s nella configurazione G2 e raggiunge 1,0290 s nel caso G3.

Tra G1 e G2 si osserva quindi un incremento pari a 0,0380 s, mentre tra G2 e G3 l'incremento risulta pari a 0,0700 s. Considerando le due configurazioni estreme, il passaggio da G1 a G3 determina un aumento complessivo di Δt pari a 0,1080 s.

L’andamento ottenuto risulta pertanto **monotono crescente**: all’aumentare del gap aumenta anche la distanza temporale tra i due eventi principali. Gli incrementi tra configurazioni consecutive non risultano tuttavia uguali; sulla base delle sole tre condizioni analizzate non è quindi possibile affermare l’esistenza di una relazione lineare tra il valore del gap e il parametro Δt.

La separazione tra i valori ottenuti per G1, G2 e G3 mostra comunque come Δt rappresenti un parametro utile per caratterizzare quantitativamente le differenti configurazioni geometriche. L’informazione relativa alla dimensione del gap non risulta quindi contenuta esclusivamente nella forma e nell’ampiezza dei segnali, ma anche nella posizione temporale degli eventi caratteristici.

Tale risultato completa quanto osservato qualitativamente nella sezione precedente. All’aumentare del gap, infatti, non soltanto il tratto discendente precedente al primo evento tende a iniziare più precocemente, ma aumenta anche la distanza temporale tra il primo e il secondo evento principale.

Il parametro Δt risulta pertanto particolarmente interessante ai fini del presente lavoro, poiché consente di associare alla variazione geometrica una grandezza quantitativa ricavabile automaticamente mediante l’elaborazione dei segnali.

3.3 Considerazioni sull’influenza del gap

L’analisi delle configurazioni G1, G2 e G3 ha evidenziato come la variazione del gap produca modifiche riconoscibili nella risposta dinamica del sistema.

Dal confronto delle forme d’onda emerge innanzitutto una variazione dell’ampiezza e dell’evoluzione temporale dei transitori associati al superamento della discontinuità. Un comportamento particolarmente significativo riguarda il tratto discendente che precede il primo evento principale: all’aumentare del gap, l’inizio di tale diminuzione della forza si manifesta progressivamente in anticipo rispetto all’istante del primo picco.

Tale andamento rappresenta un primo indicatore qualitativo della dimensione della discontinuità e risulta coerente con la maggiore estensione orizzontale della zona di gap.

Un secondo risultato, quantificabile direttamente, riguarda la posizione temporale del secondo evento principale. Nella configurazione F0 – Rnom – Snom, il parametro Δt aumenta infatti da 0,9210 s per G1 a 0,9590 s per G2, fino a raggiungere 1,0290 s per G3.

La variazione del gap può quindi essere riconosciuta attraverso due caratteristiche complementari del segnale: l’anticipo del tratto discendente precedente al primo evento e l’aumento della distanza temporale Δt tra i due eventi principali.

Tra queste, Δt rappresenta il parametro più direttamente utilizzabile dal punto di vista quantitativo, mentre la posizione di inizio del tratto discendente costituisce, nell’analisi attualmente svolta, un indicatore prevalentemente qualitativo.

Nel complesso, i risultati ottenuti mostrano quindi che il metodo analizzato è sensibile alla variazione del gap e permette di distinguere le configurazioni considerate attraverso caratteristiche sia morfologiche sia temporali dei segnali. Ciò costituisce una prima indicazione della possibilità di utilizzare la risposta dinamica del sistema per il riconoscimento e la caratterizzazione di differenti discontinuità geometriche.

3.4 Analisi dei segnali al variare del flush

Dopo aver analizzato l'influenza del gap, è stata valutata la risposta del sistema al variare del **flush**. A tale scopo sono state confrontate le configurazioni F-1, F0 e F1 mantenendo invariati gli altri parametri del modello, in modo da ricondurre le differenze osservate alla sola variazione della posizione verticale relativa tra le due superfici.

