



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Ottobre 2025

Analisi strutturale mediante metodo FEM di un'antenna per telecomunicazioni satellitari

Candidata:

Federica Salvà Gagliolo

Relatore:

Prof. Enrico Cestino

Tutor aziendale:

Ing. Piero Vita

Sommario

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito delle telecomunicazioni satellitari, caratterizzato da una continua evoluzione tecnologica. L'obiettivo è lo studio del comportamento meccanico di un'antenna parabolica progettata da Antech Space s.r.l., analizzata mediante simulazioni numeriche basate sul metodo agli elementi finiti (FEM), con particolare attenzione agli effetti combinati di peso proprio e vento statico.

A partire dal modello CAD della struttura, semplificato per esigenze di calcolo, è stato sviluppato il modello FEM in ambiente Patran/Nastran, validato mediante un'analisi modale preliminare "*free-free*". Successivamente sono stati definiti i principali carichi e analizzate le diverse configurazioni operative, con angoli di elevazione compresi tra 0° e 90°. Le pressioni aerodinamiche, determinate tramite simulazioni CFD in Solidworks – Flow Simulation, sono state trasferite sul modello FEM per valutare in modo realistico l'interazione fluido-struttura.

I risultati hanno consentito di identificare lo scenario più critico e le zone maggiormente sollecitate, evidenziando come, seppur in un contesto preliminare e semplificato, l'approccio adottato fornisca indicazioni utili sul comportamento globale dell'antenna. In conclusione, il lavoro conferma l'efficacia dell'integrazione tra modellazione CAD, simulazioni CFD e analisi FEM come strumento di supporto alla progettazione di antenne paraboliche complesse, fornendo al progettista indicazioni utili per garantire affidabilità, sicurezza e prestazioni ottimali.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Contesto Generale	1
1.2	Contesto aziendale	1
1.3	Obiettivo del lavoro	2
1.4	Struttura della tesi	3
2	Antenne per Telecomunicazioni Satellitari	5
2.1	Introduzione alle antenne paraboliche	5
2.2	Struttura e principio di funzionamento	6
2.3	Tipologia e configurazioni	9
2.4	Sistemi di movimentazione	11
2.5	Applicazioni e bande di frequenze di utilizzo	13
2.6	Parametri di design delle antenne	16
2.7	Valutazioni conclusive sul design di antenne paraboliche	21
3	Principi teorici dell'analisi agli elementi finiti	23
3.1	Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti	23
3.2	Fondamenti teorici del FEM	26
3.3	Il processo FEM: dalla modellazione alla soluzione	38
3.4	Panoramica dei software utilizzati	43

3.5	Validazione del modello.....	46
4	Modellazione FEM dell'antenna	49
4.1	Introduzione	49
4.2	Struttura dell'antenna.....	50
4.3	Semplificazioni del modello	51
4.4	Materiali e proprietà degli elementi.....	53
4.5	Interazioni tra le parti.....	57
4.6	Verifiche preliminari	59
4.7	Conclusioni e validazione del modello FEM.....	60
5	Analisi modale	61
5.1	Introduzione	61
5.2	Analisi modale <i>free-free</i> dell'antenna	63
6	Carico aerodinamico vento	67
6.1	Introduzione al carico aerodinamico dovuto al vento.....	67
6.2	Coefficienti di pressione e regime di flusso.....	70
6.3	Modello CFD del riflettore	73
6.4	Risultati dell'analisi CFD	78
6.5	Elaborazione dei dati e interpolazione in Matlab	80
6.6	Validazione del metodo: caso test	85
6.7	Applicazione dei campi di pressione in Patran	95

6.8	Riepilogo della procedura di elaborazione dati	97
7	Casi di carico e analisi	99
7.1	Definizione dei carichi agenti sull'antenna	99
7.2	Definizione dei casi di carico.....	100
7.3	Definizione dei Load Case in Patran	102
7.4	Definizione dell'analisi FEM e scelta del solver	103
7.5	Visualizzazione e interpretazione dei risultati	104
7.6	Considerazioni finali.....	110
8	Conclusioni	113
8.1	Sintesi del lavoro svolto.....	113
8.2	Risultati principali.....	114
8.3	Conclusioni e sviluppi futuri.....	115
	Bibliografia	117

Indice delle figure

Figura 2.1 Schema di ricezione del segnale per un antenna con riflettore parabolico.....	7
Figura 2.2 Rappresentazione dell'antenna parabolica con indicazione degli elementi che la costituiscono [9]	8
Figura 2.3 A sinistra, configurazione antenna Offset; a destra, configurazione antenna Prime Focus.....	9
Figura 2.4 Schema di funzionamento configurazione Cassegrain (a sinistra) e Gregorian (a destra) [12] [13]	10
Figura 2.5 Assi di rotazione principali di un'antenna.....	12
Figura 3.1 Elemento monodimensionale	28
Figura 3.2 Elementi bidimensionali.....	28
Figura 3.3 Elementi tridimensionali	28
Figura 3.4 Schema elemento asta allineata con l'asse x	31
Figura 3.5 Schema elemento asta ruotata di un angolo θ rispetto all'asse x	32
Figura 3.6 Schema elemento rettangolare allineato con l'asse x	34
Figura 3.7 Esempi di discretizzazione in elementi 2D di un corpo [28]	38
Figura 4.1 Modello CAD dell'antenna parabolica	49
Figura 4.2 Componenti dell'antenna parabolica	51
Figura 4.3 Dettaglio piastre di collegamento della struttura di supporto.....	52
Figura 4.4 Confronto tra la struttura originale del Feedcone e dell'Hub (a destra), e quella semplificata (a sinistra)	52

Figura 4.5 Dettaglio sezioni della centinatura (a sinistra: Sezione 40x40, a destra: sezione 70x70)	54
Figura 4.6 Dettaglio sezioni dei controventi (a sinistra: 60x60, a destra: 80x80) ..	55
Figura 4.7 Dettaglio sezioni travi a S (a sinistra: travi radiali, a destra: travi trasversali)	55
Figura 4.8 Dettaglio delle costole interne all'Hub (a sinistra), dettaglio dei rinforzi del feedcone (a destra)	56
Figura 4.9 Modello FEM dell'intera struttura	60
Figura 5.1 Modo 1, Frequenza= $3.5e-3$ Hz.....	64
Figura 5.2 Modo 2, Frequenza= $2.75e-3$ Hz.....	64
Figura 5.3 Modo 3, Frequenza= $2.00e-4$ Hz.....	64
Figura 5.4 Modo 4, Frequenza= $1.16e-3$ Hz.....	64
Figura 5.5 Modo 5, Frequenza= $1.44e-3$ Hz.....	65
Figura 5.6 Modo 6, Frequenza= $1.82e-3$ Hz.....	65
Figura 5.7 Modo 7, Frequenza=25.527 Hz.....	65
Figura 5.8 Modo 8, Frequenza=23.925 Hz.....	65
Figura 5.9 Modo 9, Frequenza=32.271 Hz.....	66
Figura 5.10 Modo 10, Frequenza=32.885 Hz.....	66
Figura 6.1 Dettaglio direzione del vento	67
Figura 6.2 Direzione vento incidente sul riflettore	69
Figura 6.3 Modello semplificato del riflettore	74
Figura 6.4 Dominio computazionale per l'analisi CFD	76

Figura 6.5 Dettaglio Mesh del riflettore	77
Figura 6.6 Distribuzione di pressione superficie sopravento (0°)	79
Figura 6.7 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (30°)	79
Figura 6.8 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (45°)	79
Figura 6.9 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (60°)	79
Figura 6.10 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (90°)	80
Figura 6.11 Sistemi di riferimento delle normali alle superfici	81
Figura 6.12 Profilo alare NACA 65(1)-412	85
Figura 6.13 Distribuzione di pressione attorno ad un profilo alare	87
Figura 6.14 Andamento dei coefficienti di pressione	87
Figura 6.15 Dominio computazionale di analisi	89
Figura 6.16 Mesh rifinita del profilo alare.....	89
Figura 6.17 Distribuzione di pressione per un profilo alare (incidenza nulla) [CFD]	90
Figura 6.18 Distribuzione di pressione per un profilo alare (incidenza 5°) [CFD]	90
Figura 6.19 Andamento del C_p per profilo con incidenza 5° (Xfoil)	92
Figura 6.20 Andamento del C_p per profilo con incidenza nulla (Xfoil).....	92
Figura 6.21 Andamento dei coefficienti di pressione ricavato dall'analisi CFD del profilo con incidenza pari a 5°	93

Figura 6.22 Dettaglio Mesh della struttura, con evidenza della riga di elementi su cui verrà applicato il campo	94
Figura 6.24 Campo di pressione (C_p) applicato al profilo con incidenza 5°	94
Figura 6.23 Campo di pressione (C_p) applicato al profilo con incidenza nulla	94
Figura 6.25 Campo di pressione risultante sul riflettore (0°)	95
Figura 6.26 Campo di pressione risultante sul riflettore (30°)	96
Figura 6.27 Campo di pressione risultante sul riflettore (45°)	96
Figura 6.28 Campo di pressione risultante sul riflettore (60°)	96
Figura 6.29 Campo di pressione risultante sul riflettore (90°)	96
Figura 7.1 Schema delle configurazioni dell'antenna analizzate	101
Figura 7.2 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (0°).....	105
Figura 7.3 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (30°).....	105
Figura 7.4 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (30°).....	105
Figura 7.5 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (60°).....	106
Figura 7.6 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (90°).....	106
Figura 7.7 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (0°).....	107
Figura 7.8 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (30°).....	107
Figura 7.9 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (45°).....	108
Figura 7.10 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (60°).....	108
Figura 7.11 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (90°).....	109

1 Introduzione

1.1 Contesto Generale

Il settore delle telecomunicazioni satellitari continua a evolversi rapidamente, spinto dalla crescente domanda di connettività ad alta velocità, capacità avanzate di telerilevamento e analisi dei dati sempre più sofisticate. Storicamente, le comunicazioni satellitari erano limitate da basse velocità di trasmissione e tecnologie rudimentali. Con l'avvento dei satelliti geostazionari e di costellazioni in orbita bassa, il panorama è completamente cambiato: i sistemi moderni integrano tecniche all'avanguardia di progettazione dei sistemi d'antenna, processi sofisticati di elaborazione del segnale e protocolli di trasmissione dati ottimizzati. [1]

Le stazioni di terra costituiscono il collegamento fondamentale con i satelliti in orbita, garantendo un flusso continuo di dati, essenziale per numerosi settori e servizi. Queste stazioni, dotate di tecnologie quali antenne, ricevitori e sistemi di controllo e sicurezza, sono essenziali per assicurare l'efficienza e l'affidabilità complessiva delle reti di comunicazione satellitare. In particolare, le antenne paraboliche rappresentano un elemento fondamentale nell'ambito delle telecomunicazioni, poiché permettono di trasmettere e ricevere segnali su grandi distanze, in maniera altamente direzionale. [2]

La precisione del puntamento è fondamentale: una piccola deviazione angolare può comportare un disallineamento significativo rispetto al satellite, riducendo la qualità del segnale o causando la perdita della comunicazione. Pertanto, la progettazione dell'antenna deve garantire stabilità e affidabilità strutturale, in quanto soggetta a carichi di diversa tipologia ed entità.

1.2 Contesto aziendale

Antech Space S.r.l., con sede a Catania, è un'azienda attiva nella progettazione e realizzazione di antenne e sistemi avanzati per le telecomunicazioni satellitari.

Fondata nel 2016, come prosecuzione dell'attività storica avviata da Antech nel 1989, l'azienda si occupa di gestire l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla concezione al collaudo, ed è coinvolta in progetti ad alto contenuto tecnologico, sia per il settore aerospaziale che per quello terrestre. Tra le principali attività figurano: progettazione di riflettori parabolici di grandi dimensioni, realizzazione di sistemi di puntamento ad alta precisione. [3]

Durante il periodo di tesi in azienda, ho avuto l'opportunità di seguire da vicino il processo progettuale reale di un'antenna satellitare, svolgendo parallelamente attività di analisi strutturale su alcune componenti già progettate. In particolare, ho fatto uso di strumenti professionali di modellazione CAD e di analisi agli elementi finiti (FEM), approfondendo l'utilizzo di software come Solidworks, MSC Patran e Nastran. Questa esperienza mi ha consentito di comprendere le logiche alla base delle scelte progettuali e le problematiche concrete affrontate dagli ingegneri, tra cui i vincoli di rigidità, le deformazioni e i carichi aerodinamici. L'attività ha inoltre rappresentato un'importante occasione formativa, permettendomi di acquisire competenze pratiche nella modellazione e validazione di modelli FEM e nell'interpretazione critica dei risultati numerici, strumenti fondamentali per affrontare in autonomia l'intero processo di simulazione strutturale.

1.3 Obiettivo del lavoro

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è lo studio del comportamento strutturale di un'antenna parabolica per telecomunicazioni satellitari, progettata da Antech Space s.r.l., mediante l'applicazione del metodo agli elementi finiti (FEM). Lo scopo è verificare la coerenza tra il progetto meccanico dell'antenna e i requisiti prestazionali, identificando eventuali criticità strutturali.

In particolare, l'analisi FEM è stata impostata considerando diverse condizioni operative e differenti casi di carico, tra cui:

- Effetto della sola gravità, per valutare le deformazioni critiche della struttura.
- Effetto combinato di gravità e vento costante, per stimare le deformazioni e le tensioni indotte dai carichi aerodinamici sulle diverse configurazioni dell'antenna.

Per raggiungere tali obiettivi sono stati utilizzati diversi software:

- MSC Patran e Nastran, per la modellazione e la simulazione strutturale;
- Solidworks – Flow Simulation, per stimare il carico aerodinamico sul riflettore, valutando l'interazione con un flusso d'aria avente direzione e velocità specifiche.

L'uso combinato di simulazioni CFD e FEM permette di trasferire i carichi aerodinamici, calcolati in Solidworks, al modello realizzato in Patran, garantendo una rappresentazione realistica del comportamento strutturale.

In sintesi, questo lavoro ha l'obiettivo di fornire una valutazione preliminare completa del comportamento strutturale dell'antenna, integrando conoscenze teoriche e strumenti software avanzati, con applicazioni pratiche nella progettazione di antenne paraboliche affidabili e performanti.

1.4 Struttura della tesi

La tesi è organizzata in otto capitoli, ciascuno dei quali affronta aspetti specifici del processo di analisi strutturale di un'antenna parabolica, seguendo un percorso logico che parte dalla contestualizzazione del problema fino alla validazione dei risultati.

Dopo il primo capitolo introduttivo, nel quale viene inquadrato il contesto generale e gli obiettivi, il secondo capitolo descrive le antenne paraboliche, il loro principio

di funzionamento e le motivazioni tecniche che rendono necessaria un'analisi strutturale accurata.

Il terzo capitolo introduce i principi teorici dell'analisi agli elementi finiti (FEA), approfondendo il funzionamento dei software utilizzati, spiegando come essi consentano di simulare il comportamento meccanico della struttura sottoposta a diversi carichi.

Successivamente, nel quarto capitolo, viene illustrato il modello CAD dell'antenna e il processo di ricostruzione e semplificazione necessario per l'importazione in ambiente FEM. Questo capitolo evidenzia le scelte progettuali adottate per garantire un equilibrio tra fedeltà geometrica e fisica, e tempi di calcolo accettabili.

Prima di procedere con l'analisi statica, il quinto capitolo, presenta un'analisi modale preliminare, volta a verificare la corretta definizione del modello FEM e a identificare le caratteristiche vibrazionali intrinseche della struttura.

Il sesto capitolo, si concentra sulla determinazione del carico aerodinamico, agente sulla struttura in presenza di vento orizzontale, considerando diverse condizioni operative. A tal fine, è stato sviluppato un metodo di calcolo basato sullo studio fluidodinamico del riflettore dell'antenna, condotto con Solidworks – Flow Simulation, i cui risultati sono stati successivamente adattati e resi compatibili con l'ambiente di Patran.

Il settimo capitolo descrive i diversi casi di carico che verranno analizzati e presenta i risultati delle simulazioni effettuate, esaminando il comportamento meccanico dell'antenna in termini di spostamenti e tensioni. Per ciascuno scenario viene analizzato l'effetto della variazione della posizione dell'antenna, con l'obiettivo di interpretare le deformazioni e individuare le aree critiche della struttura.

Infine, la tesi si conclude con un riepilogo dei principali risultati, una discussione sui limiti dell'analisi condotta e una panoramica sui possibili sviluppi futuri, con l'obiettivo di estendere lo studio a scenari più complessi e realistici.

2 Antenne per Telecomunicazioni Satellitari

2.1 Introduzione alle antenne paraboliche

Le antenne paraboliche costituiscono uno degli elementi fondamentali delle telecomunicazioni satellitari, poiché permettono di stabilire il collegamento tra stazioni di terra e satelliti in orbita. Esse garantiscono la trasmissione e la ricezione dei segnali su lunghe distanze con elevata efficienza, sfruttando la capacità del riflettore di concentrare le onde elettromagnetiche incidenti nel punto focale, e, allo stesso tempo, di irradiare l'energia in un fascio altamente direzionale. [2] Tale proprietà consente di ottenere guadagni molto elevati, migliorando l'efficienza complessiva del collegamento.

Nel campo delle telecomunicazioni satellitari queste caratteristiche risultano fondamentali, poiché le distanze da coprire sono considerevoli e le frequenze di trasmissione si collocano generalmente tra la banda L (1-2 GHz) e la banda Ka (26-40 GHz). [4]

Le antenne paraboliche sono impiegate sia in trasmissione che in ricezione:

- In trasmissione, è necessario garantire un puntamento accurato e una distribuzione uniforme di potenza, per massimizzare l'efficienza del collegamento uplink ed evitare interferenze con altri sistemi.
- In ricezione, risulta fondamentale garantire sensibilità del ricevitore e capacità del riflettore di convogliare il segnale verso l'illuminatore (feed), minimizzando le perdite.

Nella maggior parte dei casi queste due funzioni vengono svolte dalla stessa antenna, utilizzando bande di frequenze diverse.

Le applicazioni delle antenne paraboliche spaziano dalle telecomunicazioni satellitari commerciali alla televisione satellitare, fino a missioni scientifiche e spaziali avanzate. Un esempio sono le grandi parabole impiegate dalle agenzie spaziali (NASA e ESA) per gestire le comunicazioni con sonde e rover, che si

trovano nel Deep Space. Negli ultimi anni, l'impiego di antenne paraboliche si è esteso anche a sistemi legati alle costellazioni di satelliti in orbita bassa (LEO), finalizzati a servizi di connettività Internet a livello globale. [5]

Le prestazioni dell'antenna vengono valutate sia per quanto riguarda gli aspetti elettromagnetici che quelli strutturali. È necessario, quindi, che vengano garantite precisione meccanica e robustezza strutturale, dal momento che eventuali deformazioni della struttura possono causare errori di allineamento rilevanti e, di conseguenza, una riduzione del guadagno e dell'efficienza complessiva del sistema.

Queste ultime considerazioni rappresentano il motivo principale per cui è fondamentale lo studio strutturale dell'antenna, che verrà affrontato nei capitoli successivi.

2.2 Struttura e principio di funzionamento

Le antenne paraboliche sfruttano la geometria del paraboloide di rivoluzione, che consente di ottenere un'elevata direttività del segnale, grazie alla concentrazione delle onde elettromagnetiche in un punto focale. Il paraboloide di rivoluzione si ottiene dalla rotazione di una parabola attorno al proprio asse di simmetria. Il fuoco della parabola è definito come il punto che, rispetto ad ogni punto della curva, realizza la stessa distanza che c'è tra lo specifico punto e la retta direttrice [6]. Di conseguenza, per il paraboloide il punto focale coincide con quello della parabola generatrice e rappresenta il punto in cui, in ricezione, le onde elettromagnetiche incidenti, parallele all'asse ottico del riflettore, vengono riflesse e concentrate. In tale punto viene installato l'illuminatore (feed). [8]

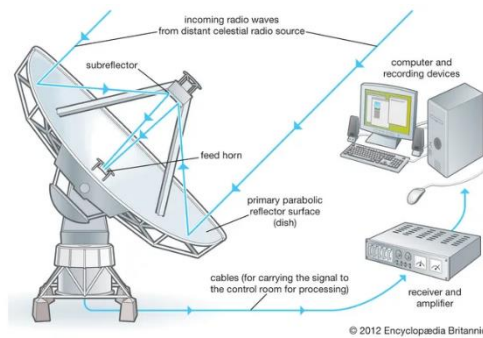


Figura 2.1 Schema di ricezione del segnale per un antenna con riflettore parabolico

Viceversa, quando si lavora in trasmissione, le onde emesse dalla sorgente posta nel fuoco vengono riflesse dal paraboloide, trasformandosi in un fronte d'onda piano e direzionale. Questo comportamento consente di ridurre le perdite e garantire collegamenti ad alta efficienza.

Un'antenna parabolica è costituita dai seguenti elementi [5] [9]:

- Riflettore: struttura concava a forma di paraboloide, realizzata in materiale conduttivo, tipicamente metallo o materiali compositi. La sua geometria consente, come già detto, di concentrare le onde in un punto specifico, aumentando il guadagno e la direttività dell'antenna, essenziali per applicazioni in campo satellitare, che richiedono la copertura di grandi distanze.
- Feed: sorgente di alimentazione posizionata nel fuoco del riflettore, la cui funzione principale è quella di generare o ricevere le onde elettromagnetiche. Il corretto posizionamento di questa componente è fondamentale per garantire uniformità del fascio e perdite ridotte. Il feed viene installato all'interno di una struttura di contenimento, chiamata feedcone, che ha come compito principale quello di proteggere le componenti che si trovano al suo interno.
- Back Structure: struttura di supporto dell'antenna, progettata per garantire stabilità e rigidità. È costituita da un hub centrale e da un sistema di travi reticolari installate radialmente e trasversalmente. Il principale scopo di questi sostegni è il mantenimento della geometria del riflettore e della precisione di posizionamento.

- Sub-riflettore: elemento che contribuisce a migliorare l'efficienza dell'illuminazione, garantendo un fascio più preciso e uniforme. Le diverse configurazioni delle antenne con doppio riflettore verranno descritte nel paragrafo successivo.
- Quadripode: sistema di bracci che ha il compito di sorreggere il sub-riflettore, mantenendolo in posizione rispetto al fuoco del riflettore principale.
- Yoke: elemento meccanico che collega la parte superiore dell'antenna al basamento. Questa componente permette il movimento di rotazione dell'antenna attorno agli assi principali, consentendole l'orientamento verso il satellite.
- Pedestal: struttura di base che garantisce il sostegno dell'intera antenna. È progettato per resistere ai carichi trasmessi dalla struttura sovrastante, garantendo stabilità anche in condizioni ambientali sfavorevoli.

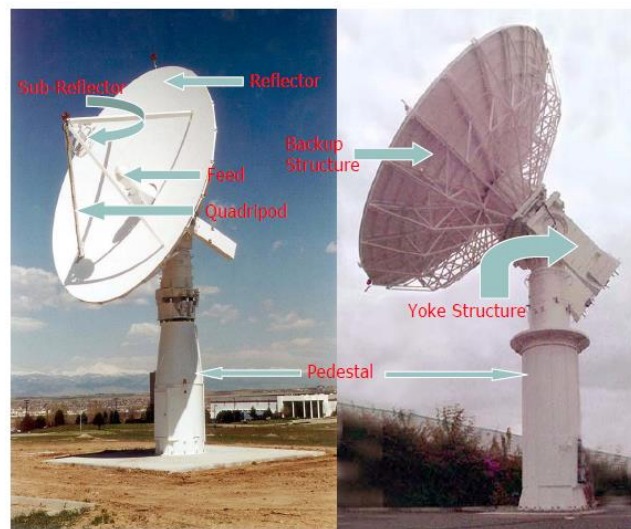


Figura 2.2 Rappresentazione dell'antenna parabolica con indicazione degli elementi che la costituiscono [9]

Nell'ambito dello studio condotto non verranno considerate le ultime quattro parti della struttura appena descritte, in quanto l'analisi sarà focalizzata esclusivamente sul comportamento della parte superiore dell'antenna, comprendente il riflettore, il feedcone e la back structure.

2.3 Tipologia e configurazioni

La posizione del feed rispetto al riflettore, il numero di superfici riflettenti e le dimensioni caratteristiche della struttura definiscono le diverse configurazioni delle antenne paraboliche, influenzandone efficienza, ingombro meccanico e prestazioni globali.

2.3.1 Configurazioni a riflettore singolo

In base al posizionamento del feed è possibile avere:

- Antenne Prime-focus, in cui il feed si trova direttamente sul fuoco del paraboloide e viene sorretto da bracci di sostegno. Questo schema è di facile realizzazione ma la presenza del supporto del feed può causare fenomeni di diffrazione e ombreggiamento che inducono una degradazione dell'efficienza del sistema globale.
- Antenne Offset, ottenute decentrando il feed rispetto all'asse ottico, illuminando solo una porzione del paraboloide, senza interferire con il fascio principale. Questa configurazione risulta vantaggiosa in termini di efficienza e riduzione delle perdite, ma caratterizzata da un'elevata complessità strutturale e, di conseguenza, richiede maggiore attenzione durante le fasi di progettazione meccanica. [10]

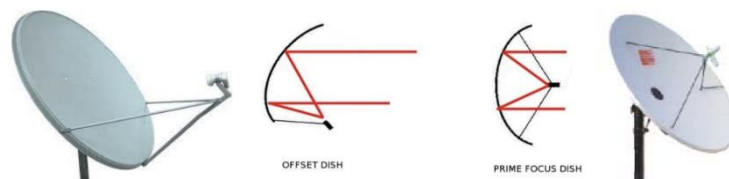


Figura 2.3 A sinistra, configurazione antenna Offset; a destra, configurazione antenna Prime Focus

2.3.2 Configurazioni a doppio riflettore

Oltre alle configurazioni a riflettore singolo, appena descritte, le antenne paraboliche possono essere realizzate con doppio riflettore, per applicazioni in cui sono richiesti guadagni molto elevati e grandi diametri del riflettore principale. Il sub-riflettore viene posizionato lungo l'asse ottico del primo riflettore, permettendo di ridurre l'ingombro dell'antenna e facilitare l'installazione del feed e dei dispositivi elettronici.

