



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS)

**Analisi agli elementi finiti e sviluppo,
ottimizzazione, progettazione
(preliminare) di ruote per rover
lunari pressurizzati.**

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesista: 256812 – SAPONARO PIACENTE AURELIO

Relatore: PAGANI ALFONSO (DIMEAS)

Correlatori: PETROLO MARCO (DIMEAS)
PALAIA GIUSEPPE (DIMEAS)
AZZARA RODOLFO (DIMEAS)

Anno Accademico 2025/2026

Abstract

L'esplorazione lunare di lunga durata richiede rover pressurizzati in grado di garantire mobilità, affidabilità e sicurezza dell'equipaggio in un ambiente caratterizzato da vuoto, temperature estreme e presenza di regolite abrasiva. In tale contesto, la ruota rappresenta un sottosistema critico poiché deve coniugare capacità di carico, rigidità radiale controllata, durabilità e massa contenuta, senza ricorrere a pneumatici tradizionali. Questa tesi, inserita nel progetto Space It Up!, propone un approccio numerico per lo sviluppo e la valutazione di architetture di ruota per rover lunari pressurizzati mediante analisi agli elementi finiti. Il lavoro è strutturato attorno a un workflow parametrico e automatizzato che integra modellazione CAD, generazione dei modelli FEM e post-processing dei risultati. Sono state definite tre architetture di riferimento (ruota a razze piane, ruota a razze curve e ruota a pannelli cilindrici), accomunate da una geometria anulare con cilindro interno ed esterno e differenziate dalla morfologia degli elementi di collegamento. A partire da un insieme di variabili geometriche con significato fisico diretto (raggio esterno, rapporto tra raggio interno ed esterno, larghezza assiale, spessore uniforme e numero di elementi ripetuti), è stato costruito uno spazio di progetto discreto e sono state generate automaticamente numerose configurazioni, dell'ordine di alcune centinaia per architettura. Per ciascuna configurazione sono state condotte analisi statiche non lineari con l'obiettivo di ottenere curve forza-spostamento e indicatori sintetici di prestazione, quali spostamenti a carichi target e rigidità equivalente. Il post-processing è stato automatizzato a partire dagli output numerici e organizzato in un dataset strutturato, predisposto per analisi quantitative successive. I risultati evidenziano l'influenza dei principali parametri geometrici sulla deformabilità globale e consentono un confronto coerente tra architetture a parità di livelli parametrici. In prospettiva, il workflow sviluppato è pensato per essere esteso a ulteriori campagne numeriche e a condizioni di carico più complesse, al fine di consolidare criteri di progetto e supportare la selezione di configurazioni promettenti per ruote destinate a rover pressurizzati.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore, il Prof. Alfonso Pagani, e i miei correlatori, il Prof. Marco Petrolo, Giuseppe Palaia e Rodolfo Azzara, per avermi seguito durante lo sviluppo di questo lavoro di tesi. Un sentito ringraziamento va inoltre al Prof. Enrico Zappino, a Karim Abu Salem e a tutto il gruppo Space It Up! per la disponibilità e per avermi dato la possibilità di approfondire un argomento che mi appassiona e che guarda a una delle frontiere più affascinanti dell'esplorazione spaziale.

Un ringraziamento va anche a Simone Ilardo e Ivan Perković, che in ambito lavorativo mi hanno dato la possibilità di sviluppare e approfondire concretamente le mie competenze nell'analisi FEM, contribuendo alla mia crescita professionale e ingegneristica.

A Roberto va il mio ringraziamento più grande, per essermi stato accanto durante i mesi intensi in cui ho portato a termine questa tesi e, soprattutto, negli anni precedenti, non sempre semplici. Grazie per avermi sostenuto, incoraggiato e per avermi accompagnato con pazienza anche nei momenti più difficili.

Ringrazio i miei genitori, Giammarco e Clara, per avermi sostenuto e incoraggiato nello studio fin dall'inizio di questo lungo percorso, e i miei fratelli, Mino e Silvia, per essermi sempre stati vicini.

Un saluto particolarmente affettuoso va ai miei nipoti, che per anni hanno continuato a chiedermi: «Zio, ma quando finisci l'università?». Ecco, finalmente posso rispondere.

Ringrazio Antonella ed Enrico per i momenti di serenità, compagnia e leggerezza che mi hanno regalato anche nel mezzo dei periodi più impegnativi.

Un ringraziamento va anche a Nicolò, per il confronto quotidiano e per aver contribuito a rendere più leggere molte giornate di lavoro.

Infine, ringrazio tutti coloro che hanno continuato a chiedermi «come va la tesi?», anche nei periodi in cui la risposta dipendeva principalmente dalla convergenza di OptiStruct.

Abbreviations

CAD Computer-Aided Design

CCW Circular-Cell Wheel

CSW Curved-Spoke Wheel

CSV Comma-Separated Values

DOE Design of Experiments

FEM Finite Element Method

KPI Key Performance Indicator

LPR Lunar Pressurized Rover

MFRA Modal Frequency Response Analysis

NL Nonlinear

OLS Ordinary Least Squares

OOF Out-of-Fold

QC Quality Control

RBE2 Rigid Body Element, Type 2

RBE3 Rigid Body Element, Type 3

RMSE Root Mean Square Error

RSW Rounded Shell Wheel

SAW Solid Annular Wheel

SPC Single-Point Constraint

SSW Straight-Spoke Wheel

STEP Standard for the Exchange of Product model data

Indice

Abstract	i
Ringraziamenti	ii
Abbreviations	iii
1 Introduzione	1
1.1 Contesto dell'esplorazione lunare	1
1.2 Rover lunari pressurizzati	2
1.3 Obiettivi della tesi	3
1.4 Inquadramento nel progetto Space It Up!	5
1.5 Struttura della tesi	6
2 Stato dell'arte	7
2.1 Perimetro dello stato dell'arte	7
2.2 Lezioni dalle esperienze storiche	7
2.2.1 Ruote per veicoli lunari: differenze architetture e requisiti di missione	7
2.2.2 Fatica, impatti e concentrazioni di tensione	9
2.2.3 Implicazioni per rover di maggiore massa	9
2.3 Famiglie di ruote deformabili e loro principi strutturali	10
2.3.1 Ruote metalliche a rete	11
2.3.2 Ruote a elementi elastici metallici	11
2.3.3 Spring tire e architetture a materiale superelastico	12
2.3.4 Ruote airless a raggi e strutture cellulari	12
2.4 Criteri di selezione per un rover pressurizzato	13
2.4.1 Trazione e geometria del contatto	13
2.4.2 Capacità di carico e rigidità radiale	13
2.4.3 Durabilità e carichi localizzati	13
2.4.4 Compatibilità ambientale	14
2.4.5 Massa, producibilità e verificabilità	14
2.5 Posizionamento delle architetture considerate nella tesi	15

3	Impostazione dello studio e strategia di modellazione	17
3.1	Configurazione di riferimento e limiti della campagna	18
3.2	Architetture considerate	20
3.3	Spazio di progetto	21
3.4	Famiglie di analisi	22
3.5	Indicatori di prestazione	23
4	Modellazione CAD parametrica e rappresentazione delle architetture	24
4.1	Ruolo della modellazione CAD nel lavoro	24
4.2	Generazione parametrica delle geometrie in FreeCAD	25
4.3	Automazione ed esportazione delle configurazioni	25
4.4	Separazione tra workflow CAD e workflow FEM diretto	26
5	Generazione diretta dei modelli FEM e impostazione delle analisi	27
5.1	Workflow di generazione diretta dei modelli FEM	27
5.2	Definizione parametrica della mesh	28
5.2.1	Coordinate nodali, topologia e discretizzazione	28
5.2.2	Componenti strutturali e gruppi logici	29
5.2.3	Controlli geometrici e qualità della mesh	29
5.2.4	Studio di convergenza della mesh	30
5.3	Definizione del modello numerico	33
5.3.1	Materiali e proprietà	33
5.3.2	Elementi, spessori e componenti	35
5.3.3	Connessione del mozzo e RBE3	35
5.3.4	Piano di appoggio e contatto	36
5.3.5	Vincoli e casi di carico	37
5.4	Tipologie di analisi	37
5.4.1	Analisi statiche lineari	37
5.4.2	Analisi statiche non lineari	38
5.4.3	Analisi modali	39
5.4.4	Configurazioni di carico e posizionamento	39
5.5	Organizzazione dei deck e tracciabilità	40
5.5.1	Naming dei modelli	40
5.5.2	Manifest e metadati	40
5.5.3	Controlli preliminari di validità	40
6	Post-processing automatico e costruzione del dataset	41
6.1	Architettura del workflow di post-processing	41
6.2	Dati di input e tracciabilità	42
6.2.1	Output del solutore	42

6.2.2	Manifest e metadati	42
6.3	Estrazione delle grandezze di interesse	42
6.3.1	Risposta forza–spostamento	42
6.3.2	Massa e frequenze	43
6.3.3	Tensioni, deformazioni e grandezze locali	43
6.4	Costruzione dei KPI	43
6.4.1	Rigidezza e carichi target	43
6.4.2	Indicatori modali	44
6.4.3	Indicatori tensionali	45
6.5	Controlli di qualità e criteri di esclusione	45
6.6	Dataset finale e copertura della campagna	46
6.6.1	Struttura dei file	46
6.6.2	Casi disponibili e casi esclusi	46
6.6.3	Impiego nei confronti e nei modelli predittivi	47
7	Analisi di sensitività, risultati e modelli predittivi	48
7.1	Perimetro dei dati e criteri di confronto	48
7.2	Parte I: effetto delle scelte di modellazione	49
7.2.1	Collegamento al mozzo: RBE2 e RBE3	49
7.2.2	Effetto congiunto di non linearità, contatto e vincoli	51
7.2.3	Fase circonferenziale A1–A2	52
7.3	Parte II: costruzione dei modelli predittivi	54
7.3.1	Target, modelli candidati e validazione	54
7.3.2	KPI modali	55
7.3.3	Rigidezza statica lineare	56
7.3.4	Rigidezza secante non lineare	56
7.4	Lettura ingegneristica dello spazio parametrico	57
7.5	Sintesi dei risultati	58
8	Selezione dei candidati, ottimizzazione locale e verifica statica	60
8.1	Obiettivo della seconda fase	60
8.2	Screening massa–rigidezza, Pareto e selezione delle baseline	61
8.3	Mesh della seconda fase	63
8.4	Free-size: formulazione e parametri	64
8.5	Topography: formulazione e parametri	65
8.6	Matrice baseline, ottimizzazione e reanalysis	66
8.7	Risultati e reanalysis elastiche	67
8.8	Verifica STNL A1/A2 e robustezza di fase	71
8.9	Sintesi della verifica statica e passaggio alla verifica dinamica	74

9	Verifica dinamica comparativa delle baseline e delle varianti ottimizzate	76
9.1	Obiettivo e perimetro	76
9.2	Impostazione FEM della verifica dinamica	77
9.3	KPI dinamici e trattamento degli output	79
9.4	Confronto tra baseline e varianti ottimizzate	79
9.5	Ranking dinamico e shortlist	83
9.6	Limiti della valutazione dinamica	88
9.7	Sintesi	89
10	Conclusioni, limiti e sviluppi futuri	90
10.1	Risultati rispetto agli obiettivi e configurazioni promettenti	90
10.2	Contributo ingegneristico e metodologico	92
10.3	Limiti del lavoro	94
10.4	Sviluppi futuri	95
10.5	Considerazioni finali	97
A	Specificazione dei modelli predittivi	101
A.1	Variabili geometriche	101
A.2	Formulazioni e coefficienti	101
A.3	Artefatti riproducibili	104
B	Dataset, tracciabilità e controlli di qualità	105
B.1	Architettura dei dati	105
B.2	File principali	105
B.3	Criteri di esclusione	106
B.4	Curva del materiale	106

Elenco delle figure

1.1	Concetto del NASA Space Exploration Vehicle (SEV), con cabina pressurizzata integrata su chassis multi-ruota. Fonte: NASA/LaRC, Advanced Concepts Lab [6].	2
1.2	Schema della metodologia sviluppata nella tesi, dall'inquadramento del problema alla valutazione e selezione delle configurazioni di ruota mediante analisi FEM parametriche. Elaborazione dell'autore.	5
2.1	Ruota a rete metallica del Lunar Roving Vehicle Apollo; sono visibili la maglia deformabile e gli elementi di trazione. Immagine NASA, identificativo MSFC-7020255, di pubblico dominio [10].	8
2.2	Schematizzazione, non in scala, delle principali famiglie di ruote deformabili discusse nello stato dell'arte: (a) mesh metallica; (b) elementi elastici radiali; (c) maglia di molle; (d) struttura airless a raggi o celle. Elaborazione dell'autore sulla base della letteratura citata nel testo.	10
2.3	Collegamento tra requisiti del rover pressurizzato, scelte di parametrizzazione della ruota e indicatori strutturali utilizzati per il confronto delle architetture nel presente lavoro. Elaborazione dell'autore.	14
3.1	Rendering delle cinque famiglie parametriche considerate nella campagna FEM: Solid Annular Wheel (SAW), Rounded Shell Wheel (RSW), Straight-Spoke Wheel (SSW), Curved-Spoke Wheel (CSW) e Circular-Cell Wheel (CCW).	20
4.1	Workflow CAD parametrico impiegato nella fase preliminare per definire, verificare e rappresentare le architetture.	26
5.1	Workflow di generazione diretta dei modelli FEM adottato per la campagna finale.	27
5.2	Errore della mesh di produzione P rispetto al riferimento finale per i casi RBE3: P_2 per SAW, SSW e CSW; P_4 per RSW e CCW. Il colore rappresenta il rapporto tra errore e soglia di accettazione.	31

5.3	Evoluzione normalizzata della prima frequenza, della rigidità equivalente lineare e della rigidità secante a 4000 N con il raffinamento della mesh. Le ordinate sono normalizzate rispetto a q_{ref} e le curve statiche si riferiscono alla configurazione RBE3.	33
5.4	Legge dell'Al 7075-T6 impiegata nelle analisi non lineari. A sinistra è riportato il ramo plastico tabulato nel modello, espresso in funzione della deformazione plastica equivalente vera. A destra è mostrata la curva tensione vera–deformazione totale vera ricostruita aggiungendo il ramo elastico lineare e trasformando i punti plastici secondo l'Eq. (5.7).	35
5.5	Schema delle condizioni al contorno statiche e delle direzioni di carico. Il disegno è concettuale e non rappresenta la discretizzazione di una specifica famiglia.	37
6.1	Pipeline automatica dal risultato del solutore al dataset consolidato.	41
7.1	Distribuzione delle variazioni relative RBE2 rispetto a RBE3 per le coppie disponibili. La scala evidenzia la diversa sensibilità di RSW e CCW.	50
7.2	Differenza relativa tra rigidità secante STNL e rigidità equivalente ST ai due carichi di confronto.	52
7.3	Curve forza–spostamento rappresentative di una coppia ST–STNL quasi coincidente e di una coppia con elevata differenza. Le rette tratteggiate rappresentano la risposta lineare corrispondente.	53
7.4	Sensibilità della rigidità alla fase A2 rispetto ad A1. Per CCW sono riportati sia il confronto lineare sia il confronto STNL nel ramo RBE3 ritenuto utilizzabile.	54
8.1	Screening massa– k_{rob} sui risultati lineari RBE3 delle famiglie RSW–CCW. Il fronte nero indica il Pareto globale della seconda fase, i marker vuoti colorati indicano i Pareto intra-famiglia e le stelle evidenziano le baseline selezionate.	62
8.2	Confronto tra variazione di massa e variazione di rigidità equivalente nella reanalysis lineare A1.	68
8.3	Pattern rappresentativi dei campi free-size trasferiti in reanalysis.	70
8.4	Pattern rappresentativi delle variazioni di forma topografiche. I pattern ottenuti evidenziano direzioni di irrigidimento differenti tra le famiglie; la relazione con i percorsi di carico viene interpretata qualitativamente nel testo.	71
8.5	Rapporto tra spostamento finale al mozzo e baseline STNL per le soluzioni topografiche in A1 e A2.	73

9.1	FRF della compliance verticale al mozzo. (a) Confronto tra le baseline delle quattro famiglie della seconda fase. (b) Effetto delle varianti RSW TP-L e RSW FS-O rispetto alla baseline RSW, rappresentative delle differenti tendenze associate all'irrigidimento topografico e all'alleggerimento free-size.	82
9.2	Confronto massa–massima compliance dinamica al mozzo.	82
9.3	Confronto tra massima compliance dinamica al mozzo e indicatore di stress dinamico normalizzato.	83
9.4	Configurazioni con punteggio nominale più elevato nel ranking dinamico. .	87

Elenco delle tabelle

3.1	Famiglie di ruote considerate, acronimi adottati nel testo e numerosità geometrica della campagna.	20
3.2	Spazio di progetto consolidato per la campagna FEM.	21
3.3	Rappresentazione equivalente dei livelli geometrici adottati per la RSW. La parametrizzazione operativa resta basata su R_M , R_S/R_M e $\beta = B/R_e$; R_e e ϕ sono grandezze derivate usate per rendere il confronto dimensionale coerente con SSW, CSW e CCW.	22
3.4	Valori di N_C adottati per la CCW in funzione del rapporto ϕ	22
3.5	Famiglie di analisi previste nel workflow. Le fasi 2 sono applicate ai modelli per i quali la posizione circonferenziale del carico è rilevante.	23
5.1	Sintesi della topologia di mesh delle cinque famiglie.	28
5.2	Errore massimo della mesh di produzione P rispetto al riferimento finale: P_2 per SAW, SSW e CSW; P_4 per RSW e CCW. Per le analisi modali l'errore globale è il massimo sulle prime cinque frequenze strutturali; per le statiche è il massimo tra spostamento e rigidezza.	32
5.3	Non linearità, superficie di appoggio rigida e dispositivi numerici riscontrati nelle configurazioni del generatore corrente. Le sigle ST e STNL indicano rispettivamente analisi statica lineare e analisi statica non lineare.	39
6.1	File principali del dataset di post-processing.	46
6.2	Copertura dell'archivio consolidato dei risultati. Per le famiglie con due fasi circonferenziali, i conteggi delle colonne A e B aggregano le fasi 1 e 2 disponibili. I conteggi RSW e parte dei conteggi CCW includono varianti RBE2 e RBE3; le sigle MOD, ST e STNL indicano rispettivamente analisi modale, statica lineare e statica non lineare.	47
7.1	Variazione relativa della formulazione RBE2 rispetto a RBE3 su coppie corrispondenti. Per CCW le righe STNL derivano dal sottoinsieme con spessori comuni alle due formulazioni.	49
7.2	Variazione della rigidezza secante del modello non lineare con contatto rispetto alla rigidezza del modello lineare con appoggio equivalente.	51

7.3	Sensibilità della rigidezza alla fase circonferenziale, espressa come variazione A2 rispetto ad A1.	53
7.4	Errore OOF normalizzato sulla media [%] e formulazione migliore per i KPI modali. La validazione è raggruppata per geometria.	55
7.5	Prestazione OOF del migliore modello candidato per la rigidezza equivalente lineare, con soli risultati RBE3.	56
7.6	Prestazione OOF del migliore modello candidato per la rigidezza secante non lineare. Sono inclusi i soli casi A1/A2 RBE3 giudicati utilizzabili dopo i controlli di regolarità della curva.	56
7.7	Lettura progettuale sintetica dello spazio parametrico. Le indicazioni sono valide nel dominio campionato e non costituiscono regole di estrapolazione.	58
8.1	Baseline selezionate per la seconda fase nel dataset di screening lineare RBE3. La rigidezza robusta è definita in Eq. 8.2; i KPI riportati provengono dalla campagna parametrica e servono a documentare la scelta dei candidati, mentre la reanalysis della seconda fase è riportata separatamente nella Tab. 8.7.	63
8.2	Risoluzioni adottate nella seconda fase in continuità con la mesh convergence del Capitolo 5.	63
8.3	Impostazione metodologica delle ottimizzazioni free-size.	64
8.4	Impostazione metodologica delle ottimizzazioni topografiche.	65
8.5	Parametri dei domini topografici. In tutti i casi MINHGT=0.5; TP-O aggiunge il dominio esterno al dominio locale già presente in TP-L.	65
8.6	Matrice metodologica della seconda fase.	66
8.7	Baseline lineari della seconda fase.	67
8.8	Storia dell'obiettivo free-size: massa del dominio di design.	67
8.9	Storia dell'obiettivo topografico: spostamento totale del nodo di mozzo.	68
8.10	Reanalysis lineare A1 delle soluzioni free-size rispetto alla baseline lineare dello stesso modello.	69
8.11	Reanalysis lineare A1 delle soluzioni topografiche rispetto alla baseline lineare dello stesso modello.	69
8.12	Riferimenti STNL della seconda fase. La rigidezza secante è calcolata come $4000/ U_{\text{hub}} $; nelle verifiche A2 il riferimento numerico resta la baseline STNL del medesimo modello.	72
8.13	Reanalysis STNL A1/A2 delle soluzioni topografiche rispetto alla baseline STNL del medesimo modello.	72
8.14	Reanalysis STNL A2 delle soluzioni free-size FS-L rispetto alla baseline STNL del medesimo modello.	73

8.15	Audit delle reanalysis STNL FS-O. La disponibilità del deck o del monitor non è considerata sufficiente: la curva è usata solo quando lo spostamento del nodo di controllo è disponibile e coerente.	74
9.1	Perimetro reale delle configurazioni trasferite alla verifica dinamica. Tutte le MFRA utilizzano lo stato precaricato A1; la fase A2 resta una verifica statica esterna di robustezza.	77
9.2	Impostazione compatta dei deck MFRA utilizzati nel Capitolo 9.	78
9.3	KPI dinamici estratti dalle MFRA precaricate. La frequenza f_1 rappresenta la minima frequenza strutturale positiva ordinata dal file dei modi, mentre le risposte armoniche sono normalizzate rispetto a una forza verticale unitaria al mozzo.	80
9.4	Variazioni percentuali dei KPI dinamici rispetto alla baseline della stessa famiglia. Per $C_{z,max}$ e σ_{max}/F valori negativi indicano una riduzione della risposta dinamica.	80
9.5	Ranking dinamico sintetico delle prime dodici configurazioni, con le baseline mantenute come riferimento quando rientrano nell'ordinamento. Lo score combina massa, rigidità incrementale, massima compliance al mozzo e indicatore tensionale normalizzato; la prima frequenza positiva è riportata come indicatore complementare e non contribuisce al punteggio nominale. .	84
9.6	Contributi normalizzati dei primi otto casi del ranking nominale. I valori S_i sono adimensionali e compresi tra 0 e 1; un valore elevato indica un contributo favorevole per il KPI considerato.	85
9.7	Analisi di sensibilità dei pesi a KPI costanti. Lo scenario nominale usa i coefficienti dell'Eq. 9.5; lo scenario uniforme usa pesi 0.25 per ciascun KPI; lo scenario orientato alla massa usa $w_m = 0.45$, $w_{k_t} = 0.10$, $w_{C_z} = 0.25$ e $w_\sigma = 0.20$. In tutti i casi normalizzazione, popolazione e KPI restano invariati.	85
9.8	Effetto dell'inclusione della prima frequenza nel ranking. Questa prova modifica il set di KPI rispetto allo score nominale e non va interpretata come sola sensitivity dei pesi.	86
9.9	Shortlist per gli sviluppi successivi ottenuta dalla lettura congiunta di verifica statica, robustezza A1/A2, KPI dinamici, ranking nominale e sensitivity del ranking.	88
10.1	Sintesi delle configurazioni numericamente promettenti emerse dalla seconda fase. Le variazioni sono riferite alla baseline della medesima famiglia. . .	91
A.1	Dominio parametrico delle geometrie nominali presenti nel catalogo geometrico.	101

A.2	Coefficienti del modello power-law di base per la massa. Il fit usa i soli dati modali e i parametri geometrici applicabili a ciascuna famiglia.	102
A.3	Coefficienti del modello power-law di base per la prima frequenza strutturale.	102
A.4	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza equivalente lineare nei casi A1 RBE3.	102
A.5	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza equivalente lineare nei casi A2 RBE3.	103
A.6	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza secante a 2000 N nei casi A1 RBE3.	103
A.7	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza secante a 2000 N nei casi A2 RBE3.	103
A.8	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza secante a 4000 N nei casi A1 RBE3.	103
A.9	Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza secante a 4000 N nei casi A2 RBE3.	103
B.1	Copertura geometrica e perimetro qualitativo dell'archivio post-processato.	105
B.2	Campi principali usati per documentare l'effetto operativo dei criteri di qualità e inclusione.	106

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto dell'esplorazione lunare

Negli ultimi anni l'interesse per l'esplorazione della Luna è tornato centrale sia in ambito istituzionale sia industriale. Le architetture di esplorazione in sviluppo includono habitat di superficie, sistemi energetici, capacità di trasporto dei carichi e veicoli per la mobilità dell'equipaggio. In tale quadro, la mobilità di superficie rappresenta un elemento abilitante per il trasferimento di persone, materiali, strumenti scientifici e risorse tra siti di atterraggio, infrastrutture e aree operative [1].

La superficie lunare impone vincoli peculiari. L'assenza di atmosfera comporta il vuoto e l'impossibilità di utilizzare soluzioni basate sulla convezione per la gestione termica, mentre l'alternanza tra illuminazione e oscurità determina escursioni termiche elevate. A queste condizioni si sommano l'azione abrasiva e potenzialmente aderente della regolite, la presenza di particelle fini che possono penetrare nei meccanismi, l'esposizione alla radiazione solare e la gravità ridotta. Tali fattori influenzano contemporaneamente la scelta dei materiali, la progettazione dei meccanismi e l'affidabilità dei sottosistemi mobili [2], [3].

Per missioni di durata crescente, l'esplorazione locale tramite attività extraveicolari può risultare limitante in termini di autonomia, sicurezza e produttività. Veicoli in grado di trasportare equipaggio e carichi, proteggere i sistemi e garantire continuità operativa diventano quindi elementi chiave di una futura architettura lunare. Lo sviluppo di tali piattaforme richiede un approccio integrato che coinvolga struttura, sistemi, interazione con il terreno e affidabilità a lungo termine [1], [4].

La progettazione di sottosistemi apparentemente “maturi” in ambito terrestre, come le ruote, assume quindi un ruolo critico. In ambiente lunare vengono meno alcuni presupposti tipici dell'automotive, come l'impiego di pneumatici tradizionali e di materiali polimerici esposti, e diventano prioritari aspetti quali la resistenza al vuoto, alle temperature estreme, alla polvere abrasiva e alla fatica su cicli prolungati. La necessità di

conciliare capacità di carico, massa contenuta e adeguata trazione su regolite rende essenziale un processo di progettazione guidato da analisi strutturali e verifiche numeriche [2].

1.2 Rover lunari pressurizzati

I rover lunari pressurizzati (*Lunar Pressurized Rover*, LPR) si distinguono dai rover non pressurizzati per l'obiettivo primario di garantire un volume abitabile protetto e condizioni ambientali controllate per l'equipaggio. Questo requisito, insieme alla necessità di operare per periodi prolungati e a distanze maggiori rispetto al punto di atterraggio, determina un incremento significativo di massa, ingombri e complessità rispetto ai veicoli di mobilità leggera impiegati nelle missioni storiche. Di conseguenza, la catena di trazione e il sistema ruota devono essere dimensionati per carichi più elevati e per scenari operativi più vari [4], [5].

Un esempio concettuale di questa classe di veicoli è riportato in Figura 1.1, nella quale la cabina pressurizzata è integrata con uno chassis multi-ruota dedicato alla mobilità di superficie.

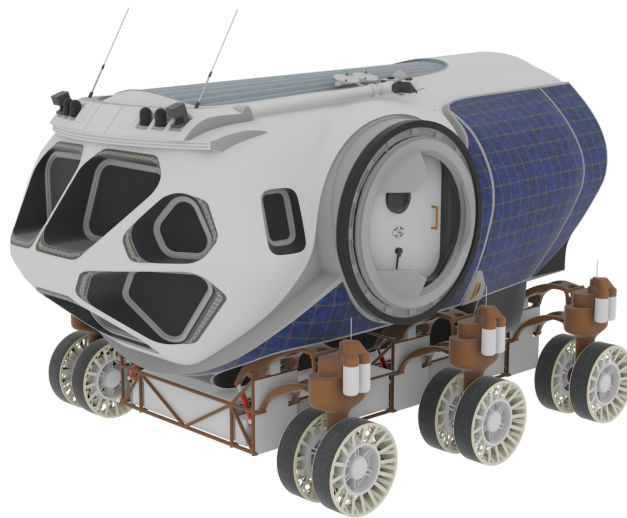


Figura 1.1: Concetto del NASA Space Exploration Vehicle (SEV), con cabina pressurizzata integrata su chassis multi-ruota. Fonte: NASA/LaRC, Advanced Concepts Lab [6].

Il sistema ruota svolge simultaneamente più funzioni: supporto del carico verticale del veicolo, generazione della trazione e della forza frenante, superamento di ostacoli e adattamento a un terreno deformabile. Le prestazioni su regolite sono definite dalla capacità di grip superficiale ma anche dalla gestione del cedimento del terreno (*sinkage*) e dalle resistenze al moto legate alla compattazione e allo scorrimento. Ne deriva che la ruota deve garantire un contatto efficace senza indurre eccessivo affondamento e senza introdurre picchi di tensione che riducano la vita a fatica [2], [7].

Dal punto di vista strutturale, una ruota per LPR deve soddisfare requisiti spesso in competizione tra loro:

- **Capacità di carico e rigidità controllata:** la ruota deve sostenere il carico per ruota previsto, in condizioni nominali e di picco, con una deformazione radiale compatibile con la cinematica del veicolo e con l'interazione ruota-terreno. Una ruota eccessivamente rigida può ridurre l'area di contatto e penalizzare la trazione; una ruota troppo deformabile può portare a instabilità, danneggiamenti locali e perdita di efficienza [2], [7].
- **Resistenza a condizioni ambientali estreme:** temperatura, vuoto e polvere limitano l'uso di soluzioni pneumatiche e di materiali non qualificati per l'esposizione diretta. Nello stato dell'arte delle ruote lunari sono quindi ricorrenti architetture non pneumatiche e soluzioni metalliche deformabili, come ruote a mesh metallica o a elementi elastici [2].
- **Robustezza a carichi localizzati e ostacoli:** durante il rotolamento la ruota può interagire con sassi e discontinuità del terreno, generando carichi locali significativi. La capacità di redistribuire tali carichi senza danni è un requisito centrale per l'affidabilità; le prove storiche sulle ruote deformabili mostrano infatti criticità associate alla fatica e alle concentrazioni di tensione in zone soggette a deformazioni ripetute o a impatti con ostacoli [2].
- **Massa e producibilità:** il sottosistema ruota contribuisce direttamente al budget di massa del veicolo. È quindi necessario valutare architetture e materiali anche in termini di massa strutturale e complessità realizzativa, mantenendo una configurazione producibile e ispezionabile. Tali aspetti sono rilevanti per un rover pressurizzato, nel quale mobilità, affidabilità e massa sono tra i principali driver di progetto [4], [5].

All'interno del progetto Space It Up! e delle attività del gruppo LPR, questa tesi si inserisce con l'obiettivo di sviluppare e valutare, mediante analisi agli elementi finiti, soluzioni di ruota coerenti con i vincoli di un rover pressurizzato lunare. L'approccio FEM consente di quantificare rigidità radiale, distribuzione delle tensioni e margini strutturali al variare della geometria, della topologia e delle ipotesi strutturali adottate, fornendo indicazioni oggettive per il confronto tra architetture e per l'impostazione delle successive fasi di progettazione.

1.3 Obiettivi della tesi

L'obiettivo generale della tesi è contribuire allo sviluppo preliminare del sottosistema ruota per un rover lunare pressurizzato, mediante un approccio di progettazione supportato da

analisi numeriche agli elementi finiti (FEM). In particolare, lo scopo è definire un workflow ripetibile che consenta di valutare il comportamento strutturale di più architetture di ruota candidate, quantificando rigidezza, deformabilità e livelli di sollecitazione sotto carichi rappresentativi.

Le tre famiglie richiamate nell'abstract corrispondono alle architetture a elementi discreti tra anello interno ed esterno: raggi rettilinei (SSW), raggi curvi (CSW) e celle circolari (CCW). Nel corpo della tesi il confronto numerico viene esteso anche a una ruota anulare continua, usata come modello pilota per costruire e controllare il workflow ma non assunta come candidata progettuale finale per massa, producibilità e limitata attrattiva strutturale, e a una famiglia shell raccordata (RSW), introdotta come configurazione intermedia e mantenuta nella seconda fase per le prestazioni ottenute nello screening FEM.

Gli obiettivi specifici possono essere riassunti come segue:

- **Selezione e formalizzazione delle architetture candidate:** identificare, a partire dallo stato dell'arte e dagli studi preliminari del progetto, un insieme di tipologie di ruota coerenti con i vincoli dell'ambiente lunare e con le esigenze di un rover pressurizzato, definendone geometria, componenti principali e parametri di progetto.
- **Definizione dei casi di carico e delle ipotesi di modellazione:** impostare un insieme di condizioni al contorno e carichi di riferimento, con un livello di complessità adeguato alla fase preliminare, in modo da poter eseguire confronti consistenti tra configurazioni differenti. Questa attività include la scelta delle semplificazioni adottate per il contatto ruota-terreno e per la rappresentazione dei materiali.
- **Sviluppo del modello FEM e verifica di coerenza numerica:** realizzare modelli FEM parametrizzabili, controllando stabilità numerica, sensibilità alla mesh e coerenza delle assunzioni (non linearità geometriche, contatti, eventuali leggi di materiale). L'obiettivo è ottenere simulazioni robuste e riproducibili.
- **Valutazione delle prestazioni strutturali:** calcolare grandezze utili al dimensionamento e al confronto tra soluzioni, quali curve forza-spostamento radiale, distribuzione delle tensioni e delle deformazioni, aree critiche e indicatori sintetici di margine strutturale.
- **Studio parametrico e confronto tra configurazioni:** esplorare l'influenza dei principali parametri geometrici e topologici sulle risposte strutturali, costruendo un confronto quantitativo tra le architetture analizzate e individuando famiglie e configurazioni promettenti per le successive fasi di sviluppo.

Il risultato atteso è un set di modelli e di analisi in grado di fornire indicazioni oggettive sul confronto tra architetture e sui principali driver strutturali, costituendo una base

tecnica utilizzabile dal gruppo di lavoro per ulteriori approfondimenti, quali l'integrazione con modelli di trazione e terrameccanica, verifiche su carichi più complessi e studi di affidabilità e fatica.

La sequenza logica adottata per raggiungere tali obiettivi è sintetizzata in Figura 1.2.

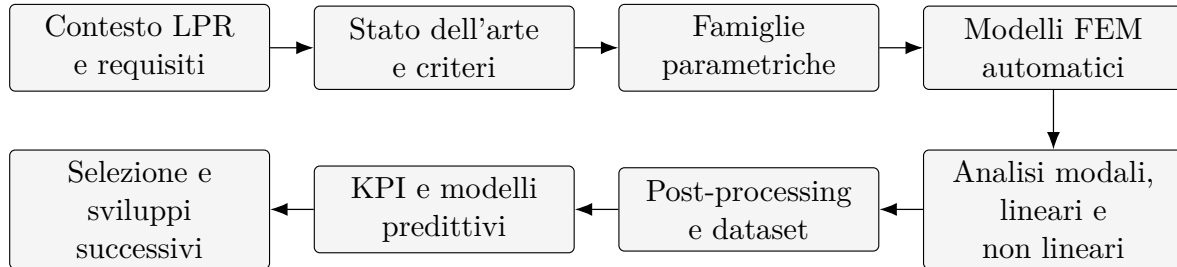


Figura 1.2: Schema della metodologia sviluppata nella tesi, dall'inquadramento del problema alla valutazione e selezione delle configurazioni di ruota mediante analisi FEM parametriche. Elaborazione dell'autore.

1.4 Inquadramento nel progetto Space It Up!

La tesi si colloca nel contesto delle attività di ricerca del Politecnico di Torino all'interno del progetto Space It Up!, partenariato nazionale finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana e dal Ministero dell'Università e della Ricerca. Il progetto riunisce 33 partner tra università, enti di ricerca e imprese ed è articolato in nove linee di ricerca (*Spoke*); la proposta progettuale è stata coordinata dal Politecnico di Torino [8].

In particolare, lo Spoke 8 è dedicato all'esplorazione robotica e umana di habitat, architetture e infrastrutture extraterrestri. Le attività includono lo studio e lo sviluppo di sistemi robotici, rover, tecnologie di mobilità, concetti di missione per l'esplorazione umana e infrastrutture per basi extraterrestri. La documentazione pubblica dello Spoke menziona inoltre contributi allo sviluppo del *powertrain* di un rover lunare pressurizzato [9].

All'interno di tale cornice, la presente attività contribuisce al tema del rover lunare pressurizzato, con focus sul sottosistema ruota e sul suo comportamento strutturale. Il lavoro è sviluppato in coordinamento con il gruppo LPR (*Lunar Pressurized Rover*), seguendo un'impostazione tipica di un processo di progettazione preliminare: definizione dei requisiti, selezione di soluzioni candidate, modellazione e analisi numerica, confronto e identificazione delle criticità.

L'integrazione nel progetto consente di collocare i risultati della tesi in un quadro più ampio, in cui le prestazioni strutturali della ruota interagiscono con aspetti di sistema quali mobilità, potenza, masse complessive e vincoli di integrazione. In questa fase, l'analisi FEM fornisce un supporto quantitativo alla scelta delle architetture e alla definizione

dei parametri chiave, contribuendo a ridurre l'incertezza progettuale e a indirizzare le successive attività di dettaglio e validazione.

1.5 Struttura della tesi

Il documento è organizzato in modo da accompagnare progressivamente il lettore dal contesto applicativo alla metodologia numerica, fino alla discussione dei risultati e alle possibili estensioni progettuali. Dopo il presente capitolo introduttivo, il Capitolo 2 richiama le principali soluzioni di ruota adottate o proposte per rover lunari e veicoli airless, evidenziando i criteri che rendono il sottosistema ruota particolarmente critico per un rover pressurizzato.

Il Capitolo 3 definisce l'impostazione dello studio, le famiglie geometriche considerate, lo spazio di progetto e le tipologie di analisi previste. I Capitoli 4 e 5 descrivono rispettivamente la generazione parametrica delle geometrie e la costruzione dei modelli FEM, con attenzione a mesh, proprietà, vincoli, carichi e contatti. Il Capitolo 6 illustra quindi il post-processing automatico degli output e la costruzione del dataset strutturato su cui si basano le analisi successive.