Come caso rappresentativo è stata scelta la configurazione caratterizzata da **gap G2, rigidezza nominale Rnom e smorzamento nominale Snom**. In questo modo, durante il confronto viene mantenuta costante l'estensione orizzontale della discontinuità, mentre viene modificato esclusivamente il disallineamento verticale tra i due elementi.

In Figura 3.3 sono riportati i segnali relativi alle tre configurazioni di flush per entrambi i punti di misura.

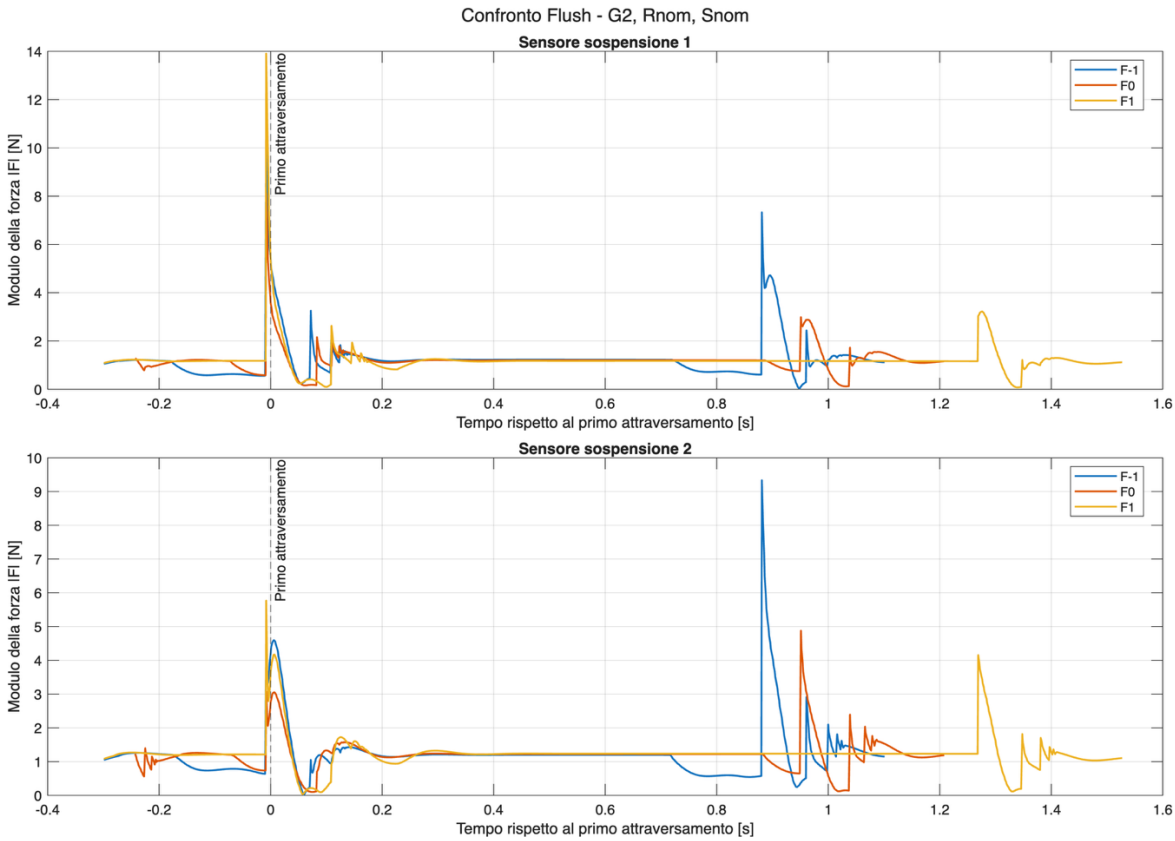


Figura 3.3 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni F-1, F0 e F1 nella condizione G2 – Rnom – Snom.

Analogamente a quanto effettuato per l'analisi del gap, i segnali sono stati allineati rispetto al primo evento principale, posto in corrispondenza di $t = 0$. Tale rappresentazione consente di confrontare direttamente la forma dei transitori e la loro evoluzione temporale nelle tre condizioni considerate.