Le configurazioni principali a doppio riflettore sono la Cassegrain e la Gregorian, che differiscono per forma del sub-riflettore e percorso ottico:

- Cassegrain: il sub riflettore è di tipo convesso iperbolico. Le onde emesse partono dal feed, vengono riflesse dal sub-riflettore e successivamente dal riflettore principale, generando un fascio parallelo. Questa configurazione consente di ridurre lo spreco di energia e migliorare la direttività globale dell'antenna.
- Gregorian: il sub-riflettore è concavo ellittico. Le onde seguono un percorso simile alla configurazione precedente, ma la forma del sub-riflettore consente un'illuminazione più uniforme del riflettore principale. Questa tipologia di antenne garantisce un miglioramento dell'efficienza in alcune bande, ma richiede maggiore ingombro e l'impiego di strutture più complesse. [11]

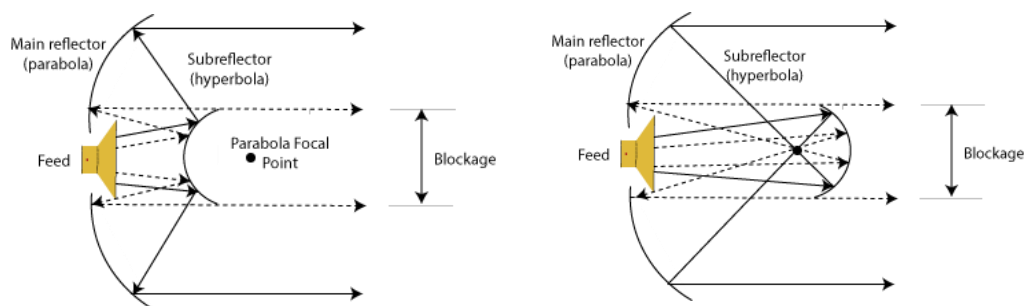


Figura 2.4 Schema di funzionamento configurazione Cassegrain (a sinistra) e Gregorian (a destra) [12] [13]

2.3.3 Configurazioni tipiche delle stazioni di terra

Le stazioni di terra per telecomunicazioni satellitari, come quella analizzata in questo lavoro di tesi, richiedono antenne di grande diametro, caratterizzate da guadagni elevati e un'accurata precisione del puntamento. Per poter soddisfare questi requisiti, si prediligono configurazioni a doppio riflettore, che facilitano l'accesso al feed e migliorano la direttività del fascio. È inoltre fondamentale selezionare materiali appropriati, tipicamente leghe di alluminio o compositi, per garantire un equilibrio ottimale tra leggerezza e rigidità strutturale, riducendo al minimo le deformazioni, che possono compromettere le prestazioni dell'antenna.

2.4 Sistemi di movimentazione

Per garantire il corretto puntamento del segnale verso il satellite e mantenere l'allineamento tra riflettore, feed e sub-riflettore è necessario dotare le antenne di sistemi di movimentazione meccanica. Questi consentono di orientare la struttura con precisione in qualsiasi direzione dello spazio.

2.4.1 Assi di movimentazione

Generalmente, le antenne paraboliche sono montate su sistemi a più assi, che consentono il controllo completo della direzione del fascio [9]:

- Asse di azimut: permette la rotazione orizzontale dell'antenna intorno al proprio asse verticale, consentendo di coprire l'intero orizzonte.
- Asse di elevazione: consente di inclinare verticalmente il riflettore per ricevere segnali a diverse altitudini.

- Asse di polarizzazione: permette di ruotare il sistema attorno al proprio asse ottico, allineando la polarizzazione del fascio con quella del satellite, al fine di ridurre le perdite di segnale.

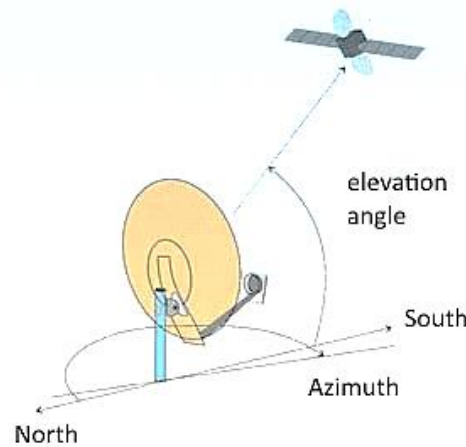


Figura 2.5 Assi di rotazione principali di un'antenna

2.4.2 Sistemi di tracking

Per mantenere il puntamento dell'antenna in modo automatico, le antenne sono dotate di sistemi di tracking costituiti da:

- Controllo motorizzato: azionamenti elettrici, idraulici o elettromeccanici che gestiscono la movimentazione attorno agli assi di movimentazione.
- Sensori e feedback: sensori ottici, encoder e giroscopi che monitorano la posizione reale dell'antenna e consentono di correggere eventuali errori di puntamento.
- Software di inseguimento: applicativo che calcola in tempo reale la posizione del satellite, con cui si sta comunicando, rispetto alla stazione di terra e invia i comandi agli attuatori per garantire il corretto tracciamento del segnale.

I sistemi di tracking automatizzati sono fondamentali per antenne di grandi dimensioni, dove anche piccoli errori di puntamento possono comportare riduzioni significative di guadagno e degrado della qualità del segnale ricevuto.[14]

2.4.3 Requisiti meccanici e prestazionali

Progettare sistemi di movimentazione richiede il rispetto di determinati requisiti meccanici e prestazionali, tra cui:

- Rigidità e stabilità: la struttura deve resistere alle sollecitazioni dovute a vento, gravità e ulteriori combinazioni di carico senza subire deformazioni significative.
- Precisione angolare: il puntamento dev'essere controllato con errori minimi, tipicamente dell'ordine di frazioni di grado per antenne di grandi dimensioni.
- Affidabilità e manutenzione: i meccanismi devono garantire un funzionamento continuo, minimizzando i tempi di inattività.

La corretta progettazione dei meccanismi di movimentazione fa sì che la struttura mantenga il puntamento desiderato, lasciando inalterato guadagno, efficienza e qualità del segnale.

2.5 Applicazioni e bande di frequenze di utilizzo

L'impiego di un'antenna parabolica per uno specifico utilizzo dipende principalmente dalla banda di frequenza operativa e dalle specifiche prestazionali richieste. Le bande di frequenza sono definite, a livello internazionale, dall'ITU (International Telecommunication Union), organizzazione che si occupa di stabilire gli standard nelle telecomunicazioni, determinando sia le applicazioni possibili sia i vincoli progettuali in termini di dimensionamento, precisione e materiali. [15]

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha portato all'utilizzo di frequenze sempre più alte, al fine di disporre di bande più ampie e supportare servizi più complessi quali comunicazioni radio, trasmissione dati, previsioni meteorologiche e altre applicazioni scientifiche. [16]

2.5.1 Bande di frequenza principali

La seguente tabella riassume le principali bande di frequenza utilizzate nelle telecomunicazioni satellitari [15]:

Banda	Intervallo di frequenza (GHz)	Applicazioni
Banda L	1-2	GPS, sistemi di navigazione satellitare, comunicazioni mobili satellitari
Banda S	2-4	Comunicazioni scientifiche e meteorologiche, tracking satellitare
Banda C	4-8	Trasmissioni televisive, reti dati, comunicazioni satellitari in zone tropicali
Banda X	8-12	Comunicazioni spaziali (deep space), radar militari e civili, missioni scientifiche
Banda Ku	12-18	TV satellitare diretta, VSAT, collegamenti aziendali e commerciali
Banda Ka	26-40	Internet satellitare ad alta capacità, collegamenti broadband, missioni spaziali avanzate

Tabella 1 Dettaglio bande di frequenza

Le bande mostrate sono caratterizzate dalle seguenti proprietà

- Banda L, caratterizzata da bassa attenuazione atmosferica e alta affidabilità. L'utilizzo di questa banda richiede antenne di dimensioni elevate per ottenere guadagni sufficienti.
- Banda S, rappresenta un buon compromesso tra copertura e robustezza del segnale.
- Banda C, molto resistente al *rain fade* (attenuazione del segnale dovuta all'assorbimento e alla dispersione causati dalla pioggia) e quindi adatta ai climi tropicali. Per questa banda le parabole sono caratterizzate da dimensioni medio-grandi.
- Banda X, presenta un buon equilibrio tra ampiezza di banda e resistenza agli agenti atmosferici. Le parabole che utilizzano questa banda richiedono elevata precisione.
- Banda Ku, permette l'impiego di parabole compatte, ma risulta più sensibile a pioggia e neve rispetto alla banda C.

- Banda Ka, richiede parabole estremamente precise con tolleranze millimetriche. Risulta molto vulnerabile a pioggia e condizioni atmosferiche estreme, motivo per cui è necessario prevedere tecniche di compensazione del segnale. [4]

2.5.2 Implicazioni per il design delle antenne

L'utilizzo di bande ad alta frequenza comporta conseguenze importanti nella progettazione delle antenne paraboliche:

- Dimensione del riflettore: a parità di guadagno, aumentare la frequenza consente di ridurre il diametro dell'antenna, rendendo possibile una progettazione più compatta.
- Precisione superficiale: ad alte frequenze la realizzazione della superficie riflettente richiede un'accuratezza molto elevata, poiché anche piccole deformazioni possono comprometterne l'efficienza dell'antenna.
- Effetti atmosferici: bande di frequenza elevate risultano maggiormente sensibili all'influenza delle condizioni atmosferiche, con conseguenti attenuazioni del segnale. Per questo motivo, è necessario adottare adeguate tecniche di mitigazione per garantire la continuità del servizio anche in presenza di fenomeni meteorologici avversi. [4]

2.5.3 Esempi di applicazioni

In funzione della banda di frequenza utilizzata, le antenne paraboliche trovano impiego in diverse applicazioni, come già anticipato:

- Telecomunicazioni satellitari commerciali: antenne caratterizzate da dimensioni contenute, che sfruttano le bande Ku e Ka, adatte anche ad installazioni domestiche e VSAT.

- Stazioni di terra per satelliti geostazionari: antenne di medio-grande diametro che sfruttano la banda C, per garantire collegamenti stabili nelle regioni equatoriali
- Deep Space Network (DSN): antenne di grande diametro che operano in banda X e Ka, dedicate a missioni interplanetarie e comunicazioni con sonde spaziali.
- Radioastronomia: radiotelescopi operanti su bande L, S, X, Ka per osservazioni astronomiche e studio delle emissioni cosmiche, caratterizzati da parabole di grandi dimensioni e tolleranze geometriche strette.
- Applicazioni militari e di difesa: antenne che operano in bande X e Ka per radar, sorveglianza e comunicazioni sicure. Sono caratterizzate da elevata direttività e resistenza alle condizioni ambientali.

2.6 Parametri di design delle antenne

Il progetto di un'antenna parabolica richiede la comprensione dei principi fisici alla base del funzionamento e l'ottimizzazione di parametri fondamentali per poter soddisfare i requisiti prestazionali.

Le principali caratteristiche che influenzano il comportamento dell'antenna sono il guadagno, la direttività, l'efficienza, l'RMS delle superfici e il De-pointing. La valutazione di queste permette di correlare le prestazioni elettromagnetiche con la qualità meccanica della struttura.

2.6.1 Guadagno

Il guadagno di un'antenna rappresenta la sua capacità di concentrare l'energia irradiata o ricevuta in una direzione preferenziale, rispetto al caso di un'antenna isotropa ideale. [5] [17]

Esso dipende da diversi fattori, tra cui il diametro del riflettore, la frequenza operativa e l'efficienza complessiva dell'apertura, e può essere calcolato tramite la seguente espressione:

$$G = 10 \log_{10} \left(\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (2.1)$$

Dove,

G è il guadagno dell'antenna in dB

D è il diametro del riflettore

λ è la lunghezza d'onda del segnale

η è l'efficienza di apertura totale, che tiene conto di diversi fattori quali:

- Efficienza superficiale
- Efficienza di spillover
- Efficienza di polarizzazione
- Efficienza dovuta al blocco meccanico

2.6.2 Direttività e ricezione delle onde

La direttività descrive la capacità dell'antenna di concentrare le onde in un fascio stretto, per migliorare l'efficienza di ricezione o trasmissione del segnale. [5]

Questa proprietà è influenzata oltre che dalla forma geometrica anche dalle dimensioni del riflettore: cresce infatti all'aumentare del diametro e determina l'ampiezza dell'angolo del lobo principale del fascio.

La ricezione delle onde segue i principi della propagazione elettromagnetica: quando un'onda incidente interagisce con il riflettore, viene riflessa e focalizzata nel punto focale. La geometria parabolica assicura che le onde provenienti da

diverse direzioni convergano nello stesso punto, massimizzando l'energia raccolta dal feed e migliorando la qualità del segnale elettrico generato.

2.6.3 Efficienza e RMS superficiale

L'efficienza di apertura di un'antenna parabolica, come già introdotto, dipende da diversi termini. Uno dei più rilevanti è l'efficienza superficiale, che tiene conto della precisione geometrica del riflettore e delle eventuali deformazioni rispetto alla superficie ideale. Essa si esprime come [47]:

$$\eta_s = e^{-\delta^2} \quad (2.2)$$

Dove, δ rappresenta la variazione di fase tra il fronte d'onda ideale e quello effettivamente generato dal riflettore deformato.

Questo parametro δ è influenzato dalle deformazioni della superficie del riflettore ed è definito dalla seguente relazione:

$$\delta = \frac{4\pi\epsilon_{RMS}}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dove,

λ è la lunghezza d'onda del segnale,

ϵ_{RMS} è l'errore quadratico medio (RMS) della superficie riflettente, indicativo delle deviazioni geometriche del riflettore rispetto alla parabola ideale.

Da queste relazioni si evince come la precisione superficiale sia un parametro fondamentale per mantenere un'elevata efficienza. La presenza di deformazioni, anche minime, comporta un incremento del parametro δ , con conseguente riduzione del guadagno e peggioramento delle prestazioni di comunicazione.

Il calcolo dell' ϵ_{RMS} si effettua considerando gli spostamenti dei nodi della superficie rispetto alla configurazione ideale. Dato N il numero di nodi della superficie e r_n lo spostamento del nodo n -esimo, si ha: [48]

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r_n|^2} \quad (2.4)$$

Con

$$r_n = \sqrt{(x'_n - x_n)^2 + (y'_n - y_n)^2 + (z'_n - z_n)^2} \quad (2.5)$$

Dove,

(x_n, y_n, z_n) , sono le coordinate ideali del nodo

(x'_n, y'_n, z'_n) , sono le coordinate del nodo deformato

Sostituendo l'espressione 2.3 nell'equazione dell'efficienza si ottiene:

$$\eta \cong e^{-\left(\frac{4\pi RMS}{\lambda}\right)^2} \quad (2.6)$$

Questa relazione consente di stimare quantitativamente l'impatto delle deformazioni sul guadagno effettivo e sulle prestazioni elettromagnetiche dell'antenna.

2.6.4 De-pointing

Il de-pointing rappresenta lo scostamento angolare dell'antenna rispetto alla direzione nominale del fascio. Questo fenomeno può derivare principalmente da errori meccanici, deformazioni termiche e carichi aerodinamici. [18] La presenza di un errore di puntamento provoca una perdita di guadagno, nota come *pointing loss*, che può essere stimata attraverso la seguente relazione:

$$L_p = 12 \left(\frac{\theta_e}{\theta_{3dB}} \right)^2 [dB] \quad (2.7)$$

Dove,

θ_e è l'errore angolare

θ_{3dB} è la larghezza di fascio a 3dB, ossia ampiezza del lobo principale tra i punti in cui il guadagno scende di 3dB rispetto al massimo. Per le antenne paraboliche la larghezza del fascio θ_{3dB} viene approssimata come:

$$\theta_{3dB} \cong 70 \frac{\lambda}{D} \quad (2.8)$$

Con,

λ lunghezza d'onda

D diametro del piatto.

All'aumentare del diametro del riflettore, il fascio di onde diventa più stretto, rendendo l'antenna più sensibile agli errori di puntamento. Il de-pointing può essere mitigato attraverso:

- Progettazione di strutture rigide e stabili;
- Controllo termico della struttura;
- Sistemi di controllo precisi degli attuatori;
- Compensazione dinamica mediante tracking del satellite.

2.7 Valutazioni conclusive sul design di antenne paraboliche

Le antenne paraboliche rappresentano uno degli elementi fondamentali nei sistemi di telecomunicazioni satellitari, grazie alla loro elevata precisione di puntamento e all'elevato guadagno. La loro efficacia, come descritto in questo capitolo, deriva dall'interazione di diversi elementi:

- Geometria del riflettore: consente di concentrare le onde elettromagnetiche in un'unica direzione, massimizzando guadagno e direttività.
- Configurazione dell'antenna: la scelta tra le diverse tipologie influenza l'efficienza, l'ingombro e la gestione del feed.
- Banda di frequenza: determina le applicazioni e impone vincoli relativi al dimensionamento e alla precisione superficiale.
- Sistemi di movimentazione: controllano il puntamento dell'antenna, richiedendo elevata precisione meccanica e stabilità strutturale.
- Parametri di progetto: RMS superficiale, efficienza di apertura, de-pointing, mettono in relazione prestazioni elettromagnetiche e qualità meccanica della struttura.

Considerando tali aspetti, risulta evidente come l'analisi strutturale dell'antenna sia indispensabile: ogni deformazione del riflettore può tradursi in errori di puntamento e, di conseguenza, in perdite di guadagno e degrado delle prestazioni della comunicazione. Attraverso strumenti di calcolo e simulazione, come l'analisi FEM applicata in questo caso di studio, è possibile garantire affidabilità e efficienza delle strutture in diverse condizioni operative.

3 Principi teorici dell'analisi agli elementi finiti

3.1 Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti

3.1.1 Origini e motivazioni del metodo

Il metodo agli elementi finiti (FEM) è stato sviluppato a partire dalla necessità di risolvere problemi complessi di analisi strutturale e di meccanica dei continui, per i quali non era possibile ottenere soluzioni analitiche chiuse.

Le difficoltà risiedevano principalmente nella complessità delle geometrie, nelle condizioni al contorno e nei materiali coinvolti, che rendevano poco adeguati i metodi tradizionali basati su soluzioni esatte delle equazioni differenziali.

Le prime idee, riconducibili al metodo FEM, risalgono agli anni '30, quando A.R.Collar e W.J.Duncan introdussero il concetto di discretizzazione di strutture per risolvere problemi di aeroelasticità. Successivamente, nel 1941 Hrennikoff e Courant concepirono l'idea di suddividere il dominio complesso di un problema in sottodomini più semplici, anticipando il concetto di discretizzazione del continuo, alla base del metodo FEM moderno. Nonostante queste prime intuizioni abbiano posto le basi per lo sviluppo del metodo, gli anni '50-'60 sono considerati l'effettivo periodo di nascita, quando M.J. Turner, della Boeing, formulò e perfezionò l'approccio agli elementi finiti nel campo continuo, definendo il *Direct Stiffness Method*. Negli stessi anni, l'aumento della potenza di calcolo dei computer rese possibili l'applicazione del metodo a sistemi reali di grandi dimensioni. A partire dagli anni '70 avvenne quindi la nascita dei primi software commerciali (ad esempio NASTRAN, sviluppato dalla NASA), che consentirono un uso sistematico del metodo in ambito ingegneristico. Oggi il metodo FEM risulta essere uno dei migliori strumenti, utilizzato in tutti i campi dell'ingegneria, per l'indagine di sistemi complessi, che consente di ridurre i costi e le difficoltà logistiche e computazionali legate all'analisi e alla sperimentazione in laboratorio.

[21] [22]

3.1.2 Ambiti di applicazione del metodo

Il metodo FEM trova applicazione in diversi settori dell'ingegneria, tra cui:

- Ingegneria Strutturale: analisi della risposta di strutture soggette a deformazioni, tensioni e instabilità.
- Analisi Termiche: analisi del comportamento delle strutture in risposta a sollecitazioni termiche, quali variazioni di temperatura e flussi di calore.
- Analisi dinamica e vibrazionale: studio delle frequenze naturali e dei modi di vibrazione delle strutture, fondamentale per evitare fenomeni di risonanza.
- Analisi a fatica: analisi di resistenza per strutture sottoposte a carichi ciclici.

La versatilità del metodo lo rende un riferimento per l'ingegneria multi-fisica, capace di integrare fenomeni di diversa natura nello stesso modello numerico.

[23]

3.1.3 Vantaggi e limiti del metodo

I principali vantaggi del metodo FEM, rispetto ad altri metodi numerici, sono:

[24]

- Trattamento di geometrie complesse: possibilità di modellare domini con forme irregolari, condizioni di carico e vincolo complesse.
- Riduzione dei costi e dei tempi di prototipazione: le simulazioni numeriche riducono la necessità di realizzare prototipi fisici da analizzare in laboratorio.
- Miglioramento della precisione: l'accuratezza dei risultati ottenuti dalla simulazione è regolabile in funzione della qualità della mesh e del grado delle funzioni di forma utilizzate.
- Ottimizzazione del design: possibilità di simulare più configurazioni di un prodotto, prima della produzione, migliorandone prestazioni e durabilità.

Tuttavia, il metodo presenta anche delle criticità:

- Dipendenza dalla modellazione: modelli mal definiti possono portare a risultati non accurati o non realistici.
- Elevati costi computazionali: realizzare mesh molto fini compromettono i tempi di calcolo e possono richiedere risorse hardware considerevoli.
- Instabilità numeriche: elementi e condizioni al contorno mal definite possono compromettere i risultati della simulazione.

Per poter applicare correttamente il metodo FEM è quindi necessario possedere competenze teoriche, esperienza pratica e capacità critica di interpretazione dei risultati. [22]

3.1.4 Sintesi del processo FEM

Il flusso di lavoro tipico di un'analisi FEM può essere suddiviso in tre fasi principali, che verranno approfondite nei successivi paragrafi:

- Pre-processing: fase di definizione del modello numerico, che prevede la definizione della tipologia di analisi, le proprietà dei materiali, i vincoli e i carichi. Sempre in questa fase viene effettuata la discretizzazione del dominio tramite Mesh.
- Processing: fase di risoluzione del sistema di equazioni derivate dalla discretizzazione del problema.
- Post-processing: fase di elaborazione e visualizzazione dei risultati ottenuti, necessari per valutare il comportamento del modello, soggetto ai carichi definiti, e guidare eventuali modifiche progettuali. [24]

3.2 Fondamenti teorici del FEM

3.2.1 Discretizzazione del continuo

Il principio alla base del metodo agli elementi finiti (FEM) consiste nella discretizzazione di un dominio continuo in un insieme finito di sottodomini elementari, detti elementi finiti. Questi elementi sono connessi tra loro tramite nodi, sui quali sono definiti i gradi di libertà del sistema e su cui vengono calcolate le variabili incognite del problema. Per poter descrivere univocamente il campo degli spostamenti di un elemento, si introducono delle funzioni polinomiali di approssimazione, che hanno il compito di interpolare i valori noti agli estremi e di approssimare i valori all'interno dell'elemento stesso. Per garantire una buona approssimazione, queste funzioni devono rispettare alcuni requisiti fondamentali: [27]

- Completezza di rappresentazione dei moti rigidi;
- Completezza nella descrizione dei campi di deformazione;
- Continuità del campo degli spostamenti tra elementi contigui, evitando discontinuità o sovrapposizioni;
- Continuità del campo degli spostamenti interni al singolo elemento.

Il campo di spostamento in un generico punto dell'elemento può essere definito come:

$$\{\delta(x_k)\} = [\phi(x_k)]\{\alpha\} \quad (3.1)$$

Dove,

$[\phi(x_k)]$ rappresenta la matrice delle funzioni polinomiali di approssimazione,

$\{\alpha\}$ è il vettore dei coefficienti delle combinazioni lineari delle funzioni.

Affinché la funzione δ , che approssima gli spostamenti, assuma esattamente i valori degli spostamenti nei nodi, si impone la condizione:

$$\{u\} = [A]\{\alpha\} \quad (3.2)$$

Dove,

$[A]$ è la matrice dei valori delle funzioni ϕ calcolate nei nodi,

$\{u\}$ è il vettore degli spostamenti nodali.

Invertendo l'equazione 3.2, si ottengono i coefficienti della combinazione lineare:

$$\{\alpha\} = [A]^{-1}\{u\} \quad (3.3)$$

Che, sostituiti nell'equazione 3.1, permettono di valutare l'intero campo degli spostamenti come funzione degli spostamenti nodali:

$$\{\delta(x_k)\} = [\phi(x_k)][A]^{-1}\{u\} = [N(x_k)]\{u\} \quad (3.4)$$

Dove $[N(x_k)]$ è la matrice delle funzioni di forma, il cui compito è quello di interpolare il campo degli spostamenti a partire dal valore degli spostamenti nodali. [27]

3.2.2 Tipologie di elementi finiti

Gli elementi finiti, in cui viene discretizzato il dominio, possono essere classificati in [25]:

- **Elementi 1D:** sono segmenti di linea, rettilinei o curvi utilizzati per modellare strutture snelle con una dimensione prevalente. Gli elementi monodimensionali vengono sfruttati per studiare il comportamento di quelle componenti soggette a soli sforzi assiali (trazione e compressione), nel caso di aste, o, nel caso di travi, soggette anche a flessione e torsione.