Il Capitolo 7 presenta i principali risultati della campagna parametrica, con confronto tra famiglie, analisi di sensibilità, modelli predittivi e criteri di selezione dei casi utilizzabili. Il Capitolo 8 introduce la seconda fase del lavoro: selezione delle baseline, ottimizzazione locale free-size e topografica, trasferimento dei campi ottimizzati e reanalysis statiche. Il Capitolo 9 discute la verifica dinamica comparativa lineare delle baseline e delle varianti ottimizzate precaricate, tramite analisi modale e risposta in frequenza. Il Capitolo 10 riassume infine i contributi principali della tesi, i limiti del modello numerico e le prospettive di sviluppo.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Perimetro dello stato dell'arte

Questo capitolo esamina le soluzioni di ruota non pneumatica rilevanti per un rover lunare pressurizzato, con attenzione ai principi strutturali che ne determinano la deformabilità, la capacità portante e la durabilità. Si evita in questa sede di ricostruire in modo esaustivo l'evoluzione di tutti i veicoli planetari o di valutare la mobilità del rover mediante un modello completo ruota-terreno. L'obiettivo è invece individuare, a partire dall'esperienza storica e dalla letteratura tecnica, quali trade-off rendano necessaria una valutazione strutturale dedicata delle architetture di ruota.

Il problema presenta una specificità che lo distingue dalla progettazione automobilistica terrestre. Per le ruote lunari devono essere considerate contemporaneamente le limitazioni di massa e volume, il vuoto, l'ampia escursione termica, l'esposizione alla radiazione e il contatto con regolite e polvere non alterate dagli agenti atmosferici [2]. In tale contesto, è importante studiare quei fenomeni legati al ruolo di elemento di interfaccia fra il veicolo e il terreno: la sua deformazione modifica l'area di contatto, la distribuzione di pressione e quindi la capacità di generare trazione e limitare le resistenze al moto. La medesima deformazione deve però essere ottenuta senza introdurre concentrazioni di tensione o meccanismi di danneggiamento incompatibili con la vita utile richiesta.

2.2 Lezioni dalle esperienze storiche

2.2.1 Ruote per veicoli lunari: differenze architetture e requisiti di missione

Le prime applicazioni lunari mostrano che non esiste una configurazione di ruota universalmente ottimale. Lunokhod, il Mobile Equipment Transporter e il Lunar Roving Vehicle (LRV) impiegavano soluzioni molto differenti, sviluppate in funzione della massa

del veicolo, della modalità operativa e dei requisiti di mobilità. Nel confronto riportato da Asnani, Delap e Creager, Lunokhod adottava otto ruote motrici con una carcassa rigida in filo metallico collegata a raggi, mentre l'LRV utilizzava una carcassa flessibile in rete metallica e un telaio interno rigido per limitare la sovradeformazione [2]. Il confronto è utile perché rende esplicito il legame fra architettura della ruota, condizioni di carico e missione prevista sebbene non sia possibile trasferire direttamente tali configurazioni a un rover pressurizzato contemporaneo.

Nel caso dell'LRV, la ruota finale derivò da un programma iterativo di confronto fra configurazioni a rete metallica e configurazioni a molle circonferenziali (*hoop spring*). La soluzione a rete metallica combinava una carcassa intrecciata deformabile, un telaio interno di contenimento e strisce di battistrada parzialmente distribuite lungo la circonferenza. La deformazione globale della carcassa contribuiva a distribuire il carico, mentre la geometria e la spaziatura delle strisce di battistrada influivano sulla generazione dello sforzo di taglio nel terreno [2]. Le prove su simulante di suolo lunare mostrarono inoltre che la copertura al 50% del battistrada offriva, nelle condizioni considerate, un compromesso favorevole fra consumo di potenza e *drawbar pull* [2].

Il dettaglio della ruota LRV in Figura 2.1 mostra la natura deformabile della carcassa a rete e la presenza degli elementi di trazione lungo la superficie esterna.



Figura 2.1: Ruota a rete metallica del Lunar Roving Vehicle Apollo; sono visibili la maglia deformabile e gli elementi di trazione. Immagine NASA, identificativo MSFC-7020255, di pubblico dominio [10].

Il processo di validazione sperimentale della geometria eseguito su prototipi assunse poi un ruolo importante aldilà della prima fase di progettazione. Nel programma LRV furono eseguite prove di *drawbar pull*, resistenza al rotolamento, risposta carico-spostamento,

risposta dinamica, impatto su ostacolo, endurance e funzionamento in camera termovuoto. Le caratteristiche della ruota finale emersero come correzioni a limitazioni osservate sui prototipi, senza fermarsi alla sola valutazione teorica [2]. Questo aspetto è particolarmente rilevante per il presente lavoro: un modello FEM può fornire informazioni essenziali sulla risposta strutturale, ma non sostituisce la necessità di successiva validazione sperimentale su configurazioni candidate.

2.2.2 Fatica, impatti e concentrazioni di tensione

Lo sviluppo delle ruote a rete e a molle circonferenziali mise in evidenza che l'aumento della compliance non coincide automaticamente con un aumento della durabilità. Nelle prime ruote a rete, le intersezioni ad anello dei fili presentavano vita a fatica ridotta per effetto delle concentrazioni di tensione. Nelle prove sulle ruote *hoop spring*, invece, furono osservati flutter del cerchio esterno a determinate velocità, sovrasollecitazione durante il superamento di ostacoli e rotture avviate in corrispondenza degli attacchi delle molle, dove si verificava flessione inversa attorno ai fori di rivettatura [2]. Anche la ruota a rete mostrò rotture dei fili in zone ripetutamente sollecitate dall'impatto con l'ostacolo, pur ottenendo una durata maggiore rispetto alla configurazione a molle circonferenziali nelle prove comparate [2].

Questi risultati sono direttamente collegati alle grandezze valutate nella presente tesi. Per una ruota deformabile, la curva forza–spostamento radiale costituisce solo una parte del problema: occorre individuare come il carico si redistribuisca fra gli elementi elastici, quali zone presentino massimi di tensione o curvatura e come tali zone varino al cambiare della geometria. Anche l'esperienza maturata sui rover marziani conferma l'importanza dei carichi localizzati: nel caso di Curiosity, l'elevato tasso iniziale di danneggiamento delle ruote è stato attribuito alla combinazione di rocce appuntite e inglobate nel terreno, non presenti nei siti considerati durante la definizione originaria della missione [11]. Pur trattandosi di un ambiente e di una ruota differenti, il caso viene qui assunto come richiamo alla necessità di verificare esplicitamente le condizioni di contatto e impatto più severe, senza fare un confronto quantitativo con la Luna.

2.2.3 Implicazioni per rover di maggiore massa

Le ruote dell'LRV non possono essere considerate una soluzione semplicemente scalabile verso veicoli più grandi e con missioni più lunghe. Cardile et al. osservano che le future piattaforme lunari sono destinate a operare con masse e autonomie superiori rispetto ai rover storici e propongono pertanto una metodologia di progetto che combina requisiti di sistema, valutazioni terrameccaniche preliminari e analisi FEM della ruota elastica [12]. La stessa esigenza emerge nei concetti di rover pressurizzato raccolti da Zakrajsek et al.: una configurazione denominata *Rover First* prevedeva sei ruote flessibili a rete

metallica da 1.23 m di diametro per un veicolo da 4.3 t, mentre altri concetti pressurizzati adottavano masse dell'ordine di 6–7 t e ruote da 1.5–2 m [4], [5].

Tali esempi non definiscono requisiti vincolanti per il rover considerato in questa tesi, poiché appartengono a studi concettuali con ipotesi di missione differenti. Mostrano però che, al crescere della massa e della distanza operativa, la ruota deve essere progettata come componente strutturale del sistema di mobilità e non come semplice adattamento di una soluzione sviluppata per un veicolo leggero.

2.3 Famiglie di ruote deformabili e loro principi strutturali

Le famiglie richiamate nel seguito possono essere ricondotte a differenti modi di distribuire la compliance tra carcassa, elementi elastici e collegamenti interni, come schematizzato in Figura 2.2.

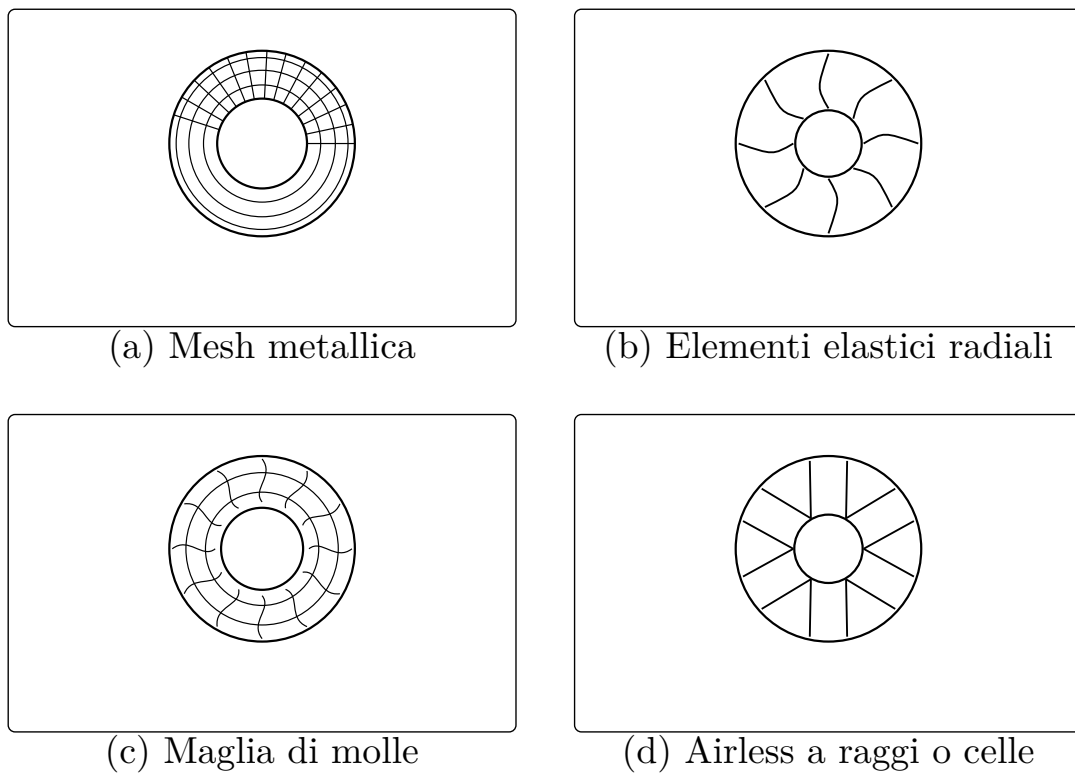


Figura 2.2: Schematizzazione, non in scala, delle principali famiglie di ruote deformabili discusse nello stato dell'arte: (a) mesh metallica; (b) elementi elastici radiali; (c) maglia di molle; (d) struttura airless a raggi o celle. Elaborazione dell'autore sulla base della letteratura citata nel testo.

2.3.1 Ruote metalliche a rete

Nelle *metallic mesh wheels* la carcassa deformabile è costituita da fili o elementi metallici intrecciati. Il principale vantaggio di questa architettura è la possibilità di ottenere una deformazione distribuita senza ricorrere a camera d'aria o a elastomeri esposti. Nel caso LRV, la carcassa flessibile, il telaio interno e le strisce di battistrada costituivano un sistema integrato: la carcassa controllava la conformazione al terreno, il telaio limitava la deformazione eccessiva e il battistrada contribuiva alla trazione e alla protezione laterale [2].

La letteratura storica indica tuttavia che la distribuzione locale delle deformazioni è determinante. Modifiche apparentemente secondarie, come la segmentazione delle strisce di battistrada in prossimità dei punti di fissaggio, furono introdotte proprio per consentire un moto relativo più favorevole fra battistrada e carcassa e ridurre la sovrasollecitazione dei fili [2]. Per questa famiglia, una valutazione FEM è quindi utile soprattutto per identificare i meccanismi locali che non emergono dalla sola rigidità globale.

2.3.2 Ruote a elementi elastici metallici

Una seconda famiglia comprende ruote in cui la compliance è affidata a elementi elastici metallici discretizzati: lamine, molle, archi o strutture radiali connesse fra mozzo e battistrada. Le *hoop spring wheels* storiche appartengono a questa famiglia, ma ne rappresentano solo una possibile configurazione. I risultati sperimentali mostrano sia il potenziale di una vasta impronta di contatto sia le criticità di flutter e fatica che possono comparire quando gli elementi elastici lavorano con elevata flessione ciclica [2]. Anche lavori più recenti sulle ruote flessibili per rover leggeri confermano l'interesse di architetture deformabili progettate in modo sistematico, nelle quali rigidità, massa e adattamento al terreno devono essere valutati congiuntamente [13].

Un'evoluzione concettuale è costituita dalle architetture a molle ellittiche radiali (*ellipse spring wheels*). Cardile et al. hanno confrontato una ruota a molle ellittiche e una ruota a molle spiraliformi nell'ambito della progettazione concettuale di una ruota per rover lunare di grande massa. Nella configurazione ellittica, la progressiva entrata in contatto fra elementi radiali vicini può modificare la rigidità al crescere della deformazione; nella configurazione spiraliforme, gli elementi radiali risultano invece progettati per una risposta più prossima a una rigidità costante. Nel caso di studio degli autori, il confronto fra modelli CAD e FEM ha portato alla selezione della configurazione ellittica per il comportamento di rigidità, la massa e la risposta dinamica ottenuti sotto le ipotesi considerate [12]. Tale conclusione resta specifica della configurazione e dei requisiti analizzati; il principio generale trasferibile è che la geometria degli elementi radiali può essere utilizzata per progettare una risposta non lineare della ruota.

2.3.3 Spring tire e architetture a materiale superelastico

Le architetture più recenti estendono il concetto di ruota metallica deformabile combinando reti di molle con materiali superelastici. La NASA descrive lo *Spring Tire* come una struttura costituita da numerose molle elicoidali intrecciate in una maglia flessibile; la versione successiva, denominata *Superelastic Tire*, impiega molle in lega a memoria di forma per aumentare la deformazione reversibile ammissibile rispetto alle precedenti molle in acciaio [14]. Il lavoro citato è rilevante anche dal punto di vista metodologico: lo studio utilizza un modello FEM completo della ruota e una campagna di sensibilità su parametri quali diametro del filo, diametro e passo della molla, angolo di posa e numero di molle, valutando sia la risposta globale carico–spostamento sia gli stati tensionali locali [14].

Questa classe di soluzioni non viene assunta come riferimento geometrico diretto della presente tesi, poiché implica materiali e leggi costitutive differenti da quelli adottati nei modelli analizzati. Essa conferma però che, per ruote deformabili a molti elementi, il collegamento fra risposta globale e sollecitazioni locali richiede strumenti numerici capaci di trattare non linearità geometriche, contatti e sensibilità parametrica.

2.3.4 Ruote airless a raggi e strutture cellulari

Le ruote airless a raggi o a celle interne possono essere interpretate come una famiglia strutturale nella quale la rigidezza è ottenuta soprattutto dalla topologia degli elementi che collegano il mozzo all’anello esterno. Il loro interesse progettuale risiede nella possibilità di modulare la risposta forza–spostamento attraverso numero, orientazione, sezione e curvatura degli elementi portanti. Tuttavia, il fatto che una soluzione sia *airless* non costituisce di per sé una garanzia di idoneità lunare: compatibilità con vuoto e temperature, comportamento a fatica, resistenza alla polvere e modalità di giunzione devono essere verificati per materiali e geometrie specifici. In particolare, l’esperienza NASA sulle ruote lunari evidenzia che gli elastomeri tipici delle ruote terrestri non conservano le stesse proprietà nel campo ambientale lunare e che la carcassa flessibile deve resistere a cicli ripetuti, impatti e contatto radente con regolite [2].

Per il confronto proposto in questa tesi, le strutture a raggi sono pertanto considerate come una modalità di generare compliance mediante geometria; una semplice trasposizione diretta di pneumatici airless terrestri sarebbe inadatta. Il confronto con una configurazione metallica deformabile permette di isolare il ruolo della topologia strutturale nella rigidezza radiale, nella distribuzione delle tensioni e nella massa stimata.

2.4 Criteri di selezione per un rover pressurizzato

La scelta di una ruota per un rover pressurizzato deve essere effettuata in relazione alla sua specifica missione, come detto prima. Le indicazioni NASA per lo sviluppo di nuove ruote lunari richiamano esplicitamente la necessità di definire ridondanza richiesta, esposizione termica e radiativa, numero di cicli, condizioni di terreno e requisiti operativi prima di confrontare le alternative [2]. Per il presente studio, tali indicazioni sono tradotte in cinque criteri strutturali e funzionali.

2.4.1 Trazione e geometria del contatto

La capacità di avanzare dipende dalla possibilità di generare una forza propulsiva superiore alle resistenze al moto. Nello sviluppo LRV, la deformazione della carcassa e la spaziatura del battistrada furono collegate alla lunghezza di contatto e alla capacità di salita; un aumento della deflessione nominale incrementava la spinta disponibile ma aumentava anche le tensioni nei fili e la frequenza di intervento del *bump stop* [2]. Da ciò deriva che la deformabilità richiesta per la mobilità deve essere valutata insieme alle conseguenze strutturali che essa produce.

2.4.2 Capacità di carico e rigidità radiale

Per un veicolo pressurizzato non è sufficiente verificare che la ruota non collassi sotto il carico verticale. La risposta forza–spostamento deve risultare compatibile con gli ingombri, le sospensioni e il margine disponibile prima di contatti indesiderati fra elementi della ruota o con componenti del veicolo. Nel caso delle ruote a molle ellittiche, Cardile et al. mostrano come la rigidità possa cambiare con la progressiva attivazione di più elementi radiali; tale caratteristica è utile soltanto se i livelli di tensione e le modalità di contatto sono controllati [12].

2.4.3 Durabilità e carichi localizzati

Le ruote deformabili sono sottoposte a cicli di carico che dipendono sia dal rotolamento nominale sia dalla geometria degli ostacoli. Le prove storiche riportate per mesh e *hoop spring* mostrano che la durata può essere limitata da rotture localizzate nei fili, negli attacchi o nelle zone ripetutamente investite dall'ostacolo [2]. Per le configurazioni analizzate nella presente tesi, il confronto fra valori massimi di tensione, zone di curvatura elevata e sensibilità alle dimensioni geometriche costituisce quindi una base preliminare per identificare i punti che richiederebbero, in uno sviluppo successivo, verifiche di fatica esplicite.

2.4.4 Compatibilità ambientale

Vuoto, temperatura, radiazione e polvere sono condizioni che la progettazione strutturale deve assolutamente considerare: essi influenzano la scelta dei materiali, i possibili attriti interni, le giunzioni e l'affidabilità delle parti mobili. Nel caso storico delle ruote lunari, la NASA evidenzia che l'ambiente rende inadatta la trasposizione diretta di pneumatici in gomma e richiede una carcassa flessibile capace di operare sotto cicli ripetuti, urti e contatto con regolite [2]. Quindi, il presente capitolo sposta l'approccio della progettazione verso il non utilizzo dei materiali polimerici e compositi senza però renderla una decisione assoluta per il futuro.

2.4.5 Massa, producibilità e verificabilità

La riduzione di massa resta essenziale, ma non può essere valutata separatamente dalla fabbricabilità e dalla possibilità di verificare la ruota. Le soluzioni a molti elementi possono offrire elevata deformabilità, ma introducono un maggior numero di connessioni, possibili contatti e parametri geometrici. Il caso dello *Spring Tire* mostra che, al crescere della complessità della struttura, un modello predittivo e una campagna di sensibilità diventano strumenti necessari per ridurre il numero di iterazioni sperimentali richieste [14]. In una fase preliminare, la massa stimata, la risposta carico-spostamento e il livello di tensione costituiscono quindi indicatori complementari, non sostituibili uno con l'altro.

Il collegamento tra requisiti del rover, scelte geometriche e indicatori numerici utilizzati nei capitoli successivi è riassunto in Figura 2.3.

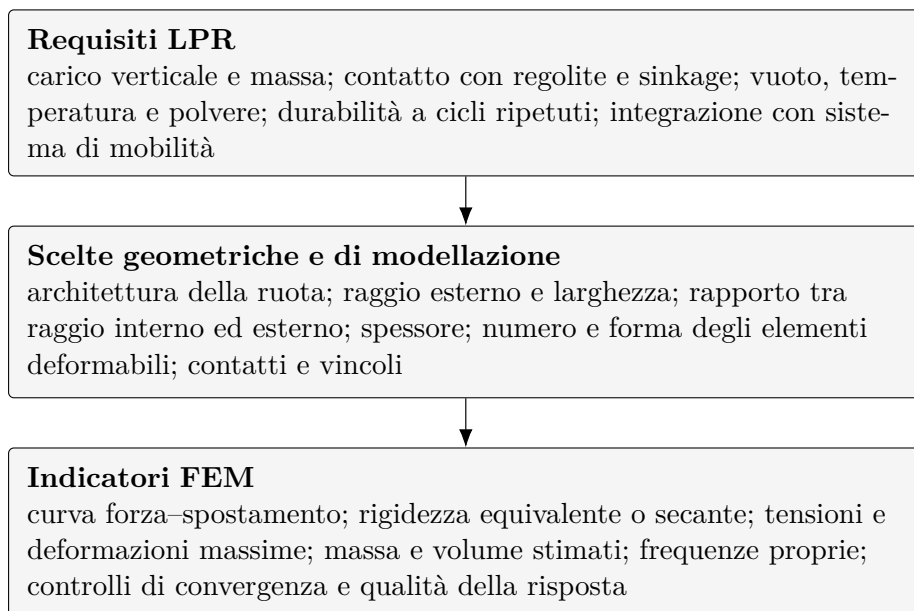


Figura 2.3: Collegamento tra requisiti del rover pressurizzato, scelte di parametrizzazione della ruota e indicatori strutturali utilizzati per il confronto delle architetture nel presente lavoro. Elaborazione dell'autore.

2.5 Posizionamento delle architetture considerate nella tesi

Nel contesto LPR, un precedente studio di progettazione preliminare ha svolto un'analisi di sistema della mobilità, includendo terrameccanica, confronto fra concetti di ruota e valutazione multicriterio. In tale studio, le ruote metalliche deformabili sono risultate una delle famiglie più promettenti per il rover pressurizzato considerato, mentre gli aspetti di fatica e di verifica strutturale dettagliata sono stati esplicitamente individuati come elementi da approfondire [15]. La presente tesi si colloca a valle di quel livello di analisi: valuta in modo comparabile la risposta strutturale di architetture parametriche senza assegnare un punteggio globale alle tecnologie o validandone il comportamento del rover sul terreno reale.

Sulla base di queste considerazioni la presente tesi traduce i principi individuati in letteratura in un insieme di archetipi geometrici idealizzati. Il punto di partenza è una *Solid Annular Wheel*, assimilabile a un cilindro cavo, utile come riferimento strutturale semplice e compatto. A partire da questa forma base, la geometria viene poi resa progressivamente più articolata separando idealmente la superficie interna e quella esterna e introducendo diversi meccanismi di collegamento.

Una prima estensione è costituita dalla *Rounded Shell Wheel*, nella quale le superfici interna ed esterna sono collegate da una sezione arrotondata attorno a una circonferenza media. Le altre architetture introducono invece collegamenti discreti tra anello interno ed esterno: pannelli radiali rettilinei nella *Straight-Spoke Wheel*, elementi curvi nella *Curved-Spoke Wheel* e celle circolari ripetute nella *Circular-Cell Wheel*. In questo modo il confronto FEM mira a isolare l'effetto della topologia strutturale sulla rigidezza radiale, sulla distribuzione delle tensioni, sulla massa e sulla risposta non lineare.

La nomenclatura operativa dei modelli, le dimensioni di riferimento, le assunzioni di materiale e lo spazio parametrico associato a ciascun archetipo sono definiti nel Capitolo 3. A questo livello si va a costruire un confronto controllato tra famiglie geometriche riconoscibili.

La campagna FEM viene pertanto utilizzata per quantificare:

- la curva forza–spostamento radiale e la sua eventuale non linearità;
- la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni nelle aree critiche;
- la massa strutturale associata alle diverse architetture;
- la sensibilità degli indicatori ai parametri geometrici e di materiale;
- la robustezza numerica dei modelli rispetto a mesh, non linearità geometriche e condizioni di contatto adottate.

Gli indicatori ottenuti forniscono un filtro strutturale necessario per evitare di considerare promettente, dal solo punto di vista della compliance o dell'area di contatto, una configurazione che presenti livelli tensionali incompatibili con un successivo sviluppo. Sulla base di tale perimetro, il Capitolo 3 definisce le architetture, i casi di carico e le ipotesi che rendono possibile il confronto numerico tra i diversi candidati.

Capitolo 3

Impostazione dello studio e strategia di modellazione

A valle dell'inquadramento del problema e dello stato dell'arte, lo studio è stato impostato con un obiettivo preciso: trasformare la valutazione di ruote deformabili per rover lunari da analisi puntuale di singole geometrie a processo parametrico ripetibile. Il risultato atteso è la costruzione di un dataset strutturato dal quale ricavare tendenze, confronti tra architetture e, in ultima istanza, modelli predittivi utilizzabili nella fase di progetto preliminare.

La scelta di partire da geometrie semplificate è legata allo stato iniziale del problema. Non essendo disponibili requisiti definitivi di dettaglio, ad esempio massa ammissibile della singola ruota, rigidità target o limiti tensionali di progetto, la prima fase dello studio esplora un dominio parametrico costruito attorno a valori dimensionali e di carico rappresentativi per un Lunar Pressurized Rover. Le ruote vengono quindi analizzate come modelli ideali: materiale isotropo unico, geometrie ridotte agli elementi strutturali principali e casi di carico normalizzati. Questa impostazione consente di capire come variano i KPI al variare dei parametri prima di restringere il dominio a requisiti di progetto più maturi.

La strategia complessiva è articolata in due fasi. La prima fase costruisce il database FEM e le formule predittive. La seconda fase usa tali formule per selezionare configurazioni promettenti e sottoporle a ottimizzazione topologica o topografica, seguita da nuove verifiche FEM complete. In questo modo il calcolo esteso fornisce una base quantitativa per scegliere dove concentrare le analisi più costose.

Il flusso adottato è composto da quattro livelli successivi:

1. definizione parametrica delle architetture e generazione automatica dei modelli FEM;
2. esecuzione di analisi modali, statiche lineari e statiche non lineari secondo casi di carico normalizzati;

3. post-processing automatico degli output del solutore e costruzione di tabelle compatte di risultati;
4. analisi statistica e regressiva dei KPI per valutare sensibilità, confronti tra modelli e formule predittive.

Questa impostazione permette di separare il costo computazionale delle analisi FEM dal patrimonio informativo finale: i file di calcolo sono voluminosi e transitori, mentre i risultati utili sono conservati in CSV leggeri e tracciabili.

3.1 Configurazione di riferimento e limiti della campagna

La scala del problema è stata definita a partire da un precedente studio preliminare sul locomotion system del Lunar Pressurized Rover svolto nello stesso contesto progettuale. In tale lavoro, Giacconi assume una massa complessiva preliminare del rover pari a

$$M_{\text{tot}} = 7000 \text{ kg} \quad (3.1)$$

e adotta una configurazione a sei ruote nel modello di sospensione. Inoltre, nella valutazione delle ruote flessibili metalliche viene indicato un carico atteso per ruota superiore a 1800 N. Questi dati vengono qui assunti come riferimento coerente per impostare una campagna FEM preliminare e confrontabile [15].

Assumendo una ripartizione statica uniforme del peso sulle sei ruote e l'accelerazione di gravità lunare

$$g_{\text{Luna}} = 1,62 \text{ m s}^{-2}, \quad (3.2)$$

il carico statico medio per ruota risulta

$$F_{\text{wheel,stat}} = \frac{M_{\text{tot}} g_{\text{Luna}}}{N_{\text{wheel}}} = \frac{7000 \cdot 1.62}{6} \simeq 1890 \text{ N}. \quad (3.3)$$

Nel presente studio si adotta quindi

$$F_{\text{nom}} = 2000 \text{ N} \quad (3.4)$$

come arrotondamento del carico statico medio nominale per ruota. Tale valore rappresenta una condizione di riferimento con distribuzione uniforme del peso del rover e non include trasferimenti di carico, assetto del veicolo, pendenze, superamento di ostacoli, accelerazioni o effetti dinamici.

Il secondo livello di carico impiegato nella campagna è

$$F_{\text{amp}} = 4000 \text{ N} = 2F_{\text{nom}}. \quad (3.5)$$

Esso non è introdotto come fattore di sicurezza né come requisito certificativo, ma come caso di carico amplificato ed esplorativo. Il suo ruolo è valutare la sensibilità della risposta strutturale quando la domanda verticale supera il valore statico medio, evidenziando configurazioni più sensibili a grandi spostamenti, non linearità geometriche, contatto e concentrazioni locali di tensione. Una definizione fisicamente completa dei carichi di picco richiederebbe un modello integrato di dinamica del veicolo, sospensione, ruota e interazione ruota-regolite, esterno allo scopo della presente campagna parametrica.

La stessa tesi di Giacconi esplora, nella fase di ottimizzazione geometrica della ruota, un intervallo preliminare

$$0.8 \leq D \leq 1,4 \text{ m}, \quad 0.3 \leq b \leq 0,9 \text{ m}, \quad (3.6)$$

e seleziona la configurazione

$$D = 1,2 \text{ m}, \quad b = 0,4 \text{ m} \quad (3.7)$$

come compromesso preliminare tra sinkage e resistenze al moto nelle ipotesi terrameccaniche considerate [15]. In questa tesi tali valori sono usati come baseline dimensionale.

Il dominio FEM viene quindi limitato superiormente a

$$R_{\text{max}} = 600 \text{ mm}, \quad D_{\text{max}} = 1200 \text{ mm}, \quad b_{\text{max}} = 400 \text{ mm}. \quad (3.8)$$

Per le famiglie descritte tramite una larghezza assiale esplicita, tale limite corrisponde al massimo livello di w adottato nella griglia parametrica. Uno dei modelli studiati usa invece una parametrizzazione specifica basata su R_M , R_S/R_M e $\beta = B/R_e$; per esso il confronto con le altre famiglie avviene tramite il raggio esterno equivalente $R_e = R_M + R_S$ e il rapporto equivalente tra raggi, mentre il tratto cilindrico centrale B non coincide direttamente con la variabile w degli altri modelli.

La scelta di non estendere ulteriormente il dominio geometrico è metodologica. I modelli sono costruiti in Al 7075-T6. Nella campagna consolidata gli spessori sono compresi tra da 2 mm a 4 mm per RSW, SSW e CSW, mentre per la famiglia CCW il ramo utilizzato nelle analisi comparative adotta da 3 mm a 5 mm: il livello da 2 mm è stato scartato per la marcata cedevolezza globale mostrata dalla ruota. In questo intervallo, un aumento ulteriore delle dimensioni caratteristiche porterebbe a rapporti R/t più elevati e quindi a ruote più snelle, potenzialmente più sensibili a deformazioni globali, grandi spostamenti e fenomeni locali di instabilità o concentrazione degli sforzi. Il limite superiore non va

quindi interpretato come vincolo fisico generale per tutte le ruote lunari, ma come confine coerente con materiale, spessori, architetture e casi di carico della campagna FEM qui sviluppata.

3.2 Architetture considerate

La campagna è stata organizzata attorno a cinque famiglie di ruote. Nei file di calcolo e nel dataset esse sono tracciate con i codici M1–M5; nel testo, invece, vengono identificate con un nome descrittivo in inglese e con un acronimo breve. Questa separazione evita di confondere la nomenclatura operativa dei file con la lettura ingegneristica delle architetture.

Codice	Nome	Acr.	Descrizione sintetica	Parametri principali	Geom.
M1	Solid Annular Wheel	SAW	Ruota continua di riferimento, modellata con elementi solidi.	R_e, ϕ, w	27
M2	Rounded Wheel	Shell	Architettura shell raccordata con tratto cilindrico centrale.	$R_M, R_S/R_M, \beta, t$	144
M3	Straight-Spoke Wheel	SSW	Anello interno ed esterno collegati da razze rettilinee.	R_e, ϕ, w, N_s, t	324
M4	Curved-Spoke Wheel	CSW	Architettura con elementi intermedi curvi tra gli anelli.	R_e, ϕ, w, N_s, t	324
M5	Circular-Cell Wheel	CCW	Elementi circolari ripetuti tra anello interno ed esterno.	R_e, ϕ, w, N_C, t	351

Tabella 3.1: Famiglie di ruote considerate, acronimi adottati nel testo e numerosità geometrica della campagna.

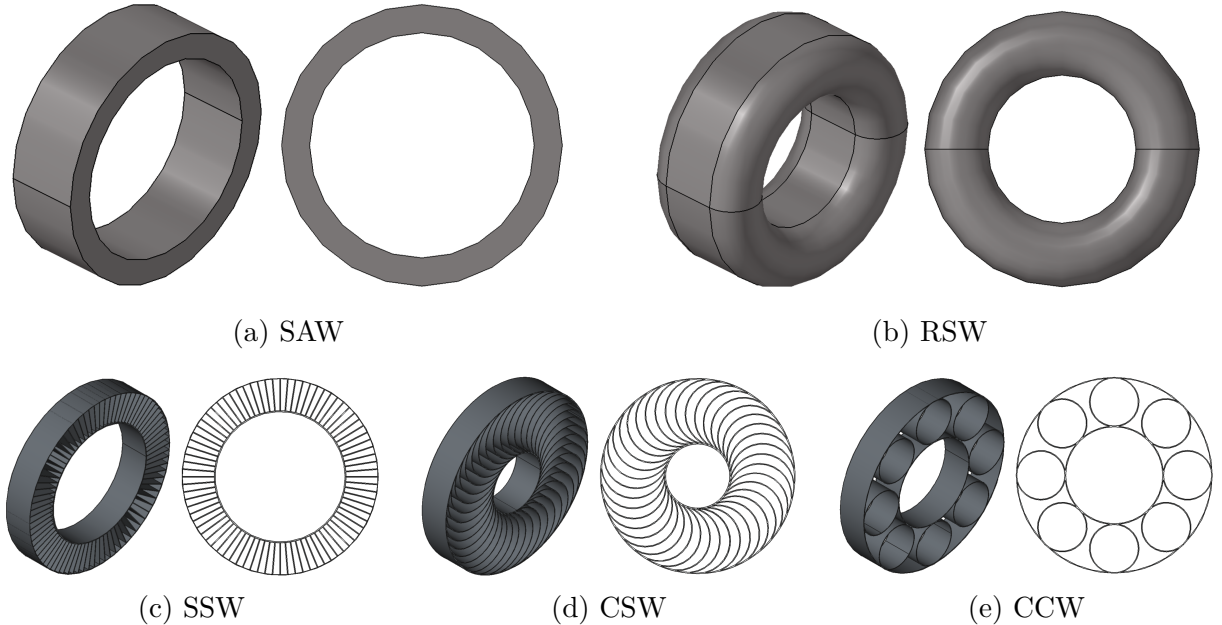


Figura 3.1: Rendering delle cinque famiglie parametriche considerate nella campagna FEM: Solid Annular Wheel (SAW), Rounded Shell Wheel (RSW), Straight-Spoke Wheel (SSW), Curved-Spoke Wheel (CSW) e Circular-Cell Wheel (CCW).

La distinzione tra le famiglie è utile anche dal punto di vista dell'interpretazione fisica. La Solid Annular Wheel fornisce una risposta di riferimento continua e poco segmentata; la Rounded Shell Wheel introduce una configurazione shell quasi-toroidale ma raccordata con tratto cilindrico centrale; la Straight-Spoke Wheel rappresenta il caso più diretto di collegamento tra mozzo e anello esterno; la Curved-Spoke Wheel e la Circular-Cell Wheel introducono invece una maggiore possibilità di deformazione locale e di redistribuzione degli sforzi.

3.3 Spazio di progetto

La scelta dei parametri è stata guidata da due esigenze: mantenere un significato geometrico chiaro e contenere la dimensione del dominio in modo compatibile con una campagna FEM estesa. Per le famiglie SSW, CSW e CCW il raggio interno non è trattato come variabile indipendente, ma viene espresso tramite il rapporto

$$\phi = \frac{R_i}{R_e}. \quad (3.9)$$

In questo modo il parametro controlla direttamente lo spessore radiale disponibile, cioè $R_e - R_i$.

Famiglia	Parametro	Livelli adottati
SAW	R_e [mm]	{400, 500, 600}
	ϕ [-]	{0.75, 0.80, 0.85}
	w [mm]	{200, 300, 400}
RSW	R_M [mm]	{333.333, 366.667, 400}
	R_S/R_M [-]	{0.20, 0.30, 0.40, 0.50}
	$\beta = B/R_e$ [-]	{0.40, 0.50, 0.60, 0.70}
	t [mm]	{2, 3, 4}
SSW, CSW	R_e [mm]	{400, 500, 600}
	w [mm]	{200, 300, 400}
	ϕ [-]	{1/3, 1/2, 2/3}
	N_s [-]	{20, 40, 60, 80}
	t [mm]	{2, 3, 4}
CCW	R_e, w, ϕ	stessi livelli di SSW e CSW
	t [mm]	{3, 4, 5}
	N_C [-]	funzione di ϕ , Tab. 3.4

Tabella 3.2: Spazio di progetto consolidato per la campagna FEM.

La griglia riportata in Tab. 3.2 rappresenta la campagna consolidata. La scelta di tre livelli per ϕ e per t riduce la ridondanza rispetto a esplorazioni preliminari più ampie e concentra le analisi sui domini più utili per il confronto tra architetture. Per la RSW,

Grandezza equivalente RSW	Livelli discreti adottati
$R_e = R_M + R_S$ [mm]	{400, 433.333, 440, 466.666, 476.667, 480}
$\phi = (R_M - R_S)/(R_M + R_S)$ [-]	{500, 513.334, 520, 550, 560, 600}
$\beta = B/R_e$ [-]	{0.333, 0.429, 0.538, 0.667}
t [mm]	{0.40, 0.50, 0.60, 0.70}
	{2, 3, 4}

Tabella 3.3: Rappresentazione equivalente dei livelli geometrici adottati per la RSW. La parametrizzazione operativa resta basata su R_M , R_S/R_M e $\beta = B/R_e$; R_e e ϕ sono grandezze derivate usate per rendere il confronto dimensionale coerente con SSW, CSW e CCW.