Dal confronto emerge che la variazione del flush produce differenze evidenti nella risposta dinamica del sistema. Le configurazioni F-1, F0 e F1 presentano infatti andamenti differenti sia in corrispondenza del primo attraversamento sia nelle successive fasi del segnale.

Un primo elemento di interesse è osservabile già nel tratto che precede il primo evento principale. Le tre configurazioni mostrano infatti una diversa evoluzione del segnale prima del picco posto in corrispondenza di $t = 0$. A differenza di quanto osservato nell'analisi del gap, in questo caso l'estensione orizzontale della discontinuità viene mantenuta costante; le differenze presenti in questa fase risultano quindi associate alla diversa configurazione verticale delle due superfici.

La variazione del flush influenza pertanto la risposta del sistema già durante la fase di ingresso nella discontinuità. Tale comportamento si manifesta attraverso differenze nella forma del segnale e nell'andamento della forza precedente al primo evento principale.

Differenze ancora più evidenti emergono osservando i transitori successivi. Le tre condizioni presentano variazioni sia nell'ampiezza delle forze sia nella posizione temporale degli eventi caratteristici. In particolare, nella configurazione analizzata, l'evento successivo associato a F-1 si manifesta anticipatamente rispetto alla condizione F0, mentre nella configurazione F1 risulta spostato verso tempi maggiori. La configurazione F0 presenta quindi un comportamento intermedio rispetto alle altre due per quanto riguarda la posizione temporale di tale evento.

Anche l'ampiezza dei transitori risulta sensibile alla variazione del flush. La configurazione F-1 presenta, in alcune fasi del secondo attraversamento, una risposta più pronunciata, mentre F0 e F1 mostrano evoluzioni differenti sia per intensità sia per durata delle oscillazioni successive.

Il confronto evidenzia quindi come la modifica del disallineamento verticale tra le superfici non produca un'unica variazione localizzata del segnale, ma influenzi più caratteristiche della risposta dinamica, tra cui l'andamento precedente al primo attraversamento, l'ampiezza dei transitori e la loro distribuzione temporale.

Un comportamento qualitativamente analogo è stato riscontrato anche nei confronti effettuati mantenendo i gap G1 e G3 e lasciando invariati i parametri meccanici nominali. La configurazione G2 viene pertanto utilizzata come caso rappresentativo per evitare la ripetizione di grafici caratterizzati da informazioni sostanzialmente analoghe.

Nel complesso, i risultati mostrano quindi che le configurazioni F-1, F0 e F1 producono risposte distinguibili nei segnali analizzati. La variazione del flush costituisce pertanto un ulteriore parametro geometrico in grado di influenzare la risposta dinamica del modello.

3.5 Considerazioni sull'influenza del flush

L'analisi delle configurazioni F-1, F0 e F1 ha evidenziato come la variazione del flush produca modifiche riconoscibili nella risposta del sistema.

Dal confronto dei segnali si osservano differenze già nell'andamento che precede il primo attraversamento e, successivamente, nell'ampiezza, nella forma e nella posizione temporale dei transitori. La modifica della posizione verticale relativa tra le due superfici influenza quindi diverse caratteristiche della risposta registrata nei punti di misura.

Nella configurazione analizzata, caratterizzata da gap G2 e parametri meccanici nominali, le tre condizioni di flush risultano distinguibili attraverso l'evoluzione temporale dei segnali. In particolare, F-1, F0 e F1 presentano una diversa posizione degli eventi successivi al primo attraversamento, con la configurazione F0 che assume un comportamento intermedio rispetto alle altre due nelle condizioni considerate.

Le differenze osservate non risultano inoltre limitate alla sola configurazione G2 utilizzata come caso rappresentativo, ma sono riscontrabili qualitativamente anche nei confronti effettuati mantenendo i gap G1 e G3.