Figura 3.1 Elemento monodimensionale

- **Elementi 2D:** sono triangolari o quadrilateri, utilizzati per modellare strutture sottili come piastre e lamiere, con uno spessore molto più piccolo delle altre due dimensioni.

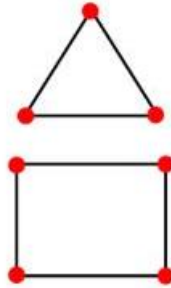


Figura 3.2 Elementi bidimensionali

- **Elementi 3D:** utilizzati per modellare strutture volumetriche, per analisi in presenza di discontinuità geometriche o zone di concentrazione delle tensioni. I principali elementi 3D sono tetraedrici o esaedrici.

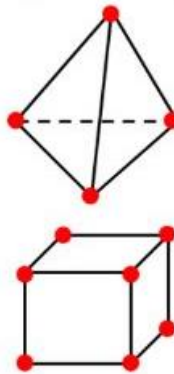


Figura 3.3 Elementi tridimensionali

3.2.3 Formulazione generale del problema

A partire dal campo degli spostamenti è possibile calcolare il campo delle deformazioni come: [26]

$$\{\epsilon\} = \frac{1}{2}(\nabla\delta + (\nabla\delta)^T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$= \partial[N]\{u\}_e = [B]\{u\}_e$$

Dove, $[B]$ è la matrice di deformazione.

Una volta calcolati gli spostamenti nodali e le deformazioni interne agli elementi, è necessario andare a valutare le tensioni interne, tramite la legge costitutiva, che descrive il comportamento meccanico del materiale:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (3.6)$$

Dove,

$[D]$ è la matrice costitutiva del materiale, definita dalle sue proprietà meccaniche ed elastiche. Per un materiale elastico, isotropo, lineare ed omogeneo la legge costitutiva si riduce alla legge di Hooke.

E quindi, sostituendo l'equazione 3.5 nella 3.6 si ottiene:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{u\}_e \quad (3.7)$$

Esplicitato il legame tra deformazioni e tensioni tramite le relazioni costitutive, si risale al contributo delle forze interne sugli elementi, ottenendo così alla formulazione dell'equilibrio agli spostamenti nodali.

Considerando un problema statico e lineare, vale la seguente relazione di equilibrio tra spostamenti e forze nodali [26]:

$$[K]_e \{u\}_e = \{f\}_e \quad (3.8)$$

Dove,

$[K]_e$ è la matrice di rigidezza dell'elemento, che descrive il legame tra spostamenti nodali e carichi applicati,

$\{f\}_e$ è il vettore delle forze applicate all'elemento.

La matrice di rigidezza dell'elemento è sempre simmetrica e, per materiali elastici lineari, risulta definita positiva. La sua formulazione deriva dall'applicazione del principio dei lavori virtuali:

$$[K]_e = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dV \quad (3.9)$$

Integrando quindi su tutto il volume dell'elemento si ottiene la matrice di rigidezza di quest'ultimo.

Per poter ottenere, la matrice di rigidezza dell'intera struttura, costituita da diversi elementi monodimensionali e bidimensionali, si calcolano le matrici dei singoli elementi, che vengono poi assemblate in un'unica matrice globale, necessaria alla risoluzione del problema strutturale. [27]

Elemento Asta

Per quanto riguarda gli elementi asta, questi sono definiti da due nodi ciascuno caratterizzato da un solo grado di libertà in direzione assiale, come nel caso mostrato in figura.

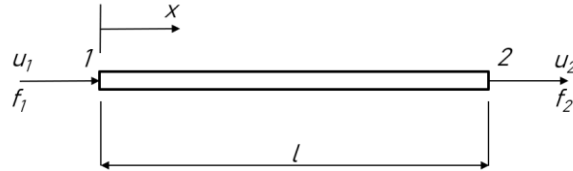


Figura 3.4 Schema elemento asta allineata con l'asse x

La matrice di rigidezza di questo elemento ha dimensione [2x2]: [26]

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix}_e \quad (3.10)$$

Come già anticipato, per un materiale elastico, omogeneo e lineare, la legge costitutiva è:

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.11)$$

Dove, E è il modulo di Young del materiale.

La funzione di forma che permette di ricavare gli spostamenti interni all'asta è la seguente:

$$[N] = \begin{bmatrix} \frac{L-x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Da questa si calcola lo spostamento:

$$u(x) = \begin{bmatrix} \frac{L-x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

La matrice $[B]$ ottenuta dalla derivata della funzione di forma sarà:

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Di conseguenza, assumendo l'area dell'asta costante per tutta la sezione, la matrice di rigidezza può essere valutata come:

$$\begin{aligned} [K]_e &= \int_L [B]^T [E] [B] A dl = EA \int_L \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} dl \\ &= EA \begin{bmatrix} \frac{1}{L^2} & -\frac{1}{L^2} \\ -\frac{1}{L^2} & \frac{1}{L^2} \end{bmatrix} \int_L dl \end{aligned} \quad (3.15)$$

Integrando su tutta la lunghezza dell'elemento:

$$[K]_e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Questa relazione è valida nel caso di asta disposta orizzontalmente, se si dovesse valutare la matrice nel caso di asta inclinata rispetto l'asse orizzontale di un angolo θ , illustrata in figura, più rappresentativa di un caso reale, bisognerà considerare le matrici di rotazione:

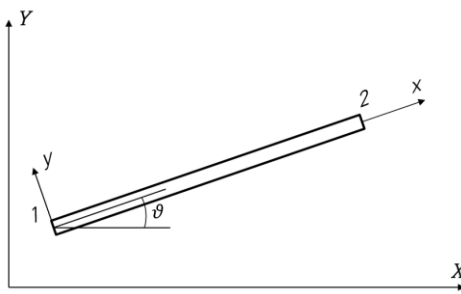


Figura 3.5 Schema elemento asta ruotata di un angolo θ rispetto all'asse x

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = [R'] \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

Considerando la matrice di rigidezza ricavata nel caso di asta orizzontale, si aggiungono i gradi di libertà connessi alla direzione y e si ottiene:

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \end{Bmatrix}_e \quad (3.18)$$

La matrice di rotazione da applicare è la seguente:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Da cui deriva la matrice di rigidezza in coordinate globali, definita come:

$$[K] = [R]^T [K]_e [R] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos\theta \sin\theta & -\cos^2 \theta & -\cos\theta \sin\theta \\ \cos\theta \sin\theta & \sin^2 \theta & -\cos\theta \sin\theta & -\sin^2 \theta \\ -\cos^2 \theta & -\cos\theta \sin\theta & \cos^2 \theta & \cos\theta \sin\theta \\ -\cos\theta \sin\theta & -\sin^2 \theta & \cos\theta \sin\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Elementi trave

Gli elementi trave possono essere considerati una generalizzazione degli elementi asta, appena descritti, in quanto modellano sia il comportamento assiale sia quello flessionale lungo l'asse dell'elemento. Rispetto agli elementi asta, i nodi dell'elemento trave possiedono più gradi di libertà: oltre alle traslazioni lungo l'asse longitudinale, si considerano traslazioni lungo l'asse trasversale e rotazioni ortogonali all'asse della trave. [50]

L'introduzione degli elementi travi comporta modifiche fondamentali nella formulazione del problema agli elementi finiti:

- Matrice di rigidezza: diventa più complessa, poiché deve considerare sia le componenti assiali sia quelle flessionali, integrando la matrice di rigidezza assiale con quella flessionale derivata dal momento flettente.
- Funzioni di forma: gli spostamenti trasversali e le rotazioni vengono descritti tramite funzioni polinomiali di ordine superiore, come i polinomi cubici di Hermite. La derivazione delle funzioni di forma per le rotazioni si ottiene differenziando rispetto alla coordinata longitudinale le funzioni degli spostamenti trasversali. Di conseguenza, la matrice $[B]$, che lega spostamenti nodali e deformazioni interne, risulta più estesa rispetto al caso dell'elemento asta.
- Coordinate locali e globali: la conversione tra il sistema locale della trave e il sistema globale della struttura deve includere anche le rotazioni associate ai momenti flettenti, per garantire il corretto assemblaggio della matrice di rigidezza globale. [50]

Elementi rettangolari

Considerando un elemento rettangolare nel piano, allineato al sistema di riferimento globale, è possibile andare a valutare la matrice di rigidezza. Gli elementi rettangolari sono caratterizzati da quattro nodi, ciascuno con due gradi di libertà, per cui la matrice di rigidezza dell'elemento avrà dimensione $[8 \times 8]$.

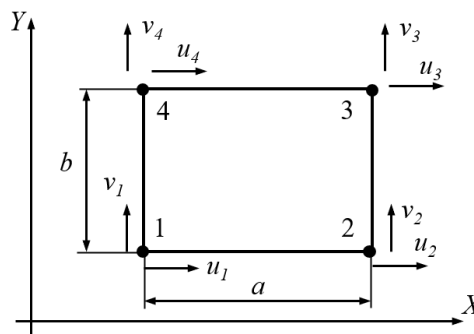


Figura 3.6 Schema elemento rettangolare allineato con l'asse x

È dimostrabile che la matrice di rigidezza di questo elemento ha la seguente forma:

$$[K] = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_4 & C_5 & -\frac{C_1}{2} & -C_2 & C_7 & -C_5 \\ C_2 & C_3 & -C_5 & C_6 & -C_2 & -\frac{C_3}{2} & C_5 & C_8 \\ C_4 & -C_5 & C_1 & -C_2 & C_7 & C_5 & -\frac{C_1}{2} & C_2 \\ C_5 & C_6 & -C_2 & C_3 & -C_5 & C_8 & C_2 & -\frac{C_3}{2} \\ -\frac{C_1}{2} & -C_2 & C_7 & -C_5 & C_1 & C_2 & C_4 & C_5 \\ -C_2 & -\frac{C_3}{2} & C_5 & C_8 & C_2 & C_3 & -C_5 & C_6 \\ C_7 & C_5 & -\frac{C_1}{2} & C_2 & C_4 & -C_5 & C_1 & -C_2 \\ -C_5 & C_8 & C_2 & -\frac{C_3}{2} & C_5 & C_6 & -C_2 & C_3 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Dove,

h è lo spessore dell'elemento,

ν è il coefficiente di Poisson,

I coefficienti C sono calcolati come segue:

$$\begin{cases} C_1 = \left(\frac{b}{3a} + \frac{1-\nu}{6} \frac{b}{a} \right) \\ C_2 = \left(\frac{\nu}{4} + \frac{1-\nu}{8} \right) \\ C_3 = \left(\frac{a}{3b} + \frac{1-\nu}{6} \frac{b}{a} \right) \\ C_4 = \left(-\frac{b}{3a} + \frac{1-\nu}{12} \frac{a}{b} \right) \\ C_5 = \left(\frac{\nu}{4} - \frac{1-\nu}{8} \right) \\ C_6 = \left(\frac{a}{6b} - \frac{(1-\nu)}{6} \frac{b}{a} \right) \\ C_7 = \left(\frac{b}{6a} - \frac{1-\nu}{6} \frac{a}{b} \right) \\ C_8 = \left(-\frac{a}{3b} + \frac{1-\nu}{12} \frac{a}{b} \right) \end{cases} \quad (3.22)$$

Se invece di un elemento rettangolare, si considerasse un elemento quadrato ($a=b$), la matrice di rigidezza assumerebbe una forma più semplice e sarà indipendente dalle sue dimensioni nel piano, per cui elementi che hanno uguali

proprietà del materiale e uguale spessore avranno la stessa matrice di rigidezza anche se le dimensioni saranno diverse. [26]

Assemblaggio della matrice di rigidezza

Come anticipato precedentemente, ottenute le matrici di rigidezza per i singoli elementi della struttura si prosegue con l'assemblaggio per ottenere una matrice globale.

Questa fase si basa sul principio per cui i nodi condivisi tra due o più elementi devono mantenere la continuità degli spostamenti. Le matrici di rigidezza dei singoli elementi vengono quindi sovrapposte nel caso di gradi di libertà comuni, seguendo una logica di somma per posizionamento relativo:

$$K = \sum_{e=1}^{n_{el}} [A]_e^T [K]_e [A]_e \quad (3.23)$$

Con $[A]$ matrice di connessione che converte i gradi di libertà dell'elemento nel sistema globale. [27]

Effettuato l'assemblaggio, ottenuta la matrice di rigidezza globale, l'equazione del problema strutturale sarà:

$$K u = f \quad (3.24)$$

Dove,

f è il vettore delle forze esterne

K è la matrice di rigidezza

u è il vettore degli spostamenti nodali globali

3.2.4 Vincoli e condizioni al contorno

Nel metodo agli elementi finiti, una volta assemblata la matrice di rigidezza globale e definita l'equazione del problema (equazione 3.22) è necessario definire vincoli e condizioni al contorno. Questi vengono imposti definendo dei limiti sui gradi di libertà della struttura.

A seconda del tipo di vincolo che si vuole imporre è possibile andare a limitare la rotazione o lo spostamento di alcune parti della struttura, per simulare correttamente il sistema, facendo riferimento alle condizioni reali di vincolo. Impostati i vincoli la matrice di rigidezza e il vettore delle forze si modificano andando ad eliminare righe e colonne corrispondenti ai gradi di libertà vincolati.

3.2.5 Concetto di mesh e influenza sui risultati

La mesh rappresenta la discretizzazione del dominio continuo in elementi finiti. È un elemento fondamentale, che influenza qualità e accuratezza dei risultati dell'analisi FEM. Nel definire la mesh è importante considerare:

- Dimensione degli elementi: realizzare una mesh più fitta migliora la precisione dei risultati ed è richiesta in zone particolarmente sollecitate o soggette a deformazione. Bisogna sempre considerare che rifinire la mesh può comportare anche un aumento dei costi computazionali, è quindi ottimale trovare un equilibrio tra accuratezza dei risultati ed efficienza di calcolo.
- Regolarità geometrica: elementi con forma regolare garantiscono prestazioni numeriche migliori. È necessario, nella fase di definizione della mesh, verificare che non siano presenti elementi distorti che potrebbero generare errori significativi nei risultati.
- Grado delle funzioni di forma: all'aumentare del grado del polinomio l'accuratezza dell'approssimazione cresce a fronte di una maggiore complessità di calcolo.

È fondamentale sottolineare che, sebbene la definizione di una mesh più fine possa migliorare l'accuratezza dei risultati, ciò non garantisce automaticamente la convergenza della soluzione. La coerenza tra formulazione dell'elemento finito e le caratteristiche fisiche del problema è essenziale per ottenere risultati affidabili. Inoltre, la qualità della mesh, la scelta del tipo di elemento e l'adeguatezza delle funzioni di forma devono essere attentamente valutate per assicurare la convergenza della soluzione numerica.

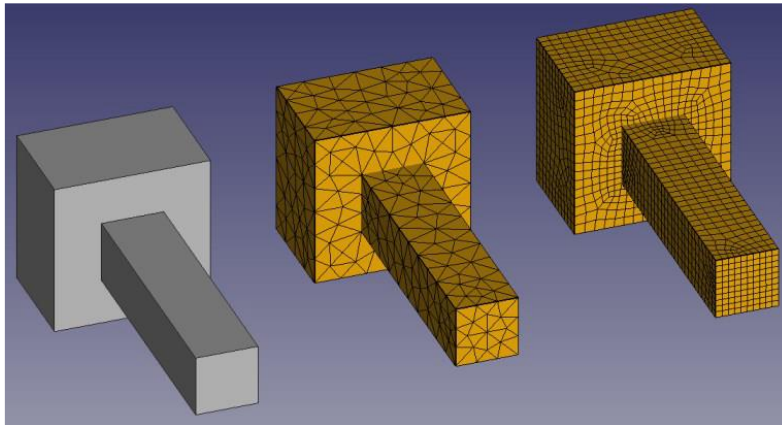


Figura 3.7 Esempi di discretizzazione in elementi 2D di un corpo [28]

Per questo motivo, in alcuni casi, si ricorre a strategie di *refinement* locale della mesh: in prossimità delle zone critiche la discretizzazione viene resa più fine, mentre nelle aree meno sollecitate si mantiene grossolana, ottimizzando così il compromesso tra accuratezza dei risultati e costo computazionale.

3.3 Il processo FEM: dalla modellazione alla soluzione

Come anticipato nel paragrafo 3.1, il processo di analisi FEM può essere suddiviso in fasi, che a loro volta contengono diverse azioni eseguite per raggiungere l'obiettivo finale dell'analisi. In particolare, il flusso di lavoro tipico, svolto attraverso l'utilizzo di software come MSC Patran e MSC Nastra, si articola nelle fasi di pre-processing, processing e post-processing. Patran svolge principalmente funzioni di pre e post processore, mentre Nastran è il solutore numerico che riceve in input il modello discretizzato e risolve le equazioni che definiscono il problema.

3.3.1 Pre-processing

La fase di Pre-processing comprende tutte le attività di modellazione della struttura, necessarie alla costruzione del modello numerico. [29]

Modellazione CAD e importazione nei software FEM

Il punto di partenza è la definizione della geometria che può essere generata direttamente in ambiente Patran, mediante gli strumenti di modellazione, o importata da software CAD esterni. Partendo dal modello 3D, si introducono le necessarie semplificazioni geometriche, eliminando tutti i dettagli secondari (fori non rilevanti, raccordi di piccole dimensioni, filettature, ecc.) che renderebbero il modello più complesso, senza fornire informazioni aggiuntive rilevanti per l'analisi. È cruciale, tuttavia, prestare attenzione a non semplificare eccessivamente il modello e a non eliminare elementi che influenzano la risposta strutturale.

Una volta ottenuta la geometria semplificata, si procede con la discretizzazione della struttura generando la mesh di elementi finiti. In Patran è possibile controllare la tipologia di elementi da applicare e i parametri di *meshing*, assicurandosi elementi con buone caratteristiche geometriche, per evitare risultati inaccurati o instabilità numeriche.

Definizione dei materiali e proprietà meccaniche

Successivamente, si procede andando a definire le proprietà meccaniche dei materiali:

- Modulo elastico E
- Coefficiente di Poisson ν
- Densità ρ

- Eventuali altre proprietà nel caso di materiali anisotropi.

In ambiente Patran queste informazioni vengono inserite nelle *Material Properties*, collegate poi alle proprietà degli elementi finiti che si andranno a definire con la mesh. Per materiali isotropi come acciaio e alluminio, la definizione delle proprietà è molto semplice, dal momento che basta conoscere pochi parametri per effettuare un'analisi statica preliminare. Per quanto riguarda i materiali compositi, invece, sarebbe necessario andare a definire matrici costitutive più articolare.

Definizione delle proprietà geometriche degli elementi

La scelta della tipologia di elemento condiziona le proprietà che vengono richieste all'utente:

- Per gli elementi 1D (beam) occorre definire la sezione e le inerzie principali, oltre che all'orientamento degli assi locali, necessari per descrivere correttamente il comportamento a flessione e torsione;
- Per gli elementi 2D (shell) è necessario definire almeno lo spessore, e in caso di laminati, la sequenza di laminazione;
- Per gli elementi 3D, invece, le proprietà volumetriche del materiale sono sufficienti.

Connessione tra le parti

Per poter simulare le connessioni tra le parti di una struttura è necessario andare a inserire degli elementi specifici: vincoli rigidi (RBE2), connessioni elastiche (RBE3, spring elements) o elementi di contatto più complessi. È importante definire la tipologia di connessione che simula meglio il reale comportamento fisico del sistema.

Applicazione di vincoli e carichi

Sulla mesh generata, si procede con l'applicazione delle condizioni al contorno:

- Vincoli: servono a bloccare gradi di libertà della struttura non desiderati, riproducendo appoggi, incastri o simmetrie.
- Carichi: possono essere definiti in funzione della loro natura. Si possono avere carichi distribuiti, forze concentrate sui nodi, pressioni, carichi inerziali, campi termici, ecc.

La corretta definizione dei vincoli e dei carichi è essenziale affinché non si introducano rigidzze aggiuntive alla struttura tali da impedire la risoluzione del problema.

3.3.2 Processing

L'obiettivo della fase di pre-processing appena descritta è costruire il modello e definire le condizioni al contorno, necessarie ad effettuare le analisi numeriche desiderate, che costituiscono la fase di processing, svolta dal solutore Nastran.

A seconda dello scopo dell'analisi, è possibile scegliere tra diverse tipologie di simulazione, selezionando opportuni “*Solution Sequences*” (SOL) tra le seguenti:

- Analisi statica lineare (SOL 101): si assumono comportamenti elastici lineari, piccoli spostamenti e carichi costanti nel tempo. Questa è la tipologia di analisi più diffusa per la verifica preliminare della resistenza strutturale.
- Analisi dinamica lineare (SOL 111, 112, ecc.): per questa tipologia di analisi vengono considerati carichi variabili nel tempo, permettendo lo studio della risposta strutturale alle sollecitazioni dinamiche esterne.
- Analisi modale (SOL 103): permette di determinare frequenze naturali e modi propri di vibrazione della struttura. Viene spesso usata come analisi

preliminare per validare la corretta definizione del modello e prevenire fenomeni di risonanza.

- Analisi termica (SOL 153, 159, ecc.): studia la distribuzione di temperatura nella struttura e gli effetti termomeccanici.
- Analisi non lineare (SOL 106, 129, ecc.): introduce effetti di plasticità, grandi spostamenti o contatto. Queste analisi, più onerose in termini di costi computazionali, sono fondamentali per lo studio di strutture con elevata non linearità del materiale o della geometria.
- Analisi a fatica: analisi fondamentale per valutare la durata di componenti soggetti a cicli di carichi ripetuti.

3.3.3 Post-processing

Una volta effettuata l'analisi numerica, i risultati prodotti dal solutore vengono importati nuovamente in Patran per la fase di post-processing, dove sarà possibile visualizzarli e interpretarli.

Le grandezze più comunemente analizzate sono:

- Spostamenti nodali, per verificare le deformazioni della struttura;
- Tensioni interne, rappresentate con mappe di Von Mises;
- Reazioni vincolari, per controllare la coerenza del modello in presenza di carichi applicati;
- Frequenze naturali e modi propri, nel caso di analisi modale.

Interpretare i risultati consiste nel valutare qualitativamente e quantitativamente i valori ottenuti per verificare che questi siano fisicamente coerenti con la struttura e rispettino i requisiti di resistenza e deformabilità. In caso contrario sarà necessario modificare il modello, ridefinendo la mesh, i vincoli o le proprietà degli elementi.

La fase di post-processing in Patran consente, inoltre, di verificare la convergenza della mesh, confrontando i risultati ottenuti con discretizzazioni più fini, e di

esportarli in forma grafica o tabellare per ulteriori elaborazioni o per la realizzazione di documentazione tecnica.

3.4 Panoramica dei software utilizzati

L'evoluzione del modello ad elementi finiti (FEM) è avvenuta parallelamente allo sviluppo di software dedicati, che hanno reso possibile affrontare problemi complessi riducendo i tempi e le difficoltà di calcolo.

Il loro utilizzo è di vitale importanza in ambito ingegneristico per diversi aspetti, tra cui:

- Automazione della modellazione e discretizzazione di strutture complesse;
- Risoluzione numerica efficiente, attraverso solver ottimizzati in grado di gestire modelli con un gran numero di gradi di libertà;
- Visualizzazione e interpretazione dei risultati tramite software di post-processing, rendendo l'analisi più intuitiva. Ad esempio, osservando la deformata e la distribuzione delle tensioni sul modello è possibile individuare le zone maggiormente sollecitate, verificare la coerenza fisica della risposta e valutare la necessità di modifiche progettuali.

3.4.1 Software FEM di riferimento

Esistono numerosi software FEM, ciascuno con funzionalità e settori di applicazione privilegiati. Tra questi vi sono: [53]

- ANSYS, software general-purpose, apprezzato per la facilità d'uso e l'integrazione di analisi multi-fisiche.
- Abaqus, indicato per analisi non lineari, problemi di contatto e simulazioni di materiali avanzati. È molto diffuso in ambito automotive e per lo studio di strutture realizzate con materiali compositi.

- COMSOL Multiphysics, orientato su simulazioni accoppiate in settori che spaziano dall'elettronica alla biomeccanica.
- Altair Hypermesh, specializzato nelle attività di pre-processing e generazione di mesh di alta qualità.
- LS-DYNA, solver dedicato ad analisi dinamiche non lineari, come impatti e crash test.
- MSC Patran, software di pre e post-processing utilizzato per la modellazione FEM e la visualizzazione dei risultati.
- MSC Nastran, solver numerico sviluppato per la NASA, oggi considerato uno standard industriale per analisi strutturali lineari e dinamiche.

3.4.2 MSC Patran e MSC Nastran

Tra i software più utilizzati in ambito aerospaziale si distinguono i sopra citati Patran e Nastran, che operano in maniera complementare. [29]

MSC Patran

Patran, svolge il ruolo di pre e post-processore per le analisi strutturali. Tra le funzioni che è possibile svolgere utilizzando questo software vi sono:

- Importare di modelli CAD, semplificazione della geometria, generazione della mesh con elementi 1D, 2D e 3D
- Definire materiali, proprietà geometriche, carichi e vincoli.
- Ottenere un'interfaccia grafica intuitiva che faciliti sia la modellazione che l'interpretazione dei risultati.

Come già anticipato, Patran non esegue direttamente i calcoli numerici ma si occupa di costruire il modello FEM, rendendolo leggibile dal solver Nastran.