ϕ [-]	N_C [-]
1/3	{3, 4, 5}
1/2	{3, 4, 5, 6, 8}
2/3	{3, 6, 9, 12, 14}

Tabella 3.4: Valori di N_C adottati per la CCW in funzione del rapporto ϕ .

i livelli equivalenti di Tab. 3.3 non costituiscono una griglia fattoriale indipendente in R_e e ϕ : essi derivano dalle combinazioni effettivamente analizzate di R_M e R_S/R_M . Il parametro B resta la larghezza del tratto cilindrico centrale della sezione shell raccordata e non viene assimilato alla larghezza assiale w delle altre famiglie. Per la CCW il dominio consolidato adotta $t \in \{3, 4, 5\}$ mm. Il livello da 2 mm non è incluso nella campagna consolidata, poiché le relative configurazioni risultano eccessivamente cedevoli per il perimetro di confronto adottato. La combinazione dei livelli parametrici riportati in Tab. 3.2 e dei valori di N_C definiti in Tab. 3.4 produce 351 geometrie nominali.

3.4 Famiglie di analisi

Per ogni geometria sono previste analisi modali, statiche lineari e statiche non lineari. I casi statici sono divisi in due famiglie di carico, A e B. La famiglia A rappresenta il caricamento verticale principale; la famiglia B introduce una componente inclinata, utile a valutare una risposta meno assialsimmetrica e più vicina a condizioni operative con componente longitudinale o laterale.

Per i modelli con ripetizione circonferenziale più marcata vengono considerate due fasi di carico, indicate con indice 1 e 2. La duplicazione A1/A2 e B1/B2 consente di valutare la sensibilità della risposta alla posizione del carico rispetto agli elementi ripetuti: ad esempio carico allineato a una razza o applicato in una zona intermedia.

Le analisi sono indicate mediante le sigle operative MOD, ST e STNL, rispettivamente per analisi modale, statica lineare e statica non lineare. Le lettere A e B identificano il caso di carico verticale e inclinato; gli indici 1 e 2 distinguono le due fasi circonferenziali della

geometria rispetto alla direzione di carico. La stessa convenzione è mantenuta nei file, nei manifest e nelle tabelle compatte, così da garantire tracciabilità tra modello numerico e risultati post-processati.

Sigla	Tipo di analisi	Grandezze principali estratte
MOD	Analisi modale	frequenze proprie, massa e volume modello
ST_A1, ST_A2	Statica lineare, famiglia A	spostamento nodo di controllo, rigidezza, stress/strain
ST_B1, ST_B2	Statica lineare, famiglia B	spostamento nodo di controllo, rigidezza, stress/strain
STNL_A1, STNL_A2	Statica non lineare, famiglia A	curva forza-spostamento, contatto, stress/strain
STNL_B1, STNL_B2	Statica non lineare, famiglia B	curva forza-spostamento, stress/strain

Tabella 3.5: Famiglie di analisi previste nel workflow. Le fasi 2 sono applicate ai modelli per i quali la posizione circonferenziale del carico è rilevante.

Nei casi lineari il risultato è scalabile rispetto al carico applicato e viene riportato rispetto al livello massimo della campagna. Nei casi non lineari, invece, la curva viene campionata e letta anche a carichi intermedi, in particolare 200 N, 1000 N, 2000 N e 4000 N. I livelli di 200 N e 1000 N descrivono l'evoluzione iniziale e intermedia della curva forza-spostamento, permettendo di osservare la progressiva variazione della rigidezza secante. I livelli di 2000 N e 4000 N costituiscono invece i riferimenti principali del confronto quantitativo: il primo corrisponde al carico nominale definito in Eq. (3.3), mentre il secondo rappresenta il caso amplificato usato per evidenziare gli effetti di contatto, grandi spostamenti e non linearità geometriche. Le regressioni e le sintesi comparative della rigidezza secante sono quindi costruite soprattutto su questi due livelli, senza eliminare l'informazione contenuta nei punti a carico inferiore.

3.5 Indicatori di prestazione

Gli indicatori utilizzati nella tesi sono organizzati in quattro gruppi.

Il primo gruppo riguarda la risposta globale: spostamento del nodo di controllo, rigidezza equivalente lineare e rigidezze secanti derivate dalle curve non lineari. Il secondo gruppo riguarda la sicurezza strutturale, mediante massimi di stress e strain letti dagli output del solutore. Il terzo gruppo raccoglie le grandezze modali, in particolare la prima frequenza strutturale non rigida e, quando utile, le prime frequenze del modello. Il quarto gruppo contiene massa e volume, letti dagli output del solutore e usati per confronti multi-obiettivo.

Questa organizzazione separa i dati grezzi dai KPI derivati: gli output FEM forniscono spostamenti, forze, frequenze, stress e strain; il post-processing calcola rigidezze, indici di non linearità, controlli di qualità e tabelle riassuntive. Tale separazione è essenziale per rendere il processo aggiornabile: nuove analisi possono essere aggiunte al dataset senza riscrivere la logica di interpretazione.

Capitolo 4

Modellazione CAD parametrica e rappresentazione delle architetture

La modellazione CAD parametrica ha accompagnato la fase iniziale di definizione delle architetture. Il suo scopo è stato rendere osservabili le geometrie, verificare la coerenza delle proporzioni e sperimentare una prima automazione delle varianti. Essa non coincide, tuttavia, con il processo che ha prodotto i modelli numerici della campagna finale. Come chiarito nel seguito, i deck analizzati sono stati generati direttamente a partire dai parametri geometrici, senza importare e discretizzare i file CAD.

4.1 Ruolo della modellazione CAD nel lavoro

I modelli tridimensionali sono stati sviluppati in FreeCAD come rappresentazioni parametriche delle famiglie introdotte nel Capitolo 3. Per ciascuna architettura, un foglio di calcolo interno controlla le quote principali e alimenta le operazioni geometriche del documento. Questo approccio ha permesso di modificare rapidamente raggi, larghezze, spessori e numerosità degli elementi ripetuti, mantenendo leggibile la relazione tra parametri e forma risultante.

Il CAD ha svolto tre funzioni specifiche. In primo luogo, ha consentito di verificare visivamente che le combinazioni geometriche producessero configurazioni plausibili e prive di evidenti interferenze. In secondo luogo, ha fornito rappresentazioni tridimensionali adatte a comunicare le differenze tra Solid Annular Wheel, Rounded Shell Wheel, Straight-Spoke Wheel, Curved-Spoke Wheel e Circular-Cell Wheel. I rendering delle cinque famiglie sono raccolti in Fig. 3.1. Infine, l'esportazione in un formato geometrico neutro ha costituito un utile strumento di scambio nelle prove preliminari.

Questa fase va quindi interpretata come supporto alla concezione e alla rappresentazione delle architetture, non come sorgente geometrica obbligatoria dei modelli FEM finali.

4.2 Generazione parametrica delle geometrie in FreeCAD

Nei documenti FreeCAD, le variabili geometriche sono associate ad alias di uno spreadsheet. Per la ruota anulare continua sono presenti, tra gli altri, raggio esterno, raggio interno e larghezza assiale. Per le famiglie con due anelli concentrici sono definiti i raggi degli anelli, la larghezza, gli spessori delle parti e il numero di elementi ripetuti. Nel modello shell raccordato la sezione è invece controllata dal raggio medio R_M , dal raggio di raccordo R_S e dalla larghezza del tratto cilindrico centrale B .

Le operazioni del modello dipendono da tali celle: dopo la modifica dei valori, il documento viene ricalcolato e la geometria aggiornata. Nei casi con elementi ripetuti, le funzioni di array polare costruiscono l'architettura completa a partire da un elemento di riferimento. Nei modelli con raggi curvi o celle circolari, il ricalcolo costituisce anche un primo controllo sulla compatibilità della combinazione scelta, poiché configurazioni geometricamente troppo spinte possono rendere non valida una feature.

Le macro CAD costituiscono strumenti preliminari di generazione e controllo geometrico e non definiscono il dominio della campagna FEM consolidata. I parametri e i livelli effettivamente analizzati sono quelli riportati nel Capitolo 3 e tracciati nei manifest dei modelli numerici.

4.3 Automazione ed esportazione delle configurazioni

Le macro FreeCAD disponibili implementano una procedura batch essenziale. Esse individuano lo spreadsheet tramite la relativa etichetta, associano i valori alle celle mediante gli alias, richiedono il ricalcolo del documento e percorrono le combinazioni ammissibili. Il risultato viene salvato come copia del documento o esportato in formato STEP, secondo la procedura adottata dalla macro. Per le famiglie più sensibili alla compatibilità geometrica sono inoltre presenti controlli che registrano i casi nei quali il ricalcolo fallisce.

La Fig. 4.1 sintetizza questa procedura. Il blocco finale comprende sia il controllo visivo sia gli artefatti destinati alla comunicazione o allo scambio geometrico. Non comprende la generazione della mesh di analisi.

L'automazione CAD ha mostrato anche un limite rilevante per una campagna numerica estesa. Un modello geometricamente ricalcolabile non determina da solo la topologia della mesh, la numerazione dei nodi, la qualità degli elementi o la struttura dei set necessari a carichi e contatti. Questi aspetti richiederebbero passaggi ulteriori di importazione, semplificazione e discretizzazione, con il rischio di introdurre differenze difficili da controllare tra un numero elevato di configurazioni.

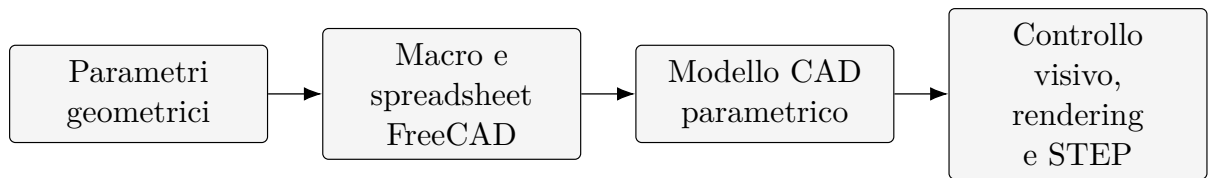


Figura 4.1: Workflow CAD parametrico impiegato nella fase preliminare per definire, verificare e rappresentare le architetture.

4.4 Separazione tra workflow CAD e workflow FEM diretto

L'approccio CAD parametrico ha costituito uno strumento utile nelle prime fasi di definizione delle architetture, permettendo di controllare le proporzioni geometriche, generare rappresentazioni tridimensionali e produrre file di scambio. L'elevato numero di combinazioni e la necessità di controllare direttamente topologia della mesh, numerazione nodale, componenti strutturali, interfacce e condizioni al contorno hanno però reso preferibile una generazione diretta dei deck FEM.

La procedura adottata per la campagna finale non deriva quindi dalla conversione di geometrie CAD in mesh di analisi. I parametri vengono letti da configurazioni di campagna e trasformati direttamente in coordinate nodali, connettività, proprietà e gruppi logici. Ne consegue che il file STEP non è un input necessario della pipeline numerica e che la riproducibilità del caso dipende dal generatore FEM e dal relativo manifest.

La separazione dei due flussi evita di attribuire al CAD funzioni che non ha nella metodologia finale. La modellazione CAD ha supportato la concezione, il controllo geometrico preliminare e la rappresentazione delle architetture. Il generatore descritto nel Capitolo 5 traduce invece i parametri geometrici nel modello discreto effettivamente sottoposto ad analisi.

Capitolo 5

Generazione diretta dei modelli FEM e impostazione delle analisi

La campagna numerica richiede che geometrie diverse siano costruite secondo regole ripetibili e confrontabili. Per questo motivo i modelli finali non derivano dalla meshatura dei file CAD descritti nel Capitolo 4. Un generatore dedicato trasforma direttamente i parametri in coordinate nodali, connettività, proprietà, condizioni al contorno e deck OptiStruct. Lo stesso processo produce i metadati necessari a collegare ogni analisi ai risultati discussi nei capitoli successivi.

5.1 Workflow di generazione diretta dei modelli FEM

Il generatore riceve la famiglia geometrica, il materiale, il tipo di analisi, i livelli parametrici e le eventuali varianti del collegamento al mozzo. Prima della costruzione, i parametri vengono normalizzati e sottoposti ai vincoli geometrici della famiglia: ad esempio, nella Rounded Shell Wheel deve risultare $0 < R_S < R_M$, mentre nella Circular-Cell Wheel il numero di celle deve essere compatibile con lo spazio radiale disponibile.

Ogni famiglia è associata a un builder che calcola nodi ed elementi e restituisce le componenti logiche del modello. Un writer comune completa il deck con proprietà, materiali, set, carichi, vincoli, contatti e richieste di output. La Fig. 5.1 riassume il flusso effettivamente impiegato.

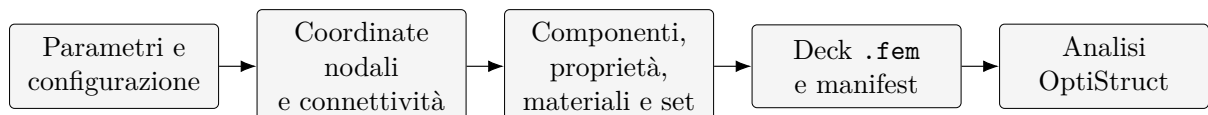


Figura 5.1: Workflow di generazione diretta dei modelli FEM adottato per la campagna finale.

Questa impostazione rende esplicita la relazione tra parametri e modello discreto. La numerazione dei nodi e degli elementi, la suddivisione in componenti e la formazione dei

set non dipendono da operazioni interattive di un pre-processore. Ne consegue che uno stesso insieme di parametri genera nuovamente lo stesso deck, salvo modifiche versionate del generatore.

5.2 Definizione parametrica della mesh

5.2.1 Coordinate nodali, topologia e discretizzazione

Il sistema di riferimento ha asse Y coincidente con l'asse della ruota; la circonferenza principale giace quindi nel piano XZ . La posizione angolare di partenza corrisponde al punto inferiore della ruota e le altre coordinate sono ottenute percorrendo la circonferenza con passo regolare.

La discretizzazione è specifica per famiglia:

Famiglia	Elementi principali	Regola di discretizzazione
SAW (M1)	CHEXA	anello solido suddiviso lungo circonferenza, spessore radiale e larghezza; passo angolare nominale di 2° e dieci intervalli assiali
RSW (M2)	CQUAD4	sezione a capsula, composta da bande cilindriche e raccordi semicircolari, ruotata attorno a Y ; passo angolare nominale di 2°
SSW (M3)	CQUAD4	anelli interno ed esterno discretizzati separatamente; raggi piani connessi alle posizioni periodiche corrispondenti
CSW (M4)	CQUAD4	schema degli anelli ereditato dalla SSW; raggi curvi discretizzati lungo l'arco e raccordati ai nodi circonferenziali più vicini
CCW (M5)	CQUAD4	schema degli anelli ereditato dalla SSW; due rami curvi formano ciascuna cella circolare, con trimming delle zone terminali

Tabella 5.1: Sintesi della topologia di mesh delle cinque famiglie.

Il target dimensionale di base è pari a 10 mm. Per la RSW la discretizzazione delle bande cilindriche utilizza un target di 20 mm, ridotto automaticamente quando necessario per rispettare il limite geometrico definito. Per SSW, CSW e CCW il passo assiale desiderato è anch'esso 20 mm; il numero di intervalli lungo Y viene calcolato come

$$N_Y = \left\lceil \frac{w}{\min(h_Y^{\text{target}}, AR_{\max} h_{\text{ref}})} \right\rceil, \quad (5.1)$$

dove h_{ref} è la minore tra le dimensioni medie degli elementi lungo anello esterno, anello interno e elemento intermedio. Nella campagna corrente $h_Y^{\text{target}} = 20$ mm e $AR_{\max} = 2.5$. Il parametro $AR_{\max}$ è il limite nominale imposto al rapporto tra il passo assiale e la

dimensione in-plane di riferimento h_{ref} . Esso limita preventivamente l'allungamento degli elementi durante la generazione della mesh, ma non sostituisce il controllo a posteriori dell'aspect ratio effettivo dei singoli elementi.

Per SSW, CSW e CCW il numero di suddivisioni per settore non è imposto uguale sui due anelli. Esso è calcolato separatamente sulla lunghezza del settore interno ed esterno, mantenendo almeno quattro suddivisioni, in numero pari. Le posizioni di attacco degli elementi intermedi restano allineate alla periodicità $2\pi/N$, ma i nodi intermedi dei due anelli possono avere passi differenti. In questo modo l'anello interno non eredita inutilmente la discretizzazione più fitta richiesta dal raggio esterno.

I raggi curvi e le celle circolari richiedono un trattamento ulteriore. Le file che si avvicinano agli anelli oltre la distanza di sicurezza proporzionale allo spessore vengono eliminate; l'ultima fascia di elementi è poi chiusa verso la fila circonferenziale più vicina. La procedura evita elementi quasi coincidenti o tangenti, che renderebbero più fragile la soluzione di contatto.

5.2.2 Componenti strutturali e gruppi logici

La SAW è suddivisa in componente solida principale ed eventuale banda esterna, entrambe associate alla medesima PSOLID. La RSW utilizza una PSHELL unica nella campagna strutturale; una suddivisione più dettagliata in cilindro interno, cilindro esterno e fianchi è disponibile per le successive prove di ottimizzazione, ma non modifica la geometria di base. SSW, CSW e CCW impiegano componenti separate per anello interno, anello esterno ed elementi intermedi, ciascuna con la propria proprietà PSHELL ma con uguale materiale e spessore nella campagna parametrica.

Oltre alle componenti strutturali, il generatore costruisce set dedicati a interfaccia del mozzo, superficie della ruota, elementi della componente operativa **Ground**, contatto ruota-piano rigido e contatti interni. I set di contatto restano distinti dai set richiesti per gli output. Tale separazione consente di modificare una legge di contatto senza cambiare l'identità delle regioni dalle quali vengono estratti i risultati.

5.2.3 Controlli geometrici e qualità della mesh

I controlli attualmente implementati riguardano la validità dei parametri, il numero minimo e la parità delle suddivisioni periodiche, l'allineamento dei nodi di connessione, la limitazione nominale dell'aspect ratio e la rimozione delle fasce terminali geometricamente critiche. Il manifest registra inoltre quantità quali numero di nodi, numero di elementi e principali passi reali della discretizzazione.

Questi controlli verificano la qualità geometrica e topologica della mesh, ma non dimostrano da soli la convergenza dei risultati. Per quantificare l'errore di discretizzazione è stata quindi eseguita una campagna dedicata, descritta nel seguito.

5.2.4 Studio di convergenza della mesh

Lo studio considera una geometria rappresentativa per ciascuna famiglia. Per SAW e RSW sono state ripetute le analisi MOD, ST_A1 e STNL_A1; per SSW, CSW e CCW sono state aggiunte ST_A2 e STNL_A2, così da includere la sensibilità alla fase circonferenziale. Le statiche sono state risolte sia con RBE3 sia con RBE2, mantenendo separati i due insiemi; le conclusioni operative della campagna sono formulate sul collegamento RBE3 adottato come configurazione di riferimento. La campagna di convergenza comprende 176 run post-processati, senza casi mancanti o falliti.

Il livello P coincide con la discretizzazione di produzione adottata nella campagna parametrica estesa. La sua dimensione è stata scelta come compromesso tra risoluzione del modello e costo computazionale, considerando l'elevato numero di geometrie e analisi previste. Lo studio di convergenza quantifica quindi, su casi rappresentativi delle diverse famiglie, lo scostamento introdotto da tale discretizzazione rispetto a riferimenti più raffinati, senza assumere che una singola geometria dimostri la convergenza dell'intera famiglia.

La sequenza di raffinamento è espressa rispetto alla dimensione nominale h_P della mesh di produzione. Il livello C è più grossolano, mentre i livelli più fini sono indicati con P_i :

$$h_C = \sqrt{2} h_P, \quad h_{P_i} = \frac{h_P}{(\sqrt{2})^i} = 2^{-i/2} h_P, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (5.2)$$

Lo studio è valutato fino a P_2 per tutte le famiglie. Per RSW e CCW, la variazione dei KPI monitorati indica una stabilizzazione non sufficiente a tale livello; il raffinamento è pertanto esteso a P_3 e P_4 . Il riferimento finale è assunto pari a P_2 per SAW, SSW e CSW e a P_4 per RSW e CCW.

Per una generica grandezza q , l'errore relativo del livello L rispetto al riferimento è definito come

$$e_q^{(L)} = 100 \frac{|q_L - q_{\text{ref}}|}{|q_{\text{ref}}|}, \quad q_{\text{ref}} = \begin{cases} q_{P_2}, & \text{SAW, SSW, CSW,} \\ q_{P_4}, & \text{RSW, CCW.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Le soglie adottate sono pari al 3% per frequenze, spostamenti, rigidezze, energia e confronto della curva forza-spostamento, e al 10% per tensioni e deformazioni massime. Per le curve non lineari è inoltre calcolato un NRMSE su una griglia comune tra 0 e 4000 N, con passo di 200 N. La Tab. 5.2 sintetizza il confronto tra P e il riferimento finale; la Fig. 5.2 separa KPI globali, curve e massimi locali.

La SAW mostra una risposta poco sensibile al raffinamento: l'errore modale massimo è 0,08%, i KPI lineari globali restano sotto 0,8% e la non lineare è prossima alla soglia, con errore massimo 3,05% e NRMSE 1,49%. La SSW presenta un comportamento analogo: P è conforme nelle analisi modali, lineari e STNL_A1; nella STNL_A2 lo scostamento

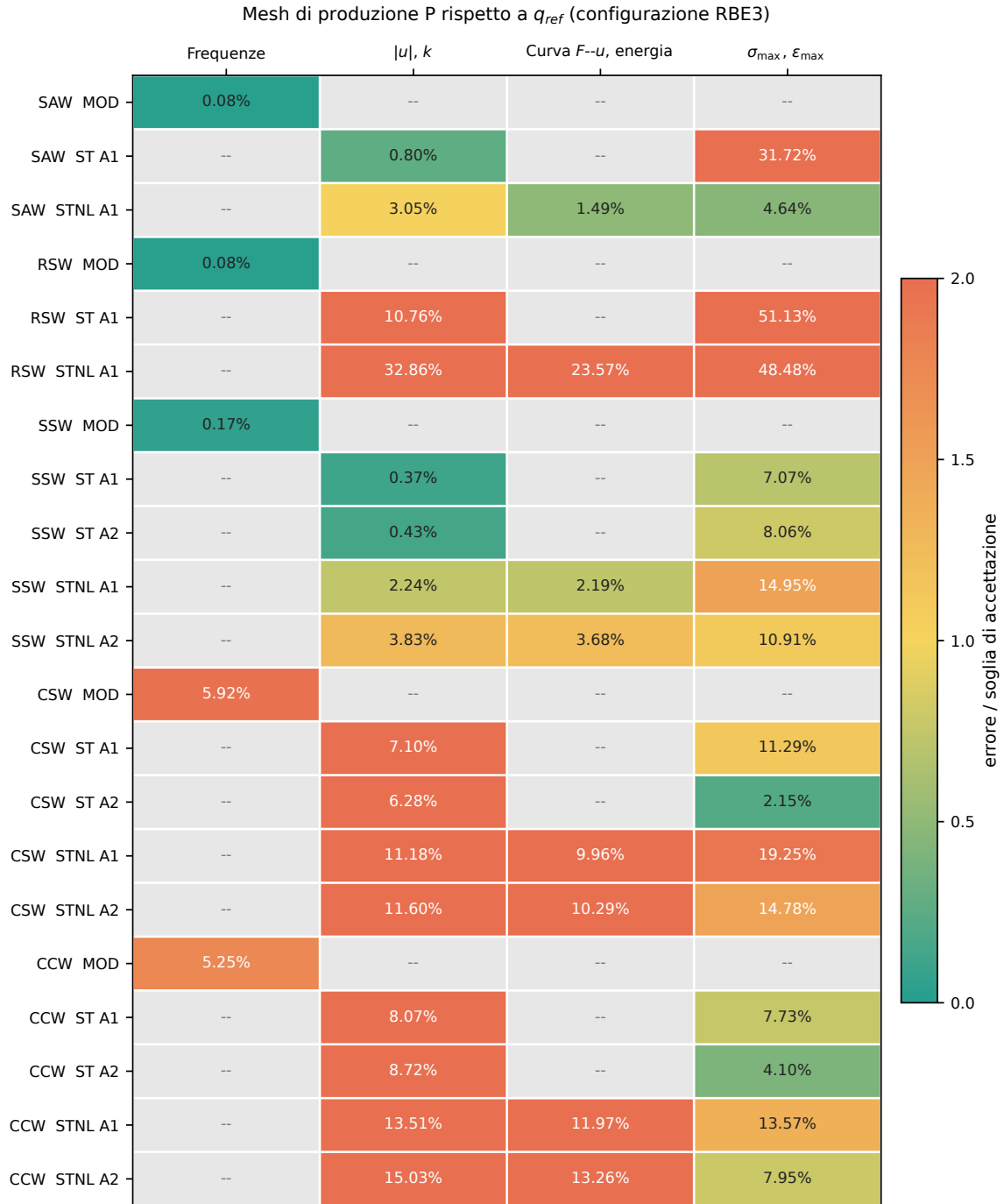


Figura 5.2: Errore della mesh di produzione P rispetto al riferimento finale per i casi RBE3: P_2 per SAW, SSW e CSW; P_4 per RSW e CCW. Il colore rappresenta il rapporto tra errore e soglia di accettazione.

Famiglia	Caso	$N_{e,P}$	$N_{e,ref}$	$e_{glob,max}$ [%]	$e_{loc,max}$ [%]	Interpretazione
SAW	MOD	14 400	57 600	0,08	–	conforme
SAW	ST_A1 (RBE3)	14 400	57 600	0,80	31,72	KPI globali conformi; massimi locali sensibili
SAW	STNL_A1 (RBE3)	14 825	59 250	3,05	4,64	indipendenza globale non raggiunta
RSW	MOD	21 960	344 160	0,08	–	conforme
RSW	ST_A1 (RBE3)	21 960	344 160	10,76	51,13	indipendenza globale non raggiunta
RSW	STNL_A1 (RBE3)	23 624	370 322	32,86	48,48	indipendenza globale non raggiunta
SSW	MOD	22 200	88 800	0,17	–	conforme
SSW	ST_A1 (RBE3)	22 200	88 800	0,37	7,07	conforme
SSW	ST_A2 (RBE3)	22 200	88 800	0,43	8,06	conforme
SSW	STNL_A1 (RBE3)	22 625	90 450	2,24	14,95	KPI globali conformi; massimi locali sensibili
SSW	STNL_A2 (RBE3)	22 625	90 450	3,83	10,91	indipendenza globale non raggiunta
CSW	MOD	27 000	109 200	5,92	–	non conforme
CSW	ST_A1 (RBE3)	27 000	109 200	7,10	11,29	indipendenza globale non raggiunta
CSW	ST_A2 (RBE3)	27 000	109 200	6,28	2,15	indipendenza globale non raggiunta
CSW	STNL_A1 (RBE3)	27 425	110 850	11,18	19,25	indipendenza globale non raggiunta
CSW	STNL_A2 (RBE3)	27 425	110 850	11,60	14,78	indipendenza globale non raggiunta
CCW	MOD	12 960	210 240	5,25	–	non conforme
CCW	ST_A1 (RBE3)	12 960	210 240	8,07	7,73	indipendenza globale non raggiunta
CCW	ST_A2 (RBE3)	12 960	210 240	8,72	4,10	indipendenza globale non raggiunta
CCW	STNL_A1 (RBE3)	13 810	223 440	13,51	13,57	indipendenza globale non raggiunta
CCW	STNL_A2 (RBE3)	13 810	223 440	15,03	7,95	indipendenza globale non raggiunta

Tabella 5.2: Errore massimo della mesh di produzione P rispetto al riferimento finale: P_2 per SAW, SSW e CSW; P_4 per RSW e CCW. Per le analisi modali l'errore globale è il massimo sulle prime cinque frequenze strutturali; per le statiche è il massimo tra spostamento e rigidezza.

globale massimo raggiunge 3,83%, ma con P_1 scende sotto 0,2%.

La CSW è invece sensibile alla discretizzazione P: l'errore modale raggiunge 5,92% e gli errori statici globali sono compresi tra circa 5,9% e 11,6%. Il livello P_1 riduce però tutti questi scostamenti a circa 1% o meno, indicando una convergenza regolare verso P_2 .

Per la RSW, il confronto con P_4 evidenzia che P non è sufficiente per una lettura indipendente dalla mesh: gli errori globali sono pari a circa 10,8% nella lineare e arrivano fino a 32,9% nella non lineare. Il livello P_3 porta la lineare entro 1,85%, ma la non lineare resta a circa 6,5%: il contatto non è ancora pienamente indipendente dalla mesh. Per la CCW il livello P_2 è sufficiente per MOD, ST_A1, ST_A2 e STNL_A1, con errori globali inferiori al 3%; STNL_A2 rimane al 4,31% con P_2 e al 3,44% con P_3 , appena oltre la soglia rispetto a P_4 .

I massimi locali di tensione e deformazione risultano generalmente più sensibili dei KPI globali. Essi sono quindi mantenuti come indicatori diagnostici, ma non usati da soli per dichiarare la convergenza: un massimo puntuale può spostarsi tra elementi vicini a vincoli, raccordi o contatti.

La Fig. 5.3 rende visibili questi andamenti normalizzando ciascun KPI con il rispettivo riferimento finale q_{ref} . Il quadrato vuoto identifica P e la fascia colorata rappresenta la tolleranza del 3%.

Le varianti RBE2 confermano infine che il tipo di collegamento al mozzo non può essere trattato come una semplice perturbazione numerica: nella CCW esso modifica sensibilmente la risposta e la sua dipendenza dalla mesh, mentre nella RSW le differenze

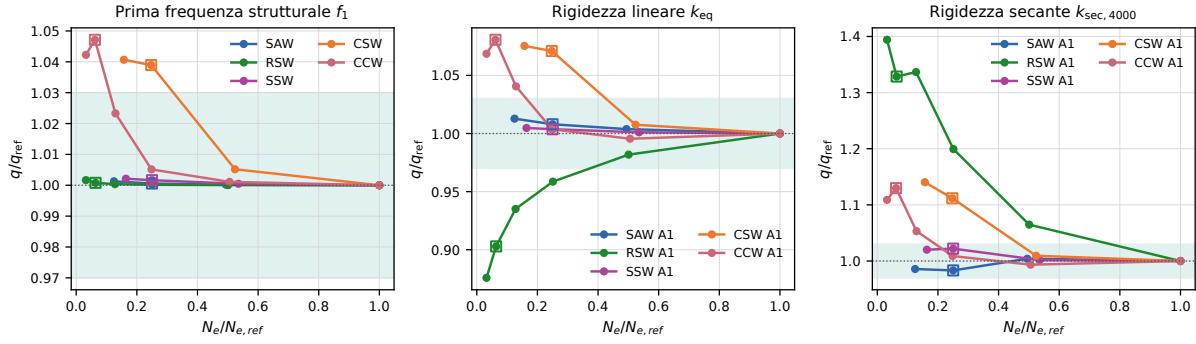


Figura 5.3: Evoluzione normalizzata della prima frequenza, della rigidità equivalente lineare e della rigidità secante a 4000 N con il raffinamento della mesh. Le ordinate sono normalizzate rispetto a q_{ref} e le curve statiche si riferiscono alla configurazione RBE3.

globali tra RBE2 e RBE3 restano contenute nel caso rappresentativo. I due insiemi di risultati devono pertanto rimanere distinti.

Nel complesso, P è adeguata per lo screening della SAW e della maggior parte dei KPI globali della SSW, ma non costituisce una discretizzazione universale. Per le verifiche finali è opportuno usare P_1 per SSW e CSW, almeno P_3 per la RSW lineare e P_2 per la CCW; i casi RSW non lineare e CCW STNL_A2 devono essere accompagnati da una verifica specifica rispetto a P_4 . Le regressioni basate su P descrivono pertanto il modello discreto di produzione e non una soluzione indipendente dalla mesh per ogni famiglia. Le discretizzazioni più fini individuate dallo studio vengono impiegate nelle reanalysis della seconda fase quando la mesh di produzione P non offre un livello di stabilità sufficiente per i KPI considerati.

5.3 Definizione del modello numerico

5.3.1 Materiali e proprietà

La campagna numerica utilizza un unico materiale, Al 7075-T6, per tutte le famiglie di ruote. In questo modo il confronto tra architetture isola l'effetto della geometria e della topologia, senza introdurre una variazione simultanea delle proprietà costitutive. La scelta è coerente con l'interesse generale del 7075-T6 come lega di alluminio trattabile termicamente e ad alta resistenza, rilevante per strutture sensibili alla massa; fonti NASA documentano sia le proprietà dell'alluminio 7075 sia il suo impiego in componenti aerospaziali e spaziali, pur evidenziando anche la necessità di controlli specifici su ambiente e corrosione sotto sforzo [16], [17]. Nel presente lavoro questa scelta non costituisce quindi una qualificazione del materiale per una ruota lunare, ma una base omogenea per il confronto numerico.

Il record numerico impiegato nei deck proviene dal *MATDAT Database of Materials Properties*, fornito da MATDAT LLC, Materials Databases and Services for Engineers and Scientists [18]. Tale record identifica il materiale come Al 7075-T6 e associa, alla temperatura di riferimento di 20 °C,

$$E = 71\,100 \text{ MPa}, \quad \nu = 0.331, \quad \rho = 2.72 \times 10^{-9} \text{ tonne/mm}^3. \quad (5.4)$$

Questi valori sono trasferiti nel modello come proprietà nominali del record MATDAT, non come *allowables* qualificati per ambiente spaziale. Le analisi lineari e modali utilizzano la scheda MAT1, mentre nei deck non lineari la stessa identificazione di materiale è estesa mediante MATS1 con opzione PLASTIC. La TABLES1 associata contiene il solo ramo plastico tabulato: l'ascissa è la deformazione plastica equivalente vera e l'ordinata è la tensione equivalente vera. La curva contiene 111 coppie e si estende da

$$(\bar{\varepsilon}_{\text{pl}}, \bar{\sigma}) = (0, 497,1 \text{ MPa}) \quad \text{a} \quad (0.11, 629,6 \text{ MPa}). \quad (5.5)$$

Il valore nullo della deformazione plastica nel primo punto non indica una deformazione totale nulla. Esso rappresenta il primo punto del ramo plastico ed è assunto, nel modello, come soglia nominale di inizio dello snervamento:

$$\bar{\varepsilon}_y = \frac{497,1 \text{ MPa}}{71\,100 \text{ MPa}} \simeq 0.00699, \quad \bar{\sigma}_y = 497,1 \text{ MPa}. \quad (5.6)$$

Nella fase elastoplastica, la deformazione equivalente totale ricostruibile dal modello è

$$\bar{\varepsilon}_{\text{tot}} = \bar{\varepsilon}_{\text{pl}} + \frac{\bar{\sigma}}{E}. \quad (5.7)$$

Prima del primo punto plastico si considera il ramo elastico lineare $\bar{\sigma} = E\bar{\varepsilon}_{\text{tot}}$, dall'origine fino a $\bar{\varepsilon}_y$. La Fig. 5.4 mostra sia la curva plastica effettivamente scritta nei deck, sia la legge true stress–true total strain ricostruita mediante la relazione precedente. I punti completi sono conservati nel record numerico e nei deck della campagna; l'Appendice B ne documenta la provenienza, la numerosità e gli estremi.

Il record MATDAT e i deck consentono quindi di documentare senza ambiguità la legge costitutiva utilizzata nella campagna. Non sono invece ricostruiti, nel materiale di progetto, la fonte sperimentale primaria dei singoli punti plastici né la procedura con cui i dati siano stati elaborati prima della tabulazione. Non si attribuisce perciò alla curva una provenienza sperimentale non verificata: essa è trattata come legge costitutiva proveniente dal record MATDAT e trasferita nel modello numerico. Quando viene introdotto un limite tensionale di screening, esso è ottenuto dividendo il primo livello tensionale del ramo plastico per un fattore di sicurezza preliminare pari a 2. Tale limite non rappresenta un allowable spaziale certificato né un criterio di fatica.

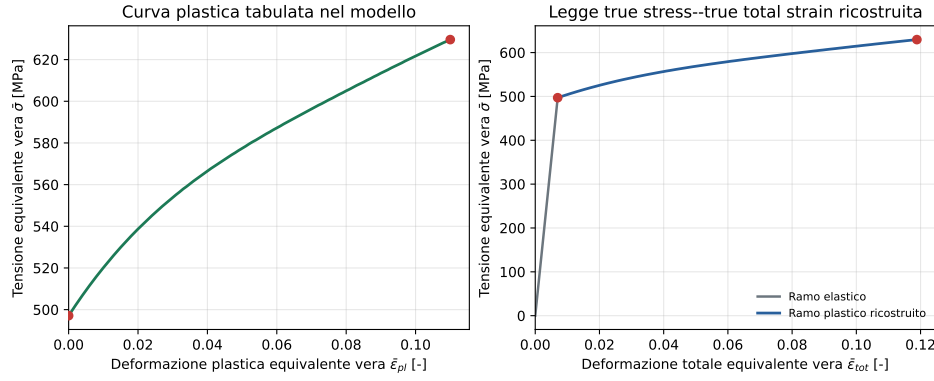


Figura 5.4: Legge dell'Al 7075-T6 impiegata nelle analisi non lineari. A sinistra è riportato il ramo plastico tabulato nel modello, espresso in funzione della deformazione plastica equivalente vera. A destra è mostrata la curva tensione vera–deformazione totale vera ricostruita aggiungendo il ramo elastico lineare e trasformando i punti plastici secondo l'Eq. (5.7).

Le proprietà sono assunte costanti e riferite al singolo stato a temperatura ambiente presente nel database. La campagna non include dipendenza dalla temperatura, vuoto, radiazione, degrado ambientale o anisotropia legata al processo produttivo. Questi effetti dovranno essere considerati in una fase di verifica di dettaglio qualora risultino rilevanti per il materiale e la tecnologia costruttiva selezionati.

5.3.2 Elementi, spessori e componenti

La SAW è modellata mediante elementi solidi esaedrici e proprietà PSOLID. Le restanti famiglie impiegano elementi shell quadrangolari e proprietà PSHELL; lo spessore t è assegnato alla proprietà e non ottenuto da una mesh volumetrica. Per SSW, CSW e CCW lo stesso valore è usato su anello interno, anello esterno ed elementi intermedi. Tale scelta isola l'effetto della forma e mantiene interpretabile il confronto parametrico, pur non rappresentando necessariamente una configurazione costruttiva ottimizzata.