A differenza dell'analisi del gap, per il quale è stato possibile individuare nel parametro Δt una grandezza direttamente utilizzabile per quantificare la separazione tra le configurazioni considerate, nel caso del flush l'analisi svolta evidenzia principalmente differenze nella forma complessiva e nell'evoluzione temporale dei segnali.

Non viene pertanto individuato, nell'ambito della presente analisi, un singolo parametro quantitativo equivalente a Δt attraverso il quale caratterizzare direttamente il valore del flush. Le informazioni relative al disallineamento verticale emergono invece dall'osservazione congiunta di più caratteristiche della risposta dinamica.

Nel complesso, i risultati mostrano quindi che il sistema risulta sensibile anche alla variazione del flush. Le differenti configurazioni geometriche producono infatti risposte distinguibili, indicando la possibilità di ricavare dai segnali informazioni relative non soltanto alla distanza orizzontale tra le superfici, ma anche al loro disallineamento verticale.

3.6 Analisi dell'influenza della rigidezza

Dopo aver analizzato l'influenza dei parametri geometrici, è stato valutato l'effetto della **rigidezza delle sospensioni** sulla risposta dinamica del sistema. A tale scopo sono state confrontate le configurazioni R-15, Rnom e R+15, corrispondenti rispettivamente a una riduzione del 15%, al valore nominale e a un aumento del 15% della rigidezza, mantenendo invariati gli altri parametri.

Come caso rappresentativo è stata scelta la configurazione caratterizzata da **flush F0, gap G2 e smorzamento nominale Snom**. In questo modo, le differenze osservate possono essere ricondotte alla sola variazione della rigidezza.