MSC Nastran

Nastran è un solutore numerico, particolarmente apprezzato per l'affidabilità nelle analisi lineari e dinamiche, ma con il quale si possono effettuare anche analisi non lineari, termiche e di ottimizzazione. Il software gestisce modelli di grandi dimensioni, mantenendo stabilità numerica anche per modelli con elevato numero di gradi di libertà.

L'integrazione tra i due software descritti permette lo sviluppo di un'analisi completa, partendo dalla modellazione, passando per la risoluzione e giungendo poi all'interpretazione dei risultati. Questo approccio rappresenta uno standard di riferimento per l'analisi FEM in ambito aerospaziale, per lo studio di antenne satellitari, ali di velivoli e serbatoi per propellenti e altre strutture complesse.

Il ciclo di lavoro completo ottenuto dall'integrazione tra Patran e Nastran può essere descritto dai seguenti passaggi:

1. Modellazione CAD, diretta o tramite importazione da modelli realizzati su software esterni.
2. Discretizzazione del dominio e definizione delle condizioni al contorno.
3. Esportazione del file .bdf (Bulk Data File), file di input per il solutore che contiene tutte le informazioni necessarie al calcolo.
4. Analisi numerica, vengono eseguiti i calcoli e forniti i risultati tramite un file di output.
5. Importazione dei risultati nel software di post-processing, per poter proseguire con la visualizzazione e l'interpretazione.
6. Verifica e debug, effettuata in caso di errori o instabilità del modello. Il file di output .f06 contiene messaggi diagnostici dettagliati che permettono di identificare anomalie nella definizione del modello.

3.5 Validazione del modello

Validare il modello è una fase fondamentale del processo di analisi. Un modello FEM rappresenta una semplificazione di una struttura reale e per questo motivo è necessario andare a verificare che le ipotesi adottate e i risultati che si ottengono dall'analisi siano coerenti dal punto di vista numerico e fisico.

La validazione si articola in due momenti principali: [21]

- Verifiche pre-run, effettuate prima dell'esecuzione dell'analisi per andare a validare la consistenza del modello.
- Verifiche post-run, effettuate dopo aver svolto i calcoli per appurare che i risultati ottenuti siano fisicamente accettabili.

3.5.1 Verifiche pre-run: consistenza del modello

Prima di avviare il solutore è indispensabile eseguire controlli sul modello FEM realizzato, per prevenire soluzioni non convergenti, instabili o fisicamente incoerenti.

Le principali verifiche riguardano [30] [21]:

- Mesh e connessioni: si verifica che la definizione del modello FEM sia stata eseguita in maniera tale da bilanciare accuratezza numerica e costo computazionale. Per valutare la qualità della mesh vengono controllati i seguenti parametri: [51]
 - Aspect Ratio: rappresenta il rapporto tra le dimensioni caratteristiche di un elemento. Valori elevati indicano elementi allungati che possono compromettere l'accuratezza della soluzione. In generale, valori inferiori a 3 sono considerati ottimali, mentre valori compresi tra 3 e 10 possono essere accettabili per zone in cui si ha concentrazione degli sforzi;

- Rapporto jacobiano: indica il grado di distorsione geometrica dell'elemento rispetto alla forma ideale. Anche per questo parametri, valori accettabili sono compresi tra 0 e 10.
- Maximum corner angle: rappresenta l'angolo massimo formato tra i lati di un elemento, che dev'essere inferiore a 180° , per garantire un comportamento numerico stabile.
- Orientamento delle normali: per elementi bidimensionali e tridimensionali è necessario verificare che le normali delle superfici siano coerenti tra loro. Un orientamento errato può generare una scorretta applicazione dei carichi e dei vincoli.
- Analisi modale preliminare: effettuata senza applicazione di vincoli e carichi consente di accertare la presenza dei sei gradi di libertà rigidi, che devono comparire a modello libero.

3.5.2 Verifiche post-run: validazione dei risultati

Una volta completata l'analisi numerica è necessario verificare che i risultati siano coerenti e affidabili, effettuando i seguenti controlli:

- Equilibrio tra carichi e vincoli: le reazioni vincolari devono bilanciare le forze esterne applicate.
- Accuratezza numerica: si verifica che il parametro di convergenza ϵ si mantenga inferiore all'ordine di grandezza di $1e-12$. Un valore maggiore potrebbe comportare problemi di condizionamento numerico o instabilità del modello.
- Analisi degli ordini di grandezza: verificare che i risultati ottenuti siano coerenti con valori attesi da stime preliminari. [21]

3.5.3 Sensibilità ai parametri di input

Il modello FEM è fortemente influenzato dalle ipotesi iniziali su materiali, vincoli e carichi. Per questo motivo, è utile condurre uno studio di sensibilità del modello ai parametri di input, al fine di valutare la robustezza e l'affidabilità della soluzione ottenuta.

- Materiali: variare le caratteristiche del materiale consente di valutare l'effetto che le proprietà meccaniche hanno su spostamenti e tensioni risultanti della struttura.
- Vincoli: modificare le condizioni al contorno permette di verificare se il modello sia troppo vincolato o eccessivamente libero.
- Carichi: variando le forze applicate sulla struttura è possibile valutare l'influenza dei diversi carichi e identificare le condizioni più gravose.

Queste verifiche consentono al progettista di valutare la robustezza del modello e di certificare che i risultati siano rappresentativi del comportamento fisico reale della struttura.

4 Modellazione FEM dell'antenna

4.1 Introduzione

La costruzione del modello agli elementi finiti dell'antenna parabolica, oggetto di studio, si sviluppa a partire dal modello CAD, realizzato in Solidworks dal progettista meccanico di Antech Space.

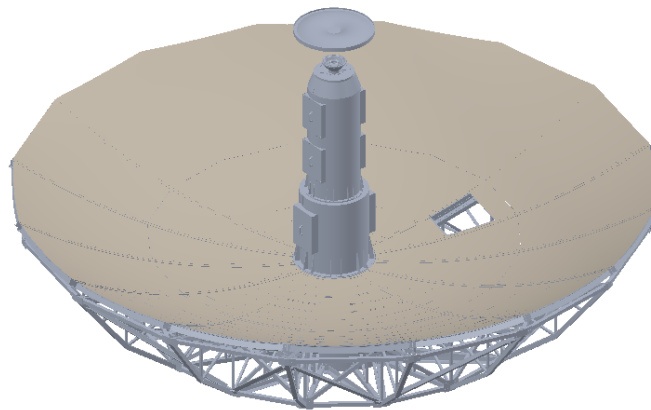


Figura 4.1 Modello CAD dell'antenna parabolica

Questo modello rappresenta la base geometrica necessaria per sviluppare l'analisi, ma non è utilizzabile direttamente all'interno dell'ambiente di calcolo.

Gli obiettivi di questa fase sono:

- Ottenere un modello che riproduca il comportamento meccanico dell'antenna in maniera realistica;
- Contenere i costi computazionali associati alla simulazione, agendo sul livello di dettaglio del modello. Un modello eccessivamente dettagliato introduce complessità non necessarie per gli scopi dell'analisi, con conseguente aumento dei tempi di calcolo.

Per soddisfare questi due obiettivi, prima di importare il modello in Patran, si esegue un processo di semplificazione geometrica e di ricostruzione funzionale, mantenendo invariati gli aspetti strutturali significativi della configurazione originaria. In questa fase vengono eliminati tutti i dettagli secondari, irrilevanti ai fini del comportamento globale della struttura. Il modello semplificato diventa quindi il punto di partenza per le successive fasi di discretizzazione agli elementi finiti, garantendo un buon compromesso tra accuratezza dei risultati e sostenibilità del calcolo numerico.

4.2 Struttura dell'antenna

L'oggetto di studio del presente lavoro di tesi è un'antenna parabolica con apertura pari a 9.3 m, progettata per operare come sistema di comunicazione satellitare. La geometria complessiva è stata già introdotta nel Capitolo 2, ma in questa sezione ci si è concentrati sul fornire una descrizione mirata agli aspetti strutturali, propedeutica alla modellazione FEM.

L'antenna è costituita dai seguenti sottosistemi principali illustrati nella figura 4.2:

- Riflettore: superficie parabolica responsabile della riflessione del segnale elettromagnetico verso il punto focale. Dal punto di vista strutturale, è costituito da un pannello sottile curvo sostenuto da un reticolo di travi radiali e trasversali.
- Travi a S di sostegno: elementi strutturali disposti al di sotto del riflettore in direzione radiale e trasversale, che formano una griglia di irrigidimento del pannello e contribuiscono al mantenimento della forma curva.
- Centine e controventi: sistema strutturale che collega il riflettore all'Hub centrale. Le centine svolgono la funzione di collegamento principale, mentre i controventi contribuiscono alla stabilità complessiva e alla corretta distribuzione dei carichi. L'azione congiunta di queste due componenti aumenta la resistenza globale della struttura e riduce le deformazioni.

- Hub: componente centrale dell'assieme che raccoglie e trasferisce i carichi provenienti dalle strutture di supporto al piedistallo, che sostiene l'antenna e la ancora al terreno (non descritto in questo lavoro di tesi).
- Feedcone: componente che ospita l'illuminatore dell'antenna (feed), contribuendo alla rigidezza complessiva della struttura.
- Sub-riflettore: elemento secondario posto davanti al fuoco, lungo l'asse ottico, utilizzato per orientare il fascio elettromagnetico. In questa analisi non è stato considerato, poiché il suo contributo meccanico alla rigidezza globale risulta trascurabile rispetto agli altri sottosistemi.

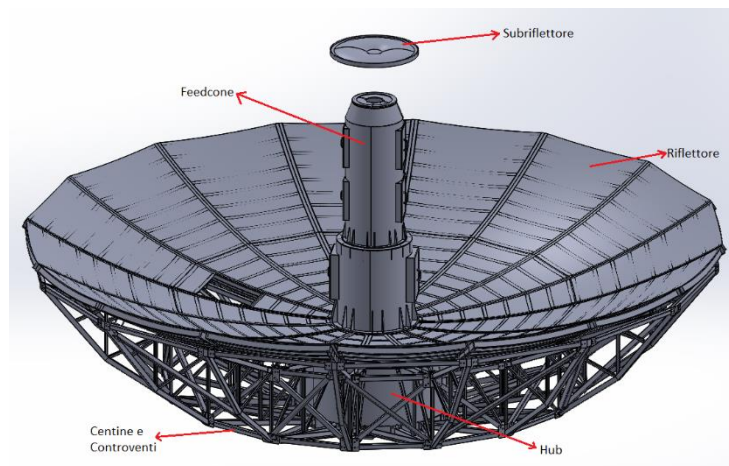


Figura 4.2 Componenti dell'antenna parabolica

Distinguere le varie componenti consente di individuare quali risultano fondamentali per l'analisi e quali possono essere semplificate o trascurate, senza compromettere la simulazione. Nei paragrafi successivi verranno descritte le strategie di semplificazione adottate in fase di modellazione CAD e FEM.

4.3 Semplificazioni del modello

Il modello realizzato in Solidworks presenta un livello di dettaglio elevato, con numerosi elementi minori e particolari costruttivi. Importare direttamente questa geometria in Patran comporterebbe tempi di calcolo molto elevati e un aumento della complessità del problema. Per questo motivo, come anticipato, è stato

necessario introdurre semplificazioni geometriche finalizzate a ridurre la complessità della mesh, preservando il comportamento meccanico dell'antenna.

Le scelte adottate sono le seguenti:

- Piastre di collegamento tra controventi e centine, e tra queste e l'hub: questi elementi, presenti nel CAD originale, vengono rimossi e sostituiti con elementi rigidi RBE2. Essi permettono di riprodurre l'effetto di irrigidimento senza aumentare il numero di elementi e nodi. In figura sono evidenziate le piastre che sono state semplificate ad un semplice elemento rigido (MPC).

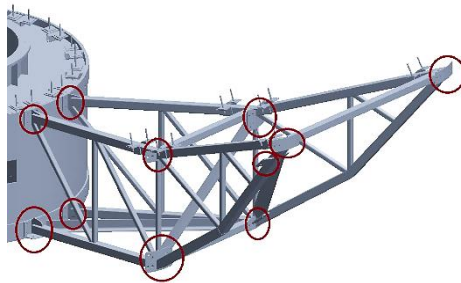


Figura 4.3 Dettaglio piastre di collegamento della struttura di supporto

- Dettagli Hub e Feedcone: i dettagli interni ed esterni di queste componenti sono stati trascurati, ricostruendo le due parti come semplici cilindri, sufficientemente rappresentativi del loro comportamento globale.

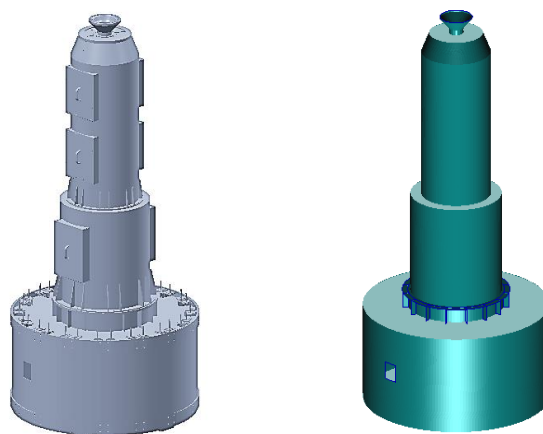


Figura 4.4 Confronto tra la struttura originale del Feedcone e dell'Hub (a destra), e quella semplificata (a sinistra)

Queste semplificazioni permettono di ottenere un modello computazionalmente gestibile, che non comprometta la coerenza fisica e la distribuzione dei carichi sulla struttura. La rimozione dei dettagli secondari consente, inoltre, di semplificare la mesh, riducendo i tempi di simulazione. Il modello ottenuto dopo aver applicato le semplificazioni costituisce la base per la successiva definizione delle proprietà dei materiali, degli elementi e la discretizzazione, trattati nel paragrafo successivo.

4.4 Materiali e proprietà degli elementi

Il passo successivo all'importazione e semplificazione della geometria consiste nella definizione dei materiali e della tipologia di elementi più appropriati per la discretizzazione della struttura.

4.4.1 Materiale

Per tutte le componenti della struttura è stata adottata la lega di alluminio 6063-T6, caratterizzata da [31]:

- Resistenza meccanica adeguata alle sollecitazioni previste;
- Elevata estrudibilità, che facilita la realizzazione di profili complessi come quelli che caratterizzano le strutture di sostegno;
- Ottima resistenza alla corrosione, importante per le condizioni operative dell'antenna.

I principali elementi che costituiscono la lega sono alluminio, magnesio e silicio, che conferiscono al materiale un buon compromesso tra leggerezza e rigidità. La designazione T6 indica un trattamento termico specifico: soluzione termica, tempra in acqua e successivo invecchiamento artificiale.

Le proprietà meccaniche principali considerate per la modellazione FEM sono riportate nella seguente tabella:

	Valore nel SI	Valore convertito (Patran)
Modulo di Young	70 GPa	70000 MPa
Coefficiente di Poisson	0.3	0.3
Densità	$2700 \frac{Kg}{m^3}$	$2.7E - 09 \frac{ton}{mm^3}$

Tabella 2 Proprietà meccaniche del materiale

La conversione delle unità di misura presentata in tabella è necessaria per rispettare le unità di misura utilizzate in Patran.

4.4.2 Tipologie di elementi finiti

La discretizzazione della geometria è stata effettuata utilizzando due tipologie di elementi finiti:

- Elementi monodimensionali (1D-BAR): sono travi rettilinee a due nodi, in grado di trasmettere forze assiali, taglio, momenti flettenti e torsione.

Questi elementi sono stati utilizzati per modellare:

- Centine: la struttura di centinaggio presenta travi con sezioni differenti; per questo motivo vengono definite due tipologie distinte di elementi BAR, corrispondenti alle sezioni principali, illustrate in figura.

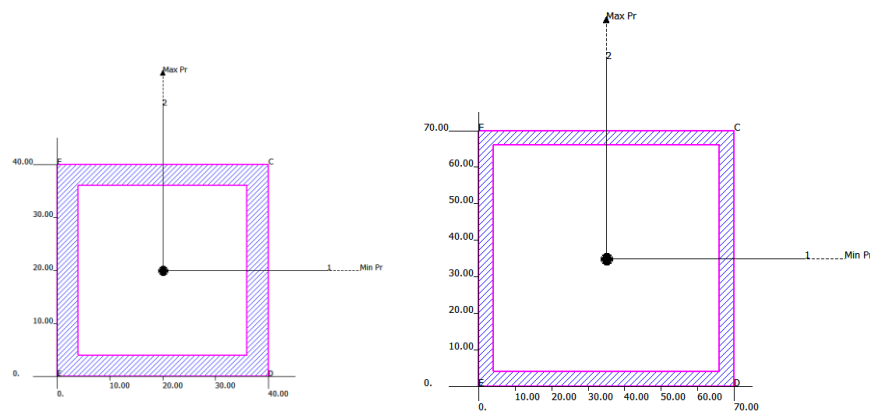


Figura 4.5 Dettaglio sezioni della centinatura (a sinistra: Sezione 40x40, a destra: sezione 70x70)

- Controventi: analogamente a quanto fatto per la struttura di centinaggio, i controventi sono stati modellati con più tipologie di elementi BAR, per tenere conto delle diverse sezioni trasversali.

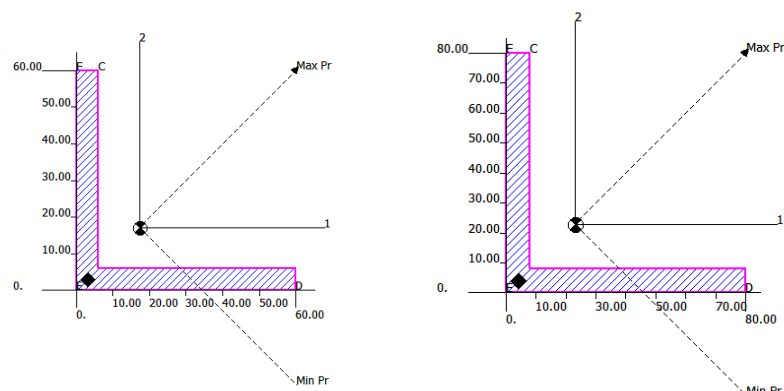


Figura 4.6 Dettaglio sezioni dei controventi (a sinistra: 60x60, a destra: 80x80)

- Travi di sostegno del riflettore: le travi a S sono disposte radialmente e trasversalmente sotto al pannello del riflettore principale. Le travi lunghe radiali e quelle corte trasversali hanno sezioni differenti, rappresentate da diversi tipi di elementi BAR, come illustrato in figura.

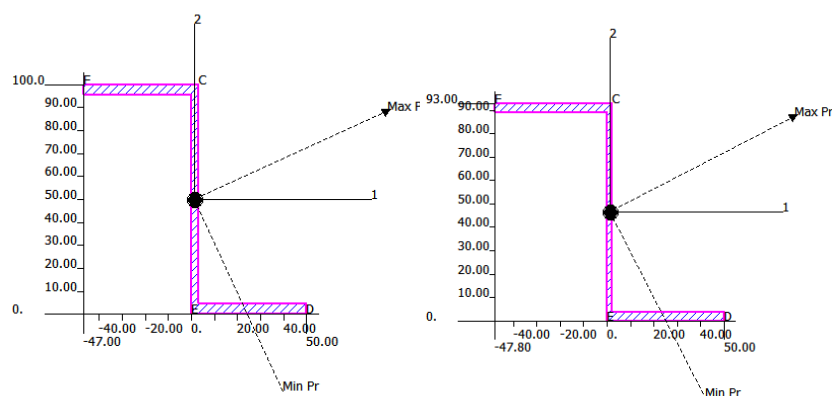


Figura 4.7 Dettaglio sezioni travi a S (a sinistra: travi radiali, a destra: travi trasversali)

Per ciascun elemento BAR, è stato necessario definire la linea mediana della trave, la sezione trasversale e l'orientamento nello spazio tridimensionale.

- Elementi bidimensionali (2D-SHELL): sono elementi a tre o quattro nodi, utilizzati per rappresentare superfici sottili soggette a flessione, come i pannelli. La scelta di questa tipologia consente di simulare correttamente le deformazioni del pannello del riflettore e delle superfici cilindriche sottili di Hub e Feedcone.

Gli spessori definiti per ciascuna componente sono i seguenti:

- Riflettore: 1.5 mm
- Feedcone: 3.5 mm
- Hub: 15mm
- Rinforzi interni: elementi progettati per aumentare la rigidità della struttura nelle zone critiche. Nel modello FEM sono stati considerati:
 - Costole HUB: irrigidimenti interni che garantiscono stabilità dell'Hub, con spessore di 8mm.
 - Rinforzi Feedcone: elementi strutturali, come quelli mostrati in figura 4.8, che aumentano la rigidità della struttura, con spessore di 10 mm.
 - Flange: base dei cilindri che costituiscono Feedcone e Hub, con spessore di 20 mm.

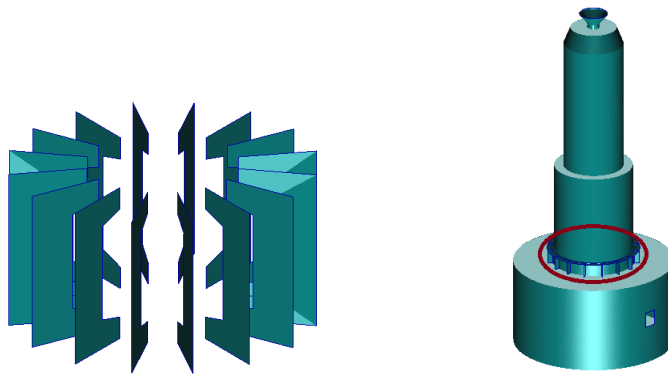


Figura 4.8 Dettaglio delle costole interne all'Hub (a sinistra), dettaglio dei rinforzi del feedcone (a destra)

L'impiego combinato di elementi Bar e Shell consente di rappresentare sia le strutture lineari che quelle sottili. Una volta definite le proprietà geometriche e meccaniche di ciascuna componente, si procede discretizzando la struttura. La mesh è stata definita separatamente per ogni componente, al fine di garantire una discretizzazione regolare e coerente con le specificità geometriche. Questo approccio consente di preservare l'accuratezza del modello, risultando fondamentale per mantenere precisione geometrica e stabilità numerica.

4.5 Interazioni tra le parti

Definite le proprietà dei materiali, degli elementi e la mesh delle singole componenti, è fondamentale modellare accuratamente le connessioni tra le parti della struttura. Queste interazioni sono essenziali affinché il comportamento simulato in fase di analisi risulti coerente con quello reale della struttura.

4.5.1 Connessioni dirette

Alcune componenti, che presentano bordi o facce coincidenti, vengono collegate tramite la funzione *Equivalence* di Patran. Questa operazione unifica i nodi duplicati, garantendo continuità meccanica senza dover introdurre vincoli aggiuntivi. L'utilizzo di *Equivalence* consente di preservare la rigidità locale e la trasmissione dei carichi, tra le superfici contigue. [29]

4.5.2 Vincoli Multi-Point Constraints (MPC)

Per le componenti che non risultano direttamente collegabili mediante *Equivalence*, si è ricorso ai *Multi-Point Constraints* (MPC). [29]

In particolare, sono stati definiti gli RBE2, elementi rigidi che creano vincoli tra un nodo “master” e nodi “slave” dipendenti. I nodi slave selezionati sono costretti a muoversi rigidamente, seguendo i movimenti del nodo master, senza introdurre masse aggiuntive o deformazioni locali non desiderate. [52]

Questa strategia è stata applicata per simulare connessioni tra le parti della struttura, che nel modello CAD completo, erano rappresentate da piastre di giunzioni o elementi secondari di irrigidimento. Gli RBE2 consentono di replicare il comportamento globale della struttura senza appesantire la mesh con dettagli geometrici non significativi.

4.5.3 Collegamenti implementati

I collegamenti definiti tramite RBE2 nel modello FEM sono i seguenti:

- Connessione tra centine e controventi, per assicurare la corretta distribuzione dei carichi sulla struttura, mantenendo l’assetto statico globale.
- Connessione tra pannello del riflettore e travi di sostegno sottostanti, garantendo che le deformazioni del pannello risultino coerenti con il comportamento globale della griglia di supporto.
- Connessioni tra le travi di sostegno del riflettore e le centine, realizzate vincolando i nodi corrispondenti ai punti reali di giunzione, così da riprodurre fedelmente il comportamento meccanico delle interfacce.
- Connessione tra Centine e Hub, fondamentale per garantire il corretto trasferimento dei carichi verso la struttura centrale. In questo caso gli MPC sono stati definiti nei nodi corrispondenti alla posizione delle piastre di collegamento, presenti nel modello CAD completo, assicurando la corretta trasmissione dei carichi fino al piedistallo dell’antenna.

È importante ricordare che, nonostante questa strategia risulti efficace, l’uso di collegamenti rigidi potrebbe alterare localmente la distribuzione delle tensioni. Tuttavia, dal momento che l’obiettivo principale dell’analisi è lo studio del

comportamento globale della struttura, e non un'analisi dettagliata nei punti di giunzione, è accettabile procedere con l'utilizzo di elementi rigidi appena descritti.