5.3.3 Connessione del mozzo e RBE3

Nelle analisi statiche la forza è applicata al nodo di riferimento posto nel centro della ruota. Il nodo è collegato ai nodi dell'interfaccia interna mediante un RBE3: nella SAW l'interfaccia è la superficie cilindrica interna del solido; nella RSW è la banda cilindrica interna; in SSW, CSW e CCW comprende i nodi dell'anello interno. Le traslazioni dei nodi indipendenti partecipano con peso unitario alla distribuzione verso i sei gradi di libertà del nodo di riferimento.

L'RBE3 è stato scelto come configurazione di riferimento perché distribuisce il carico senza introdurre direttamente la rigidità cinematica di un corpo rigido tra tutti i nodi dell'interfaccia. Il generatore supporta anche una variante RBE2; la formulazione del

collegamento al mozzo è tracciata sia nel nome del run sia nel manifest. I risultati delle due formulazioni devono essere mantenuti distinti, poiché la scelta del collegamento modifica il vincolo locale del mozzo e può influire sulla risposta globale.

5.3.4 Piano di appoggio e contatto

Nei casi lineari non viene generata una superficie di appoggio rigida. L'appoggio è rappresentato bloccando tutti i gradi di libertà di una fila di nodi sulla superficie esterna in corrispondenza del punto inferiore della ruota. Questa condizione equivalente consente una soluzione lineare stabile e ripetibile, ma non descrive né la variazione dell'area di contatto né la ridistribuzione delle pressioni durante la deformazione.

Nei casi non lineari A viene invece generata una superficie shell molto rigida, interamente vincolata, posta sotto la ruota. Il materiale numerico della componente operativa **Ground** ha $E = 2\,100\,000$ MPa e non costituisce un modello della regolite: serve a rappresentare una superficie di appoggio praticamente indeformabile rispetto alla ruota. Il deck definisce il contatto tra ruota e piano di appoggio rigido mediante una proprietà **PCONT** con penalità normale **HARD**. Nella documentazione OptiStruct, **HARD** e **SOFT** indicano rispettivamente penalità più rigide o più morbide rispetto alla stima automatica della rigidità dell'interfaccia [19]. Poiché l'appoggio rappresenta una superficie praticamente indeformabile e lo spostamento al mozzo è un KPI primario, la formulazione **HARD** limita la penetrazione numerica all'interfaccia e riduce il contributo della compliance di contatto alla deformazione globale misurata. Si impone inoltre un coefficiente di attrito tangenziale statico pari a 0.15 come valore di compromesso: il contatto non è privo di attrito, ma non viene imposto un incollaggio cinematico tra ruota e superficie di appoggio.

Per SSW e CSW è inoltre definita un'interazione interna tra anello esterno ed elementi intermedi mediante una proprietà di contatto **SOFT**. Nella CCW il set di autocontatto interno comprende anello interno e celle, mentre il contatto con il piano di appoggio coinvolge anello interno, anello esterno e celle. Quest'ultima estensione è stata introdotta per intercettare le configurazioni molto deformabili nelle quali parti diverse dall'anello esterno possono raggiungere l'appoggio. Per i contatti interni viene adottata una penalità **SOFT**: tali interazioni hanno principalmente la funzione di impedire compenetrazioni durante le grandi deformazioni; una formulazione più morbida favorisce la gestione numerica delle variazioni di stato del contatto e limita il rischio di sovrairrigidire artificialmente la risposta globale. La scelta ammette una maggiore compliance dell'interfaccia rispetto alla formulazione **HARD** ed è adottata come compromesso numerico per i contatti interni. La superficie di appoggio della CCW è inoltre estesa lungo X fino a due volte il raggio esterno complessivo, così da coprire la regione deformata.

5.3.5 Vincoli e casi di carico

La Fig. 5.5 confronta schematicamente l'appoggio lineare e quello non lineare. Il modulo massimo del carico è $F = 4000$ N. Nella famiglia A esso è diretto lungo $-Z$. Il nodo centrale è vincolato nelle traslazioni X e Y , mentre può spostarsi nella direzione del carico. Nella famiglia B la risultante è inclinata di $\alpha = 10^\circ$ nel piano YZ :

$$F_Y = F \sin \alpha, \quad F_Z = -F \cos \alpha, \quad \sqrt{F_Y^2 + F_Z^2} = F. \quad (5.8)$$

Non viene quindi mantenuta costante la componente verticale aggiungendo una forza laterale: è il modulo della risultante a restare pari a F . Nei casi B il nodo centrale è vincolato in X ; nelle analisi non lineari dei modelli in shell sono mantenuti anche la superficie di appoggio rigida e il bloccaggio della fila di appoggio lineare, per limitare lo scorrimento rigido della ruota.

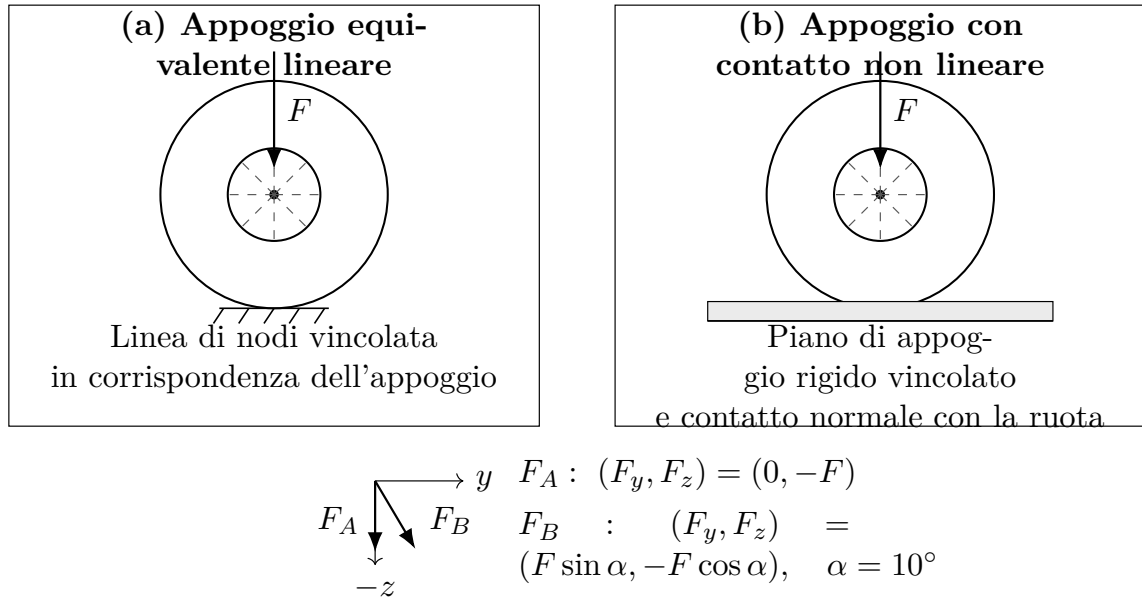


Figura 5.5: Schema delle condizioni al contorno statiche e delle direzioni di carico. Il disegno è concettuale e non rappresenta la discretizzazione di una specifica famiglia.

5.4 Tipologie di analisi

5.4.1 Analisi statiche lineari

Le analisi statiche lineari, indicate nel workflow con la sigla **ST**, assumono risposta elastica lineare e piccoli spostamenti. Utilizzano **MAT1**, il collegamento al mozzo previsto per il caso statico e l'appoggio equivalente tramite nodi vincolati; non includono contatto, aggiornamento geometrico o plasticità. Il carico applicato nel deck è il valore massimo di 4000 N. Gli spostamenti e gli indicatori tensionali a livelli inferiori sono ricavati nel

post-processing per proporzionalità lineare; essi rappresentano quindi una scalatura della stessa soluzione FEM, non altre analisi indipendenti. Questa impostazione fornisce un riferimento numericamente economico per la rigidità globale, ma non può riprodurre l'evoluzione dell'area di appoggio o le variazioni di vincolo proprie del modello non lineare.

5.4.2 Analisi statiche non lineari

Le analisi statiche non lineari, indicate nel workflow con la sigla **STNL**, sono risolte in forma incrementale. Nei casi con superficie di appoggio rigida sono attivi grandi spostamenti tramite **LGDISP**, contatto e plasticità tabulata del materiale. Il deck utilizza **NLPARM** con 20 incrementi nominali e incremento iniziale 0.05; il parametro pseudo-temporale va da 0 a 1 e scala progressivamente il carico fino al valore finale.

Il controllo adattativo **NLADAPT** limita l'incremento normalizzato nell'intervallo $10^{-4} \leq \Delta t \leq 0.05$, attraverso i campi **DTMIN**=0.0001 e **DTMAX**=0.05. Nel deck non è specificato un valore esplicito di **NCUTS**. Il limite superiore mantiene una risoluzione sufficientemente fitta della progressione di carico, mentre il limite inferiore evita che configurazioni numericamente critiche proseguano attraverso successioni di cutback a incrementi estremamente piccoli. Questa scelta è particolarmente rilevante nella campagna parametrica estesa: una configurazione incapace di convergere entro i limiti adottati viene successivamente esclusa dai risultati utilizzabili, evitando tempi di calcolo sproporzionati su singoli casi.

La richiesta **NLOUT** utilizza un **SET** di tipo **TIME** con 21 livelli di pseudo-tempo normalizzato compresi tra 0 e 1, distanziati di 0.05. Poiché il carico viene scalato progressivamente fino a 4000 N, tali livelli corrispondono a intervalli di 200 N. Gli output incrementali sono quindi richiesti direttamente a 0, 200, 400, ..., 4000 N, rendendo disponibili i punti utilizzati nel post-processing delle curve forza-spostamento e nel calcolo dei KPI senza ricorrere a successive interpolazioni. La posizione di tali livelli è controllata dalla richiesta di output, non da **DTMAX**. **NLMON** registra lo spostamento del nodo centrale nella direzione dominante del carico e fornisce un controllo diretto dell'evoluzione del KPI principale durante la soluzione. Nei casi con contatto viene inoltre richiesta l'uscita delle forze di contatto in **H3D**.

La stabilizzazione **CNTSTB** è introdotta per migliorare la robustezza numerica delle transizioni di contatto durante la soluzione incrementale. Poiché tale meccanismo aggiunge un contributo numerico artificiale alle equazioni del contatto [20], il campo **SCALE** è mantenuto pari a 0.001, con **S0**=1.0 e **S1**=0.0 nel deck verificato. L'obiettivo è favorire la convergenza limitandone l'influenza sulla risposta strutturale; la stabilizzazione non deve quindi essere interpretata come una proprietà fisica della superficie di appoggio o della ruota.

Le non linearità effettivamente presenti sono sintetizzate in Tab. 5.3. La configurazione **STNL B** della SAW, priva di superficie di appoggio rigida nel generatore corrente, non

è equivalente agli schemi STNL B delle famiglie shell e deve essere interpretata entro il proprio schema di vincolo.

Caso	MATS1	LGDISP	Piano rigido	Contatto	Stabilizzazione
ST	no	no	no	no	no
STNL A, tutte le famiglie	sì	sì	sì	sì	sì
STNL B, SAW	sì	no	no	no	no
STNL B, famiglie shell	sì	sì	sì	sì	sì

Tabella 5.3: Non linearità, superficie di appoggio rigida e dispositivi numerici riscontrati nelle configurazioni del generatore corrente. Le sigle **ST** e **STNL** indicano rispettivamente analisi statica lineare e analisi statica non lineare.

5.4.3 Analisi modali

Le analisi modali, indicate nel workflow con la sigla **MOD**, sono eseguite in configurazione free-free: non sono presenti superficie di appoggio, precarico, SPC o collegamento RBE al nodo centrale. L'estrazione degli autovalori reali utilizza **EIGRL**; nei deck della campagna vengono richieste 16 radici (**ND=16**), con limite inferiore **V1=0.0**, senza limite superiore **V2** e con autovettori normalizzati rispetto alla matrice di massa (**NORM=MASS**), ossia a massa generalizzata unitaria. Poiché il modello è libero nello spazio, la sequenza comprende inizialmente modi quasi rigidi associati ai sei gradi di libertà del corpo libero, seguiti dai modi deformabili della ruota. Tali modi quasi rigidi non rappresentano deformazioni strutturali della ruota e non devono essere confrontati con le frequenze flessionali o locali. Nel dataset, un modo con frequenza inferiore a 1 Hz è marcato come rigido; la prima frequenza usata come KPI è la prima frequenza strutturale al di sopra di tale soglia, non il primo valore grezzo elencato dal solutore. La soglia di 1 Hz costituisce un criterio operativo di post-processing e non una classificazione delle forme modali eseguita dal solutore.

Questa frequenza caratterizza il modello free-free adottato e non è una proprietà assoluta della ruota installata. Inoltre, il filtro attuale è basato sulla frequenza e non classifica automaticamente le forme modali come globali o locali; tale distinzione richiederebbe l'ispezione o l'elaborazione delle forme proprie.

5.4.4 Configurazioni di carico e posizionamento

Per le famiglie periodiche SSW, CSW e CCW, gli indici 1 e 2 identificano due fasi relative tra geometria e punto di carico. La fase 1 allinea un elemento ripetuto con la posizione di riferimento; la fase 2 applica uno sfasamento pari a metà settore. Il carico resta applicato

al nodo centrale, ma cambia la disposizione degli elementi resistenti rispetto all'appoggio. Le famiglie assialsimmetriche SAW e RSW non richiedono il raddoppio A1/A2 o B1/B2 nella campagna corrente.

5.5 Organizzazione dei deck e tracciabilità

5.5.1 Naming dei modelli

Ogni caso è identificato da un `run_id` composto da famiglia, parametri codificati, eventuale suffisso di variante e tipo di analisi. Un esempio è

`M3_400_33333_200_040_300__STNL_A1.`

Il nome compatto è utile per la gestione operativa, mentre l'interpretazione fisica dei parametri è affidata ai metadati espliciti.

5.5.2 Manifest e metadati

La cartella del run contiene il deck e un `manifest.json`. Il manifest riporta geometria, materiale, regole di mesh, tipo di collegamento, carico, vincoli, riepilogo della discretizzazione, conteggi di nodi ed elementi, percorsi attesi e hash del deck. La catena parametri-deck-output può quindi essere ricostruita anche quando i file numerici pesanti vengono archiviati o rimossi.

5.5.3 Controlli preliminari di validità

Prima della scrittura, il generatore rifiuta parametri incompatibili e verifica condizioni specifiche della famiglia. Dopo la soluzione, uno scanner classifica il run in base alla presenza e alla completezza degli output. Generabilità geometrica, completamento del solutore e utilizzabilità del risultato restano tre verifiche distinte: un deck valido può non convergere, e una soluzione convergente può richiedere un controllo ingegneristico prima di entrare nei modelli predittivi. Il Capitolo 6 descrive questa seconda parte della selezione.

Capitolo 6

Post-processing automatico e costruzione del dataset

Il post-processing trasforma gli output numerosi e voluminosi del solutore in un archivio compatto, interrogabile e aggiornabile. L'obiettivo è quello di conservare i valori finali per ogni analisi e di mantenere separati i dati letti, gli indicatori derivati e le valutazioni sulla qualità dei risultati. Questa separazione consente di modificare un KPI o una soglia senza rieseguire la campagna FEM, purché le grandezze grezze necessarie siano state archiviate.

6.1 Architettura del workflow di post-processing

La pipeline è articolata in due livelli. Il Livello A legge e normalizza le grandezze presenti nei file del solutore; il Livello B calcola KPI, indicatori di forma delle curve e liste di casi utilizzabili. La Fig. 6.1 mostra la sequenza completa.

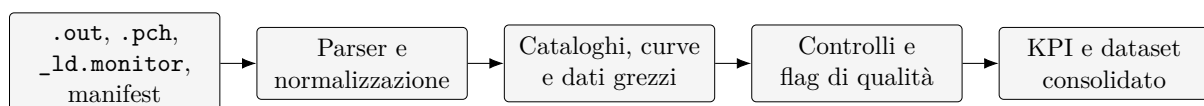


Figura 6.1: Pipeline automatica dal risultato del solutore al dataset consolidato.

Prima dell'estrazione, uno scanner individua le cartelle canoniche e classifica ogni run in base alla presenza e al contenuto del file `.out`. Il registro destinato al post-processing può quindi essere limitato ai casi completati e convergenti. Questa selezione evita di trattare come dati validi file parziali o analisi mai avviate e non sostituisce i controlli successivi sulla plausibilità della risposta.

6.2 Dati di input e tracciabilità

6.2.1 Output del solutore

I parser utilizzano quattro sorgenti principali:

- il file `.out`, dal quale sono letti completamento, errori, warning, ultimo incremento, massa, volume e dati modali;
- il file `.pch`, che contiene spostamenti, reazioni vincolari, energia di deformazione e risultati di stress e strain richiesti nel deck;
- il file `_ld.monitor`, quando presente, che fornisce la storia del fattore di carico e dello spostamento monitorato nelle analisi non lineari;
- il `manifest.json`, che specifica geometria, materiale, mesh, forza, direzione rilevante, collegamento al mozzo e percorsi attesi.

I file `.h3d` sono utili per visualizzazione, immagini e controlli locali, ma non sono un input necessario della pipeline quantitativa descritta in questo capitolo. Ciò permette di eseguire e archiviare la campagna senza dipendere dai file grafici più pesanti.

6.2.2 Manifest e metadati

Il `run_id` collega registro, manifest, output e KPI. Il `geometry_id` identifica invece la geometria indipendentemente dal tipo di analisi. Queste chiavi consentono di integrare batch distinti e di mantenere un record univoco per ciascun caso elaborato.

Il manifest è anche la sorgente della direzione di carico usata dal parser. Lo spostamento rilevante viene scelto in base alla componente dominante della forza: Z per la famiglia A e ancora Z per la famiglia B corrente, poiché $|F_Z| > |F_Y|$. Il segno è conservato nelle colonne di spostamento; le rigidezze sono calcolate con valori assoluti.

6.3 Estrazione delle grandezze di interesse

6.3.1 Risposta forza–spostamento

Per le analisi non lineari, il parser privilegia il monitor del nodo centrale. Il fattore di carico λ_j del passo j viene trasformato in forza mediante

$$F_j = F_{\max} \lambda_j, \quad (6.1)$$

e associato allo spostamento registrato. Se il monitor non è disponibile, la curva viene ricostruita dalle sezioni incrementali del PCH, usando il tempo o il fattore di carico scritto nel file.

Questa gerarchia ha una conseguenza sulla completezza dei dati locali. Il monitor contiene la storia dello spostamento, ma non stress e strain per ogni incremento. Quando esso è la sorgente della curva, tali grandezze sono associate soltanto al punto finale, se leggibili nel PCH; i campi intermedi restano mancanti. È un caso di assenza della grandezza locale nella sorgente incrementale disponibile.

6.3.2 Massa e frequenze

Massa e volume vengono letti dal riepilogo del modello presente nel file `.out`, quando disponibile. La massa del solutore, espressa in modo coerente con la densità in tonne/mm³, viene convertita in chilogrammi. Il codice dispone anche di una stima analitica basata su geometria e densità come fallback per record privi del valore; nel dataset destinato ai confronti è quindi necessario mantenere tracciata la provenienza del record e privilegiare i valori letti dal modello effettivamente risolto.

Le 16 frequenze richieste vengono salvate in forma lunga in `modal_modes.csv`. Ogni modo è marcato come quasi rigido o strutturale mediante la soglia di 1 Hz. I primi cinque modi grezzi sono mantenuti per tracciabilità, mentre gli indicatori dinamici impiegati nei confronti usano le prime frequenze strutturali.

6.3.3 Tensioni, deformazioni e grandezze locali

Il tipo di risultato dipende dalla formulazione degli elementi. Per la SAW, modellata con solidi, il deck richiede `GPSTRESS` e `GPSTRAIN`. Per RSW, SSW, CSW e CCW, modellate con shell, il PCH contiene stress e strain di corner; il parser separa le componenti e il campo equivalente, che nella struttura di output verificata corrisponde al valore di von Mises/equivalente del gruppo shell.

Il dataset conserva sia colonne specifiche sia colonne aggregate di fallback. Un massimo shell equivalente viene preferito al massimo di componente; per i solidi sono invece disponibili i massimi ai grid point. Questa normalizzazione rende possibile una consultazione comune; tuttavia non rende i picchi universalmente confrontabili non essendo applicato un filtro spaziale che escluda regioni prossime a RBE, contatti, bordi o possibili singolarità.

6.4 Costruzione dei KPI

6.4.1 Rigidezza e carichi target

Per una soluzione lineare, la rigidezza equivalente è

$$k_{\text{eq}} = \frac{|F_{\text{max}}|}{|u_{\text{ref}}|}. \quad (6.2)$$

Gli spostamenti ai livelli inferiori sono ottenuti per proporzionalità rispetto al risultato a 4000 N; ne consegue che la rigidezza resta unica e indipendente dal carico entro l'ipotesi lineare.

Per le analisi non lineari, i livelli

$$F_i \in \{200, 1000, 2000, 4000\} \text{ N}$$

sono target di post-processing estratti dalla medesima curva incrementale e quindi dalla stessa analisi dello stesso FEM. Come descritto nel Capitolo 5, la richiesta `NLOUT` delle analisi statiche non lineari usa un `SET` di pseudo-tempo normalizzato con passo 0.05; con carico finale pari a 4000 N, gli output sono quindi richiesti direttamente a 0, 200, 400, ..., 4000 N. Nella pipeline di post-processing, la curva forza-spostamento viene tuttavia ricostruita prioritariamente dal file `_ld.monitor`, che conserva la sequenza degli incrementi effettivamente risolti dal solutore; se il monitor non è disponibile, la curva viene ricostruita dalle sezioni incrementali del PCH. L'interpolazione lineare è quindi una procedura di post-processing applicata quando un target non coincide esattamente con un punto della sorgente di curva selezionata:

$$u(F_i) = u_a + \frac{F_i - F_a}{F_b - F_a} (u_b - u_a), \quad F_a \leq F_i \leq F_b, \quad (6.3)$$

da cui

$$k_{\text{sec}}(F_i) = \frac{|F_i|}{|u(F_i)|}. \quad (6.4)$$

Non viene eseguita estrapolazione. Se la curva termina prima del target, $u(F_i)$ e i KPI dipendenti restano NaN. Una curva può quindi essere disponibile e sufficientemente regolare per descrivere la risposta generale fino al carico raggiunto, ma non fornire tutti i target richiesti per il confronto quantitativo. La disponibilità della curva e la disponibilità dei singoli livelli di carico sono perciò tracciate come aspetti distinti. Per ridurre ambiguità dovute al segno, il parser orienta la curva secondo il verso dello spostamento finale quando calcola gli indicatori di forma, mentre conserva il valore originale nelle tabelle grezze.

Oltre alle rigidezze secanti, sono calcolati, con riferimento a 2000 N, rigidezza tangente iniziale e finale, rapporto tra le due, indice di non linearità basato sul residuo rispetto a un fit lineare, forza della maggiore transizione di pendenza ed energia sottesa dalla curva. Tali indicatori descrivono la forma della risposta e non sostituiscono l'ispezione dei casi critici.

6.4.2 Indicatori modali

Gli indicatori modali comprendono frequenze proprie, numero di modi quasi rigidi e prime cinque frequenze strutturali. Massa e volume sono associati alla geometria e possono

quindi essere uniti ai risultati statici mediante `geometry_id`. La frequenza strutturale resta riferita al modello free-free definito nel Capitolo 5.

6.4.3 Indicatori tensionali

Per le analisi statiche lineari, stress e strain ai carichi target vengono scalati proporzionalmente al valore a pieno carico. Per le analisi statiche non lineari, l'interpolazione è applicata soltanto quando esistono punti finiti della grandezza locale attorno al target. Se il PCH fornisce soltanto il valore finale, gli indicatori tensionali intermedi non vengono ricostruiti artificialmente.

Massa, spostamento, rigidità e frequenze sono KPI globali adatti al confronto tra famiglie. I massimi tensionali sono invece indicatori locali e devono essere confrontati soprattutto entro gruppi omogenei per tipo di elemento, mesh, regione e condizione al contorno. Una valutazione di resistenza conclusiva richiede inoltre una verifica locale dei picchi e della loro sensibilità alla mesh.

6.5 Controlli di qualità e criteri di esclusione

Il primo livello verifica che l'analisi sia terminata, che il file `.out` non contenga errori bloccanti o indicazioni di divergenza e che gli output richiesti siano leggibili. Il secondo livello valuta la curva non lineare. I punti sono ordinati per forza e vengono controllati rispetto a:

- copertura del target di 2000 N;
- monotonia dello spostamento orientato;
- presenza di un tratto con pendenza negativa;
- variazioni molto brusche della rigidità incrementale;
- terminazione con un numero insufficiente di punti.

I codici prodotti sono `EARLY_TERMINATION`, `NEGATIVE_STIFFNESS`, `NON_MONOTONIC` e `SPIKY_SLOPE`. Essi sono flag diagnostici. Un softening o una perdita di rigidità non vengono interpretati automaticamente come non fisici: il caso è segnalato per distinguere instabilità numerica, problema di contatto, errore di estrazione e possibile fenomeno strutturale reale. Un risultato può essere conservato nell'archivio e contemporaneamente escluso da una regressione che richiede curve regolari.

La copertura di 2000 N costituisce il requisito minimo adottato nel controllo generale di regolarità della curva. La disponibilità dei KPI a carichi superiori viene verificata

separatamente per ciascun target; una curva può pertanto contribuire ai confronti a 2000 N senza essere inclusa nelle analisi che richiedono il raggiungimento di 4000 N.

La lista dei casi utilizzabili è quindi un prodotto distinto dall'archivio consolidato dei risultati. Le regole correnti ammettono le analisi modali e le analisi statiche lineari di tutte le famiglie; vengono escluse dai modelli predittivi le analisi statiche non lineari B di SSW, CSW e CCW per motivi di instabilità del modello. Per la CCW, il ramo statico non lineare A in formulazione RBE3 è mantenuto nella sintesi principale quando supera i controlli di regolarità della curva, mentre il corrispondente ramo RBE2 resta separato e non viene usato nei modelli predittivi.

6.6 Dataset finale e copertura della campagna

6.6.1 Struttura dei file

Le tabelle prodotte sono riportate in Tab. 6.1. La distinzione tra formato per-run e formato lungo permette sia verifiche rapide sia il ricalcolo di KPI futuri.

File	Contenuto
<code>geometry_catalog.csv</code>	parametri, tipo e dimensione della mesh, massa e volume associati alla geometria
<code>run_catalog.csv</code>	analisi, scenario, stato, variante RBE e percorsi degli output
<code>run_summary.csv</code>	vista operativa per-run con lo stesso schema del catalogo
<code>static_response_raw.csv</code>	valori finali estratti dalle analisi statiche
<code>nonlinear_curve.csv</code>	punti incremento per incremento delle curve statiche non lineari
<code>modal_modes.csv</code>	modi, frequenze, masse e rigidezze generalizzate disponibili
<code>kpi_summary.csv</code>	indicatori derivati, target di carico e flag di forma della curva

Tabella 6.1: File principali del dataset di post-processing.

6.6.2 Casi disponibili e casi esclusi

L'archivio consolidato dei risultati contiene 1170 geometrie e 11803 run convergenti post-processati. La copertura per famiglia è sintetizzata in Tab. 6.2. I conteggi indicano run presenti nell'archivio consolidato, non l'intero spazio teorico né l'idoneità automatica alla regressione.

Nel ramo CCW con spessore nominale di 5 mm, la formulazione RBE3 comprende 351 run statici non lineari A1 e 351 run statici non lineari A2 post-processati, con 351 casi A1 e 346 casi A2 utilizzabili dopo i controlli di regolarità. Il ramo RBE2 resta invece più

Famiglia	MOD	ST A	ST B	STNL A	STNL B	Impiego corrente
SAW	27	27	27	27	27	analisi MOD, ST e STNL A/B utilizzabili entro la configurazione disponibile
RSW	144	288	288	288	288	analisi MOD, ST e STNL A/B; RBE2 e RBE3 mantenuti separati
SSW	324	648	648	648	648	analisi MOD, ST e STNL A; STNL B esclusa dai modelli predittivi
CSW	324	648	648	648	648	analisi MOD, ST e STNL A; STNL B esclusa dai modelli predittivi
CCW	351	1404	702	1392	691	analisi MOD e ST; STNL A utilizzabile nel ramo RBE3, STNL B esclusa

Tabella 6.2: Copertura dell’archivio consolidato dei risultati. Per le famiglie con due fasi circolari, i conteggi delle colonne A e B aggregano le fasi 1 e 2 disponibili. I conteggi RSW e parte dei conteggi CCW includono varianti RBE2 e RBE3; le sigle MOD, ST e STNL indicano rispettivamente analisi modale, statica lineare e statica non lineare.

fragile: oltre ai run convergenti presenti in tabella, il controllo dedicato ha registrato 7 errori nelle analisi statiche non lineari A1 e 5 errori nelle analisi statiche non lineari A2; tra le curve convergenti, 1 caso A1 e 62 casi A2 sono segnalati come irregolari. Questi numeri mostrano perché disponibilità del file, convergenza del solutore, utilizzabilità generale della curva e disponibilità dei singoli target debbano essere riportate separatamente.

6.6.3 Impiego nei confronti e nei modelli predittivi

I modelli predittivi leggono una selezione esplicita di righe coerenti per famiglia, scenario, formulazione RBE e target. L’archivio consolidato non viene ridotto eliminando i casi esclusi: conserva il record completo dei run post-processati, mentre liste derivate documentano il motivo dell’inclusione o dell’esclusione.

La costruzione dell’archivio è incrementale. Nuovi batch vengono elaborati con la stessa struttura e fusi usando `geometry_id`, `run_id` e la coppia `run_id-step`. Di conseguenza, l’aggiunta di una nuova campagna o di una variante non richiede la rilettura concettuale dell’intero archivio e non modifica le definizioni metodologiche dei KPI.

Capitolo 7

Analisi di sensitività, risultati e modelli predittivi

Questo capitolo organizza i risultati della campagna parametrica in tre livelli. Il primo riguarda l'effetto delle scelte di modellazione: formulazione del collegamento al mozzo, passaggio dal modello statico lineare a quello non lineare con contatto e fase circonferenziale del carico. Il secondo valuta quanto i KPI possano essere descritti mediante modelli predittivi compatti, validati fuori campione e raggruppati per geometria. Il terzo traduce le tendenze numeriche in indicazioni progettuali sul ruolo dei parametri geometrici. Questa separazione evita che una differenza introdotta dal modello numerico venga scambiata per un effetto geometrico.

7.1 Perimetro dei dati e criteri di confronto

L'archivio post-processato contiene 11803 run nel file dei KPI e 1287 identificativi geometrici nei cataloghi di run; il catalogo geometrico nominale contiene 1170 geometrie uniche. La differenza deriva dagli identificativi aggiuntivi associati ai rami CCW e dai casi operativi utilizzati per completare i confronti di fase e formulazione. Prima delle elaborazioni sono stati esclusi i run incompleti, quelli con errori di post-processing, le condizioni B giudicate non rappresentative per le famiglie SSW, CSW e CCW e i rami non lineari mantenuti fuori dalla sintesi principale quando associati a contatti o curve non sufficientemente regolari. Per CCW la sintesi principale utilizza gli spessori $t = 3\text{ mm}$, 4 mm e 5 mm , mentre il ramo $t = 2\text{ mm}$ non viene usato nei confronti progettuali perché eccessivamente cedevole. Il dataset di regressione comprende 9121 run ed è conservato insieme alle motivazioni di esclusione; i dettagli di tracciabilità sono riportati nell'Appendice B.

I confronti appaiati sono eseguiti solo quando esistono due run della stessa geometria che differiscono per la singola scelta in esame. Per una grandezza positiva Q , la variazione

relativa è definita come

$$\Delta_Q = 100 \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}. \quad (7.1)$$

Oltre alla mediana firmata sono riportati la media del valore assoluto, il 90-esimo percentile del valore assoluto e il massimo. La mediana descrive la tendenza sistematica, mentre il 90-esimo percentile evidenzia la variabilità senza affidare il giudizio a un singolo caso estremo.

7.2 Parte I: effetto delle scelte di modellazione

7.2.1 Collegamento al mozzo: RBE2 e RBE3

La formulazione RBE3 distribuisce la forza senza imporre una cinematica rigida alla superficie interna; la variante RBE2 vincola invece rigidamente i gradi di libertà selezionati. Poiché questa differenza modifica la cedevolezza globale, le due formulazioni non vengono combinate nello stesso dataset di regressione. Il confronto appaiato è disponibile per 144 geometrie RSW e, nel ramo principale CCW, per 234 geometrie lineari effettivamente sovrapponibili tra RBE2 e RBE3. Le modali non sono coinvolte, perché nei deck modali non è presente il collegamento rigido di applicazione del carico.

Fam.	Analisi	KPI	F [N]	n	Mediana [%]	Media ass. [%]	P90 ass. [%]	Max ass. [%]
RSW	STNL_A1	k_sec	4000	144	2.45	5.84	17.34	25.81
RSW	STNL_A1	u_abs	4000	144	-2.39	5.12	14.78	20.51
RSW	ST_A1	k_eq	4000	144	1.45	3.20	9.47	9.75
RSW	ST_A1	u_abs	4000	144	-1.43	2.98	8.65	8.88
CCW	STNL_A1	k_sec	4000	234	233.24	541.36	1485.66	4080.22
CCW	STNL_A1	u_abs	4000	234	-69.99	61.32	93.69	97.61
CCW	STNL_A2	k_sec	4000	222	29.01	85.65	320.34	448.33
CCW	STNL_A2	u_abs	4000	222	-22.48	30.00	76.21	81.76
CCW	ST_A1	k_eq	4000	234	194.13	388.55	1059.07	2173.91
CCW	ST_A1	u_abs	4000	234	-66.00	59.05	91.37	95.60
CCW	ST_A2	k_eq	4000	234	23.86	69.53	253.11	352.53
CCW	ST_A2	u_abs	4000	234	-19.26	28.51	71.67	77.90

Tabella 7.1: Variazione relativa della formulazione RBE2 rispetto a RBE3 su coppie corrispondenti. Per CCW le righe STNL derivano dal sottoinsieme con spessori comuni alle due formulazioni.

Per RSW l'effetto mediano sulla rigidezza è contenuto: +1.45% nella statica lineare e circa +2.5% nella rigidezza secante non lineare. La coda della distribuzione è tuttavia più ampia, fino a un 90-esimo percentile assoluto del 17.4% nella STNL. Per CCW la dipendenza è invece dominante: nella fase A1 la mediana della rigidezza lineare RBE2 è circa il 194% più alta rispetto a RBE3, con 90-esimo percentile assoluto superiore al 1000% e casi estremi oltre un ordine di grandezza. Nella STNL la stessa tendenza rimane marcata: in A1 la mediana della rigidezza secante RBE2 è circa +233%, mentre in A2 si riduce a circa +29%. Il collegamento al mozzo è quindi parte della definizione fisica del modello CCW, non una scelta numerica secondaria.

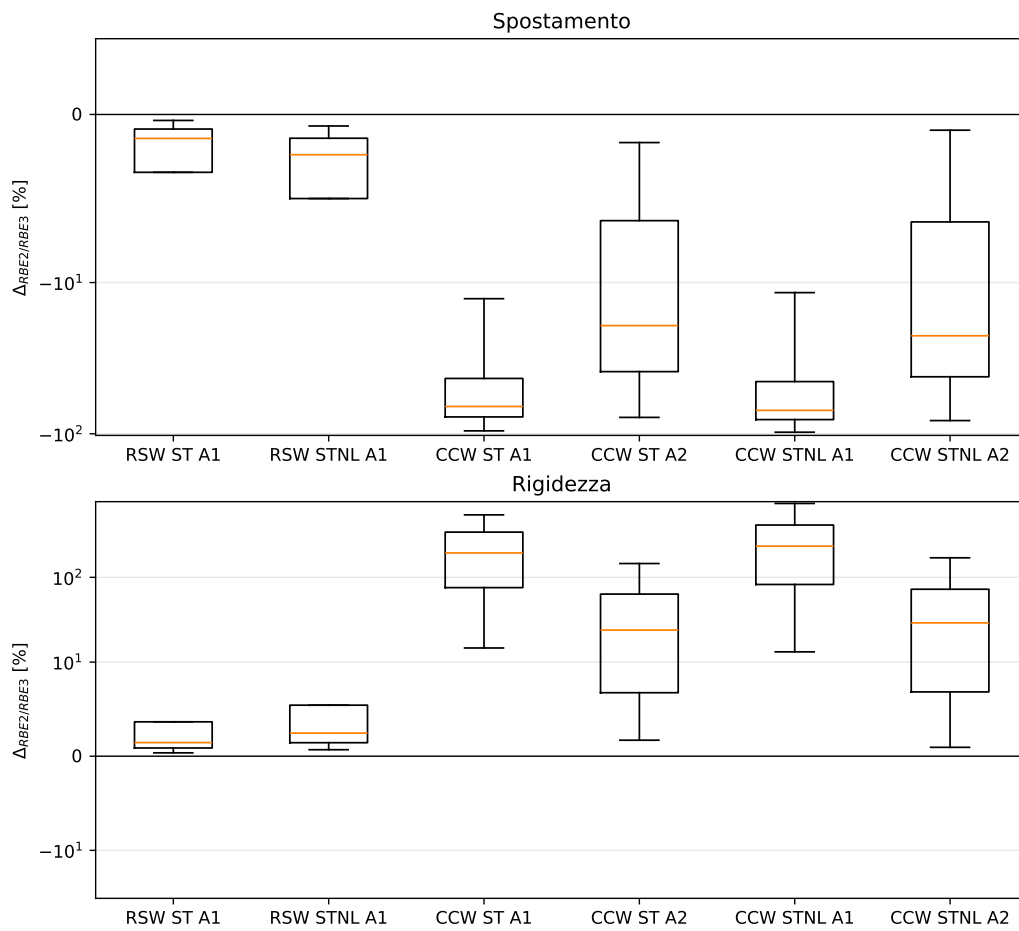


Figura 7.1: Distribuzione delle variazioni relative RBE2 rispetto a RBE3 per le coppie disponibili. La scala evidenzia la diversa sensibilità di RSW e CCW.

Per i modelli predittivi principali viene pertanto assunta la variante RBE3, coerente con l'obiettivo di distribuire il carico senza irrigidire artificialmente l'interfaccia. I risultati RBE2 rimangono un ramo di sensitività indipendente e non vengono usati per aumentare artificialmente la numerosità campionaria. I casi RBE2 disponibili per SSW e CSW nella mesh convergence sono utili come verifica metodologica locale, ma non entrano nel boxplot statistico del presente capitolo perché derivano da sottoinsiemi mirati e non da una campagna parametrica appaiata estesa all'intera famiglia.