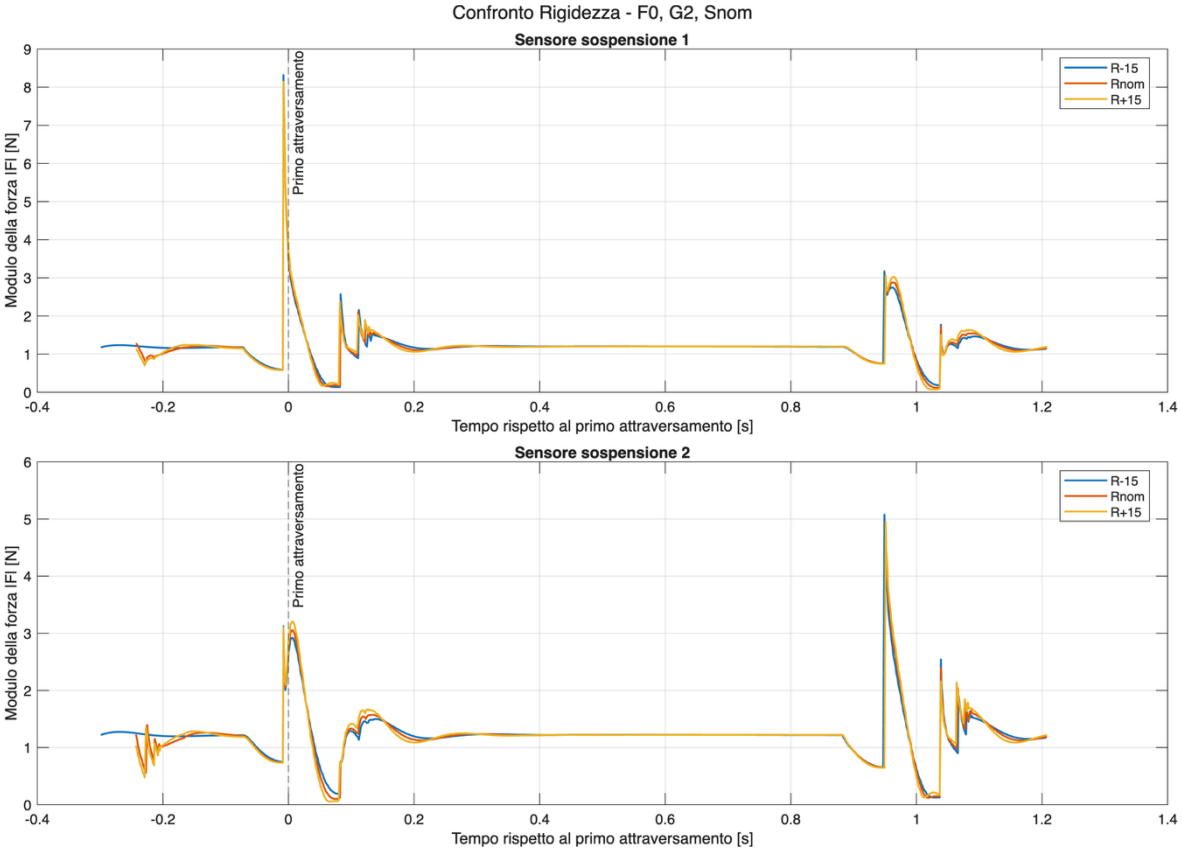


Figura 3.4 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni R-15, Rnom e R+15 nella condizione F0 – G2 – Snom.

Dal confronto dei segnali emerge innanzitutto una forte sovrapposizione tra le tre configurazioni. La posizione temporale dei principali eventi rimane sostanzialmente invariata al variare della rigidezza, mentre le differenze risultano concentrate soprattutto nell'ampiezza dei transitori e nella forma delle oscillazioni successive.

In corrispondenza del primo attraversamento le tre curve presentano infatti un andamento molto simile, con differenze relativamente contenute nei valori di forza raggiunti. Anche nelle fasi successive si osservano variazioni nell'ampiezza dei massimi e dei minimi e nella successiva evoluzione oscillatoria, senza tuttavia evidenziare spostamenti temporali paragonabili a quelli osservati modificando il gap o il flush.

Un comportamento analogo è osservabile in corrispondenza del secondo attraversamento. Le tre configurazioni mantengono una posizione temporale pressoché coincidente degli eventi principali, mentre risultano presenti differenze di ampiezza tra R-15, Rnom e R+15. L'ordine relativo delle ampiezze non risulta tuttavia necessariamente identico in tutti i transitori e nei due punti di misura, indicando che l'effetto della rigidezza si manifesta principalmente attraverso una modifica della risposta dinamica complessiva piuttosto che mediante un semplice incremento o decremento uniforme della forza.

L'analisi degli ulteriori confronti effettuati per differenti configurazioni di gap e flush mostra un comportamento qualitativamente simile: la variazione della rigidezza modifica principalmente l'intensità e la forma locale dei transitori, mentre la struttura temporale generale del segnale rimane sostanzialmente invariata.

Nel complesso, la variazione della rigidezza nell'intervallo considerato influenza quindi la risposta del modello, ma in misura meno evidente rispetto alle variazioni geometriche precedentemente analizzate. Questo risultato è particolarmente importante perché indica che le caratteristiche temporali utilizzate per distinguere le differenti condizioni geometriche risultano relativamente stabili anche in presenza di una moderata variazione della rigidezza delle sospensioni.

3.7 Analisi dell'influenza dello smorzamento

L'ultimo parametro meccanico considerato riguarda lo **smorzamento delle sospensioni**. Sono state confrontate le configurazioni S-15, Snom e S+15, corrispondenti rispettivamente a una riduzione del 15%, al valore nominale e a un aumento del 15% dello smorzamento, mantenendo nominale la rigidezza.

Anche in questo caso è stata scelta come configurazione rappresentativa la condizione caratterizzata da **flush F0, gap G2 e rigidezza nominale Rnom**.