4.6 Verifiche preliminari

Completata la modellazione e la discretizzazione in elementi finiti della struttura, è necessario effettuare una serie di verifiche preliminari, illustrate nel Capitolo 3, prima di procedere con l'analisi. [21]

Queste sono fondamentali per garantire una buona qualità della mesh, la corretta implementazione delle connessioni, e per assicurare che il modello numerico non presenti errori che compromettano l'accuratezza e la sensibilità dell'analisi. In particolare, sono stati controllati i seguenti indicatori di qualità della mesh:

- Aspect Ratio: per il modello il valore massimo riscontrato è pari a 5.7, ampiamente accettabile per l'analisi da eseguire e per la complessità del modello discretizzato.
- Jacobian Ratio: il valore massimo ottenuto è pari a 2.77, compatibile con i criteri di buona qualità numerica.
- Maximum Corner Angle, i valori ottenuti rientrano nei limiti consigliati dalle impostazioni di default del software e dai manuali di riferimento.
- Normali alle superfici, è stato verificato che le normali delle superfici siano tutte rivolte nella stessa direzione, assicurando la continuità del modello.

I risultati ottenuti da queste verifiche confermano la buona qualità della mesh e la coerenza del modello sviluppato in Patran. A completamento di queste verifiche, è stata eseguita un'analisi modale preliminare, in assenza di carichi. Questa procedura permette di verificare la stabilità numerica del modello e la corretta definizione delle connessioni tra le parti. L'analisi modale, che verrà approfondita nel capitolo successivo, ha confermato che il modello FEM risulta ben definito e

costituisce quindi una base affidabile per lo svolgimento di analisi statiche e dinamiche.

4.7 Conclusioni e validazione del modello FEM

Il processo di modellazione FEM ha consentito di sviluppare un modello numerico in grado di rappresentare in maniera efficace la struttura reale dell'antenna parabolica in esame. Le semplificazioni introdotte hanno permesso di trovare un equilibrio tra fedeltà geometrica ed efficienza computazionale, ottenendo un modello facile da analizzare e coerente con il comportamento fisico reale.

In conclusione, il processo di validazione, basato sui controlli di qualità della mesh e sull'analisi modale preliminare, ha confermato che il modello sviluppato è affidabile e accurato sia dal punto di vista geometrico che da quello strutturale. Esso costituisce pertanto una base solida e affidabile su cui condurre le analisi strutturali presentate nei capitoli successivi.

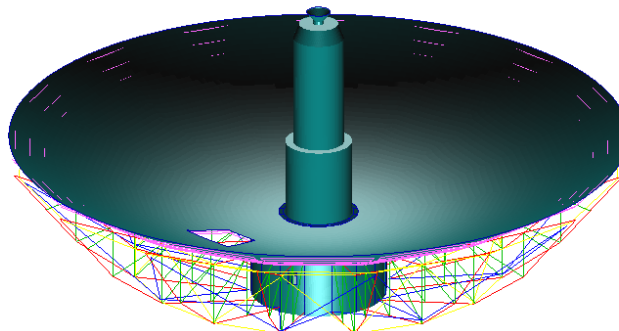


Figura 4.9 Modello FEM dell'intera struttura

5 Analisi modale

5.1 Introduzione

L'analisi modale preliminare rappresenta un passaggio fondamentale da effettuare prima di procedere con l'analisi statica e con lo studio del comportamento della struttura in condizioni operative. Il suo scopo principale è duplice: da un lato permette di verificare che il modello FEM sia stato definito correttamente, dall'altro caratterizza le proprietà dinamiche della struttura. [32]

L'analisi modale consente di determinare le caratteristiche vibrazionali di una struttura, definendone le frequenze naturali e i corrispondenti modi propri. Tali proprietà sono influenzate dai seguenti parametri:

- Distribuzione delle masse;
- Rigidezza globale e locale della struttura;
- Condizioni al contorno e vincoli applicati.

Dal punto di vista matematico, svolgere un'analisi modale consiste nel risolvere un problema agli autovalori. L'equazione del moto per un sistema elastico discreto è la seguente: [33]

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = 0 \quad (5.1)$$

Dove

$[M]$ è la matrice di massa,

$[K]$ è la matrice di rigidezza,

$\{u(t)\}$ è il vettore degli spostamenti nodali.

Cercando soluzioni armoniche del tipo $\{u(t)\} = \{\phi\}e^{i\omega t}$, si ottiene l'equazione caratteristica:

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (5.2)$$

Con,

ω pulsazione naturale e ϕ il modo proprio associato.

La risoluzione di questa equazione permette di determinare le pulsazioni naturali e le corrispondenti frequenze naturali sapendo che:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (5.3)$$

Sul modello realizzato, è stata eseguita un'analisi modale “free-free”, considerando la struttura priva di vincoli esterni. Questo approccio ha permesso di individuare i sei modi di corpo rigido, caratterizzati da frequenze naturali nulle o prossime allo zero, corrispondenti a tre traslazioni e tre rotazioni globali della struttura. L'identificazione di questi modi è fondamentale per verificare la corretta costruzione delle matrici di massa e di rigidezza. Inoltre, questa tipologia di analisi fornisce una descrizione delle caratteristiche intrinseche della struttura, indipendentemente dai vincoli. Questo risulta utile sia per effettuare dei confronti con i modelli teorici, sia come base per analisi dinamiche successive (risposta in frequenza, analisi al transitorio, studio di risonanza).

La conoscenza dei modi propri della struttura, in assenza di vincoli, consente di prevedere come questi si modificano con l'introduzione delle condizioni al contorno, permettendo di individuare in anticipo possibili fenomeni di risonanza, nel caso in cui una frequenza naturale si avvicini a quella di una forzante esterna.

5.2 Analisi modale *free-free* dell'antenna

Utilizzando il modello FEM sviluppato in ambiente Patran, descritto nel precedente capitolo, è stata condotta un'analisi modale (SOL103), in assenza di carichi e vincoli esterni (condizione “free-free”). [34]

I risultati ottenuti mostrano che:

- Le prime sei frequenze naturali sono prossime allo zero, come atteso, e rappresentano i sei modi di corpo rigido;
- Le frequenze successive caratterizzano invece i modi deformativi della struttura, descrivendo i modi flessionali e torsionali dell'antenna.

Modo	Frequenza (Hz)
Mode 1	0.0035
Mode 2	0.0027
Mode 3	0.0002
Mode 4	0.0011
Mode 5	0.0014
Mode 6	0.0018
Mode 7	23.52
Mode 8	23.92
Mode 9	32.27
Mode 10	32.88

Tabella 3 frequenze dei modi risultati dall'analisi modale

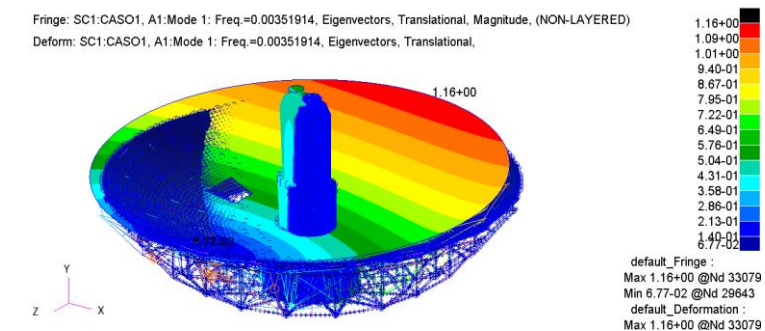


Figura 5.1 Modo 1, Frequenza= $3.5e-3$ Hz

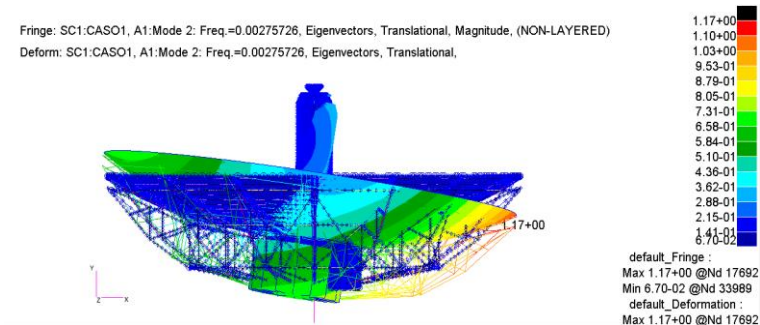


Figura 5.2 Modo 2, Frequenza= $2.75e-3$ Hz

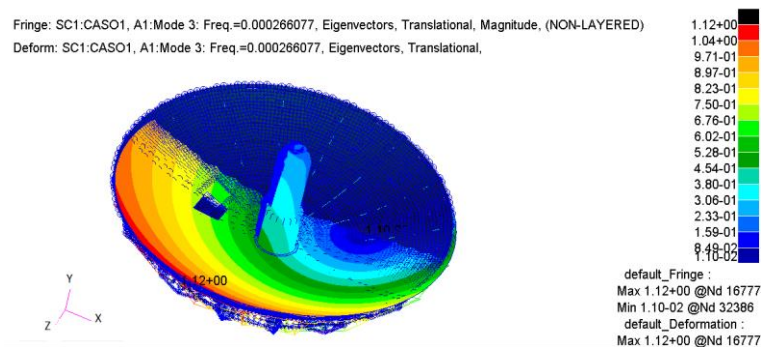


Figura 5.3 Modo 3, Frequenza= $2.00e-4$ Hz

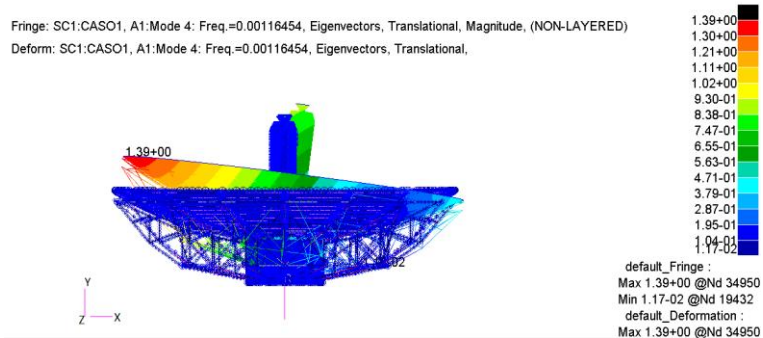


Figura 5.4 Modo 4, Frequenza= $1.16e-3$ Hz

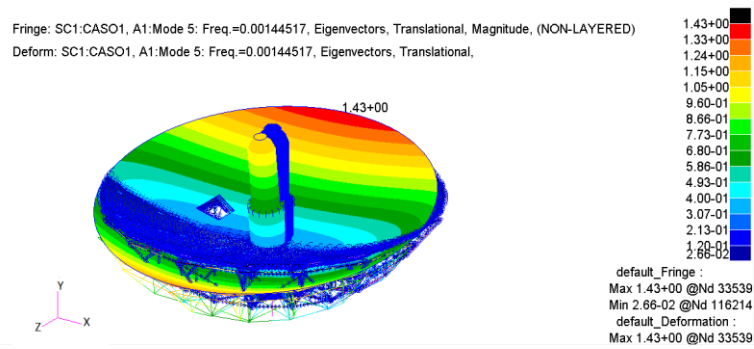


Figura 5.5 Modo 5, Frequenza= $1.44e-3$ Hz

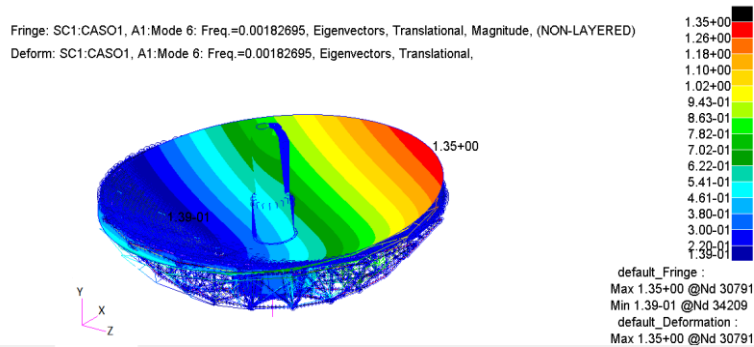


Figura 5.6 Modo 6, Frequenza= $1.82e-3$ Hz

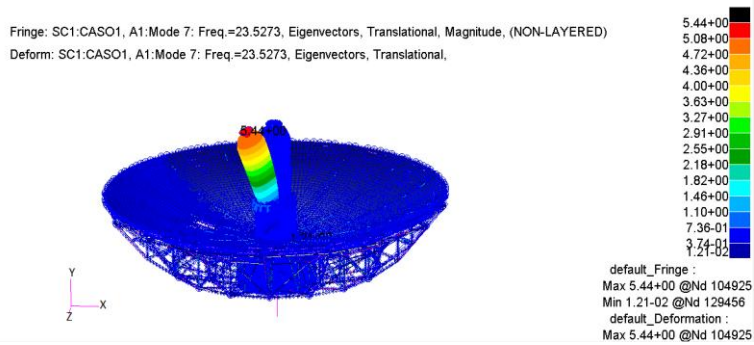


Figura 5.7 Modo 7, Frequenza=23.527 Hz

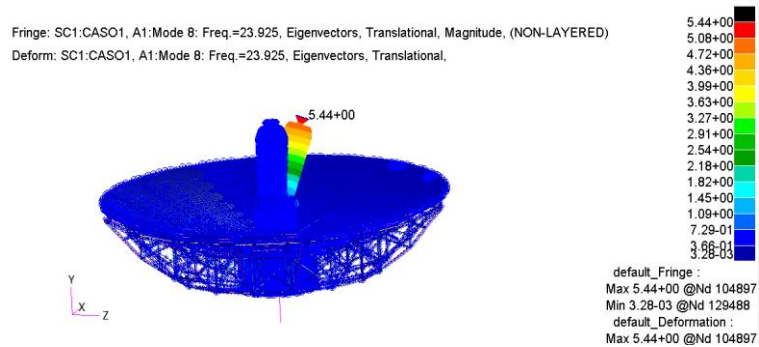


Figura 5.8 Modo 8, Frequenza=23.925 Hz

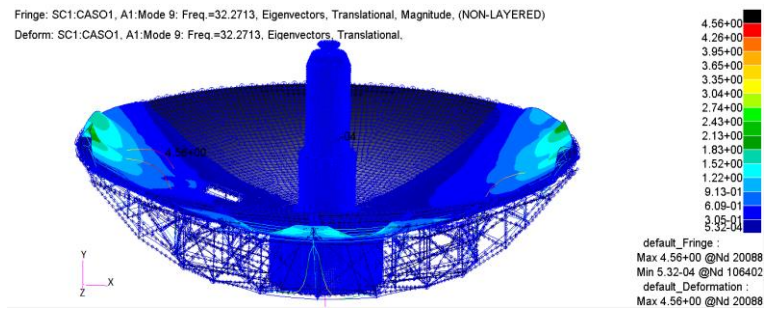


Figura 5.9 Modo 9, Frequenza=32.271 Hz

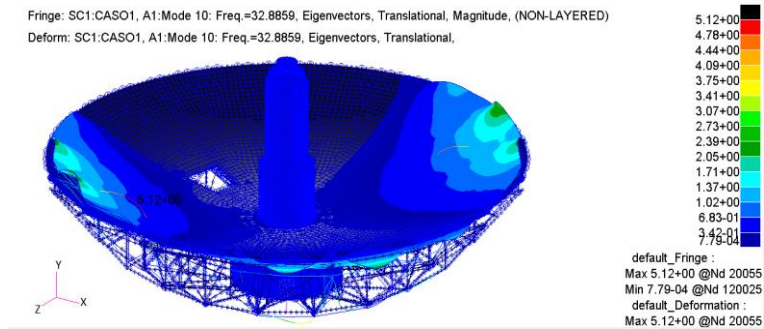


Figura 5.10 Modo 10, Frequenza=32.885 Hz

L'ottenimento di questi risultati conferma la corretta implementazione del modello. Di conseguenza, è possibile validarlo dal punto di vista dinamico e risulta pronto per essere utilizzato nelle analisi statiche con carichi e vincoli previsti.

6 Carico aerodinamico vento

6.1 Introduzione al carico aerodinamico dovuto al vento

L'obiettivo di questo capitolo è definire il carico aerodinamico agente sull'antenna, dovuto all'azione del vento.

6.1.1 Ipotesi semplificativa del modello

Per semplicità, in prima approssimazione, si andrà a valutare esclusivamente l'effetto di un vento orizzontale costante, proveniente da sinistra, come illustrato in figura.

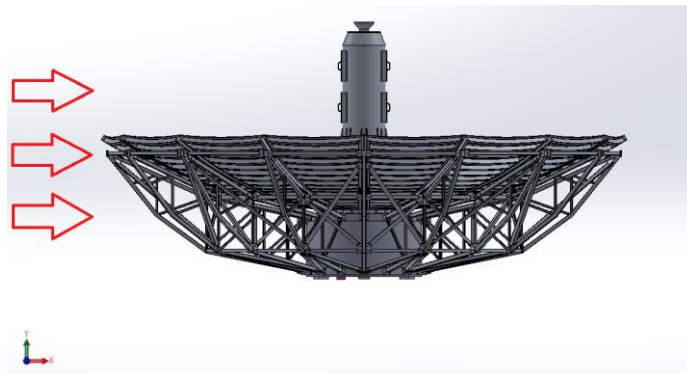


Figura 6.1 Dettaglio direzione del vento

Un'ulteriore ipotesi semplificativa consiste nel considerare l'azione del vento agente solamente sui pannelli che costituiscono il riflettore, trascurando il contributo che si genererebbe sulle travi e le altre componenti strutturali dell'antenna. Questa scelta è motivata sia da considerazioni geometriche che da aspetti aerodinamici, dal momento che la forza aerodinamica agente su una superficie è data dalla seguente relazione:

$$F = q C_d A \quad (6.1)$$

Dove,

q è la pressione dinamica del vento;

C_d è il coefficiente di resistenza aerodinamica;

A è l'area proiettata ortogonale al flusso

L'area proiettata risulta essere un parametro fortemente determinante, in particolare nel caso dell'antenna, poiché le differenze dimensionali tra le componenti sono rilevanti. Considerando i valori stimati delle aree esposte, nel caso di antenna orientata verso l'orizzonte:

$$A_{pannello} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cong 68 \text{ m}^2 \quad (6.2)$$

Per quanto riguarda le travi si considera una sezione rettangolare approssimata di dimensioni 0.1x0.1m e una lunghezza di circa 2m:

$$A_{travi} \cong 0.1 * 2 \cong 0.2 \text{ m}^2 \quad (6.3)$$

E per quanto riguarda i cilindri che costituiscono Hub e Feedcone si avrà:

$$A_{hub} = D * h \cong 2.1 * 1.135 \cong 2.38 \text{ m}^2 \quad (6.4)$$

$$A_{feedcone} = D * h \cong 1 * 3.116 \cong 3.116 \text{ m}^2 \quad (6.5)$$

Questi valori indicano che, a parità di pressione del vento, la forza agente sul riflettore è nettamente superiore a quella agente sulle altre componenti, che risultano quindi trascurabili, in prima approssimazione.

Un'ulteriore conferma deriva dal confronto dei coefficienti di resistenza aerodinamica per le diverse parti [35], considerati pari a:

- $C_d = 0.6-1.2$ per travi e cilindri
- $C_d = 0.4-1.4$ per parabole convesse

Si conclude quindi che, nella valutazione preliminare del carico aerodinamico agente sull'antenna, la risultante delle forze agenti sulla struttura è determinata principalmente dai pannelli del riflettore, mentre le altre componenti strutturali hanno contribuito trascurabile.

Il modello che verrà utilizzato per svolgere l'analisi CFD è quindi quello rappresentato nella figura sottostante:



Figura 6.2 Direzione vento incidente sul riflettore

6.1.2 introduzione all'analisi CFD

L'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics, o fluidodinamica computazionale) è una tipologia di simulazione numerica che permette di analizzare il comportamento di un fluido, sia intorno ad un corpo solido che all'interno di volumi confinati. Le analisi CFD sono classificate in base alla posizione del corpo nello spazio, alla geometria dell'oggetto, la tipologia di fluido considerato e alla dipendenza del fenomeno dal tempo. L'obiettivo di queste analisi è quello di valutare l'azione che un flusso esercita su un corpo, calcolando grandezze fluidodinamiche quali distribuzioni di pressioni, campi di velocità, forze aerodinamiche e temperature. [37]

Il calcolo fluidodinamico si fonda sulle equazioni di Navier-Stokes, che descrivono la dinamica dei fluidi attraverso [36]:

- Legge di conservazione della massa
- Legge di conservazione della quantità di moto
- Legge di conservazione dell'energia

Nel caso dell'analisi CFD, il fluido viene approssimato come un mezzo continuo: le sue proprietà macroscopiche non vengono influenzate dal comportamento molecolare, ma sono descritte da funzioni nello spazio e nel tempo.

6.2 Coefficienti di pressione e regime di flusso

6.2.1 Coefficienti di pressione

Dall'analisi CFD della struttura si ottiene, come anticipato, la distribuzione della pressione sulle superfici, input fondamentale per la successiva analisi strutturale. È possibile rendere i risultati indipendenti dalla velocità del vento, introducendo il coefficiente di pressione C_p , definito come: [44]

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6.6)$$

Dove,

p è la pressione locale,

p_∞ è la pressione indisturbata a monte (pressione ambiente),

ρ è la densità dell'aria,

V è la velocità del vento.

Una volta ottenuta la distribuzione dei coefficienti di pressione, la pressione locale può essere calcolata nel seguente modo:

$$p(x, y, z) = p_{\infty} + C_p(x, y, z) \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6.7)$$

Questo approccio risulta particolarmente utile quando l'antenna si mantiene sempre nella stessa configurazione e la direzione del vento rimane invariata, mentre varia la velocità del flusso. In questi casi, infatti, la distribuzione spaziale dei coefficienti di pressione rimane invariata e la pressione può essere scalata in funzione della pressione dinamica:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6.8)$$

Nel presente lavoro di tesi, viene studiato il comportamento strutturale dell'antenna a diversi angoli di elevazione, modificando la configurazione aerodinamica e rendendo necessario lo svolgimento di diverse analisi CFD, per ottenere le distribuzioni di pressione corrispondenti.

Il metodo basato sui coefficienti di pressione resta utile come strumento di supporto, per scalare i risultati al variare dell'intensità del vento (ad esempio in scenari di vento estremo), senza dover ripetere le simulazioni numeriche.

6.2.2 Regime di flusso

Per definire correttamente il problema aerodinamico è fondamentale inquadrare il regime di flusso che caratterizza l'interazione tra vento e struttura.

Questo è determinato dal numero di Reynolds, definito come: [44]

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (6.9)$$

Dove

ρ è la densità del fluido;

V la velocità caratteristica del vento;

L è una dimensione caratteristica della superficie;

μ la viscosità dinamica dell'aria.

Il numero di Reynolds consente di stabilire se il flusso attorno alla struttura si trovi in regime laminare, turbolento o in transizione. La distribuzione di pressione risulta strettamente dipendente da tale regime: un flusso laminare, uniforme e continuo, genera gradienti di pressione regolari, mentre un flusso turbolento, caratterizzato da comportamenti caotici e irregolari, determina variazioni di pressione più rapide e marcate. [38]

Per il riflettore in esame, caratterizzato da un diametro di 9.3 m e investito da un vento a 20 m/s, il numero di Reynolds risulta nell'ordine di 10^7 , indicando un flusso turbolento. Tuttavia, nell'analisi CFD si considera il vento come un flusso stazionario e costante, trascurando le fluttuazioni locali. Questa semplificazione è coerente con l'obiettivo di ottenere un modello preliminare di carico aerodinamico applicabile al modello FEM dell'antenna.

6.2.3 Applicazione dei risultati CFD al modello FEM

Per applicare il carico dovuto all'azione del vento sui pannelli, i risultati della pressione, ottenuti dalla simulazione CFD, devono essere elaborati e resi compatibili con il software FEM utilizzato.

Nel dettaglio, i principali step da eseguire sono i seguenti:

- Analisi CFD: effettuata tramite Solidworks – Flow Simulation, permette di ottenere la distribuzione della pressione relativa sulle superfici dei pannelli.
- Esportazione dei dati: i risultati vengono esportati in formato Excel, associando a ciascun nodo della mesh le coordinate e il valore di pressione corrispondente.
- Interpolazione: tramite uno script Matlab si interpolano i dati per ottenere una funzione continua $p(x,y,z)$, definita sull'intera superficie del riflettore.
- Import in Patran: la funzione ottenuta viene utilizzata per creare un campo spaziale di pressione da applicare agli elementi FEM del pannello.

Queste azioni costituiscono il collegamento necessario tra l'analisi CFD e l'applicazione dei carichi nel modello FEM, fondamentale per poter eseguire l'analisi strutturale completa del modello.

6.3 Modello CFD del riflettore

6.3.1 Software e obiettivi dell'analisi

Per lo studio del carico aerodinamico, le simulazioni CFD sono state condotte con Solidworks – Flow Simulation, un'estensione integrata di Solidworks che permette lo svolgimento di analisi numerica dei flussi su geometrie complesse. Il software fornisce in output distribuzioni di pressione, velocità e altre grandezze aerodinamiche sulle superfici.

I principali vantaggi nell'utilizzo di Solidworks – Flow Simulation sono: [39]

- Integrazione diretta con il modello CAD: non è necessario esportare e importare geometrie, riducendo il rischio di errori.
- Riconoscimento automatico dei volumi fluidi: funzione che consente di ridurre i tempi di configurazione dell'analisi.
- Impostazione guidata dell'analisi: permette di definire diversi scenari CFD attraverso un processo guidato, "Wizard".
- Output compatibili con l'analisi FEM: i risultati possono essere esportati e applicati direttamente come campi di carico sui modelli FEM.

L'uso di Flow Simulation permette quindi di effettuare lo studio CFD del riflettore, e ottenere distribuzioni di pressione affidabili sul pannello, che verranno elaborate e applicate al modello FEM per l'analisi strutturale.