7.2.2 Effetto congiunto di non linearità, contatto e vincoli

Il confronto ST-STNL non isola una sola sorgente di non linearità. Il modello ST utilizza un appoggio lineare equivalente, mentre STNL introduce il contatto con il piano di appoggio rigido, grandi spostamenti, legge elastoplastica e una diversa evoluzione dei vincoli attivi. Il confronto misura quindi l'effetto complessivo del passaggio tra le due idealizzazioni.

Per ogni geometria si confronta la rigidezza equivalente lineare con la rigidezza secante

$$k_{\text{sec}}(F) = \frac{F}{|u(F)|}, \quad (7.2)$$

valutata a 2000 N, carico nominale di riferimento, e a 4000 N, estremo superiore della campagna. L'uso di $|u|$ rende la metrica indipendente dal segno associato alla convenzione dell'asse.

Fam.	Fase	F [N]	n	Mediana [%]	Media ass. [%]	P90 ass. [%]	Max ass. [%]
SAW	A1	2000	27	-9.57	10.07	18.46	21.40
SAW	A1	4000	27	-5.82	6.18	11.69	13.97
RSW	A1	2000	144	73.94	77.58	119.77	173.68
RSW	A1	4000	144	71.09	74.34	116.45	170.22
SSW	A1	2000	324	3.47	4.94	9.85	40.88
SSW	A1	4000	324	3.88	9.01	24.71	82.24
SSW	A2	2000	324	6.33	8.51	14.53	47.40
SSW	A2	4000	324	6.72	12.53	27.52	77.34
CSW	A1	2000	324	4.09	4.39	7.49	9.60
CSW	A1	4000	324	2.73	3.94	7.22	29.16
CSW	A2	2000	324	3.64	4.76	8.34	14.04
CSW	A2	4000	324	2.17	4.31	7.90	18.27
CCW	A1	2000	351	1.25	3.96	8.21	28.87
CCW	A1	4000	351	-1.47	5.79	12.55	41.00
CCW	A2	2000	346	-0.61	5.63	12.59	31.90
CCW	A2	4000	346	-0.71	8.99	18.85	80.91

Tabella 7.2: Variazione della rigidezza secante del modello non lineare con contatto rispetto alla rigidezza del modello lineare con appoggio equivalente.

La SAW mostra un lieve ammorbidimento: la mediana vale -9.6% a 2000 N e -5.8% a 4000 N. La RSW presenta invece un marcato irrigidimento apparente, con mediana prossima al $+74\%$ a 2000 N; la nuova superficie cilindrica centrale e il contatto modificano sostanzialmente il percorso di carico rispetto all'appoggio lineare. SSW e CSW mantenen-

gono differenze mediane inferiori al 7%, ma SSW mostra code più ampie al crescere del carico. Per CCW, nel ramo RBE3 adottato per la sintesi principale, la mediana resta contenuta entro $\pm 1.5\%$ in A1 e entro $\pm 0.7\%$ in A2, mentre le code crescono a 4000 N fino a un 90-esimo percentile assoluto del 18.9% in A2. Questo rende 2000 N il livello più robusto per il confronto trasversale e 4000 N un livello utile a evidenziare l'insorgenza delle non linearità.

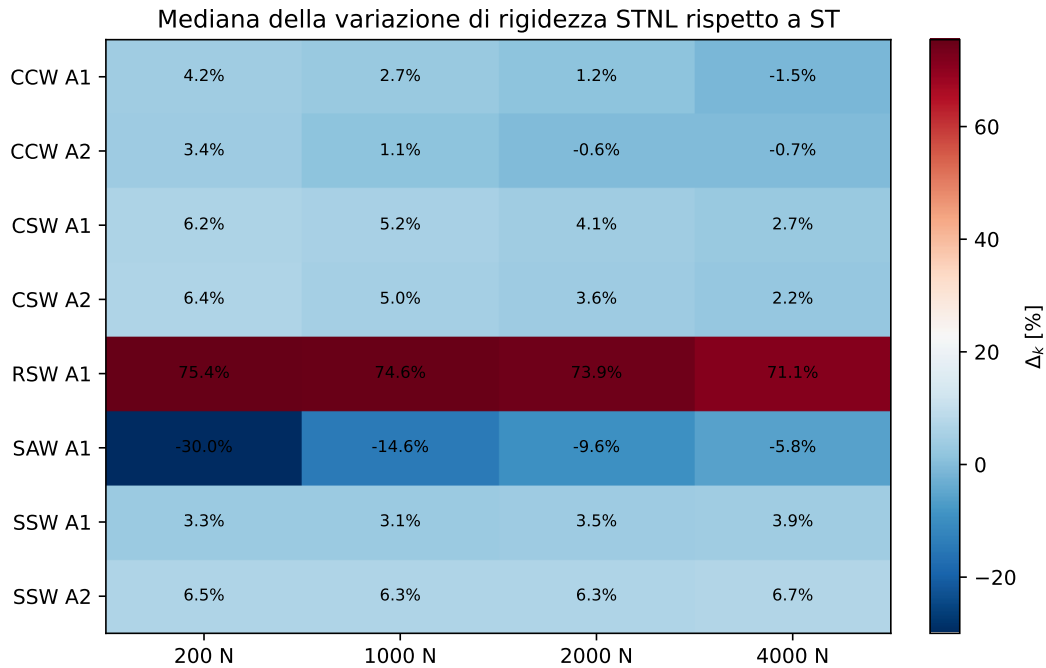


Figura 7.2: Differenza relativa tra rigidezza secante STNL e rigidezza equivalente ST ai due carichi di confronto.

Gli stress e le strain massime sono mantenuti nel dataset come indicatori locali di screening, ma non vengono usati per dimostrare una convergenza fisica tra ST e STNL. Essi dipendono dalla localizzazione del massimo, dalla discretizzazione e, nei modelli a contatto, dalla regione istantaneamente attiva. Le conclusioni globali del capitolo sono quindi fondate principalmente su massa, frequenze, spostamento e rigidezza.

7.2.3 Fase circonferenziale A1–A2

Le configurazioni A1 e A2 differiscono per la fase della geometria ripetuta rispetto alla direzione di carico. Il confronto è significativo per SSW, CSW e CCW, mentre non viene introdotto per le famiglie assialsimmetriche SAW e RSW. La Tab. 7.3 riporta la variazione A2 rispetto ad A1.

SSW evidenzia una sensibilità moderata: la mediana lineare è -2.6% , ma il 90-esimo percentile assoluto raggiunge il 13.0%. CSW è più stabile, con mediana prossima a zero e 90-esimo percentile inferiore al 7.2%. CCW è invece fortemente dipendente dalla fase già nella lineare, con mediana pari a -37.3% e 90-esimo percentile del 74.6%; la stessa

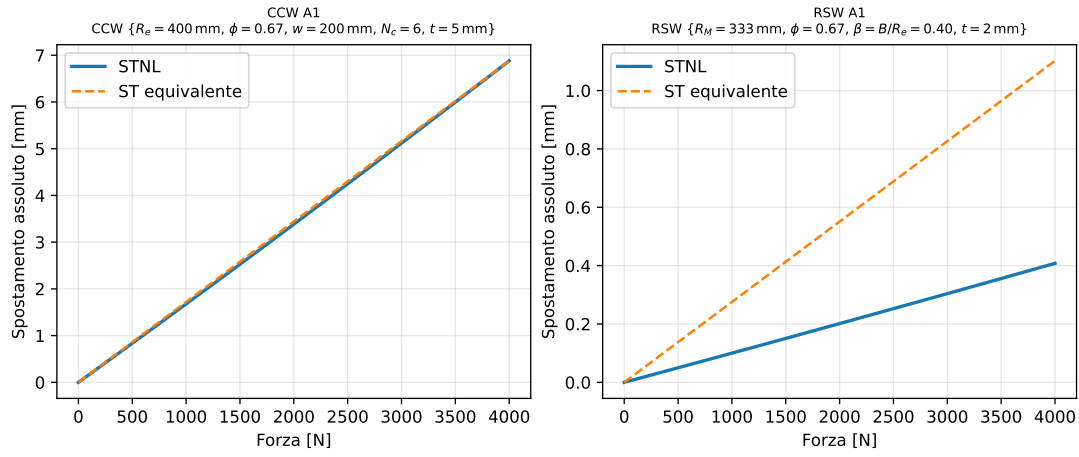


Figura 7.3: Curve forza–spostamento rappresentative di una coppia ST–STNL quasi coincidente e di una coppia con elevata differenza. Le rette tratteggiate rappresentano la risposta lineare corrispondente.

Fam.	Analisi	F [N]	n	Mediana [%]	Media ass. [%]	P90 ass. [%]	Max ass. [%]
SSW	ST	4000	324	-2.61	5.86	13.01	28.96
SSW	STNL	2000	324	-0.21	3.23	11.12	30.43
CSW	ST	4000	324	0.16	2.26	7.20	9.31
CSW	STNL	2000	324	0.17	1.45	5.04	7.29
CCW	ST	4000	351	-37.34	36.15	74.62	82.30
CCW	STNL	2000	346	-38.29	36.63	75.80	84.68

Tabella 7.3: Sensibilità della rigidità alla fase circonferenziale, espressa come variazione A2 rispetto ad A1.

tendenza si mantiene nella STNL a 2000 N, dove la mediana A2 rispetto ad A1 vale -38.3% e il 90-esimo percentile assoluto raggiunge il 75.8% . Per questa famiglia la fase non può quindi essere trattata come replica statistica della stessa configurazione nemmeno nel ramo non lineare utilizzabile.

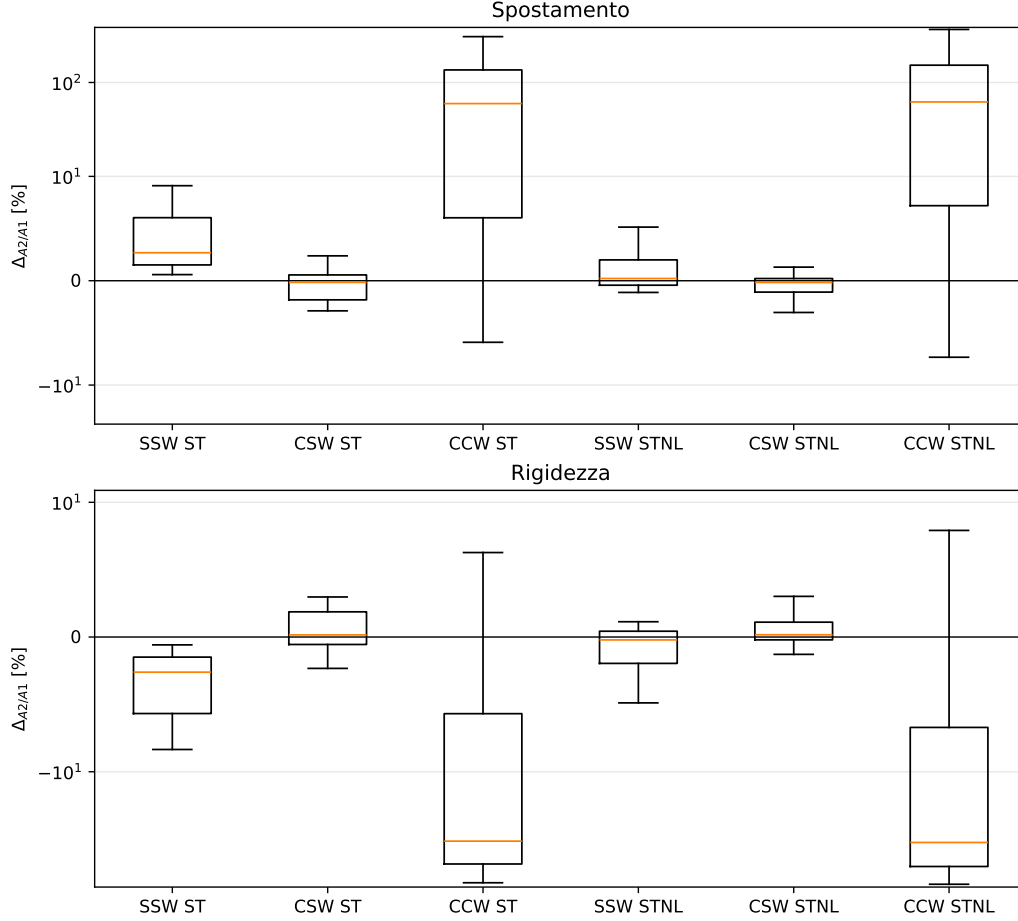


Figura 7.4: Sensibilità della rigidezza alla fase A2 rispetto ad A1. Per CCW sono riportati sia il confronto lineare sia il confronto STNL nel ramo RBE3 ritenuto utilizzabile.

7.3 Parte II: costruzione dei modelli predittivi

7.3.1 Target, modelli candidati e validazione

I modelli predittivi sono costruiti separatamente per famiglia, tipo di analisi, fase e KPI. I risultati statici principali usano esclusivamente RBE3. Per evitare leakage, tutte le righe riconducibili alla stessa geometria sono assegnate allo stesso fold: la cross-validation a cinque fold è quindi raggruppata tramite l'identificativo geometrico. Le prestazioni riportate sono calcolate sulle predizioni out-of-fold (OOF), cioè su casi non impiegati nel fit che li predice.

Sono confrontate quattro formulazioni:

1. power-law log-log di base;
2. power-law log-log con termini polinomiali per i rapporti geometrici;
3. response surface quadratica stimata direttamente sul KPI;
4. response surface quadratica sul logaritmo del KPI, con regolarizzazione Ridge selezionata nel training fold.

La forma fisicamente interpretabile del primo modello è

$$\hat{Q} = C \prod_{j=1}^p x_j^{\alpha_j}, \quad \log \hat{Q} = \log C + \sum_{j=1}^p \alpha_j \log x_j, \quad (7.3)$$

dove gli esponenti α_j rappresentano sensibilità logaritmiche del modello rispetto ai parametri nel dominio campionato. I coefficienti completi, le trasformazioni e le statistiche di normalizzazione delle response surface sono riportati nell'Appendice A; nel corpo del capitolo si privilegia la capacità predittiva OOF.

La metrica primaria è l'errore quadratico medio OOF normalizzato sulla media del target,

$$\text{NRMSE}_{\text{OOF}} = 100 \frac{\sqrt{n^{-1} \sum_i (Q_i - \hat{Q}_i)^2}}{|n^{-1} \sum_i Q_i|}. \quad (7.4)$$

Il coefficiente R_{OOF}^2 è riportato come indicatore complementare, ma non sostituisce l'errore in unità relative.

7.3.2 KPI modali

Per ogni famiglia vengono modellati massa, volume, prima frequenza strutturale, media delle prime cinque frequenze e indice di dispersione modale. Massa e volume sono quasi equivalenti dal punto di vista regressivo, poiché la densità è costante; la massa resta la grandezza direttamente utilizzata nella selezione progettuale.

Fam.	n	Massa	Modello	f_1	Modello	$\bar{f}_{1:5}$
SAW	27	0.000	PL-poly	0.038	RSM-log-Ridge	0.348
RSW	144	0.261	RSM-log-Ridge	1.099	PL-poly	0.219
SSW	324	1.537	RSM-log-Ridge	1.876	RSM-log-Ridge	1.864
CSW	324	1.955	RSM-log-Ridge	2.295	RSM-log-Ridge	2.276
CCW	351	0.637	RSM-log-Ridge	10.623	PL	3.320

Tabella 7.4: Errore OOF normalizzato sulla media [%] e formulazione migliore per i KPI modali. La validazione è raggruppata per geometria.

La massa è descritta con errore OOF inferiore al 2% per tutte le famiglie. Anche la media delle prime cinque frequenze è ben predetta, con NRMSE inferiore al 3.3%. La prima frequenza della CCW resta più difficile da approssimare singolarmente (NRMSE

10.6%), mentre la media modale scende al 3.3%: il risultato indica scambi d'ordine e maggiore complessità dello spettro, non un errore di estrazione. L'indice di dispersione delle prime cinque frequenze è invece debole per CCW e viene mantenuto come indicatore esplorativo.

7.3.3 Rigidezza statica lineare

La Tab. 7.5 riassume il migliore modello candidato per k_{eq} . SAW e RSW sono descritte con errore inferiore all'1%; SSW e CSW rimangono tra il 4.1% e il 5.2%. Per CCW l'errore sale al 9.6% in A1 e al 7.7% in A2, coerentemente con la sensibilità alla fase e con la maggiore articolazione della geometria.

Fam.	Fase	n	Modello migliore	NRMSE OOF [%]	R^2_{OOF}
SAW	A1	27	RSM-log-Ridge	0.092	1.0000
RSW	A1	144	RSM-log-Ridge	0.707	0.9998
SSW	A1	324	RSM-log-Ridge	4.397	0.9987
SSW	A2	324	RSM-log-Ridge	4.719	0.9985
CSW	A1	324	RSM-log-Ridge	5.217	0.9983
CSW	A2	324	RSM-log-Ridge	4.075	0.9989
CCW	A1	351	RSM-log-Ridge	9.586	0.9938
CCW	A2	351	RSM-log-Ridge	7.705	0.9975

Tabella 7.5: Prestazione OOF del migliore modello candidato per la rigidezza equivalente lineare, con soli risultati RBE3.

Il campione RSW contiene 144 geometrie, non 288 righe ottenute sommando RBE2 e RBE3. Questa separazione è essenziale: in caso contrario la validazione potrebbe premiare il modello per aver visto nel training una variante quasi identica della geometria presente nel test.

7.3.4 Rigidezza secante non lineare

La rigidezza secante viene modellata sia a 2000 N sia a 4000 N. Il primo livello è assunto come riferimento nominale; il secondo verifica quanto il modello predittivo mantenga accuratezza verso il limite superiore della campagna.

Fam.	Fase	n	Modello 2000 N	NRMSE 2000 N [%]	Modello 4000 N	NRMSE 4000 N [%]
SAW	A1	27	RSM-log-Ridge	0.278	RSM-log-Ridge	0.280
RSW	A1	144	PL-poly	4.901	RSM-log-Ridge	5.022
SSW	A1	324	RSM-log-Ridge	6.527	RSM-log-Ridge	8.420
SSW	A2	324	RSM-log-Ridge	6.890	RSM-log-Ridge	8.728
CSW	A1	324	PL-poly	5.327	PL-poly	7.625
CSW	A2	324	RSM-log-Ridge	4.726	PL-poly	6.843
CCW	A1	351	RSM-log-Ridge	10.480	RSM-log-Ridge	10.502
CCW	A2	346	RSM-log-Ridge	11.788	PL-poly	17.724

Tabella 7.6: Prestazione OOF del migliore modello candidato per la rigidezza secante non lineare. Sono inclusi i soli casi A1/A2 RBE3 giudicati utilizzabili dopo i controlli di regolarità della curva.

SAW conserva un comportamento molto regolare. RSW presenta una forte differenza fisica rispetto alla lineare, ma la sua superficie di risposta è ancora descrivibile con NRMSE intorno al 5%. Per SSW e CSW l'errore cresce passando da 2000 N a 4000 N, coerentemente con la maggiore curvatura della risposta e con la comparsa di casi più sensibili. Per CCW il ramo RBE3 di A1 risulta modellabile con NRMSE pari a circa 10.5% sia a 2000 N sia a 4000 N, mentre in A2 l'errore resta contenuto a 2000 N (11.8%) ma cresce fino al 17.7% a 4000 N. La famiglia entra quindi anche nella sintesi non lineare, pur richiedendo maggiore cautela rispetto alle altre per la combinazione di periodicità, fase e sensibilità del contatto.

7.4 Lettura ingegneristica dello spazio parametrico

I coefficienti power-law dell'Appendice A vanno letti come esponenti di sensibilità logaritmica validi nel dominio campionato. Essi permettono di trasformare il dataset in alcune indicazioni progettuali, da verificare comunque con reanalysis FEM quando la geometria viene modificata localmente.

Scala globale e spessore. In tutte le famiglie shell lo spessore è una leva molto forte della rigidità: negli esponenti di k_{eq} e della rigidità secante compaiono valori prossimi a 2 per RSW e prossimi a 3 per SSW, CSW e CCW. Gli esponenti prossimi a tre sono compatibili con un contributo flessionale rilevante nella risposta delle pareti shell, coerentemente con la dipendenza cubica della rigidità flessionale D dallo spessore. Il modello predittivo globale, da solo, non identifica in modo univoco il meccanismo deformativo dominante.

Raggio esterno e rapporto tra raggi. A parità degli altri parametri, l'aumento di R_e incrementa la massa ma riduce sensibilmente rigidità e frequenze: per SSW, CSW e CCW gli esponenti di k_{eq} sono dell'ordine di -3 , mentre per la prima frequenza sono prossimi a -2 . Il raggio modifica contemporaneamente bracci flettenti, lunghezze libere e distribuzione della massa. Il rapporto $\phi = R_i/R_e$ controlla invece la distribuzione radiale del materiale. Il miglioramento osservato in alcuni casi con il modello PL-poly indica che l'effetto di ϕ non è sempre monotono nel dominio discreto: il termine quadratico introdotto su tale rapporto aiuta a rappresentare cambi di tendenza legati alla topologia e alla posizione radiale degli elementi portanti.

Larghezza e numero di elementi ripetuti. La larghezza assiale w entra quasi linearmente nella massa e ha un effetto vicino all'unità sulla rigidità equivalente delle famiglie a elementi discreti, mentre influenza poco la prima frequenza. Aumentare w è quindi una leva robusta per ridurre la compliance statica, ma poco selettiva se l'obiettivo è migliorare

massa e risposta dinamica insieme. Il numero di raggi o celle è una leva topologica: in SSW e CSW l'aumento di N_s irrigidisce la ruota e aumenta la massa, mentre in CCW l'aumento di N_c modifica anche la frequenza, perché cambia la lunghezza caratteristica e l'accoppiamento tra celle.

Fase circonferenziale. La fase A1/A2 completa la lettura geometrica. SSW mostra una sensibilità moderata, CSW è la più stabile tra le architetture periodiche considerate, mentre CCW è fortemente dipendente dalla fase. Questa differenza è importante per la seconda fase: una configurazione leggera e rigida in A1 può perdere parte del vantaggio se il carico intercetta una fase sfavorevole della cella.

Famiglia	Meccanismo dominante	Parametri più influenti	in-	Vantaggi	Criticità	Ruolo nella seconda fase
SAW	guscio/anello continuo di riferimento	R_e , rapporto tra raggi, larghezza		regolarità numerica e controllo del workflow	massa elevata e minore attrattiva strutturale	e riferimento metodologico, non candidata locale
RSW	shell raccordata con percorso di carico continuo	spessore, raggio esterno, larghezza		rigidezza elevata e risposta numerica robusta	forte differenza ST-STNL al contatto e al percorso di carico	candidata baseline RSW
SSW	raggi rettilinei tra anelli	spessore, R_e , N_s , larghezza		buona leggibilità strutturale e alleggerimento possibile	sensibilità di fase moderata e stress locali agli innesti	candidata diretta primaria
CSW	raggi curvi con distribuzione più progressiva del carico	spessore, R_e , N_s , larghezza		buona robustezza A1/A2	massa più alta e benefici dinamici meno marcati	alternativa robusta ma non dominante
CCW	celle circolari accoppiate	spessore, R_e , N_c , fase		topologia compatta e modulare	elevata sensibilità alla fase e alla formulazione del mozzo	candidata da valutare con cautela

Tabella 7.7: Lettura progettuale sintetica dello spazio parametrico. Le indicazioni sono valide nel dominio campionato e non costituiscono regole di estrapolazione.

Il trade-off principale è quindi massa–rigidezza–frequenza. Spessore e larghezza aumentano la rigidezza, ma il primo risulta più selettivo nel dominio analizzato, mentre la seconda aggiunge massa quasi proporzionalmente. Il raggio esterno penalizza rigidezza e frequenze più di quanto aiuti la massa, ma può essere imposto da vincoli di integrazione o trazione. Il numero di raggi o celle consente di distribuire il carico, ma aumenta complessità, massa e possibili zone di concentrazione. Per questo motivo i modelli predittivi vengono usati nel seguito per selezionare baseline nel dominio campionato, non per sostituire le reanalysis FEM delle geometrie ottimizzate.

7.5 Sintesi dei risultati

L'analisi conduce a sei conclusioni operative:

1. RBE2 e RBE3 devono rimanere rami distinti; la differenza è piccola per RSW ma dominante per CCW, anche quando il confronto è limitato ai soli spessori comuni.

2. Il passaggio ST–STNL è contenuto per SSW e CSW nella maggioranza dei casi, mentre modifica profondamente RSW; esso rappresenta l’effetto congiunto di contatto, grandi spostamenti e legge costitutiva.
3. La fase A1–A2 è poco influente per CSW, moderata per SSW e determinante per CCW sia in lineare sia nel ramo STNL RBE3 utilizzabile.
4. I modelli predittivi sono accurati per massa, indicatori modali aggregati e rigidezza lineare di tutte le famiglie; la CCW richiede comunque maggiore cautela, soprattutto nella risposta non lineare ad alto carico.
5. 2000 N è il livello più solido per il confronto non lineare; 4000 N resta utile come verifica del margine e della curvatura della risposta.
6. Spessore, raggio esterno, larghezza e numero di elementi discreti hanno ruoli fisicamente distinguibili; la seconda fase deve quindi essere letta come raffinamento locale di baseline già selezionate nello spazio parametrico.

Queste evidenze vengono utilizzate nel capitolo successivo per costruire una selezione multicriterio che distingua requisiti rigidi, indicatori di ranking e limiti di validità del modello.

Capitolo 8

Selezione dei candidati, ottimizzazione locale e verifica statica

8.1 Obiettivo della seconda fase

La seconda fase collega la campagna parametrica del Capitolo 7 alla verifica di configurazioni localmente ottimizzate. Il dataset globale fornisce i dati utilizzati per la selezione delle baseline e i modelli predittivi ne chiariscono i principali driver geometrici. In questo capitolo la selezione viene effettuata mediante lo screening massa-rigidezza e l'analisi delle frontiere di Pareto globale e intra-famiglia; sulle quattro baseline shell così ottenute, una per ciascuna famiglia RSW-CCW, vengono poi applicate ottimizzazioni locali free-size e topografiche. Ogni campo ottimizzato viene trasferito in un deck di reanalysis, perché la sola riduzione della funzione obiettivo interna all'ottimizzatore non coincide con una prestazione già verificata sul componente.

La catena logica del lavoro è quindi:

DOE globale → archivio post-processato → modelli predittivi e screening
→ lettura dei driver geometrici → screening massa-rigidezza
→ Pareto globale e intra-famiglia → selezione dei candidati
→ baseline della seconda fase → ottimizzazione locale → reanalysis
→ confronto statico e dinamico.

Lo studio parametrico fornisce quindi il perimetro quantitativo da cui avviare la selezione, mentre free-size e topography introducono gradi di libertà locali non presenti nel DOE iniziale: distribuzione non uniforme dello spessore nel primo caso, variazioni locali della superficie media e bead nel secondo. I due livelli non sono quindi alternativi: lo screening globale restringe il dominio, l'ottimizzazione locale raffina il candidato e la reanalysis verifica il campo trasferito.

Nel seguito il suffisso **-B** identifica la configurazione baseline selezionata per ciascuna famiglia. Le sigle **FS** e **TP** indicano rispettivamente free-size e topography. Il suffisso **-L** identifica un design domain locale, limitato agli elementi interni di collegamento o al pannello deformabile specifico della famiglia considerata; **-O** indica l'estensione del dominio anche all'anello o cilindro esterno. Le sigle **A1** e **A2** restano riservate alla fase circonferenziale della geometria rispetto alla direzione del carico. Le ottimizzazioni sono formulate nella configurazione A1; A2 viene utilizzata nelle reanalysis per valutare la sensibilità dello stesso campo ottimizzato al posizionamento circonferenziale della ruota.

8.2 Screening massa–rigidezza, Pareto e selezione delle baseline

Lo screening considera esclusivamente i casi che superano i controlli di completezza, convergenza e regolarità fisica descritti nell'Appendice B. In questa sede vengono quindi discussi soltanto massa, rigidezza robusta, posizione rispetto alle frontiere di Pareto, completezza dei rami necessari e compatibilità con la successiva fase di ottimizzazione locale.

Il limite tensionale usato nello screening è

$$\sigma_{\text{lim}} = \frac{\bar{\sigma}_{y,\text{tab}}}{FS} = \frac{497,1 \text{ MPa}}{2} = 248,55 \text{ MPa}. \quad (8.1)$$

Il valore $\bar{\sigma}_{y,\text{tab}} = 497,1 \text{ MPa}$ è il primo livello tensionale del ramo plastico tabulato nel record materiale e viene assunto come soglia nominale di inizio dello snervamento nel modello. Il fattore di sicurezza pari a 2 è una scelta preliminare dell'autore per lo screening statico delle soluzioni. Il limite risultante non rappresenta un allowable spaziale certificato, non include dispersione produttiva, temperatura, ambiente, corrosione o fatica e non costituisce una prova finale di resistenza.

Per le famiglie analizzate in due fasi circonferenziali si definisce la rigidezza robusta lineare

$$k_{\text{rob}} = \min(k_{A1}, k_{A2}), \quad (8.2)$$

in modo da utilizzare nello screening la risposta meno rigida tra le due configurazioni disponibili. Quando nel dataset è presente una sola fase lineare, la definizione degenera nel valore disponibile; per RSW-B, in particolare, si ha $k_{\text{rob}} = k_{A1}$. La grandezza è quindi uno strumento di screening comparativo e non una nuova proprietà materiale o di certificazione.

Nel presente lavoro il Pareto globale è la frontiera di non dominanza costruita confrontando tutte le famiglie della seconda fase: una configurazione è dominata se esiste almeno un'altra configurazione con massa non superiore e rigidezza robusta non inferiore,

con almeno una delle due grandezze strettamente migliore. Il Pareto intra-famiglia applica lo stesso criterio limitando il confronto a una sola famiglia geometrica. La selezione delle baseline non deriva da una singola funzione obiettivo scalare: la frontiera globale massa-rigidezza e le frontiere intra-famiglia sono usate come strumenti di screening; tra i casi non dominati o prossimi al fronte vengono selezionate configurazioni rappresentative delle diverse topologie, complete nei rami di analisi richiesti e compatibili con la successiva ottimizzazione locale.

La Fig. 8.1 riporta lo screening massa-rigidezza lineare RBE3 usato per individuare la rosa iniziale. I risultati della seconda fase non vengono sovrapposti a tale fronte, perché appartengono a un livello metodologico diverso del workflow e devono restare separati dai rami con diversa formulazione del collegamento rigido.

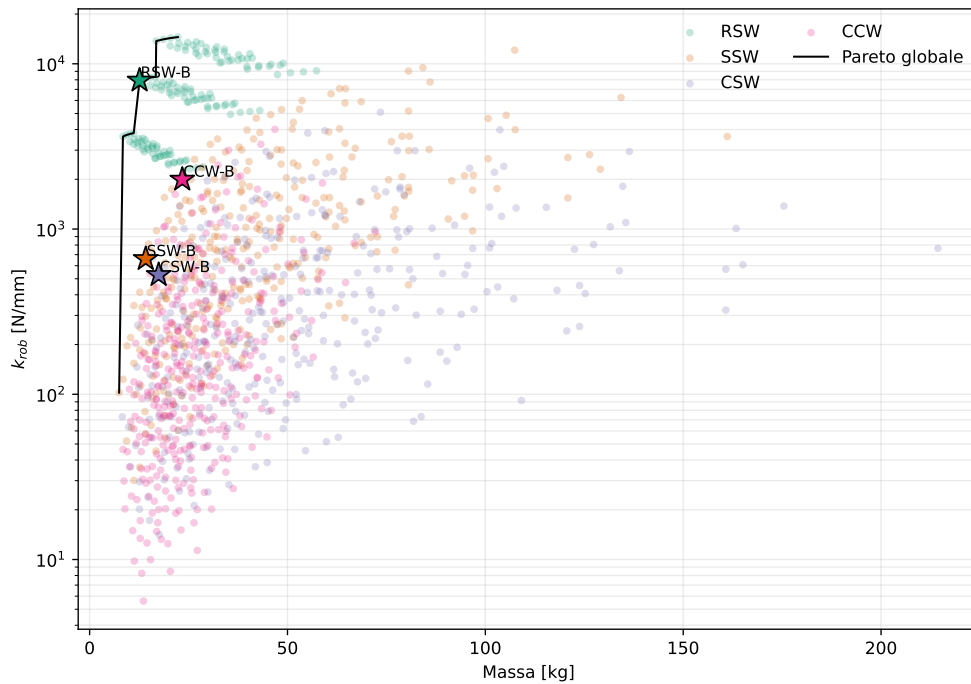


Figura 8.1: Screening massa- k_{rob} sui risultati lineari RBE3 delle famiglie RSW-CCW. Il fronte nero indica il Pareto globale della seconda fase, i marker vuoti colorati indicano i Pareto intra-famiglia e le stelle evidenziano le baseline selezionate.

La rosa della seconda fase è sintetizzata in Tab. 8.1. Le etichette descrittive sono usate nel testo; gli identificativi operativi restano soltanto riferimenti di tracciabilità all'archivio dati. RSW-B appartiene al Pareto globale e intra-famiglia. SSW-B è non dominata all'interno della propria famiglia, ma non sul Pareto globale, perché la famiglia RSW risulta molto più rigida a massa confrontabile. Per CCW viene adottata la configurazione cellulare a 5 mm: non è la più leggera del ramo, ma fornisce una rigidezza sufficiente per rendere significativa la successiva ottimizzazione locale. CSW-B non è Pareto-efficient nemmeno intra-famiglia; viene mantenuta come rappresentante topologica della famiglia a raggi curvi e per la robustezza di fase emersa nel Capitolo 7.

Candidato	Fam.	Parametri geometrici principali	Massa [kg]	k_{rob} [N/mm]	f_1 [Hz]	Ruolo nello screening Pareto	Motivo della selezione	Run ID
RSW-B	RSW	$R_e = 400$ mm; $\phi = 0.667$; $\beta = B/R_e = 0.40$; $t = 3$ mm	12.62	7929	252.4	Pareto globale e intra-famiglia	riferimento più rigido e numericamente stabile	M2_333_20000_400_300
SSW-B	SSW	$R_e = 400$ mm; $\phi = 0.333$; $w = 200$ mm; $N_s = 20$; $t = 3$ mm	14.17	659	62.9	Pareto intra-famiglia; dominato globalmente da RSW	rappresentante leggero della famiglia a raggi rettilinei	M3_400_33333_200_020_300
CSW-B	CSW	$R_e = 400$ mm; $\phi = 0.667$; $w = 200$ mm; $N_s = 40$; $t = 3$ mm	17.44	528	47.8	rappresentante topologico; non Pareto intra-famiglia	topologia a raggi curvi con buona robustezza di fase	M4_400_66667_200_040_300
CCW-B	CCW	$R_e = 400$ mm; $\phi = 0.667$; $w = 200$ mm; $N_c = 14$; $t = 5$ mm	23.41	1994	80.5	rappresentante cellulare robusto; dominato globalmente da RSW	configurazione cellulare sufficientemente rigida per la seconda fase	M5_400_66667_200_014_500

Tabella 8.1: Baseline selezionate per la seconda fase nel dataset di screening lineare RBE3. La rigidezza robusta è definita in Eq. 8.2; i KPI riportati provengono dalla campagna parametrica e servono a documentare la scelta dei candidati, mentre la reanalysis della seconda fase è riportata separatamente nella Tab. 8.7.

La scelta mantiene quattro famiglie meccanicamente differenti: shell raccordata (RSW), raggi rettilinei (SSW), raggi curvi (CSW) e celle circolari (CCW). In tal modo la seconda fase non perfeziona un singolo concetto geometrico, ma verifica quali topologie reagiscano meglio a una redistribuzione locale di spessore o alla costruzione di percorsi di irrigidimento tramite bead.

Per la famiglia CCW, i livelli più sottili restano utili per comprendere la sensibilità della famiglia, ma la seconda fase usa lo spessore da 5 mm per evitare che il confronto sia dominato dalla cedevolezza globale della struttura cellulare.

8.3 Mesh della seconda fase

Le mesh della seconda fase derivano dalle indicazioni della Sez. 5.2.4. La risoluzione è mantenuta coerente con i KPI globali usati per confrontare le configurazioni, senza inseguire i picchi locali di stress che nel Capitolo 5 sono risultati più sensibili alla discretizzazione. La sintesi è riportata nella Tab. 8.2.

Famiglia	Passo caratteristico pannelli/elementi	Passo cilindri/anelli	Livello di riferimento	Motivazione
RSW	3,5 mm sulle pareti laterali	7,0 mm sulle bande cilindriche	circa livello P_3 con banda cilindrica dedicata	contenere il costo mantenendo una discretizzazione più fitta nelle pareti raccordate
SSW	7,0 mm sui raggi/pannelli	7,0 mm sugli anelli	circa livello P_1	coerenza con il livello richiesto per stabilizzare i KPI globali
CSW	7,0 mm sui raggi curvi	7,0 mm sugli anelli	circa livello P_1	compromesso tra costo e leggibilità della risposta globale
CCW	5,0 mm sui domini cellulari	5,0 mm sugli anelli/celle	circa livello P_2	maggiore risoluzione necessaria per descrivere le celle circolari

Tabella 8.2: Risoluzioni adottate nella seconda fase in continuità con la mesh convergence del Capitolo 5.

Queste scelte permettono di contenere il costo computazionale delle reanalysis senza allontanarsi dalle risoluzioni discusse nel Capitolo 5. La stessa cautela rimane valida anche qui: la stabilità dei KPI globali non implica convergenza universale dei massimi

locali. Per questa ragione gli stress sono mantenuti come indicatori di screening, mentre il confronto principale usa massa, spostamento al mozzo e rigidezza equivalente.

8.4 Free-size: formulazione e parametri

Il free-size è definito tramite **DSIZE**, secondo la formulazione free-size di OptiStruct per la distribuzione degli spessori di shell [21], [22]. Il problema risolto nei deck è una minimizzazione della massa del dominio di design con vincolo sullo spostamento del mozzo e controllo tensionale di screening:

$$\begin{aligned} \min_{\{t_{e,i}\}} \quad & m_{\text{design}} \\ \text{s.t.} \quad & |U_{\text{hub}}| \leq 1.02 |U_{\text{hub},0}|, \\ & \sigma_{\text{VM}} \leq \sigma_{\text{lim}}, \\ & t_{\min} \leq t_{e,i} \leq t_{\max}. \end{aligned} \tag{8.3}$$

Il riferimento $U_{\text{hub},0}$ è lo spostamento della baseline A1 dello stesso modello: il vincolo limita quindi il deterioramento della rigidezza durante l'alleggerimento nella configurazione effettivamente ottimizzata. La fase A2 non entra nella formulazione dell'ottimizzazione, ma viene usata successivamente nelle reanalysis come verifica esterna di robustezza.