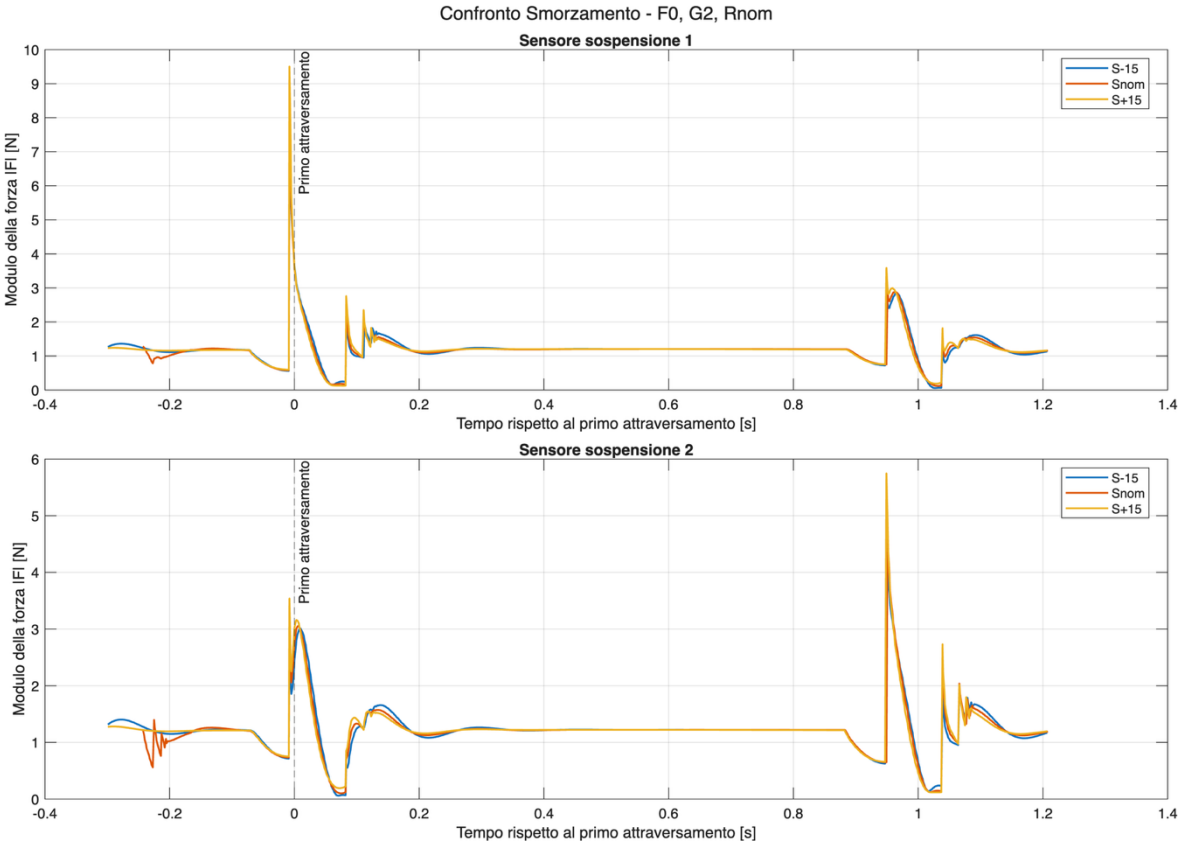


Figura 3.5 – Confronto dei segnali relativi alle configurazioni S-15, Snom e S+15 nella condizione F0 – G2 – Rnom.

Analogamente a quanto osservato per la rigidezza, i segnali relativi alle tre configurazioni di smorzamento presentano una notevole sovrapposizione. Gli eventi principali si verificano sostanzialmente negli stessi istanti temporali, mentre le differenze sono maggiormente concentrate sull'ampiezza e sulla forma dei transitori.

In corrispondenza del primo attraversamento, la variazione dello smorzamento determina differenze contenute nella risposta dei due punti di misura. La forma generale del segnale e la posizione temporale dell'evento rimangono infatti sostanzialmente invariate, mentre si osservano variazioni nell'ampiezza dei picchi e nell'evoluzione delle oscillazioni immediatamente successive.