6.3.2 Geometria e semplificazioni

Il modello utilizzato per l'analisi CFD considera, come detto in precedenza, esclusivamente il pannello del riflettore, semplificato al fine di ridurre i costi computazionali. Viene quindi realizzato come singolo pezzo, senza suddivisione in spicchi e senza considerare eventuali dettagli secondari come fori o botole.

Queste scelte semplificative sono motivate da:

- Riduzione dei costi computazionali
- Possibilità di applicare un mesh più grossolana in fase di modellazione
- Rilevanza aerodinamica maggiore dei pannelli rispetto ai dettagli secondari



Figura 6.3 Modello semplificato del riflettore

In sintesi, il modello analizzato è un pannello curvo singolo, continuo e uniforme, coerente con quanto stabilito nel paragrafo 6.1, in cui si definisce che i pannelli rappresentano la principale superficie resistente al vento.

6.3.3 Dominio computazionale e condizioni al contorno

In Solidworks – Flow Simulation l’analisi CFD viene impostata a partire da una procedura guidata (*Wizard*), che porta alla definizione delle condizioni iniziali dello studio. [40]

In questa prima fase vengono definiti:

- Unità di misura: vengono utilizzate le unità coerenti con il sistema internazionale (SI).
- Tipologia di analisi: analisi esterna, viene esclusa l’analisi di eventuali flussi interni.
- Tipologia di fluido: aria ($\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$, $\mu = 1.789 * 10^{-5} \text{ Pa} * \text{s}$).
- Condizioni a parete: parete adiabatica.
- Condizioni iniziali e ambientali: vento orizzontale a 20 m/s lungo l’asse x, pressione ambiente pari a 101325 Pa e temperatura $T=293.2 \text{ K}$.

Una volta definiti gli input iniziali, il programma imposta l’analisi e definisce automaticamente un dominio computazionale, che può essere poi ridimensionato, se necessario. La definizione del dominio di calcolo è una fase cruciale dell’analisi CFD, in quanto le dimensioni scelte influenzano l’accuratezza dei risultati. Un dominio troppo ristretto potrebbe produrre effetti artificiali dovuti alla vicinanza delle condizioni al contorno, limitando lo sviluppo delle linee di flusso attorno al corpo. La scelta ottimale è quindi quella di definire un dominio sufficientemente ampio per consentire al flusso di svilupparsi in maniera realistica, garantendo che le interazioni tra flusso e superficie vengano valutate correttamente e non vi siano influenze tali da distorcerne il moto.

Come è osservabile in figura il riflettore è stato inserito all'interno di un dominio computazionale solido, così definito:

- A monte, si considera una distanza di circa 8 volte il diametro del riflettore, pari a circa 72m.
- A valle, si amplia il dominio fino ad una distanza pari a 15 volte il diametro del riflettore, pari a 135m.
- Lateralmente e verticalmente si considera una distanza, da entrambi i lati, pari a 90 m (10 volte il diametro).

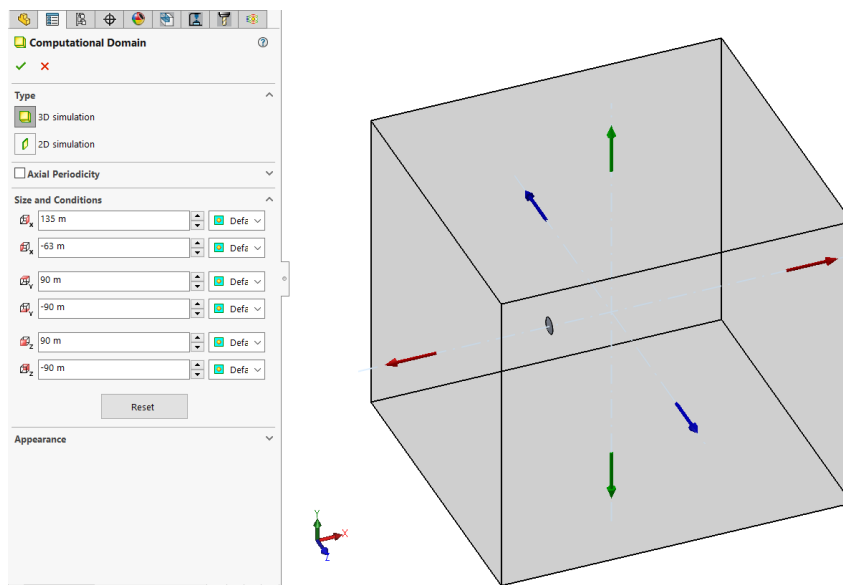


Figura 6.4 Dominio computazionale per l'analisi CFD

Vista la geometria del riflettore, sarebbe stato possibile ridurre ancora il dominio computazionale in direzione z sfruttando l'asse di simmetria, ma si è deciso di non applicare questa semplificazione, dal momento che i costi computazionali di analisi rimangono contenuti anche considerando l'intero pannello.

6.3.4 Discretizzazione del dominio

Prima di eseguire l'analisi, la geometria del riflettore viene discretizzata mediante una mesh cartesiana, che suddivide il dominio di calcolo in elementi. Definire correttamente i parametri della mesh è un passaggio fondamentale perché influisce direttamente sulla precisione dei risultati e sui tempi di calcolo. In Solidworks Flow Simulation, la generazione della mesh avviene automaticamente a partire dal livello di discretizzazione selezionato dall'utente. Nel caso in esame è stato scelto il livello 3, che rappresenta una mesh di grana medio-grande. All'aumentare del livello di discretizzazione la mesh che verrà generata sarà più fine, aumentando notevolmente i tempi di calcolo. Oltre a creare la mesh il software esegue un processo di raffinamento, che adatta automaticamente la dimensione degli elementi nelle aree di interesse per migliorare la precisione locale.

La scelta di un livello di discretizzazione intermedio, rappresenta un buon compromesso tra accuratezza dei risultati e tempi di calcolo. L'utilizzo di questa mesh permette di ottenere una distribuzione di pressione sufficientemente dettagliata per le successive fasi di analisi. [40]

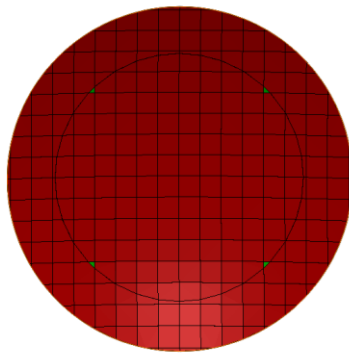


Figura 6.5 Dettaglio Mesh del riflettore

Al fine di rappresentare i diversi scenari operativi, il riflettore è stato simulato a differenti angoli di elevazione, mantenendo inalterata la velocità e la direzione del vento. Per poter simulare tutte le posizioni operative del riflettore, si considerano cinque scenari: 0° (puntamento verso l'orizzonte), 30° , 45° , 60° , 90° (puntamento verso lo zenith).

6.4 Risultati dell'analisi CFD

Dalle simulazioni CFD condotte per le diverse configurazioni, si ottengono le distribuzioni di pressione sulle superfici del pannello. È possibile visualizzare i risultati tramite mappe a colori, evidenziando chiaramente le regioni di sovrappressione e depressione. I risultati ottenuti vengono anche esportati in formato tabellare, associando a ciascun nodo della mesh le coordinate spaziali e il valore della pressione corrispondente. Questo formato rappresenta la base per le successive fasi di post-processing e interpolazione, necessarie per creare i campi di pressione da applicare sul modello FEM in Patran.

Di seguito sono riportati i risultati, in forma grafica, delle pressioni agenti sulle superfici, realizzati tramite la funzione “*Surface Plots*” di Solidworks. Questi vengono mostrati per tutte le superfici investite dal flusso, considerando quindi sia le superfici sopravento che sottovento del riflettore, per ottenere una rappresentazione completa della distribuzione di pressione. Per la configurazione con asse del riflettore parallelo alla direzione del vento, la pressione agisce principalmente sulla superficie esposta, motivo per cui la superficie sottovento non è stata tenuta in considerazione. Per gli altri casi, invece, devono essere considerate necessariamente entrambe le superfici.

I risultati ottenuti, divisi per angolo di elevazione, sono i seguenti:

- Angolo di elevazione 0° :

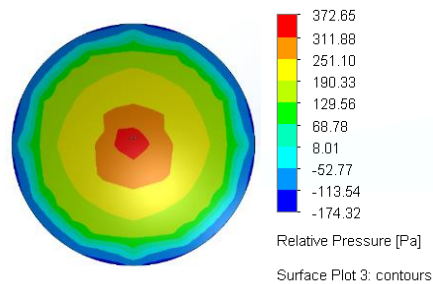


Figura 6.6 Distribuzione di pressione superficie sopravento (0°)

- Angolo di elevazione 30° :

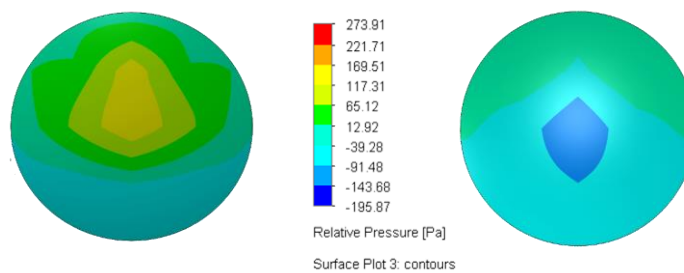


Figura 6.7 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (30°)

- Angolo di elevazione 45° :

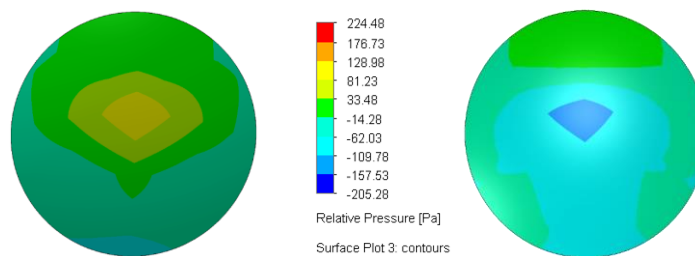


Figura 6.8 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (45°)

- Angolo di elevazione 60° :

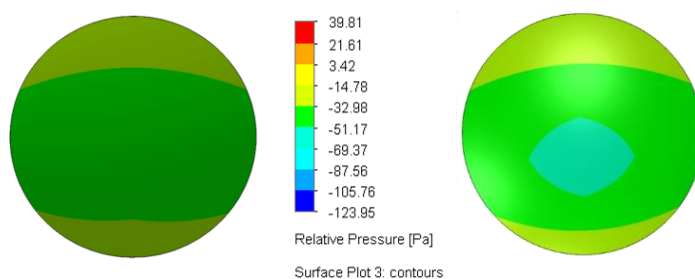


Figura 6.9 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (60°)

- Angolo di elevazione 90°:

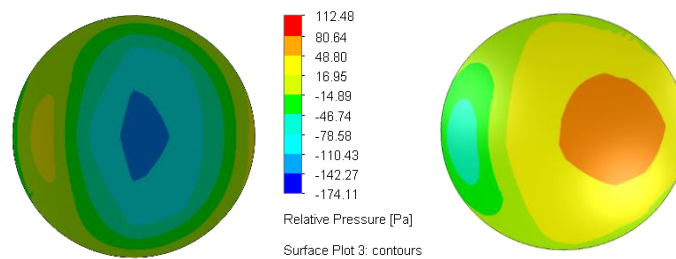


Figura 6.10 a sinistra: superficie sopravento, a destra: superficie sottovento (90°)

Questi risultati costituiscono la base per l'elaborazione dei dati e la creazione dei campi di pressione, che verrà descritta nel paragrafo successivo.

6.5 Elaborazione dei dati e interpolazione in Matlab

6.5.1 Obiettivi dell'elaborazione dati

I risultati che si ottengono dall'analisi CFD, effettuata in Solidworks, sono forniti in forma discreta, in corrispondenza dei nodi della mesh. Per poter essere applicati sul modello FEM, realizzato in Patran, è necessario trasformarli in una funzione continua definita sull'intera superficie del riflettore. A tal fine è stato sviluppato un codice Matlab che svolge le seguenti funzioni:

- Lettura ed elaborazione dati dai file Excel esportati da Solidworks.
- Interpolazione dei dati di pressione tramite un modello polinomiale.
- Visualizzazione grafica dei risultati.
- Generazione dell'equazione interpolata da poter importare in Patran.

6.5.2 Lettura e riorganizzazione dei dati

I dati CFD vengono esportati in formato Excel, per ciascun angolo di elevazione considerato, riportando le coordinate dei nodi della superficie del riflettore e i valori di pressione corrispondenti. La prima fase dell'elaborazione consiste nell'andare a determinare la pressione netta agente sulla superficie del riflettore, combinando i contributi della superficie superiore e di quella inferiore, secondo la seguente convenzione sulle normali:

- Superficie superiore: normale positiva se orientata verso la superficie, quindi rivolta verso il basso.
- Superficie inferiore: normale positiva se orientata verso la superficie; nel sistema globale risulta rivolta verso l'alto.

Il sistema di riferimento globale adottato coincide con quello considerato per la superficie superiore, mostrato in figura.

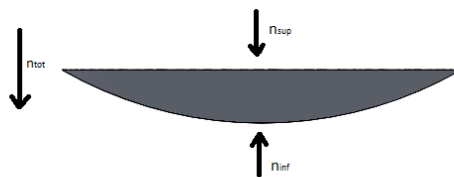


Figura 6.11 Sistemi di riferimento delle normali alle superfici

In questo modo, è possibile ottenere un unico campo di pressione, determinando la pressione netta come segue:

$$p_{netta} = p_{sup} - p_{inf} \quad (6.10)$$

6.5.3 Interpolazione dei dati

L' interpolazione dei dati, in forma discreta, è effettuata mediante il metodo dei minimi quadrati, il cui principio fondamentale è quello di ottenere, a partire da dati discreti, nella forma (x_i, y_i, z_i, f_i) , una funzione continua $f(x, y, z)$.

Si procede approssimando i valori ottenuti da analisi CFD con una funzione f , descritta da una combinazione lineare di funzioni base $\phi_i(x, y, z)$: [49]

$$f(x, y, z) \approx \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i(x, y, z) \quad (6.11)$$

Dove i coefficienti α sono parametri da determinare.

Si costruisce la matrice A di dimensione $m \times n$:

$$A = \begin{bmatrix} \phi_1(x_1, y_1, z_1) & \phi_2(x_1, y_1, z_1) & \dots & \phi_n(x_1, y_1, z_1) \\ \phi_1(x_2, y_2, z_2) & \phi_2(x_2, y_2, z_2) & \dots & \phi_n(x_2, y_2, z_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(x_m, y_m, z_m) & \phi_2(x_m, y_m, z_m) & \dots & \phi_m(x_m, y_m, z_m) \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)^T$, è il vettore dei coefficienti incogniti.

$f = (f_1, \dots, f_m)^T$, è il vettore dei dati sperimentali.

Riscrivendo l'equazione in forma matriciale si ottiene:

$$f = A\alpha \quad (6.13)$$

L'obiettivo, per definire la funzione approssimante, è trovare i coefficienti α tali da minimizzare il residuo, ottenuto come:

$$r = A\alpha - f \quad (6.14)$$

Che si traduce in:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \|r\|_2^2 = \arg \min_{\alpha} \|A\alpha - f\|_2^2 \quad (6.15)$$

Dove α^* rappresenta i valori dei coefficienti che minimizzano il residuo.

Per minimizzare la norma 2, si ricava il seguente sistema:

$$A^T A \alpha^* = A^T f \quad (6.16)$$

Risolvendo l'equazione si trovano i coefficienti α^*

Nel caso in esame l'obiettivo è definire una funzione f caratterizzata dalla seguente forma:

$$\begin{aligned} f(x, y, z) = & a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6z^2 + a_7(x * y) \\ & + a_8(x * z) + a_9(y * z) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Per trovare i coefficienti incogniti si risolve il sistema di equazioni normali (6.16), che è possibile risolvere in Matlab mediante l'operatore “\”, scrivendo la seguente riga di codice:

$$\alpha^* = A \backslash f \quad (6.18)$$

I coefficienti devono essere poi inseriti nell'equazione (6.17), per ottenere la funzione continua desiderata.

Nel presente lavoro, la grandezza che si vuole andare a interpolare è la pressione, calcolata sui nodi della superficie del riflettore. Applicando il metodo appena descritto si ottiene, per ogni configurazione considerata, una funzione continua $P(x, y, z)$ che rappresenta la distribuzione della pressione. Lo script Matlab implementato svolge le seguenti operazioni:

- Costruzione della matrice A dei termini polinomiali e calcolo dei coefficienti α^* ;
- Definizione della funzione interpolante;
- Visualizzazione grafica della distribuzione della pressione;
- Elaborazione della funzione di pressione affinché risulti compatibile con il linguaggio PCL di Patran.

6.5.4 Preparazione per l'import in Patran

Una volta interpolati i dati si ottiene una funzione unica che rappresenta l'andamento della funzione approssimata lungo la superficie da considerare. Questa funzione può essere importata in Patran, dopo essere stata adattata al linguaggio PCL (Patran Command Language):

- Le variabili x,y,z vengono indicate come “ ‘X, ‘Y, ‘Z ”.
- L'elevazione a potenza usa “ ** ” al posto di “ ^ “

La funzione interpolata assumerà quindi la seguente forma:

$$f(x, y, z) = a_0 + (a_1 * 'X) + (a_2 * 'Y) + (a_3 * 'Z) + (a_4 * ('X ** 2)) + (a_5 * ('Y ** 2)) + (a_6 * ('Z ** 2)) + (a_7 * 'X * 'Y) + (a_8 * 'X * 'Z) + (a_9 * 'Y * 'Z)$$

Una volta adattata al PCL, è possibile andare ad applicare il campo sul modello FEM. Il software Patran presenta una funzione dedicata all'inserimento di distribuzioni spaziali di quantità scalari, in questo caso di studio, la pressione. Questa funzione, chiamata “*fields*” permette di definire un campo spaziale a

partire da un'equazione nota. Il campo generato viene poi associato ad un carico (*Pressure Load*), definito nella sezione *Load/BCs*, e applicato al modello FEM. Nel caso di studio dell'antenna, la funzione polinomiale $P(x, y, z)$, ottenuta dall'interpolazione in Matlab, consente di definire un campo spaziale continuo da applicare come carico di pressione sugli elementi bidimensionali che costituiscono il riflettore.

È possibile suddividere l'intero flusso operativo nelle seguenti fasi:

- Preparazione e verifica della funzione da importare, correggendo gli errori di sintassi PCL;
- Creazione del campo spaziale tramite la sezione *Fields* in Patran;
- Applicazione del campo come carico di pressione sugli elementi 2D;
- Verifica grafica della corretta applicazione del carico.

Queste operazioni vengono effettuate per ogni configurazione dell'antenna, considerata per l'analisi strutturale.

6.6 Validazione del metodo: caso test

6.6.1 Descrizione del modello aerodinamico

Per poter validare il metodo di elaborazione dati descritto nei paragrafi precedenti, si è pensato di applicarlo ad un corpo con distribuzione di pressione nota. La geometria considerata è quella di un profilo alare NACA 65(1)-412, le cui coordinate, normalizzate con corda unitaria, sono reperibili dal sito "*Airfoil Tools*". [41]

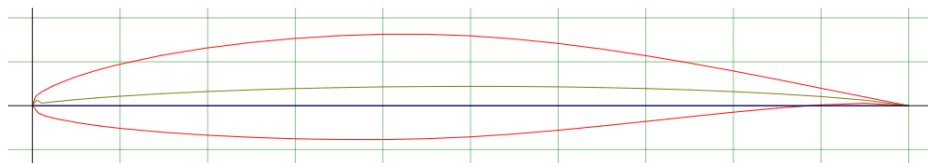


Figura 6.12 Profilo alare NACA 65(1)-412

Quando un flusso d'aria investe un profilo alare, la geometria del corpo e l'angolo di incidenza inducono una deviazione delle linee di corrente e una variazione locale di velocità del fluido. Alle variazioni di velocità, sono associate variazioni di pressione statica, che si distribuiscono lungo dorso e ventre del profilo. Il parametro utilizzato per descrivere questa distribuzione è il coefficiente di pressione C_p , definito nel paragrafo 6.2 (eq. 6.6).

Per il profilo in esame, la distribuzione di pressione attesa è la seguente [42]:

- Incidenza nulla, $\alpha=0^\circ$:
 - Dorso: il flusso d'aria subisce un'accelerazione lungo la corda, causando una riduzione della pressione statica rispetto alla pressione ambiente.
 - Ventre: il flusso è meno accelerato rispetto al dorso e questo determina una zona di sottopressione minore rispetto a quella che si genera sul dorso.
 - Bordo d'attacco: si verifica un rallentamento del flusso localizzato e quindi un incremento di pressione localizzato.
 - Bordo di fuga: la pressione tende a ritornare in equilibrio con la pressione del flusso indisturbato, facendo sì che il coefficiente di pressione tenda gradualmente al valore nullo.
- Incidenza $\alpha > 0^\circ$:
 - Dorso: la presenza di un angolo di incidenza provoca un'accelerazione maggiore lungo il dorso, rispetto al caso precedente, causando una riduzione ancora più marcata della pressione statica rispetto alla pressione ambiente.
 - Ventre: il flusso viene rallentato e subisce una compressione maggiore, generando una zona di sovrappressione più evidente.
 - Bordo d'attacco: la zona di alta pressione si accentua a causa del maggiore impatto del flusso sul ventre.

- Bordo di fuga: la pressione tende a ritornare, anche in questo caso, in equilibrio con la pressione del flusso indisturbato, ma in maniera più graduale rispetto al caso ad incidenza nulla.

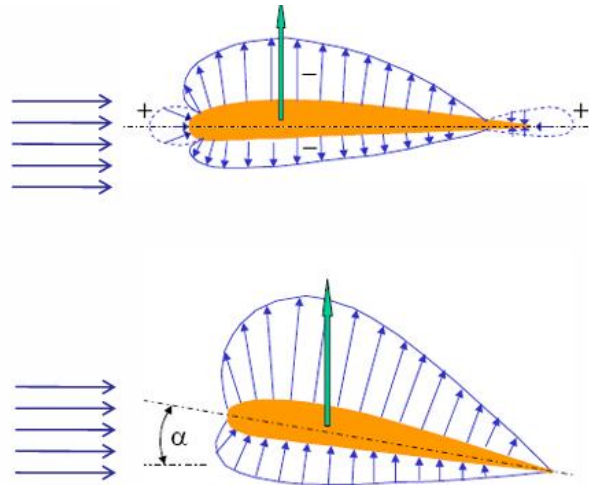


Figura 6.13 Distribuzione di pressione attorno ad un profilo alare
(in alto: angolo di incidenza nullo, in basso: angolo di incidenza α) [42]

Da queste osservazioni, è possibile stabilire che, in seguito all'analisi CFD sul profilo, la distribuzione di pressione sarà caratterizzata come segue:

- La curva del $C_p(x)$ sul dorso presenta un picco negativo vicino al bordo di attacco seguito da un aumento (tendente a valori nulli) verso il bordo di fuga.
- La curva del $C_p(x)$ sul ventre, risulta invece più piatta, con valori positivi decrescenti verso il bordo di fuga.

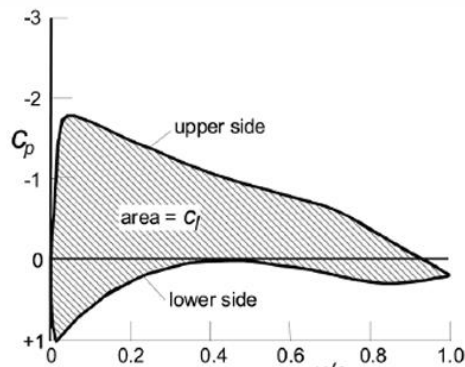


Figura 6.14 Andamento dei coefficienti di pressione
lungo la corda di un profilo alare teorico con incidenza α [42]

Questa distribuzione di pressione teorica verrà messa a confronto con i risultati ottenuti dall'analisi CFD, elaborati mediante il metodo già visto e con i risultati ottenuti tramite Xfoil, software che permette la simulazione e il calcolo dei coefficienti aerodinamici su profili alari in regime subsonico.

6.6.2 Dominio calcolo, impostazioni analisi, mesh e casi simulati

Per effettuare l'analisi CFD in Solidworks Flow Simulation, il profilo NACA 65(1) - 412 è stato modellato a partire dalle coordinate della sezione 2D e poi estruso di 1 m in direzione z. Si è inoltre pensato di studiare il flusso che investe il profilo, considerando sia il caso con angolo di incidenza nullo che il caso con angolo pari a 5° , simulati ruotando il profilo attorno all'asse z. [40]

Prima di procedere con il calcolo, vengono definiti, come già effettuato per il riflettore, gli input dell'analisi:

- Unità di misura: vengono utilizzate per convenzione le unità di misura del sistema internazionale (SI);
- Tipologia di analisi: analisi esterna;
- Tipologia di fluido: aria ($\rho = 1.225 \frac{Kg}{m^3}$, $\mu = 1.8 * 10^{-5} Pa * s$);
- Condizioni a parete: parete adiabatica;
- Condizioni iniziali e ambientali: velocità del vento pari a 20 m/s orientata lungo l'asse x, pressione ambiente pari a $P=101325 Pa$ e temperatura $T=293.2 K$.

Il dominio computazionale è stato definito, in maniera tale da permettere lo sviluppo naturale delle linee di corrente attorno al profilo, ed è strutturato come mostrato in figura:

- A monte viene considerata una distanza di circa 5 volte la corda del profilo, pari ad 5 m.
- A valle si considera una distanza di 10 volte la corda, quindi 10 m.

- Estensione laterale e verticale, circa 5 volte la corda.