Voce	Impostazione / significato
Tecnica	DSIZE free-size per shell.
Design variable	Spessori finali locali della shell, trasferiti come valori T1-T4 .
Design domain FS-L	RSW: pareti laterali; SSW, CSW e CCW: elementi interni di collegamento/celle.
Design domain FS-O	Dominio FS-L più cilindro esterno; le interfacce funzionali restano non-design.
Configurazione di carico	A1, analisi statica lineare elastica con collegamento RBE3.
Obiettivo	Minimizzazione della massa del dominio di design.
Response	Spostamento totale al mozzo e stress von Mises di screening.
Vincolo di spostamento	$ U_{\text{hub}} \leq 1.02 U_{\text{hub},0} $, con baseline A1 del medesimo modello.
Limite tensionale di screening	248,55 MPa.
$t_{\min}$	1 mm nei domini locali; 2 mm sul cilindro esterno in FS-O.
$t_{\max}$	4 mm per RSW-CSW; 5 mm per CCW.
MINDIM	Quattro volte il passo locale: 14 mm per le pareti RSW, 28 mm per domini da 7 mm, 20 mm per CCW.
Periodicità/simmetria	Ripetizione ciclica: 20 settori per RSW-CSW, 14 settori per CCW; simmetria laterale mantenuta dove richiesta dalla geometria.
Output trasferito alla reanalysis	File FSTHICK , applicato elemento per elemento.

Tabella 8.3: Impostazione metodologica delle ottimizzazioni free-size.

Il parametro **MINDIM** impone una dimensione minima caratteristica alle isole di materiale/spessore generate dall'ottimizzatore; per questo motivo viene scalato con il passo di mesh del dominio e non fissato a un valore unico per tutte le famiglie.

Dal punto di vista metodologico, il risultato free-size non viene mai riportato a uno spessore uniforme di proprietà. Nella reanalysis, i quattro valori **T1-T4** presenti nel file **FSTHICK** sono trasferiti elemento per elemento su ciascun **CQUAD4**. Questa regola è indispensabile perché il vantaggio del free-size risiede proprio nella costruzione di percorsi

di spessore non uniformi; una media per proprietà cancellerebbe il contenuto progettuale della soluzione.

8.5 Topography: formulazione e parametri

La topografia usa DTPG e minimizza lo spostamento totale del nodo di mozzo, secondo l'impostazione OptiStruct delle bead e dei rinforzi topografici [23], [24]. Anche in questo caso la formulazione precede la lettura dei risultati: A1 genera il campo di forma, mentre A2 verifica successivamente la sensibilità dello stesso campo alla fase circonferenziale.

Voce	Impostazione / significato
Tecnica	DTPG topography per bead e rilievi su shell.
Design domain TP-L	RSW: pareti laterali; SSW, CSW e CCW: elementi interni di collegamento/celle.
Design domain TP-O	Dominio TP-L più cilindro esterno; le righe necessarie a contatto e interfacce restano non-design.
Configurazione di carico	A1, analisi NLSTAT_TOPO_SMDISP elastica.
Obiettivo	Minimizzazione dello spostamento totale al mozzo.
Response	Spostamento totale al mozzo e frazione di area modificata dalle bead.
Vincoli	Limite superiore su BEADFRAC e limiti di forma tramite BOUNDS.
MW	Larghezza minima caratteristica della bead; scelta insieme a HGT e ANG in relazione alla mesh.
ANG	Angolo dei fianchi della bead; mantenuto a 70°.
HGT	Altezza massima del rilievo; 3 mm per RSW/SSW, 2 mm per CSW/CCW.
MAXWTH	Larghezza massima ammessa, verificata rispetto al limite minimo richiesto dal writer OptiStruct.
MINHGT	Frazione minima di altezza, mantenuta pari a 0.5.
BEADFRAC	Frazione massima di dominio modificabile; 0.30 per RSW/SSW e 0.22 per CSW/CCW.
BOUNDS	Limiti di spostamento della bead; in generale $[-1, 0]$, con dominio laterale RSW in TP-O pari a $[-1, 1]$ nel deck verificato.
Periodicità/simmetria	20 settori per RSW-CSW, 14 settori per CCW; simmetrie planari gestite separatamente dalla ripetizione ciclica.
Output trasferito alla reanalysis	Coordinate GRID finali del deck topografico, con rimozione delle card di ottimizzazione.

Tabella 8.4: Impostazione metodologica delle ottimizzazioni topografiche.

I parametri numerici dei domini sono riportati nella Tab. 8.5. TP-O mantiene il dominio locale di TP-L e aggiunge il dominio del cilindro esterno; la tabella riporta quindi anche i parametri del dominio esterno aggiunto.

Famiglia	Dominio	MW [mm]	ANG [°]	HGT [mm]	MAXWTH [mm]	BEADFRAC	BOUNDS
RSW	TP-L side	18	70	3	40	0.30	$[-1, 0]$
SSW	TP-L spokes	24	70	3	54	0.30	$[-1, 0]$
CSW	TP-L spokes	24	70	2	54	0.22	$[-1, 0]$
CCW	TP-L cells	18	70	2	40	0.22	$[-1, 0]$
RSW	TP-O outer	20	70	3	42	0.30	$[-1, 0]$
SSW	TP-O outer	20	70	3	42	0.30	$[-1, 0]$
CSW	TP-O outer	20	70	2	42	0.22	$[-1, 0]$
CCW	TP-O outer	18	70	2	40	0.22	$[-1, 0]$

Tabella 8.5: Parametri dei domini topografici. In tutti i casi MINHGT=0.5; TP-O aggiunge il dominio esterno al dominio locale già presente in TP-L.

Le differenze tra famiglie sono quelle codificate nei deck verificati: RSW e CCW usano MW pari a 18 mm nei domini locali, mentre SSW e CSW adottano 24 mm; CSW e CCW usano HGT e BEADFRAC inferiori. La relazione controllata in preflight è $MW +$

$HGT/\tan(ANG) \geq 2h \cdot 1.25$, dove h è il passo locale della mesh. Le fasce necessarie al contatto, alle interfacce con il mozzo e alle regioni funzionali non vengono incluse nel design domain. Nel caso del cilindro esterno, le righe di elementi necessarie al contatto sono quindi trattate come *non-design*.

Nei builder utilizzati per questa campagna le normali dei cilindri e degli anelli sono orientate verso l'esterno della ruota. Di conseguenza, nei domini con $BOUND = [-1, 0]$ lo spostamento ammesso delle bead avviene nel verso negativo della normale, cioè verso l'interno della ruota. Questa scelta evita di aumentare l'involuppo radiale esterno e protegge la superficie destinata al contatto con il terreno.

La periodicità resta pari a 20 settori per RSW-CSW e 14 settori per CCW. La simmetria planare è gestita separatamente dalla ripetizione ciclica, in modo da non confondere la riflessione tra i lati della ruota con la periodicità circonferenziale. Nella reanalysis topografica le coordinate finali del file **GRID** vengono trasferite al deck di baseline, eliminando le card di ottimizzazione. La reanalysis elastica usa materiale lineare; la reanalysis STNL conserva invece contatto, **LGDISP**, **MATS1** e curva plastica del baseline non lineare.

8.6 Matrice baseline, ottimizzazione e reanalysis

La Tab. 8.6 riassume il significato operativo dei diversi deck. Il punto centrale è che A1 genera il campo ottimizzato, mentre A2 non ottimizza nuovamente il modello: verifica la robustezza del medesimo campo quando il caricamento è in fase diversa rispetto alla struttura periodica.

Passaggio	Campo geometrico	Modello fisico	Funzione
Baseline ST	nominale	elastico lineare	riferimento per k_{eq} e vincoli FS
Baseline STNL	nominale	contatto, grandi spostamenti	riferimento non lineare A1/A2
FS-L/FS-O	DSIZE	elastico lineare	distribuzione finale FSTHICK
TP-L/TP-O	DTPG	NLSTAT elastico	coordinate finali GRID
Reanalysis FS ST	T1-T4 finali	elastico lineare	verifica di massa, rigidità e screening stress
Reanalysis TP ST	GRID finali	elastico lineare	verifica del campo di forma trasferito
Reanalysis STNL A1/A2	campo finale	contatto e materiale baseline	robustezza statica e di fase

Tabella 8.6: Matrice metodologica della seconda fase.

Tutte le baseline, le ottimizzazioni e le reanalysis della seconda fase adottano il collegamento RBE3 assunto come riferimento al termine del Capitolo 7.

8.7 Risultati e reanalysis elastiche

Le quattro baseline lineari costituiscono il riferimento quantitativo della seconda fase. La Tab. 8.7 riporta massa, spostamento al mozzo, rigidezza equivalente

$$k_{\text{eq}} = \frac{F}{|U_{\text{hub}}|}, \quad (8.4)$$

con $F = 4000 \text{ N}$, e stress massimo di screening.

Modello	Massa [kg]	$ U_{\text{hub}} $ [mm]	k_{eq} [N/mm]	σ_{max} [MPa]
RSW	12.600	0.375	10675.0	387.7
SSW	14.173	4.336	922.6	202.1
CSW	17.827	8.043	497.4	176.2
CCW	23.721	2.228	1795.2	75.6

Tabella 8.7: Baseline lineari della seconda fase.

La storia degli ottimizzatori viene usata solo per documentare la convergenza del problema formulato nelle Sez. 8.4 e 8.5. Nel free-size la grandezza monitorata è la massa del dominio di design (Tab. 8.8); nella topografia è lo spostamento obiettivo del nodo di mozzo (Tab. 8.9). Questi valori descrivono la traiettoria dell'ottimizzazione, ma non sostituiscono la reanalysis del campo finale.

Modello	Variante	Massa iniziale [kg]	Massa finale [kg]	Variazione [%]
RSW	FS-L	6.667	4.418	-33.73
RSW	FS-O	10.159	7.609	-25.11
SSW	FS-L	10.735	3.413	-68.21
SSW	FS-O	12.499	6.492	-48.06
CSW	FS-L	13.556	8.055	-40.58
CSW	FS-O	14.633	12.999	-11.17
CCW	FS-L	11.341	11.904	+4.96
CCW	FS-O	13.578	17.690	+30.28

Tabella 8.8: Storia dell'obiettivo free-size: massa del dominio di design.

Il confronto strutturale vero e proprio emerge però solo dalla reanalysis lineare A1 del campo finale. La Fig. 8.2 mostra il trade-off massa-rigidezza equivalente rispetto alle baseline. Le soluzioni free-size occupano prevalentemente il quadrante dell'alleggerimento con lieve perdita di rigidezza; le topografie si collocano invece vicino alla neutralità di massa e producono incrementi marcati di rigidezza.

Le Tabelle 8.10 e 8.11 quantificano tale comportamento. Nel free-size, l'alleggerimento più netto è ottenuto in SSW, mentre in CCW la riduzione di massa è più contenuta perché lo spessore di partenza è già stato aumentato per rendere la famiglia confrontabile. Il

Modello	Variante	$ U_{\text{hub}} $ iniziale [mm]	$ U_{\text{hub}} $ finale [mm]	Variazione [%]
RSW	TP-L	0.304875	0.251312	-17.57
RSW	TP-O	0.368374	0.276619	-24.91
SSW	TP-L	4.295519	3.349281	-22.03
SSW	TP-O	4.326987	3.331860	-23.00
CSW	TP-L	7.680787	7.404579	-3.60
CSW	TP-O	7.902969	7.000241	-11.42
CCW	TP-L	2.171521	2.133707	-1.74
CCW	TP-O	2.274454	2.172827	-4.47

Tabella 8.9: Storia dell'obiettivo topografico: spostamento totale del nodo di mozzo.

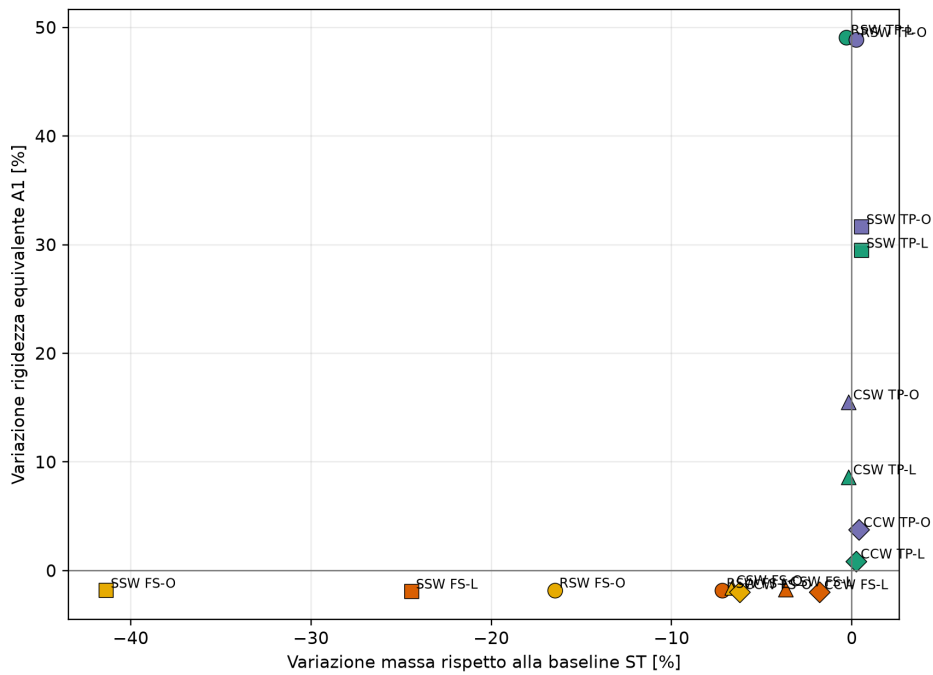


Figura 8.2: Confronto tra variazione di massa e variazione di rigidezza equivalente nella reanalysis lineare A1.

prezzo del free-size è una riduzione di rigidità sempre presente e una sensibilità locale crescente quando lo spessore minimo si avvicina alle zone strutturalmente più attive.

Modello	Variante	Δm [%]	$\Delta U_{\text{hub}} $ [%]	Δk_{eq} [%]	σ_{max} [MPa]
RSW	FS-L	-7.18	+1.89	-1.86	256.9
RSW	FS-O	-16.51	+1.86	-1.82	296.3
SSW	FS-L	-24.47	+1.95	-1.91	189.9
SSW	FS-O	-41.34	+1.87	-1.84	192.1
CSW	FS-L	-3.69	+1.72	-1.70	154.0
CSW	FS-O	-6.63	+1.60	-1.57	175.0
CCW	FS-L	-1.79	+2.00	-1.96	76.9
CCW	FS-O	-6.21	+1.99	-1.95	75.5

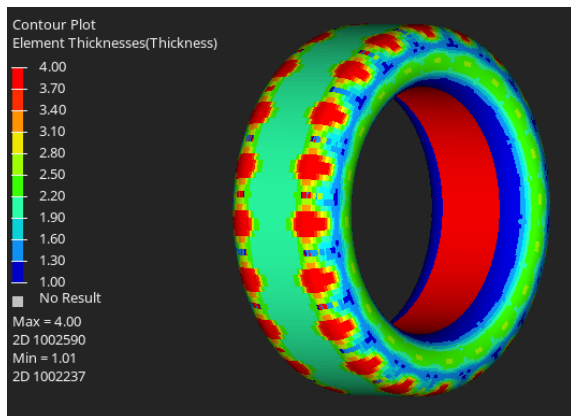
Tabella 8.10: Reanalysis lineare A1 delle soluzioni free-size rispetto alla baseline lineare dello stesso modello.

La topografia segue una logica opposta. Le masse restano quasi invariate, ma gli incrementi di rigidità equivalente sono consistenti: circa +49% per RSW, tra +29% e +32% per SSW, +8.6% / +15.5% per CSW e fino a circa +4% per CCW, con riduzione dello spostamento al mozzo e livelli di stress lineare globalmente controllati. In altre parole, la topografia non alleggerisce il componente, ma modifica la superficie media in modo da aumentare la rigidità quasi a parità di massa.

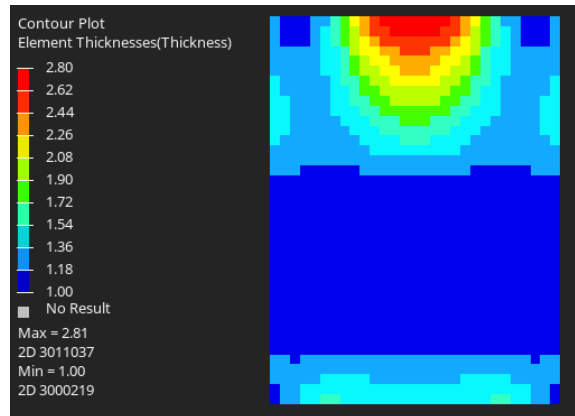
Modello	Variante	Δm [%]	$\Delta U_{\text{hub}} $ [%]	Δk_{eq} [%]	σ_{max} [MPa]
RSW	TP-L	-0.33	-32.93	+49.10	100.3
RSW	TP-O	+0.26	-32.85	+48.93	102.0
SSW	TP-L	+0.51	-22.75	+29.45	173.7
SSW	TP-O	+0.57	-24.03	+31.64	170.0
CSW	TP-L	-0.17	-7.93	+8.62	149.8
CSW	TP-O	-0.17	-13.43	+15.51	161.0
CCW	TP-L	+0.24	-0.86	+0.86	75.1
CCW	TP-O	+0.39	-3.63	+3.77	84.5

Tabella 8.11: Reanalysis lineare A1 delle soluzioni topografiche rispetto alla baseline lineare dello stesso modello.

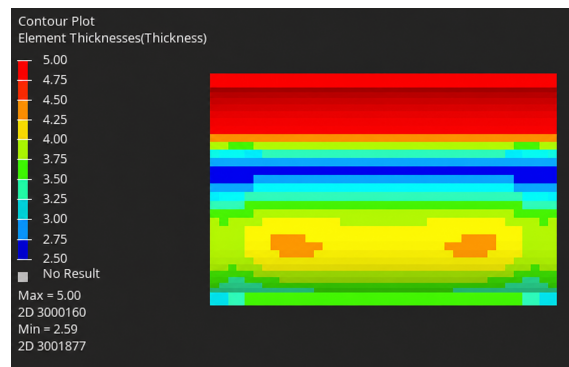
Anche la lettura qualitativa dei campi conferma la natura non uniforme della redistribuzione di spessore. Nella Fig. 8.3, RSW FS-O concentra gli spessori maggiori lungo la fascia anulare e nelle transizioni verso i bordi. SSW FS-O presenta invece estese regioni portate verso il minimo ammesso e zone più circoscritte nelle quali lo spessore viene preservato. In CCW FS-L il materiale viene maggiormente mantenuto nella regione superiore e nelle zone laterali. I campi mostrano quindi differenti strategie di redistribuzione dello spessore tra le famiglie; la relazione con i percorsi di carico resta una lettura qualitativa e richiederebbe un confronto dedicato con i campi di tensione, deformazione o energia.



(a) RSW FS-O: ispessimento concentrato sulla fascia anulare superiore e sulle transizioni verso i bordi.



(b) SSW FS-O: ampie regioni verso lo spessore minimo e zone localizzate di preservazione del materiale.



(c) CCW FS-L: materiale preservato nella regione superiore e nelle zone laterali.

Figura 8.3: Pattern rappresentativi dei campi free-size trasferiti in reanalysis.

La topografia, mostrata in Fig. 8.4, produce pattern di bead e nervature differenti tra le famiglie. In RSW TP-O compaiono due bande quasi continue sul cilindro esterno e una sequenza periodica di ponti trasversali che collegano le due corone. In SSW TP-O le nervature si concentrano sugli innesti dei raggi e attorno alla regione centrale del pannello. In CSW TP-O l'irrigidimento si addensa sulle spalle curve superiori e sulle zone di collegamento inferiori. La relazione con i percorsi di carico viene quindi interpretata solo qualitativamente, senza sostituire un'analisi dedicata di energia di deformazione.

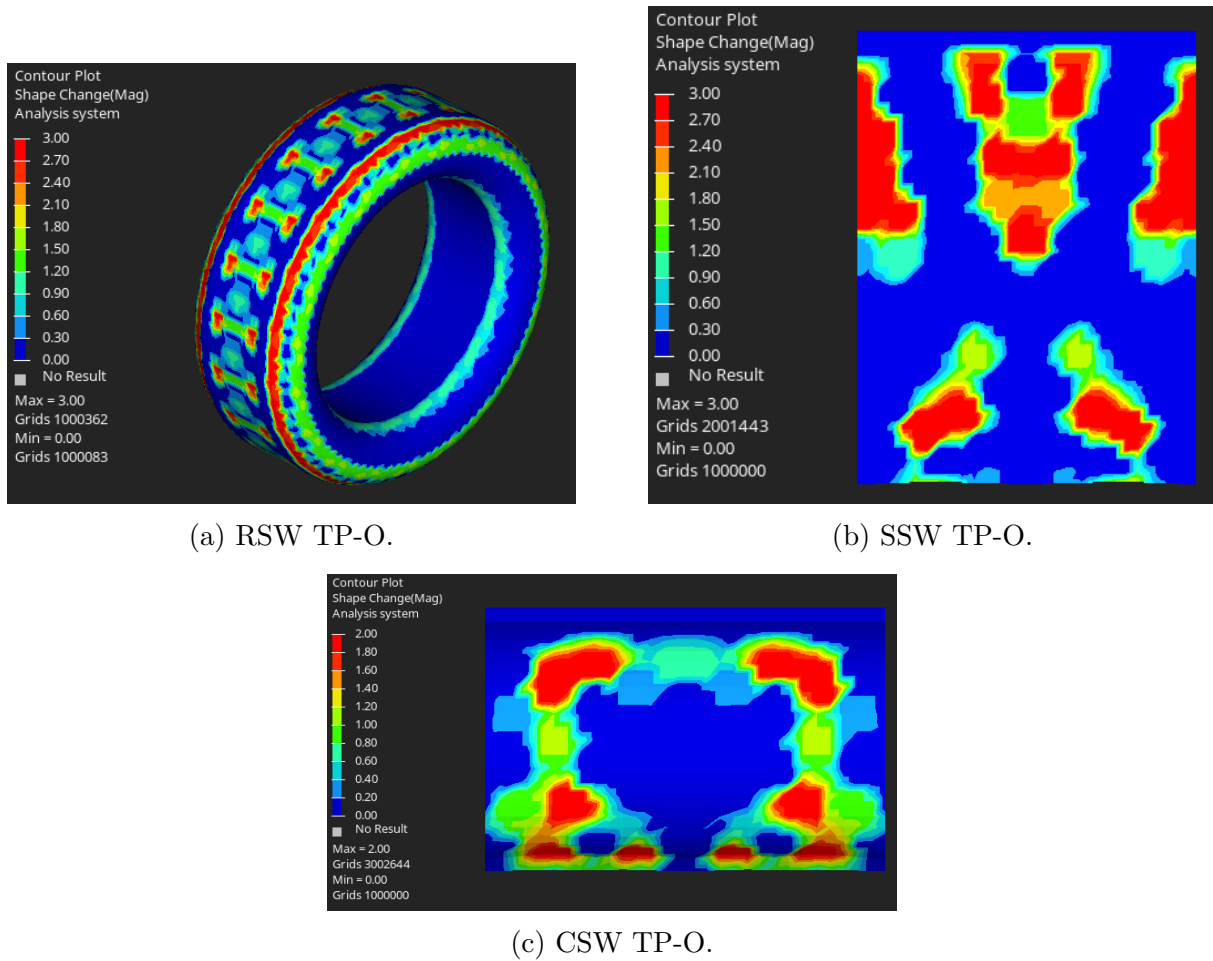


Figura 8.4: Pattern rappresentativi delle variazioni di forma topografiche. I pattern ottenuti evidenziano direzioni di irrigidimento differenti tra le famiglie; la relazione con i percorsi di carico viene interpretata qualitativamente nel testo.

8.8 Verifica STNL A1/A2 e robustezza di fase

Le baseline STNL forniscono il riferimento non lineare della seconda fase. I valori usati come base di confronto sono riportati nella Tab. 8.12. Non vengono usati per reinterpretare a posteriori la funzione obiettivo degli ottimizzatori, ma per verificare la robustezza del campo finale sotto contatto, grandi spostamenti e materiale elasto-plastico. Nelle reanalysis A2 della seconda fase la variazione di fase è introdotta sul campo ottimizzato

trasferito; il riferimento di normalizzazione resta quindi la baseline STNL del medesimo modello.

Baseline	$ U_{\text{hub},A1} $ [mm]	$k_{\text{sec},A1}$ [N/mm]	$ U_{\text{hub},A2} $ [mm]	$k_{\text{sec},A2}$ [N/mm]
RSW-B	0.336	11914.6	0.336	11914.6
SSW-B	4.281	934.3	4.281	934.3
CSW-B	7.851	509.5	7.851	509.5
CCW-B	2.170	1843.2	2.122	1884.9

Tabella 8.12: Riferimenti STNL della seconda fase. La rigidezza secante è calcolata come $4000/|U_{\text{hub}}|$; nelle verifiche A2 il riferimento numerico resta la baseline STNL del medesimo modello.

Le reanalysis STNL verificano se i benefici osservati nel modello elastico lineare persistano in presenza di contatto, grandi spostamenti e comportamento elasto-plastico. Il confronto A1/A2 valuta inoltre la sensibilità del medesimo campo ottimizzato alla fase circonferenziale. La Tab. 8.13 riporta la variazione dei KPI rispetto alla baseline STNL dello stesso modello. In A1 la topografia conferma gli incrementi di rigidezza già osservati in lineare; in A2 emerge invece la distinzione tra varianti locali ed estese al cilindro esterno.

Modello	Variante	$\Delta U _{A1}$ [%]	$\Delta k_{\text{eq},A1}$ [%]	$\Delta\sigma_{A1}$ [%]	$\Delta U _{A2}$ [%]	$\Delta k_{\text{eq},A2}$ [%]
RSW	TP-L	-23.94	+31.47	-25.18	-12.12	+13.79
RSW	TP-O	-24.51	+32.47	-23.70	-2.78	+2.86
SSW	TP-L	-20.85	+26.34	-10.75	+4.96	-4.72
SSW	TP-O	-22.02	+28.23	-12.12	-3.32	+3.44
CSW	TP-L	-6.03	+6.42	-5.49	-4.27	+4.46
CSW	TP-O	-10.88	+12.21	+8.96	-9.03	+9.92
CCW	TP-L	-3.04	+3.13	-0.55	-0.86	+0.87
CCW	TP-O	-4.04	+4.21	-1.93	-2.80	+2.88

Tabella 8.13: Reanalysis STNL A1/A2 delle soluzioni topografiche rispetto alla baseline STNL del medesimo modello.

La Fig. 8.5 sintetizza lo stesso confronto tramite il rapporto $|U_{\text{hub}}|/|U_{\text{hub,baseline}}|$. Si osservano tre tendenze nette:

1. in RSW entrambe le varianti migliorano sensibilmente in A1, ma TP-L conserva un vantaggio più robusto in A2;
2. in SSW, CSW e CCW la variante TP-O è sistematicamente più favorevole o più stabile della corrispondente TP-L;
3. il guadagno relativo più contenuto osservato per CSW e, in misura ancora più evidente, per il CCW irrigidito a 5 mm, suggerisce che la compliance globale di queste

architetture possa essere maggiormente governata dalla cinematica e dalla flessione degli elementi curvi o cellulari. Questa interpretazione richiede tuttavia una verifica dedicata dei campi di deformazione o dell'energia di deformazione.

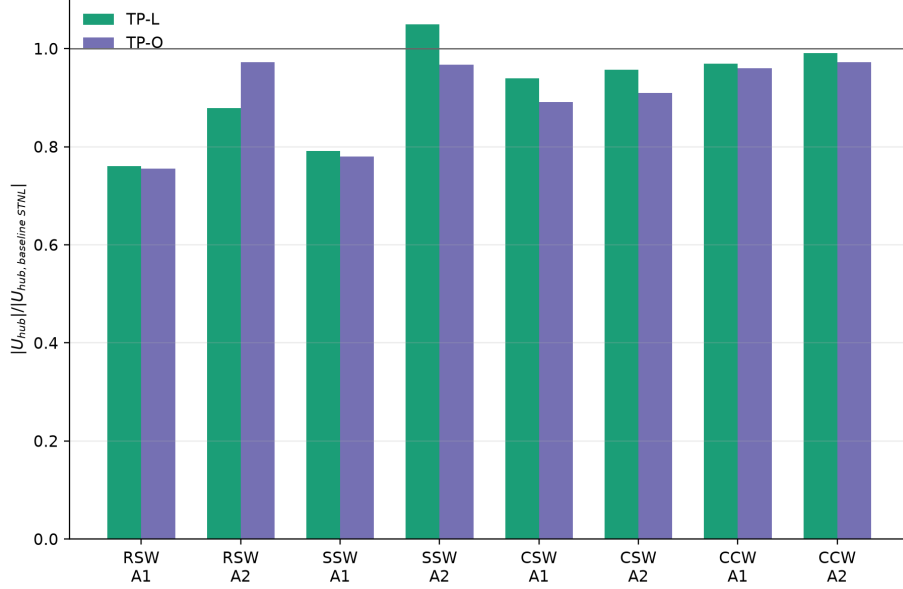


Figura 8.5: Rapporto tra spostamento finale al mozzo e baseline STNL per le soluzioni topografiche in A1 e A2.

Il free-size resta più delicato quando si esce dal perimetro lineare. I risultati ST mostrano che il metodo è efficace nel ridurre la massa, ma la robustezza non lineare dipende dalla posizione dei minimi di spessore, dal contatto e dalla sensibilità locale agli stress. Le reanalysis STNL A2 delle varianti FS-L, riportate nella Tab. 8.14, confermano questa tendenza: in tutti i modelli lo spostamento al mozzo cresce rispetto alla baseline STNL e la rigidezza equivalente si riduce, con peggioramenti particolarmente marcati in RSW. Solo SSW mostra un alleggerimento ancora accompagnato da uno stress di screening inferiore alla baseline, ma anche in questo caso la perdita di rigidezza in A2 resta non trascurabile.

Modello	$\Delta U _{A2}$ [%]	$\Delta k_{eq,A2}$ [%]	$\Delta\sigma_{A2}$ [%]
RSW FS-L	+63.31	-38.77	+41.10
SSW FS-L	+18.67	-15.73	-14.71
CSW FS-L	+9.08	-8.33	+27.26
CCW FS-L	+1.83	-1.79	+0.94

Tabella 8.14: Reanalysis STNL A2 delle soluzioni free-size FS-L rispetto alla baseline STNL del medesimo modello.

Per le varianti FS-O è stato eseguito un controllo separato, riportato nella Tab. 8.15, perché l'estensione del dominio di design al cilindro esterno rende più sensibile il trasferimento verso la reanalysis non lineare con contatto. RSW FS-O, CSW FS-O e CCW FS-O

dispongono di una curva STNL A1 utilizzabile: nel primo caso lo spostamento a 4000 N passa da 0,336 mm a 0,446 mm, con una riduzione della rigidezza secante pari a circa il 24,7%; nel secondo caso passa da 7,851 mm a 8,363 mm, con una riduzione pari a circa il 6,1%; per CCW passa da 2,170 mm a 2,217 mm, con una riduzione di rigidezza pari a circa il 2,1%. Le rispettive A2 non sono invece tutte utilizzabili come verifica di fase: per RSW FS-O il .pch riporta uno spostamento nullo al nodo di controllo, mentre per CSW FS-O l'output di spostamento non è disponibile in forma utilizzabile. SSW FS-O non fornisce curve STNL utilizzabili né in A1 né in A2. CCW FS-O dispone di un output A2, ma la reanalysis è marcata da ripetuti problemi di contact search e porta a una perdita di rigidezza molto elevata; per questo non viene usata come verifica robusta di fase.

Variante	STNL A1	STNL A2	Collegamento con MFRA
RSW FS-O	utilizzabile; $ U = 0,446$ mm	non utilizzabile; $ U = 0$ nel .pch	MFRA da STNL A1 precaricata a 2000 N
SSW FS-O	non utilizzabile; curva degenerata	non utilizzabile; output di spostamento non coerente	non inclusa nella MFRA
CSW FS-O	utilizzabile; $ U = 8,363$ mm	non utilizzabile; .pch assente	MFRA da STNL A1 precaricata a 2000 N
CCW FS-O	utilizzabile; $ U = 2,217$ mm	output presente ma non usato come verifica robusta; $ U = 4,110$ mm e warning di contatto	MFRA da STNL A1 precaricata a 2000 N

Tabella 8.15: Audit delle reanalysis STNL FS-O. La disponibilità del deck o del monitor non è considerata sufficiente: la curva è usata solo quando lo spostamento del nodo di controllo è disponibile e coerente.

Le reanalysis statiche evidenziano quindi due tendenze differenti. Le varianti topografiche risultano più favorevoli quando il criterio principale è il mantenimento o l'incremento della rigidezza e mostrano, nei casi migliori, una maggiore robustezza A1/A2. Le varianti free-size perseguono invece l'alleggerimento e accettano una riduzione della rigidezza la cui rilevanza deve essere valutata congiuntamente alla risposta dinamica. Entrambe le famiglie di soluzioni vengono pertanto mantenute nel confronto successivo, limitando le verifiche dinamiche alle configurazioni per cui il trasferimento e la reanalysis producono uno stato precaricato utilizzabile.

8.9 Sintesi della verifica statica e passaggio alla verifica dinamica

La seconda fase mette in evidenza due ruoli complementari. Il free-size fornisce un'indicazione utile di *dove* la massa può essere rimossa con un impatto globale contenuto sulla

rigidezza equivalente, ma diventa rapidamente sensibile a minimi di spessore, stress locali e robustezza di fase. La topografia, al contrario, mantiene quasi invariata la massa e trasforma la superficie in un sistema di bead e irrigidimenti capace di aumentare in modo chiaro la rigidezza sia in lineare sia, nei casi migliori, anche in STNL.

La lettura congiunta di reanalysis lineare e STNL porta quindi alla seguente sintesi statica, che non costituisce ancora una selezione definitiva:

- **RSW:** TP-L e TP-O sono quasi equivalenti in A1, ma TP-L è più robusta in A2 nella verifica topografica;
- **SSW:** TP-O supera TP-L sia in A1 sia in A2 nella lettura statica;
- **CSW:** TP-O mostra il miglior incremento di rigidezza e la migliore tenuta di fase;
- **CCW:** TP-O resta la variante più convincente della famiglia, con miglioramento moderato ma coerente della rigidezza e buona tenuta A1/A2; FS-O viene mantenuta solo come confronto dinamico precaricato da A1.

I risultati statici evidenziano una maggiore efficacia delle topografie nel miglioramento della rigidezza e una maggiore capacità del free-size di ridurre la massa. Le configurazioni trasferite con successo e sottoposte a reanalysis utilizzabile vengono mantenute nel perimetro dinamico del Capitolo 9, dove i due benefici sono confrontati anche rispetto alla rigidezza incrementale, alla compliance armonica e all'indicatore tensionale dinamico. La shortlist finale viene quindi definita solo dopo la lettura congiunta tra verifica statica e risposta dinamica.

Capitolo 9

Verifica dinamica comparativa delle baseline e delle varianti ottimizzate

9.1 Obiettivo e perimetro

Le reanalysis statiche del Capitolo 8 quantificano l'effetto delle ottimizzazioni su massa, rigidezza e risposta non lineare, ma non mostrano come la redistribuzione locale di materiale e forma modifichi le frequenze proprie e l'amplificazione sotto eccitazione armonica. La seconda fase viene quindi completata mediante una verifica dinamica comparativa delle configurazioni trasferite con successo.

Nel seguito viene utilizzata una Modal Frequency Response Analysis (MFRA), ossia un'analisi lineare della risposta armonica calcolata nello spazio modale della configurazione linearizzata attorno allo stato statico precaricato. La risposta stazionaria viene valutata al variare della frequenza di una forza armonica applicata verticalmente al mozzo. La MFRA è usata come verifica comparativa della compliance verticale al mozzo, dell'amplificazione armonica e dell'indicatore tensionale dinamico. Il modello non rappresenta il rotolamento della ruota su regolate né una validazione dinamica di missione. Lo scopo è verificare se le modifiche introdotte da free-size e topography producano effetti favorevoli o sfavorevoli rispetto alle baseline della stessa famiglia.

Il perimetro dinamico comprende 19 configurazioni effettivamente post-processate mediante MFRA: le baseline RSW-CCW, le varianti topografiche TP-L e TP-O per tutte le famiglie, le varianti free-size FS-L per tutte le famiglie e le varianti FS-O disponibili per RSW, CSW e CCW. La variante SSW FS-O non viene inclusa perché la reanalysis STNL non fornisce uno stato precaricato utilizzabile. Le sigle FS-L, FS-O, TP-L e TP-O mantengono il significato introdotto nel Capitolo 8. La Tab. 9.1 riporta la matrice completa del perimetro.

Famiglia	Variante	Stato statico precaricato	Fase	MOD	MFRA	Utilizzabilità
RSW	B	baseline STNL precaricata	A1	sì	sì	utilizzabile
RSW	FS-L	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile
RSW	FS-O	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile; A2 non robusta
RSW	TP-L	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
RSW	TP-O	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
SSW	B	baseline STNL precaricata	A1	sì	sì	utilizzabile
SSW	FS-L	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile
SSW	FS-O	reanalysis STNL non utilizzabile	–	no	no	esclusa dalla MFRA
SSW	TP-L	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
SSW	TP-O	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
CSW	B	baseline STNL precaricata	A1	sì	sì	utilizzabile
CSW	FS-L	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile
CSW	FS-O	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile; A2 non disponibile
CSW	TP-L	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
CSW	TP-O	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
CCW	B	baseline STNL precaricata	A1	sì	sì	utilizzabile
CCW	FS-L	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile
CCW	FS-O	reanalysis STNL con FSTHICK	A1	sì	sì	utilizzabile; A2 non robusta
CCW	TP-L	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile
CCW	TP-O	reanalysis STNL con coordinate GRID trasferite	A1	sì	sì	utilizzabile

Tabella 9.1: Perimetro reale delle configurazioni trasferite alla verifica dinamica. Tutte le MFRA utilizzano lo stato precaricato A1; la fase A2 resta una verifica statica esterna di robustezza.

9.2 Impostazione FEM della verifica dinamica

Ogni deck dinamico è costruito come prosecuzione della configurazione sottoposta a reanalysis statica in A1. La sequenza di subcase è la seguente:

1. NLSTAT con precarico verticale di 2000 N, contatto e grandi spostamenti;
2. statica incrementale precaricata da 1 N, collegata al primo subcase tramite **STATSUB(PRELOAD)=1** e usata per calcolare la rigidezza incrementale verticale al mozzo;
3. estrazione modale sullo stesso stato precaricato, ancora tramite **STATSUB(PRELOAD)=1**;
4. risposta in frequenza modale nella banda da 0,25 Hz a 500 Hz, anch'essa riferita al precarico A1.