Le differenze diventano maggiormente visibili in alcune fasi del secondo attraversamento. In particolare, nel segnale relativo alla seconda sospensione, le diverse configurazioni producono valori di picco differenti, con la condizione S+15 che, nel caso rappresentato, presenta un transitorio più pronunciato. Anche in questo caso, tuttavia, la posizione temporale dell'evento rimane pressoché coincidente per le tre configurazioni.

La variazione dello smorzamento influenza quindi soprattutto l'intensità dei transitori e la modalità con cui il sistema evolve dopo il superamento della discontinuità, senza modificare in maniera sostanziale la posizione temporale degli eventi principali.

I confronti effettuati anche nelle altre configurazioni di gap e flush mostrano complessivamente un comportamento analogo. Le differenze tra S-15, Snom e S+15 risultano infatti maggiormente associate alla forma e all'ampiezza della risposta piuttosto che a variazioni significative della struttura temporale del segnale.

Nel complesso, l'analisi mostra che anche lo smorzamento esercita un'influenza sulla risposta dinamica del modello, ma le variazioni del ±15% considerate non modificano in maniera sostanziale gli istanti caratteristici associati al superamento della discontinuità. Come osservato per la rigidezza, questo risultato suggerisce che le principali caratteristiche temporali utilizzate nell'analisi delle variazioni geometriche mantengono una buona stabilità anche al variare moderato dei parametri meccanici delle sospensioni.

Capitolo 4 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo lo studio di un principio di misura finalizzato al riconoscimento e alla caratterizzazione di discontinuità geometriche riconducibili a differenti condizioni di **gap e flush** tra due superfici adiacenti.

A tale scopo è stato utilizzato un modello dinamico bidimensionale sviluppato in ambiente Working Model 2D, costituito schematicamente da un corpo centrale, due ruote e due sistemi di sospensione. Il passaggio del modello attraverso differenti configurazioni geometriche ha permesso di ottenere segnali di forza successivamente esportati ed elaborati mediante un programma sviluppato in MATLAB.

La campagna di simulazioni ha previsto la variazione delle configurazioni di gap e flush e, successivamente, la modifica dei parametri meccanici delle sospensioni, in particolare rigidezza e smorzamento. L'elaborazione automatica dei segnali ha consentito di organizzare le prove, individuare gli eventi principali associati al superamento della discontinuità e confrontare in maniera sistematica le differenti configurazioni considerate.

I risultati più significativi sono emersi dall'analisi del **gap**. Il confronto tra le configurazioni G1, G2 e G3 ha evidenziato variazioni riconoscibili sia nella forma dei segnali sia nella loro evoluzione temporale. In particolare, all'aumentare del gap è stato osservato un progressivo anticipo del tratto discendente che precede il primo evento principale. Tale comportamento risulta coerente con l'aumento dell'estensione orizzontale della discontinuità e rappresenta un primo elemento qualitativo utile per distinguere le diverse condizioni geometriche.

Un risultato particolarmente rilevante è stato ottenuto attraverso l'analisi della distanza temporale **Δt** tra i due eventi principali. Nella configurazione F0 – Rnom – Snom, il parametro Δt aumenta infatti da 0,9210 s per G1 a 0,9590 s per G2, fino a raggiungere 1,0290 s per G3. L'andamento risulta quindi monotono crescente e mostra come la variazione del gap possa essere associata a una caratteristica temporale direttamente ricavabile dai segnali.

L'analisi del **flush** ha mostrato anch'essa una sensibilità del sistema alle variazioni geometriche introdotte. Le configurazioni F-1, F0 e F1 producono infatti risposte differenti nell'andamento precedente al primo attraversamento, nell'ampiezza e nella forma dei transitori e nella posizione temporale degli eventi successivi. A differenza di quanto ottenuto per il gap, tuttavia, nell'ambito dell'analisi svolta non è stato individuato un singolo parametro quantitativo equivalente a Δt attraverso il quale caratterizzare direttamente il valore del flush. La distinzione tra le configurazioni emerge quindi principalmente dall'analisi complessiva della forma e dell'evoluzione temporale dei segnali.