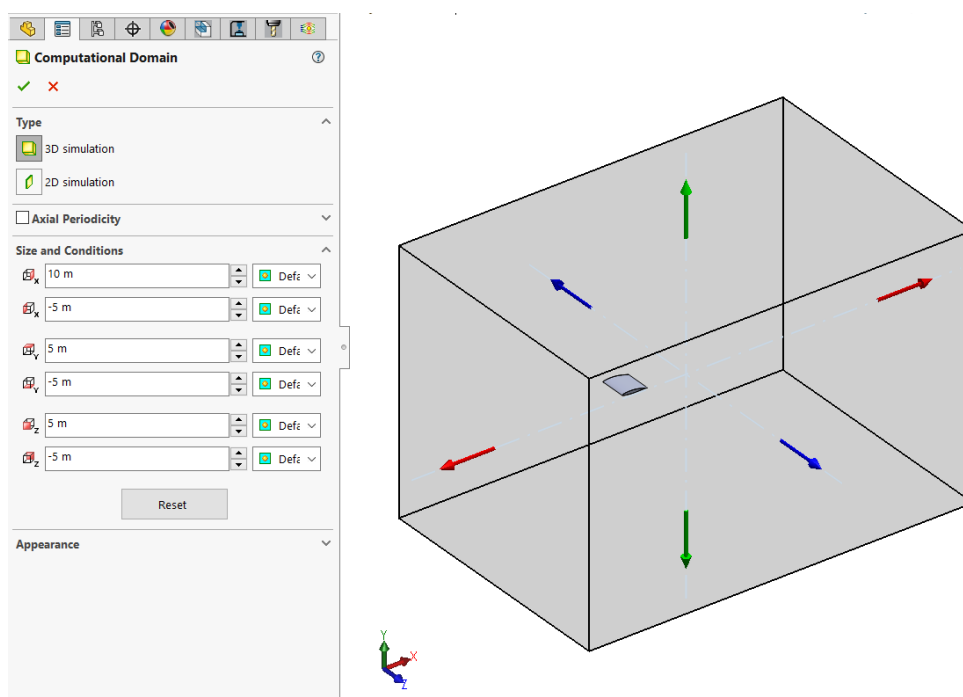


Figura 6.15 Dominio computazionale di analisi

La mesh è stata generata automaticamente dal software, con livello di discretizzazione pari a 3. La scelta di una mesh grossolana permette di ridurre i tempi di calcolo, mantenendo una buona qualità dei risultati. Automaticamente Solidworks, durante l'analisi, procede andando a rifinire la mesh nelle zone di interesse, come mostrato in figura.

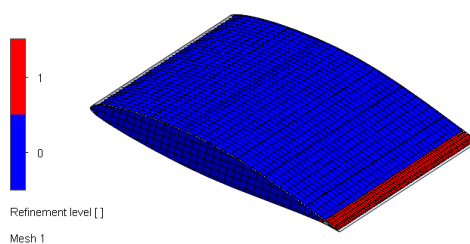


Figura 6.16 Mesh rifinita del profilo alare

Realizzata la mesh si procede effettuando l'analisi CFD, ottenendo, tra i vari output, i valori di pressione su dorso e ventre, che verranno esportati ed elaborati seguendo il processo descritto nel paragrafo 6.5.

6.6.3 Export ed elaborazione dati

Al termine della simulazione i risultati di pressione sul profilo vengono esportati in formato Excel. La prima fase dell'elaborazione dati consiste nell'andare a riordinare i valori dividendo i punti appartenenti al dorso da quelli appartenenti al ventre. L'obiettivo di questa riorganizzazione è facilitare le successive operazioni di interpolazione. A differenza di quanto viene effettuato per il riflettore, nel caso del profilo alare non si andrà a valutare la pressione netta, ma si mantengono i valori di pressione differenziali tra dorso e ventre, per poterli confrontare con i risultati teorici e i valori ottenuti dalla simulazione con Xfoil.

Vengono mostrate in figura le distribuzioni di pressione ottenute dall'analisi CFD per i due casi test considerati.

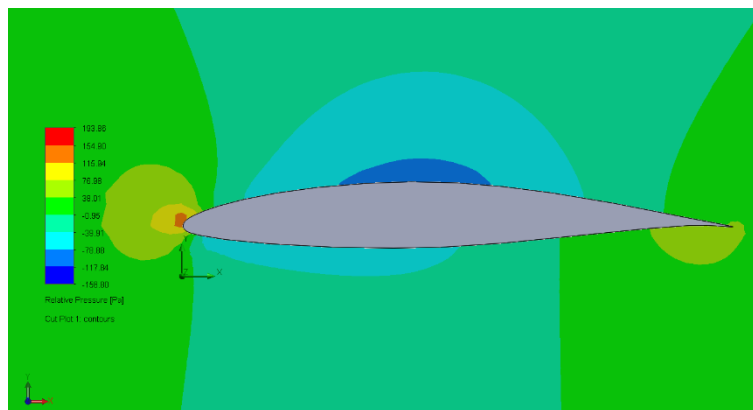


Figura 6.17 Distribuzione di pressione per un profilo alare (incidenza nulla) [CFD]

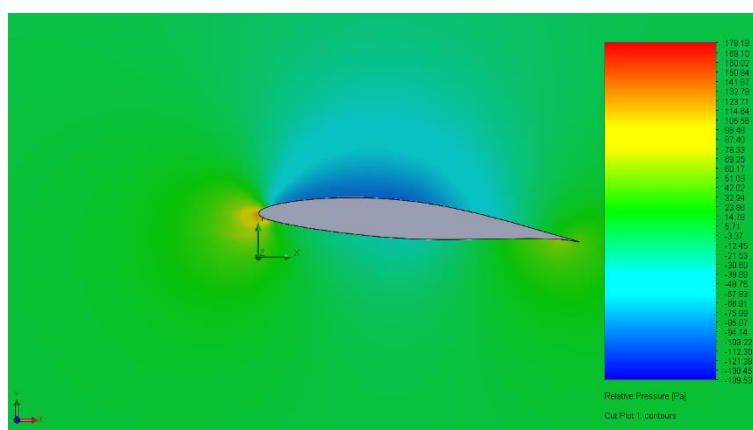


Figura 6.18 Distribuzione di pressione per un profilo alare (incidenza 5°) [CFD]

Per semplificare le fasi successive di interpolazione e confronto, i valori di pressione vengono convertiti in coefficienti di pressione. L'interpolazione dati viene effettuata mediante uno script MATLAB, che deriva da quello già descritto per il riflettore, ma opportunamente modificato per poter utilizzare i coefficienti di pressione. Il metodo di interpolazione adottato rimane quello dei minimi quadrati e le funzioni ottenute descriveranno la distribuzione dei coefficienti di pressione per dorso e ventre del profilo, a partire dai valori discreti ottenuti dall'analisi CFD per la sezione del modello a $z = 0.5$. Da questi sarà possibile effettuare il confronto con i risultati teorici forniti da Xfoil, al fine di valutare la coerenza del metodo sviluppato.

6.6.4 Analisi aerodinamica con XFOIL

Xfoil è un programma sviluppato per l'analisi aerodinamica dei profili alari in campo subsonico. È possibile andare ad effettuare: [43]

- Analisi viscosa e non viscosa di un profilo alare;
- Progettazione e modifica di profili alari;
- Memorizzazione delle geometrie dei profili;
- Rappresentazione delle geometrie, delle distribuzioni di pressioni e delle polari del profilo.

Per ottenere i risultati da confrontare con l'analisi CFD svolta si eseguono le seguenti operazioni:

- Definire la geometria del profilo, importandone le coordinate normalizzate, salvate in un file con estensione .dat;
- Definire il flusso d'aria e le condizioni operative:
 - Numero di Reynolds, calcolato a partire dalle condizioni del flusso considerate, pari a $1.3 \cdot 10^6$;
 - Angolo di incidenza: 0° e 5° ;
- Avviare il calcolo;

- Visualizzazione dei risultati ed esportazione della distribuzione dei coefficienti di pressione lungo il profilo.

I risultati che si ottengono da queste simulazioni sono mostrati in figura:

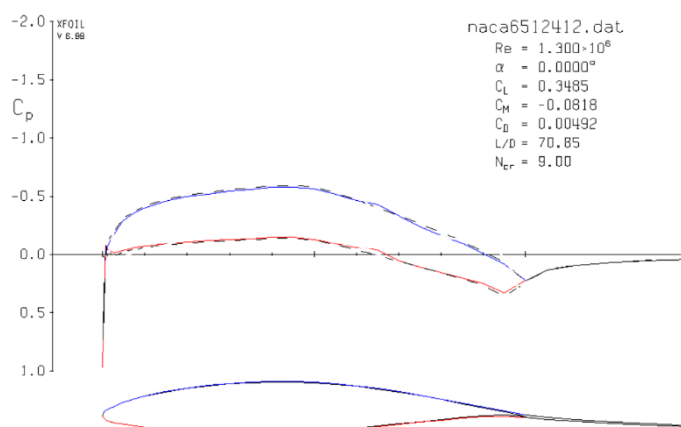


Figura 6.20 Andamento del C_p per profilo con incidenza nulla (Xfoil)

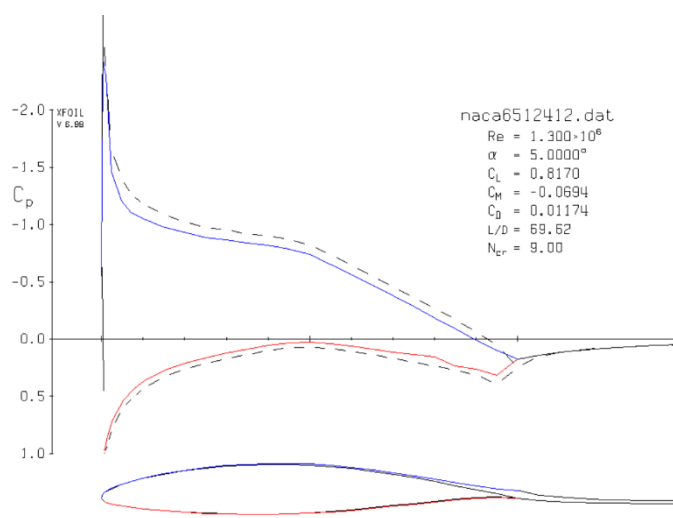


Figura 6.19 Andamento del C_p per profilo con incidenza 5° (Xfoil)

6.6.5 Confronto dei risultati e validazione del modello

Al fine di validare il metodo di elaborazione sviluppato nei paragrafi precedenti, si confrontano i risultati ottenuti dai ragionamenti teorici e dall'analisi con Xfoil con quelli derivanti dall'analisi CFD, effettuata in Solidworks Flow Simulation, e dai risultati dell'interpolazione in Matlab, applicati al modello FEM in Patran.

Il primo confronto effettuato riguarda l'andamento del coefficiente di pressione lungo la corda del profilo alare NACA 65(1) -2412. Nel caso ad incidenza nulla, i risultati CFD mostrano una distribuzione coerente con quanto atteso:

- Sul bordo d'attacco si osserva una zona di sovrappressione ($C_p > 0$)
- Lungo il dorso si sviluppa una zona di depressione ($C_p < 0$)
- Lungo il ventre la pressione rimane positiva ma con valori inferiori rispetto alla sovrappressione locale
- Verso il bordo di fuga il coefficiente di pressione tende gradualmente a zero, indicando il ritorno della pressione alla condizione di flusso indisturbato.

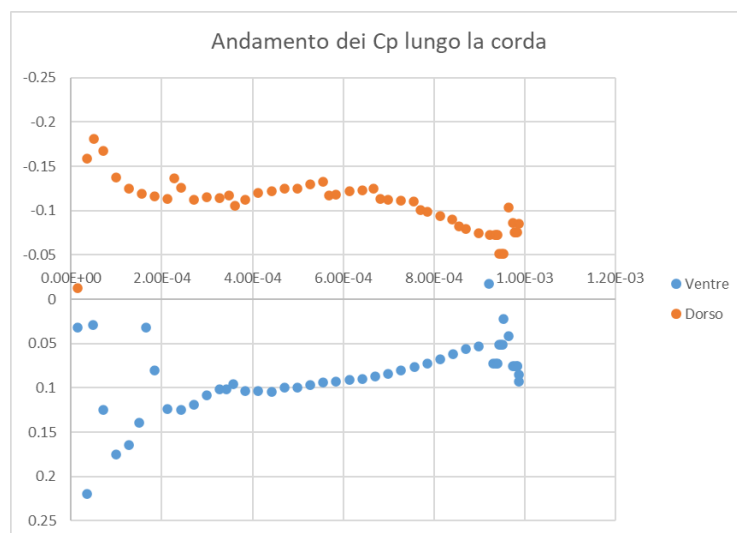


Figura 6.21 Andamento dei coefficienti di pressione ricavato dall'analisi CFD del profilo con incidenza pari a 5°

Questa distribuzione viene confrontata con i risultati ottenuti tramite Xfoil, permettendo di verificare e validare gli andamenti del campo di pressione calcolati mediante la simulazione CFD. Per poter confermare la validità del metodo sviluppato, viene verificata anche la fase di import dei campi spaziali di pressione in Patran. A tal fine è stato quindi realizzato un modello FEM del profilo alare, importato da Solidworks tramite file .STEP, sul quale è stato applicato il field spaziale dei coefficienti di pressione, ottenuto dall'interpolazione e distinto tra dorso e ventre.

Per semplificare la visualizzazione dei risultati, il campo di pressione è stato applicato unicamente alla prima riga di elementi della mesh, come illustrato in figura.

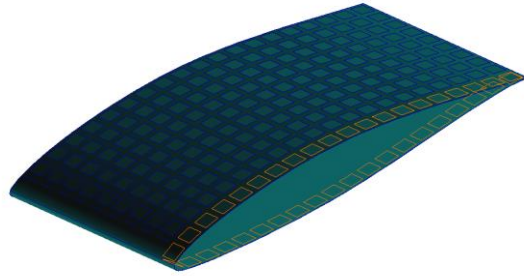


Figura 6.22 Dettaglio Mesh della struttura, con evidenza della riga di elementi su cui verrà applicato il campo

Dalle figure 6.23 e 6.24 è possibile confermare che anche le fasi di definizione del campo spaziale e applicazione del carico sul profilo, risultano coerenti con quanto atteso dall'analisi CFD.

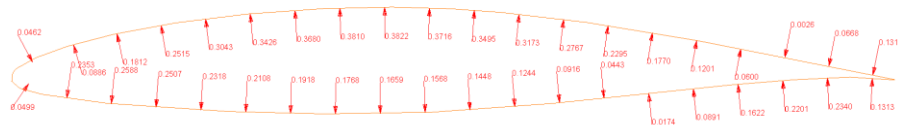


Figura 6.24 Campo di pressione (C_p) applicato al profilo con incidenza nulla

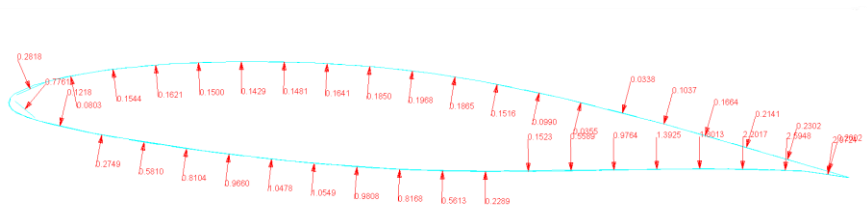


Figura 6.23 Campo di pressione (C_p) applicato al profilo con incidenza 5°

Considerando questa verifica finale, insieme ai confronti effettuati tra CFD e Xfoil, si può affermare che il metodo sviluppato:

- Garantisce una corretta riproduzione della distribuzione di pressione lungo la corda del profilo, sia dal punto di vista dell'interpolazione, sia da quello dell'applicazione dei campi di pressione sul modello FEM.

- Può essere ritenuto applicabile all'analisi del riflettore, garantendo una base solida per la definizione dei carichi aerodinamici da applicare al modello ad elementi finiti.

6.7 Applicazione dei campi di pressione in Patran

In questo paragrafo vengono illustrati i campi di pressione applicati sul modello FEM, realizzato in Patran, fondamentali per lo studio del comportamento strutturale dell'antenna in presenza di vento. A partire dalle equazioni ottenute nella fase di interpolazione, descritta nel paragrafo 6.5, per ciascuna configurazione dell'antenna sono stati creati i campi spaziali, necessari per applicare il carico di pressione alla superficie del riflettore ed effettuare l'analisi strutturale. Una volta creato il campo, si definisce un carico di pressione agente sugli elementi FEM bidimensionali del modello, e nello specifico sulla *Top Surface* di ogni elemento. Di seguito sono riportate le distribuzioni di pressione relative alle diverse configurazioni del riflettore. È importante sottolineare che i valori negativi osservati corrispondono a zone di depressione sulla superficie, mentre i valori positivi rappresentano zone di sovrappressione.

- Elevazione 0°:

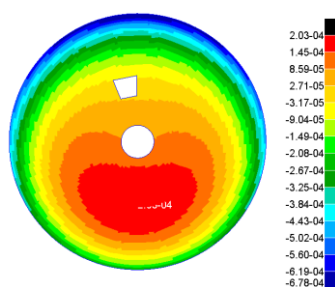


Figura 6.25 Campo di pressione risultante sul riflettore (0°)

- Elevazione 30°:

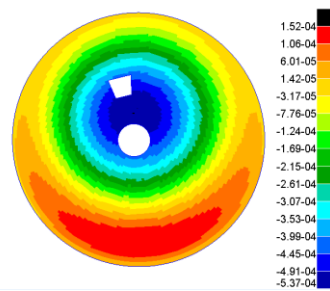


Figura 6.26 Campo di pressione risultante sul riflettore (30°)

- Elevazione 45°:

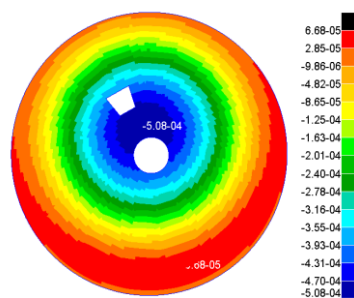


Figura 6.27 Campo di pressione risultante sul riflettore (45°)

- Elevazione 60°:

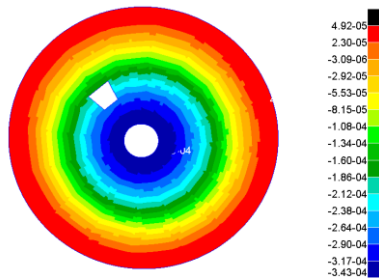


Figura 6.28 Campo di pressione risultante sul riflettore (60°)

- Elevazione 90°:

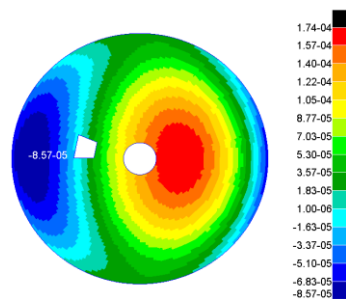


Figura 6.29 Campo di pressione risultante sul riflettore (90°)

6.8 Riepilogo della procedura di elaborazione dati

In questo capitolo è stato sviluppato e validato un metodo di post-processing per la definizione dei campi di pressione, ottenuti a partire dai risultati di analisi CFD eseguite sia sul riflettore che su un modello di prova basato su un profilo alare. La procedura, come è stato descritto, basata su interpolazione ai minimi quadrati, è stata validata utilizzando come caso di prova il profilo NACA 65(1)-2412. I risultati ottenuti sono stati messi a confronto con le previsioni teoriche e con i valori calcolati tramite il software Xfoil. L'analisi dei dati ottenuti dall'analisi CFD e la corretta importazione dei campi di pressione sul modello FEM hanno permesso di confermare l'affidabilità del metodo, che risulta idoneo a descrivere la distribuzione di pressione sulle superfici.

Validato il modello si procede con l'applicazione dei carichi sulla struttura per i diversi casi di studio considerati.

7 Casi di carico e analisi

7.1 Definizione dei carichi agenti sull'antenna

Nello studio del comportamento meccanico di strutture ingegneristiche, la corretta definizione dei carichi agenti rappresenta una fase fondamentale per garantire sicurezza ed efficienza della struttura. A livello europeo, il principale riferimento normativo è costituito dagli Eurocodici, un insieme di norme tecniche sviluppate per uniformare le pratiche costruttive nei Paesi dell'Unione Europea. In particolare, l'Eurocodice 1 (EN 1991-1) fornisce le linee guida per la determinazione delle azioni sulle strutture, suddividendole in tre categorie principali: [46]

- carichi permanenti, come il peso proprio della struttura;
- carichi variabili, come vento, neve, o altri carichi dovuti a condizioni ambientali;
- carichi eccezionali, quali incendi o esplosioni.

Queste norme si traducono in un sistema di regole che, tramite modelli matematici, fattori di sicurezza e combinazioni di carico, consentono di studiare il comportamento delle strutture in diverse condizioni operative, garantendo il rispetto dei requisiti prestazionali e di sicurezza. Seguendo la normativa di riferimento, lo studio di un'antenna parabolica dovrebbe includere l'analisi di tutte le combinazioni di carico previste dall'Eurocodice, tenendo conto delle condizioni più gravose e dei relativi fattori di sicurezza.

Tuttavia, nel presente lavoro, che ha carattere preliminare ed esplorativo, si è scelto di semplificare il problema considerando solo due contributi principali: il peso proprio della struttura e l'azione del vento costante in condizioni statiche. Questa scelta è motivata dalle peculiarità delle antenne paraboliche. Da un lato, il peso proprio rappresenta un carico permanente fondamentale, che influisce sia sul dimensionamento degli elementi strutturali di sostegno sia sulla stabilità complessiva; dall'altro, il vento rappresenta la principale azione variabile agente

sulla struttura, il cui effetto è influenzato dalla geometria del riflettore e dalle pressioni aerodinamiche che ne derivano. A differenza di altri carichi variabili o accidentali, infatti, il vento è sempre presente su antenne installate all'aperto, con intensità che dipendono dalle condizioni climatiche del sito di installazione.

L'analisi condotta, considerando esclusivamente i due carichi descritti, permette di studiare in prima approssimazione il comportamento strutturale dell'antenna, identificando le zone maggiormente sollecitate e fornendo un quadro preliminare degli spostamenti e delle tensioni che caratterizzano l'antenna. In questa fase, l'obiettivo dell'analisi non è ottenere risultati definitivi ai fini progettuali, ma verificare la robustezza del modello realizzato, calibrare il metodo di analisi e identificare le configurazioni più critiche.

I risultati ottenuti da questa analisi preliminare costituiscono una base di partenza per sviluppi futuri, nei quali saranno presi in considerazione scenari più complessi, come gli effetti dinamici del vento, le combinazioni di carico previste dalla normativa e le condizioni di esercizio legate ai movimenti operativi dell'antenna.

7.2 Definizione dei casi di carico

Una volta individuati i principali carichi agenti sull'antenna, è necessario definire i casi di carico, ovvero le diverse condizioni operative che saranno oggetto di analisi. Tali scenari devono essere rappresentativi del funzionamento dell'antenna, così da poter valutare correttamente il comportamento strutturale in termini di spostamenti e tensioni. Per l'antenna oggetto di studio, come evidenziato nei capitoli precedenti, l'attenzione si è concentrata sul comportamento della struttura al variare dell'angolo di elevazione, definito come angolo compreso tra l'asse della parabola e il piano orizzontale.

Sono stati, quindi, considerati i seguenti scenari:

- Elevazione a 0° : l'antenna è orientata verso l'orizzonte. In questa posizione, a parità di condizioni esterne, la superficie esposta al vento è massima, rendendo lo scenario il più gravoso dal punto di vista aerodinamico.
- Elevazione a 30° : questa configurazione intermedia è tipica del puntamento verso satelliti a bassa quota.
- Elevazione a 45° : questo scenario rappresenta un buon compromesso tra visibilità celeste e resistenza aerodinamica.
- Elevazione a 60° : la superficie esposta al vento è ridotta, ma la distribuzione dei carichi comporta una concentrazione degli sforzi sugli elementi di collegamento tra riflettore e supporto.
- Elevazione a 90° : l'antenna è orientata allo zenith (puntando verso l'alto). In questo caso la superficie esposta al vento è minima e le sollecitazioni aerodinamiche sono inferiori rispetto a tutti altri scenari considerati.

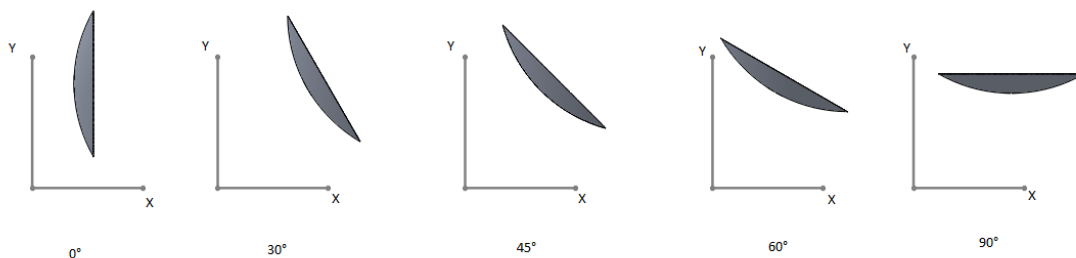


Figura 7.1 Schema delle configurazioni dell'antenna analizzate

La scelta di tali configurazioni consente di coprire l'intero intervallo operativo della struttura. I casi limite, angolo di elevazione pari a 0° e 90° , rappresentano le condizioni di massima e minima superficie esposta al vento. Le posizioni intermedie risultano, invece, fondamentali per studiare il comportamento dell'antenna nelle normali condizioni di esercizio.