Il precarico A1 a 2000 N è scelto come stato comune perché coincide con uno dei target principali delle analisi statiche non lineari e fornisce un punto di equilibrio disponibile per le configurazioni trasferite alla verifica dinamica. L'uso dello stato precaricato è necessario perché deformazione, contatto e rigidezza tangente della ruota dipendono dallo stato statico raggiunto; la MFRA descrive quindi piccole perturbazioni armoniche attorno all'equilibrio A1 a 2000 N.

La disponibilità della MFRA non coincide quindi con il completamento della verifica di robustezza A1/A2 discussa nel Capitolo 8. La verifica dinamica utilizza lo stato precaricato A1 delle configurazioni trasferite e sottoposte a reanalysis STNL; la fase A2 rimane una verifica statica esterna. Questa distinzione è particolarmente importante per le varianti FS-O: RSW, CSW e CCW entrano nel confronto dinamico perché dispongono di una A1 utilizzabile, anche quando la corrispondente A2 non è utilizzabile o non è robusta.

Voce	Impostazione
Tipo di analisi	Risposta in frequenza modale lineare su stato statico pre-caricato.
Stato di riferimento	Subcase NLSTAT A1 con precarico verticale di 2000 N.
Collegamento al precarico	STATSUB(PRELOAD)=1 per statica incrementale, modi e MFRA.
Intervallo di frequenza	da 0,25 Hz a 500 Hz.
Discretizzazione	FREQ1 con passo 0,25 Hz; FREQ4 con raffinamento modale entro $\pm 2\%$ e 11 punti per modo.
Metodo modale	EIGRL fino a 750 Hz, con limite massimo di 500 modi e normalizzazione di massa.
Smorzamento	Smorzamento modale uniforme pari all'1% del critico tramite TABDMP1.
Eccitazione	Forza armonica verticale applicata al nodo di riferimento del mozzo.
Ampiezza forza	1 N; le risposte armoniche sono quindi normalizzate per forza unitaria.
Direzione	Asse verticale del modello, componente T3, verso negativo.
Risposte principali	Spostamento e accelerazione del set monitor; shell stress centroidale, TOP=1.
Output utilizzati	.out per massa e modi; .pch per spostamenti, accelerazioni e stress complessi.

Tabella 9.2: Impostazione compatta dei deck MFRA utilizzati nel Capitolo 9.

Le impostazioni della Tab. 9.2 sono definite per mantenere continuità con i KPI statici e consentire un confronto normalizzato tra famiglie e varianti. L'eccitazione armonica della MFRA è unitaria e diretta lungo la direzione verticale del nodo di riferimento del mozzo, la stessa utilizzata per il KPI strutturale principale $U_{z,\text{hub}}$. Di conseguenza, le ampiezze di spostamento sono lette direttamente come compliance dinamiche in mm/N, mentre le tensioni dinamiche sono normalizzate in MPa/N. Lo smorzamento modale dell'1% è assunto come ipotesi uniforme di confronto e non deriva da una caratterizzazione sperimentale del sistema. L'intervallo da 0,25 Hz a 500 Hz delimita il dominio di screening dei KPI: il limite inferiore consente il controllo quasi-statico, mentre il limite superiore contiene i picchi principali osservati nelle FRF post-processate. La base modale estratta fino a 750 Hz, insieme al raffinamento attorno ai modi, mantiene un margine rispetto al limite superiore della banda di risposta analizzata.

La coerenza della MFRA a bassa frequenza è controllata confrontando la risposta armonica a 0,25 Hz con la statica incrementale da 1 N. Nel set post-processato il massimo scarto in valore assoluto tra $C_z(0,25 \text{ Hz})$ e $|U_{z,\text{hub}}^{\text{SC2}}|/1 \text{ N}$ è pari a circa il 2.3%. La vicinanza tra compliance armonica a bassa frequenza e compliance statica incrementale verifica la coerenza numerica del modello dinamico nel limite quasi-statico; non costituisce una validazione fisica della risposta dinamica della ruota.

9.3 KPI dinamici e trattamento degli output

I KPI principali sono: massa, prima frequenza modale precaricata f_1 , rigidezza incrementale verticale k_t , massimo della compliance verticale al mozzo $C_{z,\max}$, frequenza del picco di compliance, massimo indicatore di stress dinamico normalizzato $\sigma_{\max}/F$ e relativa frequenza.

La grandezza f_1 è la frequenza associata al primo modo riportato nella tabella modale del file `.out`. Nel set post-processato è usata come indicatore comparativo dello stato precaricato. Non viene eseguita una classificazione automatica della forma modale; pertanto f_1 non coincide necessariamente con il primo modo globale di deformazione radiale della ruota.

La rigidezza k_t è calcolata dalla statica incrementale precaricata da 1 N:

$$k_t = \frac{1}{|U_{z,\text{hub}}^{\text{SC2}}|}. \quad (9.1)$$

La definizione rappresenta quindi una rigidezza verticale incrementale attorno allo stato A1 precaricato, non una secante ricavata dalla curva completa di carico STNL.

La compliance dinamica al mozzo è definita come

$$C_z(f) = \frac{|U_z(f)|}{|F_z|}. \quad (9.2)$$

Poiché nei deck $|F_z| = 1$ N, il valore letto dal `.pch` è già in mm/N. Il KPI $C_{z,\max}$ è il massimo di $C_z(f)$ sul nodo di riferimento del mozzo, componente T3, nell'intervallo da 0,25 Hz a 500 Hz.

Per le shell sono esportate le tensioni armoniche complesse al centro dell'elemento e sulla superficie TOP. Per ogni frequenza, il parser ricostruisce le componenti nel ciclo armonico e calcola un indicatore di Von Mises piano campionando il periodo. Il valore $\sigma_{\max}/F$ è il massimo dell'indicatore sul dominio esportato e sull'intervallo da 0,25 Hz a 500 Hz; l'unità è MPa/N per effetto della forza armonica unitaria. Questo KPI è uno screening relativo tra configurazioni, non una verifica locale di resistenza o fatica.

9.4 Confronto tra baseline e varianti ottimizzate

La Tab. 9.4 riporta le variazioni percentuali rispetto alla baseline della stessa famiglia. Per $C_{z,\max}$ e per $\sigma_{\max}/F$ una variazione negativa indica una riduzione dell'amplificazione dinamica o dell'indicatore tensionale.

La famiglia RSW fornisce il comportamento dinamico più favorevole. Rispetto alla baseline, TP-L e TP-O aumentano la rigidezza incrementale di circa il 35% e riducono $C_{z,\max}$ rispettivamente del 29.2% e del 29.9%; il picco principale della compliance si sposta

Fam.	Variante	Massa [kg]	f_1 [Hz]	k_t [N/mm]	$C_{z,\max}$ [mm/N]	$f(C_{z,\max})$ [Hz]	$\sigma_{\max}/F$ [MPa/N]	$f(\sigma_{\max})$ [Hz]
RSW	baseline	12.61	9.37	15794	2.91e-03	170.5	1.034	170.5
RSW	FS-L	11.71	11.28	11993	3.21e-03	134.9	0.575	134.9
RSW	FS-O	10.53	10.05	12214	3.15e-03	147.2	0.635	147.2
RSW	TP-L	12.56	11.87	21340	2.06e-03	195.5	0.735	195.5
RSW	TP-O	12.63	11.27	21265	2.04e-03	193.0	0.768	193.0
SSW	baseline	14.18	4.52	929	0.0524	35.3	2.014	35.3
SSW	FS-L	10.71	6.95	955	0.0508	39.9	1.883	39.9
SSW	TP-L	14.25	4.91	1182	0.0412	40.0	1.769	40.0
SSW	TP-O	14.25	5.94	1204	0.0404	40.3	1.722	40.3
CSW	baseline	17.83	3.94	511	0.0949	24.5	1.402	24.5
CSW	FS-L	17.17	4.33	491	0.0979	24.4	1.472	24.4
CSW	FS-O	16.65	2.64	479	0.1011	25.0	1.716	25.0
CSW	TP-L	17.80	4.11	546	0.0886	25.2	1.438	25.2
CSW	TP-O	17.80	4.24	575	0.0842	25.9	1.494	25.9
CCW	baseline	23.73	7.12	1848	0.0262	40.4	0.853	40.4
CCW	FS-L	23.30	7.07	1811	0.0267	40.5	0.857	40.5
CCW	FS-O	22.25	7.21	1809	0.0267	41.3	0.881	41.3
CCW	TP-L	23.78	7.60	1909	0.0253	40.9	0.848	40.9
CCW	TP-O	23.81	7.60	1965	0.0246	41.4	0.909	41.4

Tabella 9.3: KPI dinamici estratti dalle MFRA precaricate. La frequenza f_1 rappresenta la minima frequenza strutturale positiva ordinata dal file dei modi, mentre le risposte armoniche sono normalizzate rispetto a una forza verticale unitaria al mozzo.

Fam.	Variante	Δm [%]	Δk_t [%]	$\Delta C_{z,\max}$ [%]	$\Delta \sigma_{\max}$ [%]	Δf_1 [%]
RSW	FS-L	-7.1	-24.1	+10.3	-44.4	+20.4
RSW	FS-O	-16.5	-22.7	+8.2	-38.6	+7.3
RSW	TP-L	-0.4	+35.1	-29.2	-28.9	+26.7
RSW	TP-O	+0.2	+34.6	-29.9	-25.7	+20.3
SSW	FS-L	-24.5	+2.8	-3.1	-6.5	+53.8
SSW	TP-L	+0.5	+27.2	-21.4	-12.2	+8.6
SSW	TP-O	+0.5	+29.6	-22.9	-14.5	+31.4
CSW	FS-L	-3.7	-3.9	+3.2	+5.0	+9.9
CSW	FS-O	-6.6	-6.3	+6.5	+22.4	-33.0
CSW	TP-L	-0.2	+6.8	-6.6	+2.6	+4.3
CSW	TP-O	-0.2	+12.5	-11.3	+6.6	+7.6
CCW	FS-L	-1.8	-2.0	+1.9	+0.5	-0.7
CCW	FS-O	-6.2	-2.1	+1.9	+3.3	+1.3
CCW	TP-L	+0.2	+3.3	-3.4	-0.6	+6.7
CCW	TP-O	+0.3	+6.3	-6.1	+6.6	+6.7

Tabella 9.4: Variazioni percentuali dei KPI dinamici rispetto alla baseline della stessa famiglia. Per $C_{z,\max}$ e $\sigma_{\max}/F$ valori negativi indicano una riduzione della risposta dinamica.

da 170,5 Hz a circa 195,5 Hz e 193,0 Hz. Le varianti FS-L e FS-O seguono una logica diversa: riducono la massa del 7.2% e del 16.5%, riducono l'indicatore tensionale dinamico del 44.4% e del 38.6%, ma aumentano $C_{z,\max}$ del 10.5% e dell'8.4%, con picchi spostati a frequenze inferiori 134,9 Hz e 147,2 Hz. RSW separa quindi in modo netto il beneficio delle topografie, orientato alla rigidità dinamica, da quello del free-size, orientato alla massa e allo screening tensionale.

SSW è più deformabile di RSW, ma mostra miglioramenti coerenti. TP-O aumenta k_t del 29.6%, riduce $C_{z,\max}$ del 22.9% e abbassa lo stress dinamico del 14.5%; il picco principale passa da 35,3 Hz a 40,3 Hz. TP-L è molto vicino, con riduzione di compliance del 21.5% e picco a 40,0 Hz. FS-L è invece più efficace sul peso, con massa ridotta del 24.5%, e mantiene un leggero miglioramento di compliance e stress; per questo resta interessante se la priorità progettuale è l'alleggerimento.

CSW presenta benefici più contenuti. Le topografie riducono la compliance dinamica del 6.6% per TP-L e dell'11.3% per TP-O, con picco spostato da 24,5 Hz a 25,2 Hz e 25,9 Hz, ma non riducono l'indicatore tensionale massimo. Le varianti free-size alleggeriscono la struttura del 3.7% e del 6.6%, ma aumentano sia $C_{z,\max}$ sia $\sigma_{\max}/F$; FS-O abbassa inoltre la prima frequenza modale precaricata. Questa famiglia è quindi meno convincente come scelta dinamica principale, pur potendo restare utile per motivazioni geometriche o statiche.

CCW, nella configurazione a 5 mm, cambia ruolo rispetto alla lettura iniziale della famiglia: non è più governata da una cedevolezza eccessiva e presenta una compliance dinamica inferiore a SSW e CSW. Il costo è una massa molto più elevata. TP-L e TP-O aumentano k_t del 3.3% e del 6.3% e riducono $C_{z,\max}$ del 3.3% e del 6.1%, con picchi spostati da 40,4 Hz a 40,9 Hz e 41,4 Hz. FS-L e FS-O riducono la massa del 1.8% e del 6.2%, ma aumentano lievemente la compliance. CCW diventa quindi un candidato dinamicamente intermedio e leggibile, non più un caso debole, ma resta penalizzato nel confronto massa-prestazioni. La larghezza dei picchi non è parametrizzata come KPI automatico; il confronto quantitativo si basa quindi su ampiezza e frequenza del massimo.

La Fig. 9.1 riporta le FRF complete della compliance verticale al mozzo per due confronti complementari. Il pannello (a) confronta le quattro baseline selezionate per la seconda fase: RSW-B mantiene il livello di compliance più basso tra le architetture leggere, mentre la nuova CCW-B a 5 mm si colloca sotto SSW-B e CSW-B ma con una massa sensibilmente superiore. Il pannello (b) isola la famiglia RSW e mostra la diversa azione delle strategie di ottimizzazione: TP-L riduce il picco principale e lo sposta verso frequenze più alte, mentre FS-O accetta una compliance massima leggermente superiore alla baseline in cambio della riduzione di massa e dell'indicatore tensionale discussa nei KPI.

In tutti i casi post-processati la frequenza del massimo indicatore tensionale sulla superficie TOP coincide con la frequenza del massimo della compliance al mozzo, entro la

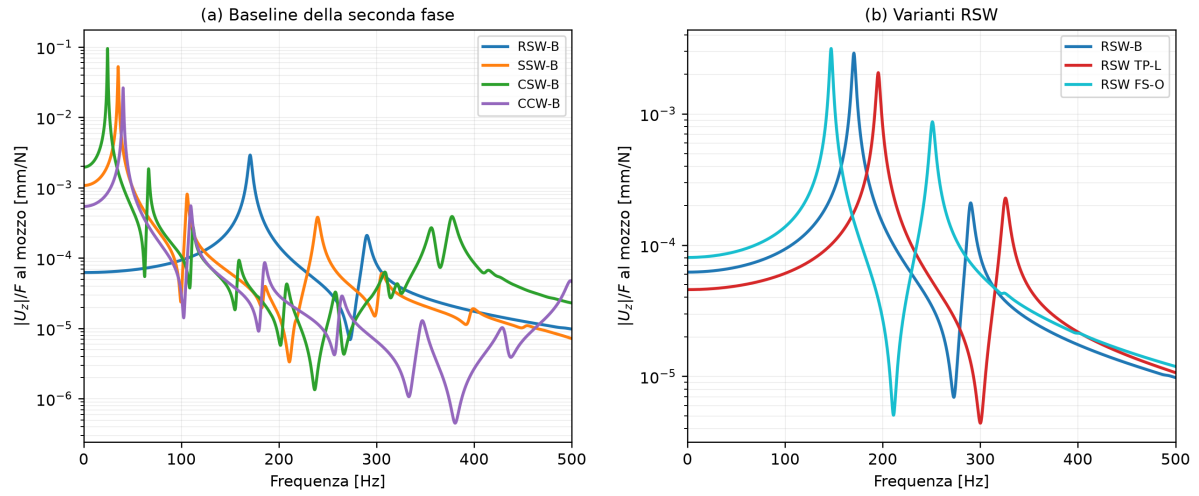


Figura 9.1: FRF della compliance verticale al mozzo. (a) Confronto tra le baseline delle quattro famiglie della seconda fase. (b) Effetto delle varianti RSW TP-L e RSW FS-O rispetto alla baseline RSW, rappresentative delle differenti tendenze associate all'irrigidimento topografico e all'alleggerimento free-size.

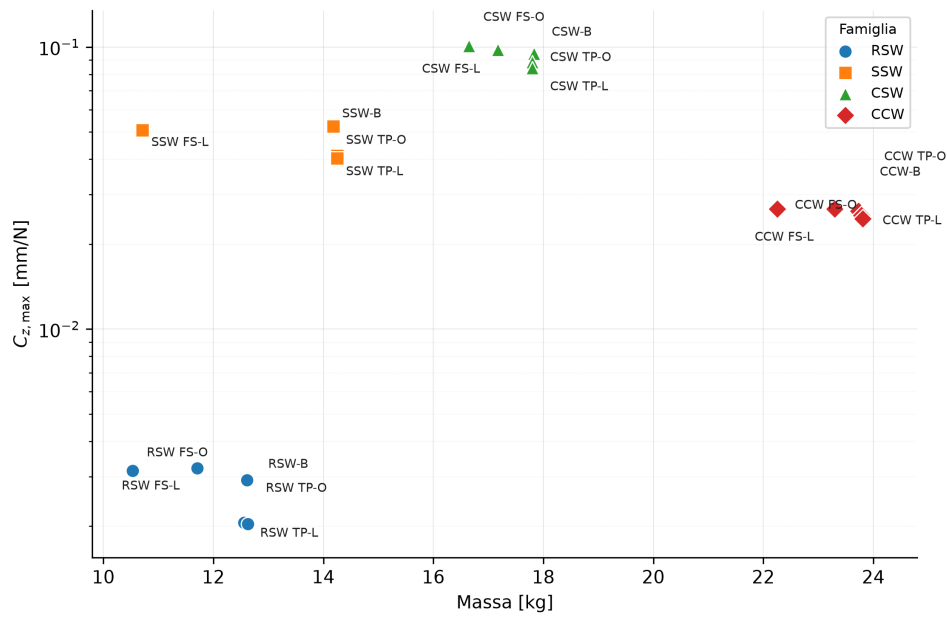


Figura 9.2: Confronto massa–massima compliance dinamica al mozzo.

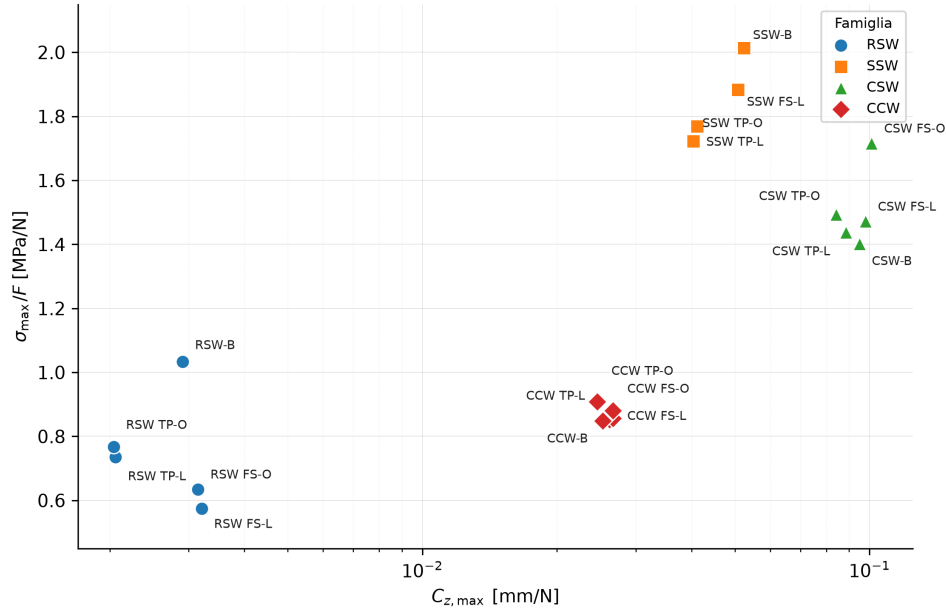


Figura 9.3: Confronto tra massima compliance dinamica al mozzo e indicatore di stress dinamico normalizzato.

risoluzione della griglia di frequenza. Per il set analizzato, quindi, il massimo dell'indicatore tensionale normalizzato cade nella stessa banda del picco principale di $C_z(f)$. La curva di stress resta comunque utile perché controlla automaticamente l'eventuale presenza di picchi locali più severi in bande diverse, senza attribuire una forma modale specifica ai picchi.

9.5 Ranking dinamico e shortlist

Per sintetizzare il confronto è stato costruito uno score normalizzato sulla popolazione delle 19 configurazioni post-processate mediante MFRA. I KPI inclusi nello score nominale sono massa, rigidità incrementale, massima compliance al mozzo e indicatore tensionale dinamico. La prima frequenza positiva è riportata come KPI complementare nella tabella di ranking, ma non compare nel punteggio nominale; l'effetto della sua inclusione viene quindi trattato separatamente come variazione del set di KPI. La variante SSW FS-O, priva di MFRA utilizzabile, non entra nella popolazione di normalizzazione e non vengono introdotti valori sostitutivi per dati mancanti. Per un KPI da minimizzare si usa

$$S_i(x) = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (9.3)$$

mentre per un KPI da massimizzare si usa

$$S_i(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (9.4)$$

Il punteggio complessivo nominale è

$$S = 100 (0.20 S_m + 0.15 S_{k_t} + 0.35 S_{C_z} + 0.30 S_{\sigma}), \quad (9.5)$$

dove massa, compliance e indicatore tensionale sono premiati quando diminuiscono, mentre la rigidità incrementale è premiata quando aumenta. I pesi non derivano da requisiti di missione formalizzati e sono adottati come set esplorativo per il confronto relativo delle configurazioni. La massima compliance al mozzo e l'indicatore tensionale ricevono i pesi maggiori, poiché descrivono direttamente la risposta armonica analizzata nel presente capitolo. La massa mantiene un ruolo significativo nel confronto progettuale, mentre la rigidità incrementale è considerata un indicatore complementare della risposta attorno allo stato precaricato. La prima frequenza positiva f_1 non è inclusa nello score nominale, poiché non viene associata automaticamente a una specifica forma modale; il suo effetto sul ranking è analizzato separatamente.

Poiché la normalizzazione min-max dipende dagli estremi della popolazione considerata, lo score ha significato esclusivamente relativo all'insieme di configurazioni confrontato. L'introduzione di nuovi candidati può modificare i valori normalizzati e richiede pertanto il ricalcolo del ranking. Il punteggio è uno strumento di ordinamento, non una prova di ammissibilità: la scelta finale deve rimanere coerente con le reanalysis statiche, con la robustezza A1/A2 e con la leggibilità fisica dei campi ottimizzati. Una soluzione con score alto ma non robusta staticamente resta quindi una candidata da consolidare.

Rank	Configurazione	Score nom.	m [kg]	k_t [N/mm]	f_1 [Hz]	$C_{z,\max}$ [mm/N]	$\sigma_{\max}/F$ [MPa/N]
1	RSW TP-L	93.6	12.56	21340	11.87	2.06e-03	0.735
2	RSW TP-O	92.8	12.63	21265	11.27	2.04e-03	0.768
3	RSW FS-O	91.8	10.53	12214	10.05	3.15e-03	0.635
4	RSW FS-L	91.1	11.71	11993	11.28	3.21e-03	0.575
5	RSW baseline	83.0	12.61	15794	9.37	2.91e-03	1.034
6	CCW FS-O	53.2	22.25	1809	7.21	0.0267	0.881
7	CCW TP-L	52.2	23.78	1909	7.60	0.0253	0.848
8	CCW FS-L	52.1	23.30	1811	7.07	0.0267	0.857
9	CCW baseline	51.8	23.73	1848	7.12	0.0262	0.853
10	CCW TP-O	51.1	23.81	1965	7.60	0.0246	0.909
11	SSW TP-O	42.5	14.25	1204	5.94	0.0404	1.722
12	SSW TP-L	41.2	14.25	1182	4.91	0.0412	1.769

Tabella 9.5: Ranking dinamico sintetico delle prime dodici configurazioni, con le baseline mantenute come riferimento quando rientrano nell'ordinamento. Lo score combina massa, rigidità incrementale, massima compliance al mozzo e indicatore tensionale normalizzato; la prima frequenza positiva è riportata come indicatore complementare e non contribuisce al punteggio nominale.

Il confronto evidenzia perché RSW TP-L ottiene il punteggio più elevato nel ranking nominale: combina il massimo contributo su rigidità e compliance con contributi ancora elevati su massa e stress. RSW FS-O e RSW FS-L sono invece molto favorevoli su massa e stress, ma perdono parte del punteggio sulla rigidità incrementale.

Configurazione	S_m	S_{k_t}	S_{C_z}	S_σ	Score
RSW TP-L	0.85	1.00	1.00	0.89	93.6
RSW TP-O	0.84	1.00	1.00	0.87	92.8
RSW FS-O	1.00	0.56	0.99	0.96	91.8
RSW FS-L	0.91	0.55	0.99	1.00	91.1
RSW baseline	0.84	0.73	0.99	0.68	83.0
CCW FS-O	0.12	0.06	0.75	0.79	53.2
CCW TP-L	0.00	0.07	0.77	0.81	52.2
CCW FS-L	0.04	0.06	0.75	0.80	52.1

Tabella 9.6: Contributi normalizzati dei primi otto casi del ranking nominale. I valori S_i sono adimensionali e compresi tra 0 e 1; un valore elevato indica un contributo favorevole per il KPI considerato.

La Tab. 9.7 riporta un'analisi di sensibilità dei pesi a KPI costanti. Lo scenario nominale usa l'Eq. 9.5, lo scenario uniforme assegna lo stesso peso ai quattro KPI e lo scenario orientato alla massa aumenta il peso di S_m . La top-4 resta invariata nel passaggio dallo scenario nominale a quello uniforme: RSW TP-L, RSW TP-O, RSW FS-O e RSW FS-L rimangono le configurazioni con punteggio più elevato, nello stesso ordine. Lo scenario orientato alla massa modifica invece l'ordinamento interno di RSW: FS-O sale dalla terza alla prima posizione e FS-L dalla quarta alla seconda, mentre TP-L e TP-O scendono rispettivamente alla terza e quarta posizione. Le varianti CCW arretrano nello scenario leggero, perché la buona compliance assoluta non compensa la massa elevata. Le varianti SSW sono più sensibili ai pesi: FS-L, tredicesima nello scenario nominale, sale al sesto posto quando la massa pesa di più, mentre TP-O passa dall'undicesimo al settimo e TP-L dal dodicesimo all'ottavo. Lo score nominale non è modificato da questa analisi: la prova verifica quanto la posizione dipenda dalle pesature, mantenendo fissi KPI, normalizzazione e popolazione.

Fam.	Variante	Score nom.	Rank nom.	Score unif.	Rank unif.	Δr	Score legg.	Rank legg.	Δr
RSW	TP-L	93.6	1	93.4	1	0	90.9	3	+2
RSW	TP-O	92.8	2	92.6	2	0	90.2	4	+2
RSW	FS-O	91.8	3	87.7	3	0	94.5	1	-2
RSW	FS-L	91.1	4	86.3	4	0	91.2	2	-2
RSW	baseline	83.0	5	81.2	5	0	83.7	5	0
CCW	FS-O	53.2	6	43.0	6	0	40.4	10	+4
CCW	TP-L	52.2	7	41.2	8	+1	36.1	12	+5
CCW	FS-L	52.1	8	41.4	7	-1	37.2	11	+3
CCW	baseline	51.8	9	40.9	9	0	36.0	13	+4
CCW	TP-O	51.1	10	40.3	10	0	35.4	14	+4
SSW	TP-O	42.5	11	39.3	12	+1	52.1	7	-4
SSW	TP-L	41.2	12	38.2	13	+1	51.3	8	-4
SSW	FS-L	40.6	13	40.2	11	-2	59.1	6	-7

Tabella 9.7: Analisi di sensibilità dei pesi a KPI costanti. Lo scenario nominale usa i coefficienti dell'Eq. 9.5; lo scenario uniforme usa pesi 0.25 per ciascun KPI; lo scenario orientato alla massa usa $w_m = 0.45$, $w_{k_t} = 0.10$, $w_{C_z} = 0.25$ e $w_\sigma = 0.20$. In tutti i casi normalizzazione, popolazione e KPI restano invariati.

Effetto dell'inclusione della prima frequenza nel ranking

La Tab. 9.8 riporta separatamente l'effetto dell'inclusione di f_1 nel ranking. Il set nominale non include la prima frequenza positiva: f_1 è usata come indicatore complementare dello stato precaricato, senza classificazione automatica delle forme modali. Lo scenario alternativo verifica quindi come cambia l'ordinamento quando la funzione di ranking include anche questo KPI; non è una semplice sensitivity dei pesi, perché modifica l'insieme delle grandezze valutate.

Nel ranking nominale la top-4 è costituita da RSW TP-L, RSW TP-O, RSW FS-O e RSW FS-L. Con inclusione di f_1 e pesi uniformi, la top-4 resta interna alla famiglia RSW ma FS-L e FS-O si scambiano la terza e quarta posizione. Nello scenario con f_1 e maggiore peso alla massa, l'ordine della top-4 diventa RSW TP-L, RSW TP-O, RSW FS-O e RSW FS-L. Questa lettura conferma la robustezza del gruppo RSW senza attribuire a f_1 un significato modale specifico che non è stato verificato tramite mode shape o partecipazioni modali.

Fam.	Variante	Score nom.	Rank nom.	Rank con f_1 uniforme	Rank con f_1 legg.
RSW	TP-L	93.6	1	1	1
RSW	TP-O	92.8	2	2	2
RSW	FS-O	91.8	3	4	3
RSW	FS-L	91.1	4	3	4
RSW	baseline	83.0	5	5	5
CCW	FS-O	53.2	6	6	9
CCW	TP-L	52.2	7	7	11
CCW	FS-L	52.1	8	9	10
CCW	baseline	51.8	9	10	13
CCW	TP-O	51.1	10	8	14
SSW	TP-O	42.5	11	12	7
SSW	TP-L	41.2	12	13	8
SSW	FS-L	40.6	13	11	6

Tabella 9.8: Effetto dell'inclusione della prima frequenza nel ranking. Questa prova modifica il set di KPI rispetto allo score nominale e non va interpretata come sola sensitivity dei pesi.

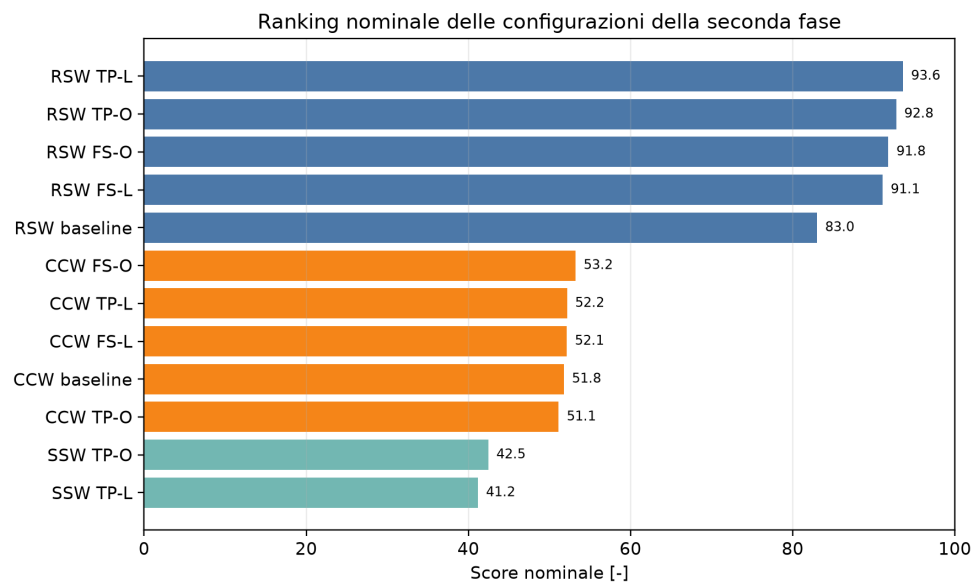


Figura 9.4: Configurazioni con punteggio nominale più elevato nel ranking dinamico.

Il ranking favorisce nettamente la famiglia RSW. Tuttavia, la shortlist per gli sviluppi successivi non coincide automaticamente con la top-4 nominale: deve tenere conto anche dei risultati statici del Capitolo 8, della robustezza A1/A2 disponibile e della necessità di non limitare il confronto a varianti quasi equivalenti della stessa famiglia. La Tab. 9.9 riassume quindi le configurazioni numericamente promettenti, includendo due soluzioni RSW dominanti nel ranking e alcune alternative utili come confronto architettuale o riserva rigida.

Configurazione	Vantaggio principale	Criticità principale	Stabilità ranking	Stato verifica statica
RSW TP-L	Massimo score nominale; incremento di k_t e riduzione di $C_{z,max}$ rispetto alla baseline.	Alleggerimento quasi nullo; resta una soluzione orientata alla rigidità.	Stabile nella top-4; scende al terzo posto nello scenario orientato alla massa.	STNL A1 e A2 utilizzabili; in A2 conserva il vantaggio topografico più robusto della famiglia RSW.
RSW FS-O	Migliore alleggerimento nel gruppo RSW e buon indicatore tensionale dinamico.	$C_{z,max}$ aumenta rispetto alla baseline; robustezza A2 non dimostrata.	Top-4 stabile; diventa prima nello scenario orientato alla massa.	STNL A1 utilizzabile; A2 non utilizzabile per output di spostamento non coerente.
SSW FS-L	Opzione non-RSW più leggera tra quelle mantenute; risposta dinamica non peggiorativa rispetto alla baseline SSW.	Ranking nominale basso rispetto al gruppo RSW; perdita di rigidità nella verifica A2.	Sensibile ai pesi: sale dal tredicesimo al sesto posto nello scenario orientato alla massa.	Stato A1 disponibile per la MFRA; STNL A2 utilizzabile ma con riduzione di rigidità rispetto alla baseline.
SSW TP-O	Variante SSW più equilibrata per rigidità, compliance e stress dinamico.	Massa quasi invariata; score nominale inferiore alle configurazioni RSW.	Sensibile ai pesi: undicesima nominale, settima nello scenario orientato alla massa.	STNL A1 e A2 utilizzabili; TP-O è la variante SSW più coerente nella lettura statica A1/A2.
CCW TP-O	Riserva rigida: riduce $C_{z,max}$ e aumenta k_t rispetto alla baseline CCW.	Massa elevata, penalizzante negli scenari con peso maggiore sull'alleggerimento.	Fascia intermedia nominale; perde posizioni nello scenario orientato alla massa.	STNL A1/A2 utilizzabili; miglioramento statico moderato ma coerente.

Tabella 9.9: Shortlist per gli sviluppi successivi ottenuta dalla lettura congiunta di verifica statica, robustezza A1/A2, KPI dinamici, ranking nominale e sensitivity del ranking.

La differenza tra top-4 nominale e shortlist ingegneristica è intenzionale: lo score identifica le configurazioni più forti nella popolazione normalizzata, mentre la shortlist preserva anche alternative con massa contenuta o comportamento statico coerente, utili per gli sviluppi successivi.

9.6 Limiti della valutazione dinamica

La MFRA precaricata ha validità di screening dinamico comparativo entro il modello numerico adottato. I principali limiti sono i seguenti:

- l'analisi è lineare e viene linearizzata attorno allo stato statico precaricato A1 già calcolato;
- lo smorzamento modale è assunto pari all'1% del critico; di conseguenza le ampiezze assolute dei picchi dipendono direttamente da questa scelta, mentre frequenze e confronti relativi sono più robusti;
- il modello non include rotolamento, evoluzione temporale dell'area di contatto, terreno deformabile, input PSD della regolate, sospensione completa o massa equivalente completa del veicolo;

- l'indicatore tensionale dinamico sulla superficie TOP è usato come grandezza relativa di screening: riduce il volume dei dati e consente il confronto automatico, ma non sostituisce una mappa continua del campo tensionale né una verifica a fatica;
- la prima frequenza positiva f_1 non è classificata automaticamente mediante forma modale o partecipazione modale; resta quindi un indicatore comparativo dello stato precaricato.

Una successiva verifica locale dovrà integrare gli indicatori scalari con l'analisi delle mappe tensionali alle frequenze di picco, controllando forme modali, sensibilità locale alla mesh e coerenza fisica del campo tensionale. Entro questi limiti, il Capitolo fornisce uno screening dinamico comparativo entro il modello numerico adottato.

9.7 Sintesi

La risposta dinamica più favorevole appartiene alla famiglia RSW. Le varianti TP-L e TP-O aumentano k_t di circa il 35% e riducono $C_{z,\max}$ del 29.2% e del 29.9% rispetto alla baseline, mantenendo massa quasi invariata. Le varianti RSW FS-L e FS-O sono meno rigide dinamicamente, ma riducono la massa del 7.2% e del 16.5% e l'indicatore tensionale del 44.4% e del 38.6%. SSW TP-O riduce $C_{z,\max}$ del 22.9% e aumenta k_t del 29.6%; SSW FS-L riduce la massa del 24.5% con lieve miglioramento dinamico rispetto alla baseline. CSW TP-O migliora la compliance dell'11.3%, ma non riduce lo stress dinamico; CCW TP-O, nella configurazione a 5 mm, riduce la compliance del 6.1% e aumenta k_t del 6.3%, restando però penalizzata dalla massa.

La MFRA conferma la conclusione statica principale del Capitolo 8: le topografie sono più adatte quando il criterio principale è l'incremento di rigidità, mentre il free-size è più adatto all'alleggerimento. La verifica dinamica modifica però la lettura di alcune alternative: le varianti RSW free-size, pur peggiorando la compliance rispetto alla baseline, restano competitive per massa e stress; SSW FS-L entra nella shortlist perché combina alleggerimento elevato e risposta dinamica non peggiorativa; CSW, pur avendo una lettura statica A1/A2 ordinata, non emerge nel confronto dinamico globale. L'inclusione di f_1 non cambia la famiglia dominante: la top-4 resta interna a RSW, con scambi interni tra FS-L e FS-O negli scenari alternativi.

La shortlist per gli sviluppi successivi è quindi costituita da RSW TP-L, RSW FS-O, SSW FS-L e SSW TP-O, con CCW TP-O come riserva rigida ma pesante. La shortlist non coincide con la top-4 nominale dello score: include alternative non-RSW per preservare varietà architettonica, robustezza statica e priorità di massa, oltre ai KPI dinamici.