È stata inoltre valutata l'influenza delle caratteristiche meccaniche delle sospensioni. Le variazioni del ±15% della **rigidezza** e dello **smorzamento** modificano principalmente l'ampiezza dei transitori e la forma locale delle oscillazioni, mentre gli istanti temporali associati agli eventi principali rimangono sostanzialmente invariati. Questo risultato risulta significativo perché indica che le caratteristiche temporali utilizzate per distinguere le differenti configurazioni geometriche mantengono una relativa stabilità anche in presenza di moderate variazioni dei parametri meccanici del sistema.

Nel complesso, i risultati ottenuti mostrano quindi che la risposta dinamica del modello contiene informazioni utilizzabili per distinguere differenti condizioni di gap e flush. In particolare, l'analisi temporale si è dimostrata particolarmente efficace per la caratterizzazione del gap, per il quale è stato possibile individuare nel parametro Δt una grandezza quantitativa sensibile alla variazione geometrica.

Il lavoro svolto deve tuttavia essere considerato come una fase preliminare di studio del principio di misura. Il modello utilizzato rappresenta infatti una schematizzazione bidimensionale del sistema reale e le dimensioni di gap e flush introdotte nelle simulazioni sono state scelte con lo scopo di evidenziare il comportamento dinamico del modello, senza rappresentare direttamente le tolleranze normalmente presenti negli accoppiamenti di una carrozzeria automobilistica.

Un possibile sviluppo futuro consiste pertanto nell'estendere l'analisi a configurazioni geometriche caratterizzate da variazioni dimensionali più ridotte e maggiormente rappresentative di un'applicazione reale. Sarebbe inoltre utile verificare sperimentalmente il principio mediante la realizzazione di un prototipo fisico e confrontare i risultati ottenuti con quelli del modello numerico.

Ulteriori sviluppi potrebbero riguardare la ricerca di parametri quantitativi specifici anche per la caratterizzazione del flush, l'analisi della ripetibilità delle misure e la valutazione della sensibilità del metodo rispetto ad altri fattori, quali la velocità di attraversamento, la presenza di rumore nei segnali e ulteriori variazioni delle caratteristiche meccaniche del sistema.

In conclusione, il lavoro svolto ha permesso di verificare la capacità del metodo proposto di rilevare variazioni della geometria della discontinuità attraverso l'analisi della risposta dinamica del sistema. I risultati ottenuti costituiscono quindi una base per il successivo sviluppo e la possibile validazione sperimentale di un dispositivo destinato alla misura e al controllo di gap e flush tra pannelli adiacenti.

Bibliografia

[1] European Economic and Social Committee (EESC), *Digitalising European Industry – Evidence from the Manufacturing Industry*, report tecnico, 2020.

[2] V. Duraiswamy, F. Campean, S. Harris and J. E. Munive-Hernandez, "Development of a methodology for robust evaluation of perceived quality of vehicle body panel gaps," in *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, pp. 237–248, 2018. DOI: 10.21278/idc.2018.0432.

[3] E. Minnetti, P. Chiariotti, N. Paone, G. Garcia, H. Vicente, L. Violini and P. Castellini, "A Smartphone Integrated Hand-Held Gap and Flush Measurement System for in Line Quality Control of Car Body Assembly," *Sensors*, vol. 20, no. 11, art. 3300, 2020. DOI: 10.3390/s20113300.

[4] J. Kholkhujaev, G. Maculotti, G. Genta, A. Covacci, M. Galetto and J. Inoyatkhodjaev, "Non-Contact Articulated Robot-Integrated Gap and Flushness Measurement System for Automobile Assembly," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 86528–86541, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3199066.

[5] L. H. Pham, D. N. N. Tran, J. Y. Byun, C. H. Rhie and J. W. Jeon, "A Smartphone-Based Laser Measuring System for Gap and Flush Assessment in Car Body," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 7, pp. 6297–6307, 2021. DOI: 10.1109/TIE.2020.2992971.