Capitolo 10

Conclusioni, limiti e sviluppi futuri

10.1 Risultati rispetto agli obiettivi e configurazioni promettenti

Il presente lavoro si è posto l'obiettivo di supportare lo sviluppo preliminare del sottosistema ruota di un rover lunare pressurizzato mediante un approccio numerico parametrico e automatizzato. Lo studio è stato orientato al confronto strutturale di differenti architetture, alla comprensione dell'influenza dei principali parametri geometrici e all'individuazione di configurazioni promettenti da trasferire alle successive fasi del progetto.

Alle tre architetture a elementi discreti inizialmente assunte come riferimento, Straight-Spoke Wheel (SSW), Curved-Spoke Wheel (CSW) e Circular-Cell Wheel (CCW), la campagna numerica ha affiancato la Solid Annular Wheel (SAW), impiegata come modello metodologico iniziale, e la Rounded Shell Wheel (RSW), mantenuta nel confronto per le prestazioni emerse durante lo screening. L'esplorazione dello spazio parametrico è stata quindi estesa a cinque famiglie e ha permesso di restringere progressivamente il dominio di ricerca, passando dal confronto globale delle geometrie alla selezione delle baseline e, infine, all'ottimizzazione locale e alla verifica delle configurazioni ottenute.

Il risultato conclusivo dello studio è una rosa di candidati numerici caratterizzati da differenti compromessi tra massa, rigidità e risposta dinamica. Le varianti RSW della shortlist derivano dalla baseline con $R_e = 400$ mm, $\phi = 0.667$, $\beta = B/R_e = 0.40$ e spessore nominale $t = 3$ mm. Le configurazioni SSW derivano dalla baseline con $R_e = 400$ mm, $\phi = 1/3$, $w = 200$ mm, $N_s = 20$ e $t = 3$ mm. La variante CCW mantenuta come riferimento alternativo deriva invece dalla configurazione con $R_e = 400$ mm, $\phi = 2/3$, $w = 200$ mm, $N_c = 14$ e spessore nominale $t = 5$ mm.

La Tab. 10.1 riassume le configurazioni considerate più significative al termine della lettura congiunta delle verifiche statiche, della sensibilità alla fase A1–A2 e della risposta dinamica.

La RSW TP-L costituisce il candidato più chiaramente orientato alla rigidità. La

Configurazione	Evoluzione della baseline	Massa [kg]	Risultato principale	Criticità principale
RSW TP-L	Topography locale	12.56	Incremento di k_{eq} lineare del 49.1% e riduzione di $C_{z,max}$ del 29.2%. Il vantaggio di rigidità resta presente in A2.	Alleggerimento trascurabile; soluzione orientata principalmente all'irrigidimento.
RSW FS-O	Free-size esteso	10.53	Riduzione di massa del 16.5% e riduzione dell'indicatore tensionale dinamico del 38.6%.	Aumento di $C_{z,max}$ dell'8.2% e robustezza A2 non dimostrata.
SSW FS-L	Free-size locale	10.71	Riduzione di massa del 24.5%, con compliance e indicatore tensionale dinamico leggermente inferiori alla baseline.	Perdita di rigidità nella verifica STNL A2.
SSW TP-O	Topography estesa	14.25	Incremento di k_{eq} lineare del 31.6% e riduzione di $C_{z,max}$ del 22.9%.	Massa sostanzialmente invariata e prestazioni globali inferiori alle RSW.
CCW TP-O	Topography estesa	23.81	Incremento della rigidità incrementale del 6.3% e riduzione di $C_{z,max}$ del 6.1%, con comportamento A1-A2 regolare.	Massa elevata e incremento dell'indicatore tensionale dinamico rispetto alla baseline.

Tabella 10.1: Sintesi delle configurazioni numericamente promettenti emerse dalla seconda fase. Le variazioni sono riferite alla baseline della medesima famiglia.

modifica topografica locale aumenta in modo marcato la rigidità statica e riduce l'amplificazione dinamica al mozzo, mantenendo il vantaggio anche nella verifica STNL in fase A2. La configurazione conserva una massa prossima a quella della baseline e rappresenta quindi una soluzione in cui la topografia viene utilizzata principalmente per migliorare l'efficienza strutturale della superficie.

La RSW FS-O segue una strategia differente. L'estensione del dominio free-size al cilindro esterno permette una riduzione di massa del 16.5% e produce un indicatore tensionale dinamico sensibilmente inferiore alla baseline. La compliance dinamica aumenta moderatamente e la verifica A2 disponibile non consente di dimostrare la robustezza di fase della soluzione. La configurazione resta pertanto un candidato interessante per un successivo ciclo di alleggerimento e consolidamento strutturale.

Tra le architetture a elementi discreti, la SSW fornisce le alternative più promettenti. La variante FS-L raggiunge una massa di 10.71 kg, con una riduzione del 24.5% rispetto alla baseline e una risposta dinamica complessivamente non peggiorativa. La verifica non lineare in A2 evidenzia tuttavia una riduzione della rigidità, che richiede un'ulteriore revisione del campo di spessore. La SSW TP-O mantiene invece la massa della baseline e incrementa la rigidità, riducendo contemporaneamente compliance e indicatore tensionale dinamico. Essa rappresenta la configurazione SSW più equilibrata nel confronto statico-dinamico.

La CCW TP-O viene mantenuta come alternativa strutturalmente rigida. La baseline a 5 mm selezionata nella seconda fase presenta una sensibilità A1-A2 molto inferiore alla tendenza mediana osservata per la famiglia CCW nella campagna parametrica. La topografia produce ulteriori incrementi di rigidità e una moderata riduzione della compliance dinamica. Il principale limite resta la massa, prossima a 24 kg, che penalizza la configurazione nel confronto multicriterio.

La CSW non rientra nella shortlist finale. La famiglia ha mostrato una buona stabilità rispetto alla fase circonferenziale, ma i benefici ottenuti mediante free-size e topography risultano meno marcati rispetto alle altre architetture e la verifica dinamica non la colloca tra le configurazioni dominanti.

Le soluzioni riportate rappresentano candidati numerici per la prosecuzione del progetto. I campi di spessore del free-size e le variazioni topografiche devono ancora essere trasformati in geometrie discrete e producibili, integrate con collegamenti, battistrada, mozzo e interfacce strutturali reali.

10.2 Contributo ingegneristico e metodologico

Il primo contributo del lavoro riguarda la lettura ingegneristica dello spazio parametrico. La campagna ha analizzato 1170 geometrie nominali e ha prodotto un archivio di 11803 esecuzioni numeriche post-processate. L'organizzazione dei risultati in un dataset strut-

turato ha permesso di confrontare le famiglie attraverso grandezze comuni e di costruire modelli predittivi nel dominio campionato.

Lo studio ha evidenziato il ruolo distinto dei principali parametri macrogeometrici. Lo spessore rappresenta una delle leve più influenti sulla rigidità delle famiglie analizzate. L'aumento del raggio esterno riduce sensibilmente rigidità e frequenze proprie, modificando i bracci flettenti e le lunghezze libere degli elementi strutturali. La larghezza assiale incrementa la massa in modo quasi proporzionale e aumenta la rigidità, risultando una leva poco selettiva quando massa e risposta strutturale devono essere migliorate simultaneamente. Il numero di raggi o celle agisce invece come parametro topologico e modifica la distribuzione del carico, la massa e la lunghezza caratteristica degli elementi ripetuti.

La sensibilità alla fase circonferenziale ha ulteriormente distinto le architetture. La SSW presenta una dipendenza moderata dalla fase, mentre la CSW risulta la famiglia periodica più stabile nel dominio analizzato. La CCW mostra una variabilità maggiore e richiede una selezione della singola geometria che tenga conto esplicitamente delle fasi A1 e A2. La configurazione CCW a 5 mm adottata nella seconda fase costituisce un esempio di come lo screening della singola geometria possa individuare casi più robusti rispetto alla tendenza complessiva della famiglia.

Il confronto tra free-size e topography ha inoltre mostrato due impieghi progettuali differenti. Il free-size risulta adatto alla ricerca di margini di alleggerimento e identifica le regioni nelle quali lo spessore può essere ridotto o preservato. La topography agisce principalmente sulla rigidità e permette di generare pattern di bead e nervature capaci di ridurre lo spostamento al mozzo con variazioni di massa contenute. Le reanalysis hanno mostrato la necessità di verificare il campo finale in un nuovo modello FEM, poiché l'andamento della funzione obiettivo durante l'ottimizzazione non è sufficiente a caratterizzare la prestazione strutturale della configurazione trasferita.

I risultati della campagna parametrica costituiscono anche un catalogo di configurazioni utilizzabile nelle successive fasi del progetto LPR. La selezione effettuata nella presente tesi riflette i KPI e le priorità oggi disponibili. La definizione futura di requisiti più precisi su massa massima, deformazione radiale ammissibile, diametro della ruota, integrazione con la sospensione o risposta dinamica potrà portare a una diversa selezione all'interno dello stesso spazio di progetto. Il dataset e i modelli predittivi permettono di aggiornare lo screening mantenendo la tracciabilità con le analisi FEM originarie.

Il secondo contributo riguarda il metodo numerico e la relativa automazione. Il workflow sviluppato separa la definizione della famiglia geometrica dalla gestione delle analisi e dal post-processing. Per ciascuna architettura, un builder dedicato traduce i parametri geometrici nella topologia nodale ed elementare del modello. La successiva generazione dei deck, l'organizzazione del naming, la costruzione dei manifest e la raccolta degli output seguono una struttura comune.

Questa impostazione rende possibile integrare nuove famiglie geometriche definendo-

ne il generatore specifico e collegandolo alla struttura già utilizzata per la gestione delle analisi. Le condizioni al contorno e le famiglie di soluzione possono essere configurate mantenendo la stessa logica di tracciabilità. Analogamente, la seconda fase ha mostrato che differenti formulazioni di ottimizzazione e differenti domini di design possono essere gestiti attraverso una sequenza comune costituita da baseline, ottimizzazione, trasferimento del campo e reanalysis.

Il post-processing automatico completa il workflow trasformando gli output del solutore in curve forza-spostamento, KPI e indicatori di qualità. La distinzione tra analisi completata, curva numericamente regolare, target disponibile e caso utilizzabile evita di identificare la sola convergenza del solutore con la validità del risultato. Manifest, identificativi geometrici e cataloghi dei run permettono infine di risalire dal dato aggregato al modello numerico che lo ha prodotto.

Il metodo sviluppato costituisce quindi una base estendibile per ulteriori campagne di progettazione numerica. La sua utilità principale risiede nella possibilità di modificare geometrie, condizioni di analisi e formulazioni di ottimizzazione mantenendo una struttura comune per la generazione dei modelli, il controllo dei risultati e il confronto quantitativo delle configurazioni.

10.3 Limiti del lavoro

I risultati ottenuti appartengono a una fase di progettazione numerica preliminare e devono essere interpretati all'interno delle ipotesi adottate.

Il modello di interazione con il suolo utilizza una superficie di appoggio rigida. La regolite, il cedimento del terreno, lo scorrimento e il rotolamento della ruota non sono rappresentati. La rigidità radiale calcolata descrive pertanto la risposta strutturale della ruota nelle condizioni di carico definite e non determina direttamente le prestazioni di trazione o mobilità del rover.

Le geometrie analizzate non comprendono un battistrada. Il contatto viene applicato direttamente alla superficie strutturale esterna e non viene valutato l'effetto di elementi destinati alla generazione dello sforzo di taglio nella regolite. Anche ostacoli, carichi localizzati e sequenze cicliche associate al rotolamento restano esclusi dalla campagna.

L'Al 7075-T6 è utilizzato come materiale strutturale comune per isolare l'effetto delle variabili geometriche e topologiche. Il lavoro non esegue una selezione comparativa dei materiali. Gli effetti di temperatura, cicli termici, radiazione, abrasione della regolite, usura e degrado ambientale non sono inclusi nella legge costitutiva. Il limite tensionale impiegato nelle ottimizzazioni costituisce un criterio preliminare di screening e non un allowable certificato per applicazioni spaziali.

Lo studio di convergenza della mesh è stato condotto su configurazioni rappresentative delle singole famiglie. La mesh di produzione è stata selezionata come compromesso tra

accuratezza dei KPI globali e costo computazionale della campagna parametrica. I massimi locali di tensione e deformazione restano maggiormente sensibili alla discretizzazione e vengono utilizzati come indicatori di screening. Una verifica locale di dettaglio richiederà raffinamenti dedicati nelle regioni critiche.

Le geometrie ottimizzate sono ottenute mediante campi continui di spessore o variazioni della superficie media. Tali risultati descrivono una direzione di sviluppo strutturale e non una definizione costruttiva completa. La campagna non introduce spessori commerciali discreti, raggi minimi di formatura, limiti specifici di stampaggio o fresatura, tolleranze e giunzioni tra componenti. Le ruote FEM sono inoltre rappresentate come strutture continue nelle regioni nelle quali una configurazione reale potrebbe richiedere bulloni, rivetti, saldature o altri sistemi di collegamento.

La verifica dinamica è una MFRA lineare eseguita attorno allo stato statico precaricato A1. Lo smorzamento modale uniforme dell'1% rappresenta un'ipotesi comparativa. Il modello non comprende la massa equivalente del veicolo, la rigidità e lo smorzamento della sospensione o una rappresentazione di dettaglio del mozzo. I risultati descrivono quindi la risposta delle ruote all'interno del modello numerico utilizzato e non la dinamica accoppiata del sistema veicolo-sospensione-ruota.

La prima frequenza positiva è trattata come indicatore modale senza una classificazione automatica delle forme proprie. L'indicatore tensionale armonico è utilizzato per il confronto relativo delle configurazioni e non costituisce una verifica di resistenza a fatica. Una valutazione della vita strutturale richiederebbe la definizione degli spettri di carico ciclici, l'identificazione dei punti critici e dati di fatica coerenti con materiale, trattamento e ambiente.

Infine, il lavoro non comprende una validazione sperimentale. Le configurazioni selezionate dovranno essere confrontate con modelli numerici di maggiore dettaglio e, successivamente, con prove su componenti o prototipi rappresentativi.

10.4 Sviluppi futuri

Una prima estensione riguarda il raffinamento dello spazio parametrico. I risultati e i modelli predittivi possono essere utilizzati per concentrare nuove campagne nelle regioni che hanno mostrato i compromessi più favorevoli. Un campionamento locale più fitto risulterebbe più efficace di un aumento uniforme del numero di livelli dell'intero DOE. Per le singole famiglie potranno inoltre essere introdotti parametri geometrici specifici, quali grandezze di curvatura per la CSW, descrittori più dettagliati delle celle per la CCW e ulteriori parametri della sezione raccordata per la RSW.

La trasformazione delle configurazioni ottimizzate in concept producibili costituisce un secondo sviluppo prioritario. I campi free-size dovranno essere discretizzati in un numero limitato di spessori realizzabili e le topografie dovranno essere tradotte in nervature

con geometria, raggi e altezze compatibili con il processo produttivo scelto. I vincoli di producibilità potranno successivamente essere introdotti direttamente nella formulazione dell'ottimizzazione.

La definizione costruttiva dovrà comprendere anche la suddivisione della ruota in componenti e lo studio delle relative giunzioni. Collegamenti bullonati, rivettati o saldati possono modificare la rigidità globale, introdurre concentrazioni di tensione e influenzare la risposta a fatica e le frequenze proprie. La modellazione di tali dettagli rappresenta il passaggio necessario tra le architetture strutturali ideali considerate nella presente tesi e una configurazione fisicamente realizzabile.

Un ulteriore sviluppo riguarda la superficie esterna della ruota. La definizione di un battistrada parametrico permetterebbe di introdurre numero, altezza, inclinazione, spaziatura e copertura degli elementi di trazione come nuove variabili di progetto. Il successivo accoppiamento con un modello di terreno deformabile consentirebbe di studiare affondamento, pressione di contatto, scorrimento e capacità di generare forza di trazione. Questa fase permetterebbe di collegare la deformabilità strutturale studiata nella tesi alle prestazioni di mobilità sulla regolite.

L'integrazione del mozzo e della sospensione è particolarmente rilevante per la prosecuzione della verifica dinamica. L'introduzione della massa equivalente supportata dalla ruota, della rigidità e dello smorzamento della sospensione e di una rappresentazione più realistica dell'interfaccia ruota-mozzo consentirebbe di studiare i modi accoppiati del sistema e la trasmissibilità verso il veicolo. La risposta in frequenza potrebbe quindi essere valutata utilizzando eccitazioni coerenti con profili del terreno o spettri di carico definiti a livello di veicolo.

Il materiale può essere introdotto come ulteriore variabile del processo di selezione. Il confronto a geometria invariata tra materiali differenti permetterebbe di valutare direttamente l'effetto di densità, modulo elastico e legge costitutiva sui trade-off massa-rigidità e sulla risposta dinamica. Eventuali campagne successive potranno estendere il database a leghe leggere, materiali ad alta resistenza o leghe con comportamento costitutivo specifico per strutture fortemente deformabili.

Le elevate prestazioni di rigidità osservate per la RSW suggeriscono inoltre di utilizzare la sua geometria globale raccordata come riferimento per nuove architetture. Una possibile direzione consiste nella sostituzione della shell continua con una struttura metallica reticolare o a rete deformabile, recuperando alcuni principi delle ruote metalliche a mesh e delle architetture Spring Tire discusse nel Capitolo 2. Questa estensione costituirebbe una nuova famiglia parametrica e permetterebbe di verificare se il percorso geometrico favorevole della RSW possa essere combinato con una maggiore deformabilità locale e una riduzione di massa.

Le fasi successive dovranno infine includere carichi ciclici, analisi di fatica, condizioni termiche e verifiche ambientali. Il rotolamento su terreno deformabile e il superamento

di ostacoli permetteranno di costruire storie di carico rappresentative. Su questa base sarà possibile definire criteri di durata e programmare prove sperimentali su provini, sottocomponenti e prototipi di ruota.

10.5 Considerazioni finali

Il lavoro ha ridotto un ampio spazio di progetto a un insieme ristretto di configurazioni strutturalmente promettenti e ha identificato il diverso ruolo delle principali leve geometriche e delle strategie di ottimizzazione. Le RSW emergono come le configurazioni più favorevoli quando viene privilegiata la rigidità e la riduzione della compliance dinamica. La SSW conserva un interesse rilevante per l'alleggerimento e offre candidati capaci di mantenere una struttura geometricamente semplice e leggibile. La CCW irrigidita mostra che una configurazione specifica può risultare più robusta della tendenza media della famiglia, accettando tuttavia una penalizzazione significativa in massa.

Il contributo metodologico permette di aggiornare questa selezione al progredire del progetto LPR. Nuove geometrie, condizioni al contorno e formulazioni di ottimizzazione possono essere integrate mantenendo la struttura di generazione, tracciabilità e post-processing sviluppata. La prosecuzione del lavoro dovrà trasformare i candidati numerici in concept producibili e inserirli in un modello più completo del sistema ruota-terreno-veicolo. In questo senso, le configurazioni individuate rappresentano punti di partenza per le successive attività di progettazione, mentre il workflow fornisce lo strumento con cui confrontarne in modo sistematico le future evoluzioni.

Bibliografia

- [1] National Aeronautics and Space Administration, “2024 Moon to Mars Architecture: Lunar Mobility Drivers and Needs,” National Aeronautics and Space Administration, rapp. tecn., 2024. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/08/6-moon-to-mars-architecture.pdf>
- [2] V. Asnani, D. Delap e C. Creager, “The Development of Wheels for the Lunar Roving Vehicle,” National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, OH, NASA Technical Memorandum NASA/TM-2009-215798, dic. 2009. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100000019>
- [3] E. McBryan, P. Francis e A. Sobey, “Dust Mitigation for the VIPER Mobility System,” in *Proceedings of the 54th International Conference on Environmental Systems*, National Aeronautics and Space Administration, 2025. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20250005201>
- [4] M. Bhardwaj, V. Bulsara, D. Kokan, S. Shariff, E. Svarverud e R. Wirz, “Design of a Pressurized Lunar Rover,” National Aeronautics and Space Administration, NASA Contractor Report NASA-CR-192033, 1992. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930008827>
- [5] J. J. Zakrajsek et al., “Exploration Rover Concepts and Development Challenges,” National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, OH, NASA Technical Memorandum NASA/TM-2005-213555, mar. 2005, AIAA-2005-2525. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050175879>
- [6] National Aeronautics and Space Administration. “Space Exploration Vehicle.” Fonte dell’immagine: NASA/LaRC/Advanced Concepts Lab, NASA, visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://science.nasa.gov/3d-resources/space-exploration-vehicle/>
- [7] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 3^a ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2001.

- [8] Politecnico di Torino, *Al via “Space It Up”, il nuovo partenariato esteso che esplorerà i temi di frontiera della ricerca spaziale nei prossimi anni. La proposta progettuale è stata coordinata dal Politecnico di Torino*, Comunicato stampa, feb. 2024. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://www.polito.it/ateneo/comunicazione-e-ufficio-stampa/comunicati-stampa/al-via-space-it-up-il-nuovo-partenariato-esteso-che>
- [9] Space It Up! *Spoke 8 – Robotic and Human Exploration of Extraterrestrial Habitats, Architectures and Infrastructures*, Pagina istituzionale del progetto, 2026. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://spaceitup.it/projects/space-it-up/spoke-8/>
- [10] National Aeronautics and Space Administration. “Lunar Roving Vehicle (LRV) Wheel.” NASA Identifier MSFC-7020255; DVIDS Photo ID 855740; public domain, DVIDS, visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://www.dvidshub.net/image/855740/lunar-roving-vehicle-lrv-wheel>
- [11] Jet Propulsion Laboratory, “Assessing Mars Curiosity Rover Wheel Damage,” Jet Propulsion Laboratory, rapp. tecn., 2022. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/media/documents/fmwi-rankin-2022-0225-final.pdf>
- [12] D. Cardile, N. Viola, S. Chiesa e A. Rougier, “Applied Design Methodology for Lunar Rover Elastic Wheel,” *Acta Astronautica*, vol. 81, n. 1, pp. 1–11, 2012. DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.06.002
- [13] G. Sharma, S. Tiwary, A. Kumar, H. N. Suresha Kumar e K. A. Keshava Murthy, “Systematic Design and Development of a Flexible Wheel for Low Mass Lunar Rover,” *Journal of Terramechanics*, vol. 76, pp. 39–52, apr. 2018. DOI: 10.1016/j.jterra.2017.12.002
- [14] P. Naghipour, I. Padula Santo A., C. Creager e H. Oravec, *Design and Analysis of Shape Memory Spring Tires for Martian and Lunar Rover Vehicles*, NASA Technical Reports Server, presentation, 2023. visitato il giorno 26 giu. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230008382>
- [15] L. Giacconi, “Preliminary Design of Locomotion System for a Lunar Pressurized Rover,” Master’s thesis, Politecnico di Torino, ott. 2025.
- [16] R. F. Muraca e J. S. Whittick, “Materials Data Handbook: Aluminum Alloy 7075,” National Aeronautics and Space Administration, NASA Contractor Report NASA-CR-123773, 1972. visitato il giorno 14 lug. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19720022809>

- [17] R. E. Johnson, “Apollo Experience Report: The Problem of Stress-Corrosion Cracking,” National Aeronautics and Space Administration, NASA Technical Note NASA-TN-D-7111, 1973. visitato il giorno 14 lug. 2026. indirizzo: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730011148>
- [18] MATDAT LLC. “MATDAT Database of Materials Properties: Al 7075-T6 Material Record.” Provider: MATDAT LLC – Materials Databases and Services for Engineers and Scientists. Record designations: Other: Al 7075-T6; AFNOR: A-Z5GU; EN: AW-7075; ISO: AlZn5,5MgCu; JIS: A7075; UNS: A97075; W.Nr.: 3.437, MATDAT LLC, visitato il giorno 14 lug. 2026. indirizzo: <https://www.matdat.com>
- [19] Altair Engineering. “PCONT Bulk Data Entry,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 14 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/pcont_bulk_r.htm
- [20] Altair Engineering. “CNTSTB Bulk Data Entry,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 14 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/cntstb_bulk_r.htm
- [21] Altair Engineering. “Free-size Optimization,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 11 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/free_size_optimization_intro_r.htm
- [22] Altair Engineering. “DSIZE Bulk Data Entry,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 11 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/dsize_bulk_r.htm
- [23] Altair Engineering. “DTPG Bulk Data Entry,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 11 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/dtpg_bulk_r.htm
- [24] Altair Engineering. “Topography Optimization Example Problem,” OptiStruct 2026 Documentation, visitato il giorno 11 lug. 2026. indirizzo: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/topography_optimization_example_problem_intro_r.htm

Appendice A

Specificazione dei modelli predittivi

Questa appendice raccoglie le informazioni necessarie a riprodurre i modelli predittivi del Capitolo 7. Il dataset utilizzato è l'archivio post-processato, filtrato mediante l'elenco dei run utilizzabili; per le analisi statiche vengono mantenuti i soli casi RBE3. La cross-validation usa cinque fold raggruppati per `geometry_id`.

A.1 Variabili geometriche

I modelli power-law impiegano variabili positive. Per SAW, SSW, CSW e CCW si usano il raggio esterno R_e , il rapporto $\phi = R_i/R_e$ e, quando applicabili, larghezza w , spessore t e numero di elementi ripetuti. Per RSW la campagna è definita tramite R_M , R_S/R_M , B/R_e e t , ma il fit utilizza le grandezze derivate $R_e = R_M + R_S$, $\phi = (R_M - R_S)/(R_M + R_S)$ e $\beta = B/R_e$. La trasformazione migliora la confrontabilità dimensionale con le altre famiglie senza modificare lo spazio campionato.

Famiglia	Geometrie	Livelli dimensionali [mm]	Rapporti	Discreti
SAW	27	$R_e = 400, 500, 600$; $w = 200, 300, 400$	$\phi = 0.75, 0.80, 0.85$	–
RSW	144	$R_M = 333.333, 366.667, 400$; $t = 2, 3, 4$	$R_S/R_M = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$; $\beta = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$	–
SSW	324	$R_e = 400, 500, 600$; $w = 200, 300, 400$; $t = 2, 3, 4$	$\phi = 1/3, 1/2, 2/3$	$N_s = 20, 40, 60, 80$
CSW	324	$R_e = 400, 500, 600$; $w = 200, 300, 400$; $t = 2, 3, 4$	$\phi = 1/3, 1/2, 2/3$	$N_s = 20, 40, 60, 80$
CCW	351	$R_e = 400, 500, 600$; $w = 200, 300, 400$; $t = 3, 4, 5$	$\phi = 1/3, 1/2, 2/3$	$N_c = 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 14$ compatibili

Tabella A.1: Dominio parametrico delle geometrie nominali presenti nel catalogo geometrico.

A.2 Formulazioni e coefficienti

Il modello power-law di base segue l'Eq. (7.3). Il coefficiente C è ottenuto dall'esponentiale dell'intercetta nello spazio logaritmico. Un esponente positivo indica crescita locale del KPI all'aumentare del parametro; uno negativo indica una relazione inversa. L'interpretazione è valida nel dominio discreto campionato e non costituisce una legge di scala universale.

La variante indicata nel Capitolo 7 come PL-poly mantiene la regressione sul logaritmo del KPI, ma arricchisce il modello power-law con due termini aggiuntivi sul rapporto geometrico ϕ quando questo è presente tra le feature. La formulazione effettivamente usata è

$$\log Q = a_0 + \sum_{j=1}^p a_j \log x_j + b_1 \phi + b_2 \phi^2, \quad (\text{A.1})$$

dove x_j sono le variabili geometriche positive della famiglia considerata. In forma equivalente, il modello può essere letto come

$$Q = C \prod_{j=1}^p x_j^{a_j} \exp(b_1 \phi + b_2 \phi^2). \quad (\text{A.2})$$

La PL-poly non introduce una response surface quadratica completa: non include interazioni tra tutte le variabili, ma solo il contributo lineare e quadratico del rapporto ϕ . I coefficienti completi di questa variante sono riportati nell'archivio supplementare `regression_coefficients.csv`; le tabelle seguenti mantengono invece il modello power-law di base, più direttamente interpretabile come insieme di esponenti di scala.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SAW	MOD	$1,332 \times 10^{-6}$	2,000	-3,631	1,000	-	-	-	-
RSW	MOD	$3,211 \times 10^{-5}$	2,019	-0,245	-	0,408	-	-	1,000
SSW	MOD	$4,764 \times 10^{-6}$	1,000	-0,566	1,000	-	0,657	-	1,000
CSW	MOD	$2,598 \times 10^{-6}$	1,085	-0,712	1,000	-	0,716	-	0,948
CCW	MOD	$1,644 \times 10^{-5}$	1,048	-0,181	1,000	-	-	0,357	0,974

Tabella A.2: Coefficienti del modello power-law di base per la massa. Il fit usa i soli dati modali e i parametri geometrici applicabili a ciascuna famiglia.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SAW	MOD	$5,276 \times 10^4$	-1,019	-4,740	0,018	-	-	-	-
RSW	MOD	$9,254 \times 10^5$	-1,477	0,207	-	-0,213	-	-	0,510
SSW	MOD	$1,482 \times 10^6$	-2,005	-0,195	$7,600 \times 10^{-3}$	-	0,162	-	0,996
CSW	MOD	$4,195 \times 10^6$	-2,165	0,089	$4,592 \times 10^{-3}$	-	0,096	-	1,093
CCW	MOD	$1,506 \times 10^6$	-2,174	-0,443	$6,669 \times 10^{-3}$	-	-	0,469	1,068

Tabella A.3: Coefficienti del modello power-law di base per la prima frequenza strutturale.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SAW	ST_A1	82,311	-0,041	-12,452	1,041	-	-	-	-
RSW	ST_A1	$1,680 \times 10^5$	-0,835	0,200	-	0,094	-	-	1,933
SSW	ST_A1	$1,990 \times 10^5$	-3,003	-1,029	1,014	-	0,893	-	2,984
CSW	ST_A1	$1,251 \times 10^6$	-3,275	0,678	1,009	-	0,895	-	3,155
CCW	ST_A1	$1,451 \times 10^6$	-3,316	-0,375	1,011	-	-	1,006	3,080

Tabella A.4: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidezza equivalente lineare nei casi A1 RBE3.

Le response surface quadratiche includono termini lineari, quadratici e interazioni a due a due. Nella variante Ridge su $\log Q$, le feature vengono standardizzate usando media

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SSW	ST_A2	$1,322 \times 10^5$	-3,005	-0,884	1,014	-	1,015	-	2,985
CSW	ST_A2	$1,499 \times 10^6$	-3,268	0,683	1,009	-	0,843	-	3,150
CCW	ST_A2	$4,004 \times 10^5$	-3,239	0,736	1,013	-	-	1,534	3,141

Tabella A.5: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidità equivalente lineare nei casi A2 RBE3.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SAW	STNL_A1	174,848	-0,036	-11,402	0,924	-	-	-	-
RSW	STNL_A1	$5,711 \times 10^5$	-0,848	0,399	-	-0,050	-	-	1,444
SSW	STNL_A1	$1,850 \times 10^5$	-2,939	-1,027	0,981	-	0,896	-	2,894
CSW	STNL_A1	$1,637 \times 10^6$	-3,358	0,707	1,030	-	0,921	-	3,234
CCW	STNL_A1	$1,569 \times 10^6$	-3,431	-0,440	1,063	-	-	1,088	3,193

Tabella A.6: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidità secante a 2000 N nei casi A1 RBE3.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SSW	STNL_A2	$1,418 \times 10^5$	-2,958	-0,950	0,987	-	0,990	-	2,913
CSW	STNL_A2	$1,783 \times 10^6$	-3,361	0,713	1,033	-	0,897	-	3,248
CCW	STNL_A2	$3,045 \times 10^5$	-3,278	0,669	1,038	-	-	1,646	3,225

Tabella A.7: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidità secante a 2000 N nei casi A2 RBE3.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SAW	STNL_A1	136,227	-0,034	-11,834	0,957	-	-	-	-
RSW	STNL_A1	$6,427 \times 10^5$	-0,874	0,427	-	-0,047	-	-	1,489
SSW	STNL_A1	$1,478 \times 10^5$	-2,834	-1,065	0,943	-	0,882	-	2,750
CSW	STNL_A1	$1,548 \times 10^6$	-3,319	0,706	1,010	-	0,908	-	3,203
CCW	STNL_A1	$1,404 \times 10^6$	-3,473	-0,474	1,085	-	-	1,135	3,271

Tabella A.8: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidità secante a 4000 N nei casi A1 RBE3.

Fam.	Analisi	C	a_{R_e}	a_ϕ	a_w	a_β	a_{N_s}	a_{N_c}	a_t
SSW	STNL_A2	$1,089 \times 10^5$	-2,842	-0,984	0,942	-	0,979	-	2,767
CSW	STNL_A2	$1,584 \times 10^6$	-3,317	0,711	1,013	-	0,891	-	3,223
CCW	STNL_A2	$2,707 \times 10^5$	-3,118	0,575	0,949	-	-	1,633	2,937

Tabella A.9: Coefficienti del modello power-law di base per la rigidità secante a 4000 N nei casi A2 RBE3.

e deviazione standard calcolate esclusivamente nel training fold; lo stesso scaling viene poi applicato al validation fold. Il valore di regolarizzazione è selezionato senza usare le osservazioni da predire.

A.3 Artefatti riproducibili

I risultati delle regressioni sono conservati in un archivio strutturato che contiene i file:

- `regression_summary.csv`, con metriche OOF per ogni metodo;
- `regression_coefficients.csv`, con tutti i coefficienti, le feature e le statistiche di scaling;
- `regression_predictions.csv`, con osservazioni e predizioni OOF;
- `run_config.csv`, con filtri e impostazioni della procedura.

Questi file costituiscono la specificazione numerica completa; le tabelle dell'appendice riportano il sottoinsieme power-law più direttamente interpretabile.

Appendice B

Dataset, tracciabilità e controlli di qualità

B.1 Architettura dei dati

Questa appendice integra il Capitolo 6 documentando la struttura concreta dei file post-processati, le chiavi di collegamento e i campi usati per tracciare qualità e inclusione dei risultati.

L'archivio post-processato documentato contiene 11803 run nel file dei KPI e 1287 identificativi geometrici nei cataloghi di run. Il catalogo geometrico nominale contiene 1170 geometrie uniche. Dopo i controlli di completezza e validità fisica, 9121 run entrano nelle elaborazioni principali e 2682 restano tracciati come esclusi. L'esclusione non cancella il dato: impedisce soltanto che un risultato incompleto o non rappresentativo influenzi statistiche e regressioni.

Famiglia	Geometrie	Run modali	Note statiche principali
SAW	27	27	A1 lineare e non lineare utilizzabile
RSW	144	144	RBE2/RBE3 separati; A1 utilizzabile
SSW	324	324	A1/A2 utilizzabili; B esclusi dalla sintesi
CSW	324	324	A1/A2 utilizzabili; B esclusi dalla sintesi
CCW	351	351	lineari utilizzabili; STNL A RBE3 utilizzabili, STNL B e ramo RBE2 c

Tabella B.1: Copertura geometrica e perimetro qualitativo dell'archivio post-processato.

B.2 File principali

Il dataset è suddiviso nei seguenti file:

- `geometry_catalog.csv`: una riga per geometria e relativi parametri;
- `run_catalog.csv`: identificazione del run, analisi, fase, variante rigida e stato;

- `modal_modes.csv`: frequenze estratte per modo e sottocaso;
- `static_response_raw.csv`: risposta finale delle analisi statiche;
- `nonlinear_curve.csv`: punti incrementali forza-spostamento;
- `kpi_summary.csv`: KPI derivati usati per confronti e regressioni.

Le tabelle complete dei confronti RBE2/RBE3, ST/STNL e A1/A2 sono conservate nel materiale supplementare associato alla tesi. Una procedura automatica ricostruisce l'archivio post-processato e le tabelle di sintesi a partire dagli output del solutore e dai manifest; la stessa catena genera i coefficienti power-law riportati nell'Appendice A.

B.3 Criteri di esclusione

I criteri di esclusione sono applicati attraverso campi espliciti del dataset e liste derivate di casi utilizzabili. La Tab. B.2 riassume i controlli principali.

Criterio	Flag/campo	Effetto
Run non completato o output non valido	<code>converged_flag</code> , <code>solver_status</code>	esclusione dalle elaborazioni quantitative principali
Curva non lineare irregolare	<code>curve_irregular_flag</code> , <code>curve_irregular_code</code>	esclusione dai modelli predittivi che richiedono curve regolari
Target di carico non disponibile	colonne KPI del target, ad esempio <code>u_4000_mm</code> o <code>k_sec_4000_n_per_mm</code>	esclusione dai confronti che richiedono quello specifico target
Ramo non confrontabile nella sintesi principale	<code>model_type</code> , <code>analysis_id</code> , <code>rigid_link_type</code>	mantenimento nell'archivio ed esclusione dalle liste utilizzabili per la regressione
Motivo di inclusione o esclusione	campo <code>reason</code> nelle liste derivate dei run utilizzabili/esclusi	tracciabilità della decisione di filtro

Tabella B.2: Campi principali usati per documentare l'effetto operativo dei criteri di qualità e inclusione.

La convergenza del solutore è quindi necessaria ma non sufficiente. Il dataset conserva anche i casi esclusi, mentre i confronti e le regressioni leggono soltanto le liste derivate coerenti con il target e con il perimetro metodologico considerato.

B.4 Curva del materiale

Il materiale numerico Al 7075-T6 deriva dal *MATDAT Database of Materials Properties*, fornito da MATDAT LLC, Materials Databases and Services for Engineers and Scientists

[18]. Il record identifica il materiale anche mediante le seguenti designazioni: Other: Al 7075-T6; AFNOR: A-Z5GU; EN: AW-7075; ISO: AlZn5,5MgCu; JIS: A7075; UNS: A97075; W.Nr.: 3.437.

La discretizzazione della TABLES1 conserva 111 coppie $(\bar{\varepsilon}_{\text{pl}}, \bar{\sigma})$, da $(0, 497,1 \text{ MPa})$ a $(0.11, 629,6 \text{ MPa})$. I deck preservano tali punti senza uniformazioni o ricampionamenti ulteriori; la Fig. 5.4 li rappresenta sia come ramo plastico effettivamente tabulato, sia come legge true stress–true total strain ricostruita mediante $\bar{\varepsilon}_{\text{tot}} = \bar{\varepsilon}_{\text{pl}} + \bar{\sigma}/E$. L’origine sperimentale primaria dei singoli punti non è stata ricostruita dal materiale disponibile; la curva è quindi trattata come legge costitutiva del record MATDAT usata nella campagna numerica, non come nuova caratterizzazione sperimentale del materiale.