7.3 Definizione dei Load Case in Patran

Dopo aver individuato gli scenari operativi di riferimento, si è proceduto con l'implementazione dei casi di carico nell'ambiente di calcolo. Per garantire la corretta gestione delle diverse configurazioni, si è predisposto un file Patran distinto per ciascun angolo di elevazione considerato. Il modello FEM si mantiene invariato sia dal punto di vista geometrico che della discretizzazione, l'unica operazione effettuata è la rotazione della struttura attorno all'asse z, così da simulare i diversi orientamenti dell'antenna. Questa scelta permette di trattare ciascuno scenario come indipendente dagli altri e facilita la comparazione dei risultati tra le varie configurazioni.

Prima di procedere con l'analisi, è stato necessario definire correttamente i vincoli, per garantire una riproduzione realistica del comportamento meccanico della struttura. Nel caso in esame, i vincoli sono stati applicati alla base dell'Hub, punto di collegamento con il piedistallo di supporto al suolo, imponendo le condizioni di incastro totale (annullamento di tutte le traslazioni e le rotazioni). In Patran, questi vincoli vengono definiti nella sezione *Load/BCs* → *Displacement*, imponendo i vettori di spostamento e rotazione nulli. [29]

Sempre all'interno della sezione di definizione dei carichi, sono stati applicati i seguenti carichi:

- Peso proprio: definito tramite la sottosezione "*Inertial Load*", inserendo l'accelerazione gravitazionale g, in direzione y negativa. In particolare, è stato utilizzato il vettore $\langle 0 \ -9810 \ 0 \rangle$, espresso nelle unità di misura del modello FEM, a partire dal quale il software calcola la forza peso sull'intera struttura.
- Pressione del vento statico: come descritto nel capitolo 6, i dati ottenuti dalle simulazioni CFD vengono elaborati e importati in Patran come campi spaziali di carico, applicati esclusivamente alla superficie del riflettore, così da riprodurre l'effetto aerodinamico del vento con velocità pari a 72 Km/h.

Definiti vincoli e carichi, sono stati implementati i seguenti casi di carico (Load Case):

- Solo Gravità: include i vincoli applicati all'Hub e il carico inerziale dovuto al peso proprio della struttura.
- Gravità e Vento: combina i vincoli con il peso proprio della struttura e con il campo di pressione aerodinamica.

Questa suddivisione consente di studiare separatamente i contributi dei diversi carichi e di valutare in quale misura l'azione del vento influenzi spostamenti e tensioni, rispetto al solo peso proprio.

7.4 Definizione dell'analisi FEM e scelta del solver

Per poter proseguire con l'analisi, una volta definiti carichi e vincoli, si procede impostando la tipologia di analisi da eseguire, gli output richiesti e il formato del file di risultato. La tipologia di analisi selezionata è quella statica lineare, che consente di valutare la risposta della struttura in regime elastico, assumendo proporzionalità tra sollecitazioni e deformazioni, trascurando gli effetti di tipo non lineare, quali instabilità locale, grandi deformazioni o plasticizzazione dei materiali.

Per l'esecuzione è stato adottato il solver MSC Nastran, integrato con l'ambiente Patran, in grado di risolvere il sistema di equazioni matriciali che mette in relazione carichi esterni, spostamenti nodali e proprietà di rigidità degli elementi. L'output generato include le principali grandezze necessarie per caratterizzare il comportamento della struttura:

- Spostamenti nodali: rappresentano le deformazioni della struttura sotto l'azione dei carichi e sono fondamentali per verificare che l'antenna non subisca deformazioni tali da compromettere il puntamento del segnale.
- Tensore degli sforzi: descrive la distribuzione delle tensioni interne agenti sugli elementi.

- Stress agenti sugli elementi trave: importanti per valutare gli sforzi che agiscono sugli elementi di supporto.
- Reazioni vincolari: forze trasmesse ai vincoli, che permettono di andare a valutare i carichi che il sistema di ancoraggio dev'essere in grado di assorbire.

L'insieme di questi output fornisce una visione completa del comportamento strutturale dell'antenna parabolica, consentendo sia una valutazione preliminare della robustezza globale sia l'individuazione delle zone maggiormente sollecitate.

7.5 Visualizzazione e interpretazione dei risultati

Come già descritto, l'intero processo di analisi può essere diviso nelle seguenti fasi:

1. Pre-processing in Patran: definizione di geometria, materiali, mesh, vincoli e carichi.
2. Generazione del file di input: creazione automatica del file input in formato bdf, contenente tutte le informazioni necessarie al solver.
3. Esecuzione del solver (Nastran): fase di calcolo finalizzata alla risoluzione del sistema di equazioni e alla determinazione delle grandezze di output richieste.
4. Produzione dei file di output, tra cui:
 - a. F06: file di testo che contiene gli output dell'analisi e i messaggi diagnostici;
 - b. F04: file di riepilogo utile per il debug
 - c. Ulteriori file di log che contengono registri di esecuzione e verifiche della corretta risoluzione.
5. Post-processing in Patran: visualizzazione e interpretazione dei risultati tramite mappe e grafici delle grandezze calcolate.

Completate tutte le fasi di preparazione e calcolo, descritte fino ad ora, si procede con la visualizzazione dei risultati per ciascun caso di carico e per ogni condizione operativa considerata. Nel dettaglio, vengono realizzate le mappe degli spostamenti ottenuti prima per il caso che considera la sola gravità e poi per il caso combinato gravità + vento (72Km/h).

Per lo scenario di carico che considera esclusivamente il peso proprio della struttura, i risultati sono i seguenti:

- Elevazione 0°: spostamento massimo ottenuto pari a 0.601mm, osservabile intorno al punto focale (estremità dell'illuminatore), causato dalla deformazione della struttura sottostante e dalla forza di gravità che agisce in direzione verticale.

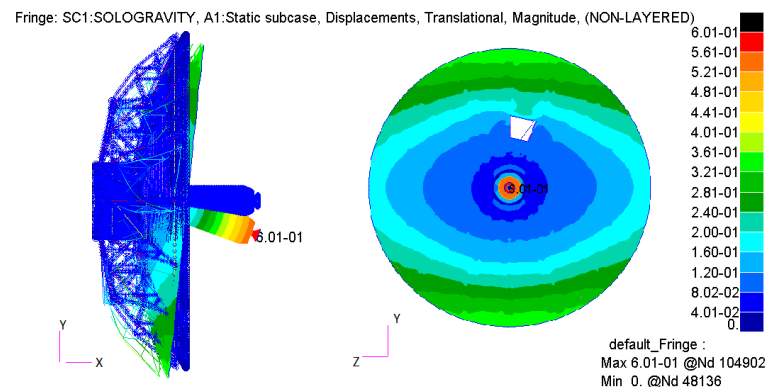


Figura 7.2 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (0°)

- Elevazione 30°: spostamento massimo ottenuto pari a 0.524 mm, sempre localizzato nell'intorno del punto focale.

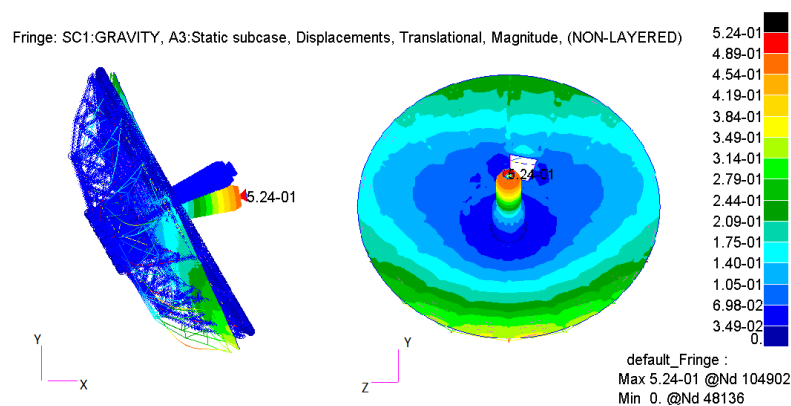


Figura 7.3 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (30°)

- Elevazione 45° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.486 mm, osservabile sul punto focale, ma di intensità minore rispetto ai casi precedenti.

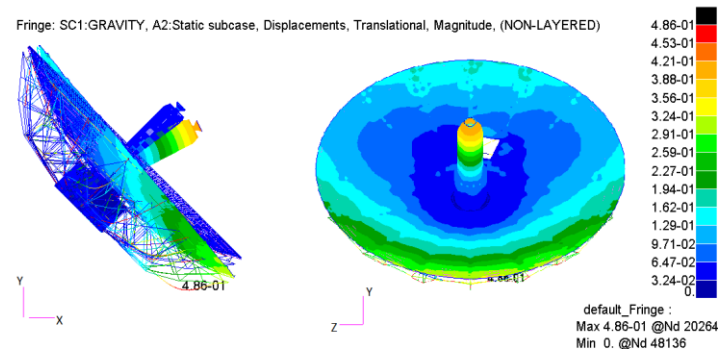


Figura 7.4 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (45°)

- Elevazione 60° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.457 mm, più contenuto rispetto agli spostamenti già visti nei casi precedenti.

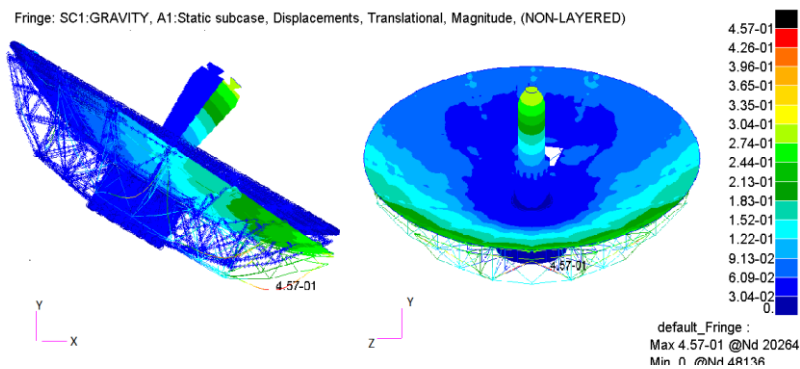


Figura 7.5 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (60°)

- Elevazione 90° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.311 mm, localizzato sul riflettore, dovuto all'effetto di gravità agente sulla struttura.

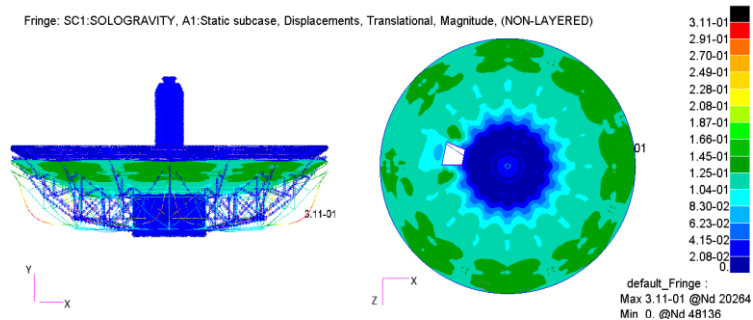


Figura 7.6 mappa degli spostamenti per il caso solo gravità (90°)

Per lo scenario di carico che considera, invece, la combinazione tra peso proprio e pressione aerodinamica, si avrà:

- Elevazione 0° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.99 mm, osservabile nella parte superiore del riflettore dovuta alla pressione aerodinamica agente sulla struttura.

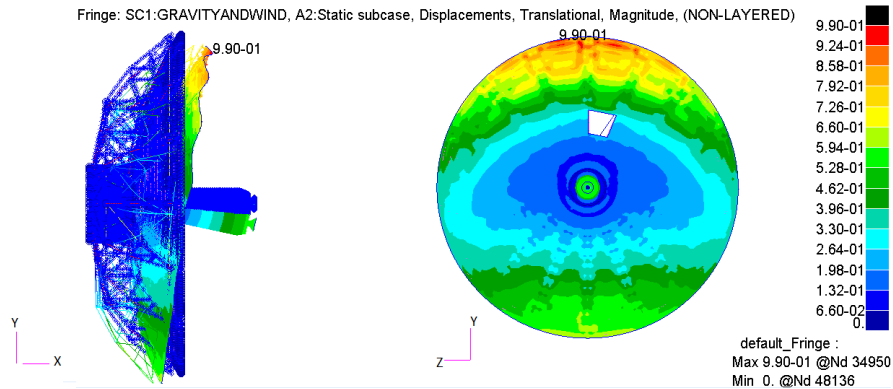


Figura 7.7 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (0°)

- Elevazione 30° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.851 mm, localizzato nella zona della botola del riflettore.

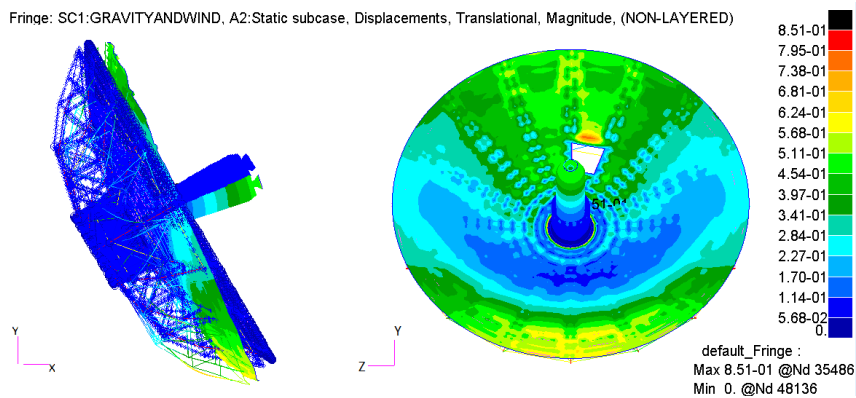


Figura 7.8 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (30°)

- Elevazione 45° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.813 mm, osservabile in una posizione analoga al caso precedente.

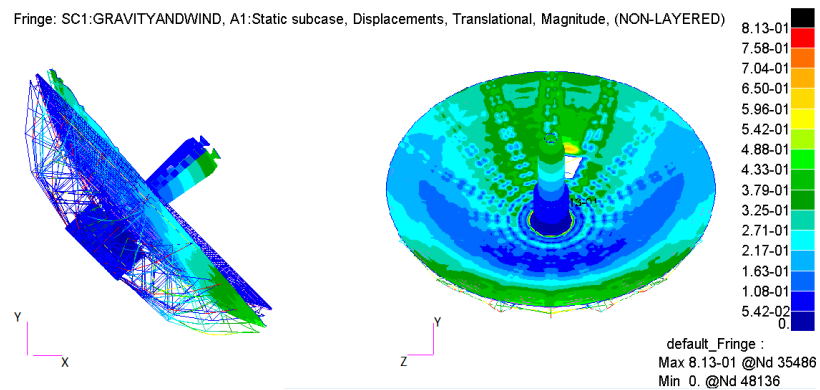


Figura 7.9 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (45°)

- Elevazione 60° : spostamento massimo ottenuto pari a 0.707 mm, osservabile nella zona di interfaccia tra riflettore e feedcone.

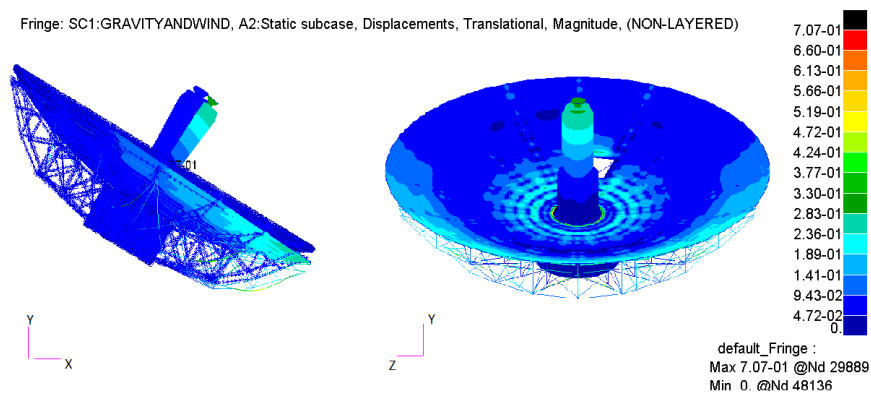


Figura 7.10 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (60°)

- Elevazione 90°: spostamento massimo ottenuto pari a 0.388 mm, osservabile sulla struttura di supporto del riflettore.

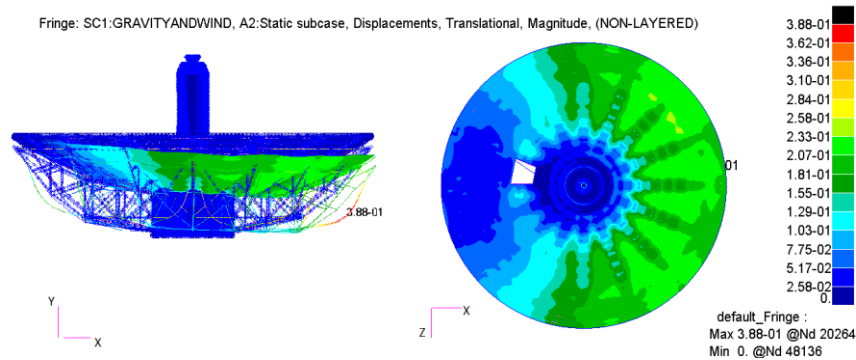


Figura 7.11 mappa degli spostamenti per il caso gravità e vento (90°)

Oltre gli spostamenti, sono stati valutati anche gli sforzi agenti sulla struttura, utili per stimare i coefficienti di sicurezza per le singole parti. Nella tabella 4 riepilogativa sottostante sono riportati, per ciascuna configurazione analizzata, i valori massimi di:

- Spostamenti nodali
- Tensioni di Von Mises
- Tensioni assiali sugli elementi trave
- Tensioni di flessione delle barre

Tali valori rappresentano i risultati più significativi dell'analisi FEM preliminare e consentono di avere un quadro sintetico delle condizioni più gravose per ogni scenario considerato.

Angolo di elevazione [°]	Caso di studio	Spostamento massimo [mm]	Tensione di Von Mises massima [Mpa]	Bar Stresses (assiale + flessionale) [Mpa]
0	Solo Gravità	0.601	13.1	4.03
	Gravità + Vento	0.990	13.1	6.58
30	Solo Gravità	0.524	12.6	3.06
	Gravità + Vento	0.851	12.6	5.51
45	Solo Gravità	0.486	11.1	2.67
	Gravità + Vento	0.813	11.1	4.24
60	Solo Gravità	0.457	8.73	2.14
	Gravità + Vento	0.707	6.55	2.25
90	Solo Gravità	0.311	2.6	1.95
	Gravità + Vento	0.388	3.02	2.6

Tabella 4 Riepilogo risultati analisi FEM

7.6 Considerazioni finali

L'analisi FEM condotta ha permesso di valutare preliminarmente il comportamento dell'antenna parabolica sotto l'azione combinata di peso proprio e vento statico.

I principali risultati mostrano che:

- Lo scenario più critico corrisponde al caso con angolo di elevazione a 0°, in cui la pressione del vento agisce sulla superficie massima del riflettore, inducendo gli spostamenti più elevati (pari a 0.99 mm).
- Le tensioni massime risultano, in ogni caso, inferiori ai valori di snervamento dei materiali, garantendo un adeguato margine di sicurezza strutturale.

È importante sottolineare che i risultati ottenuti derivano da un'analisi semplificata, limitata ai soli carichi statici principali. Sono stati trascurati sia gli effetti dinamici del vento sia le combinazioni di carico più articolate, previste da

normativa. Per questo motivo, l'analisi deve essere considerata preliminare; ciononostante, essa fornisce una base solida per comprendere il comportamento globale della struttura e per impostare le successive analisi di dettaglio.

Deformazioni e tensioni agenti sulla struttura rappresentano la base necessaria valutare due parametri funzionali fondamentali, introdotti nel Capitolo 2, che caratterizzano un'antenna parabolica: de-pointing e RMS delle deformazioni superficiali del riflettore. Questi indicatori permettono di collegare direttamente i risultati dell'analisi strutturale alle prestazioni funzionali del sistema in analisi.

Infine, i risultati ottenuti rappresentano un punto di partenza per sviluppi futuri, che dovranno includere:

- Analisi degli effetti dinamici del vento;
- Valutazioni di combinazioni di carico complete;
- Integrazione delle condizioni operative legate alla movimentazione dell'antenna.

8 Conclusioni

8.1 Sintesi del lavoro svolto

La presente tesi ha avuto come obiettivo principale lo studio preliminare del comportamento strutturale di un'antenna parabolica, con particolare attenzione agli effetti dei carichi statici principali agenti sulla struttura. In particolare, l'analisi si è focalizzata sulla valutazione degli spostamenti e delle tensioni generate dal peso proprio della struttura e dall'azione del vento statico.

Il lavoro è stato condotto seguendo un approccio articolato in diverse fasi. In primo luogo, è stato definito il modello agli elementi finiti, effettuando le necessarie ipotesi semplificative volte a trovare il giusto compromesso tra tempi di calcolo e accuratezza dei risultati. Successivamente, sono stati identificati i principali carichi agenti e definiti i casi di carico in funzione dell'angolo di elevazione dell'antenna, considerando cinque posizioni significative comprese tra 0° e 90° , al fine di coprire l'intero intervallo operativo della struttura. In seguito, i casi di carico sono stati implementati nell'ambiente di calcolo Patran e, utilizzando il solver Nastran, si è effettuata l'analisi FEM. I risultati ottenuti hanno permesso di valutare gli spostamenti nodali e le tensioni interne alla struttura, fornendo un quadro preliminare del comportamento meccanico dell'antenna.

In sintesi, la metodologia adottata ha consentito di realizzare un modello FEM affidabile, capace di evidenziare le zone maggiormente sollecitate e di fornire indicazioni preliminari sulle prestazioni funzionali dell'antenna, rappresentando una base solida per analisi più approfondite e sviluppi futuri.

8.2 Risultati principali

L'analisi condotta ha permesso di identificare i comportamenti più rilevanti della struttura, sotto le condizioni di carico considerate.

Tra i risultati principali:

- Scenario più critico: il caso di carico che valuta l'azione combinata di peso proprio della struttura e forza generata dal vento sul riflettore con antenna orientata all'orizzonte (angolo di elevazione 0°) risulta il più gravoso. In questa configurazione si registrano gli spostamenti maggiori.
- Influenza dei carichi: la riduzione dell'effetto aerodinamico con l'aumentare dell'angolo di elevazione conferma la forte dipendenza della risposta strutturale dall'orientamento dell'antenna.
- Distribuzione degli sforzi: dalle mappe delle tensioni è emerso che le componenti maggiormente sollecitate sono quelle della struttura di supporto (centine e controventi), pur rimanendo sempre al di sotto dei limiti di sicurezza, con adeguati margini rispetto al carico di snervamento.
- Comportamento funzionale dell'antenna: i risultati FEM costituiscono la base per la valutazione di parametri funzionali fondamentali, quali de-pointing e RMS delle deformazioni superficiali, essenziali per garantire la precisione del puntamento e le prestazioni complessive del sistema di ricezione/trasmissione.
- Validità della metodologia: nonostante le ipotesi semplificative adottate e l'analisi limitata a condizioni statiche, il modello FEM si è dimostrato robusto e coerente, fornendo informazioni utili per la comprensione del comportamento globale della struttura.

8.3 Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti forniscono un quadro preliminare del comportamento strutturale dell'antenna parabolica, ma devono essere interpretati alla luce dei limiti introdotti dalle ipotesi adottate.

L'analisi ha considerato esclusivamente il peso proprio e la pressione del vento statico, tralasciando altri carichi previsti dalla normativa, come neve, azioni accidentali o effetti dinamici del vento. Inoltre, l'approccio è stato limitato a un'analisi lineare, trascurando fenomeni non lineari. Ulteriori semplificazioni hanno riguardato la modellazione geometrica, che non ha riprodotto nel dettaglio tutte le complessità della struttura reale. Infine, sono state considerate solo configurazioni statiche dell'antenna, trascurando le condizioni dinamiche legate al suo movimento operativo. Nonostante queste limitazioni, il lavoro svolto ha permesso di affrontare in maniera sistematica lo studio del comportamento meccanico di un'antenna parabolica, dalla definizione del modello FEM fino all'analisi dei carichi più significativi. L'approccio adottato ha fornito una panoramica chiara sulle sollecitazioni e sugli spostamenti della struttura, identificando le configurazioni più critiche e le zone maggiormente sollecitate. È stato evidenziato che l'orientamento a 0° rappresenta lo scenario più gravoso, e che all'aumentare dell'angolo di elevazione, l'effetto aerodinamico diminuisce progressivamente fino a diventare trascurabile a 90° .

In prospettiva futura, sarà necessario ampliare il campo di indagine a scenari più complessi e realistici, includendo le combinazioni di carico complete previste dalle normative europee e le condizioni di esercizio associate alla movimentazione dell'antenna. Un ulteriore passo sarà quello di approfondire lo studio dei parametri funzionali, collegando i risultati strutturali alla qualità del segnale trasmesso o ricevuto. Sarà rivolta particolare attenzione anche alle forze di reazione sui vincoli, che costituiscono un dato fondamentale per l'analisi dell'intero sistema antenna-piedistallo. Una possibile analisi futura sarà estesa anche alla verifica strutturale del piedistallo e al dimensionamento delle strutture di ancoraggio al suolo, al fine di garantire stabilità, sicurezza e affidabilità

dell'intera struttura. L'integrazione di questi aspetti permetterà di affinare ulteriormente il modello sviluppato, trasformando le analisi preliminari in uno strumento completo di supporto alla progettazione e alla validazione di antenne paraboliche, in grado di soddisfare i requisiti stringenti in termini di prestazioni e sicurezza.

Bibliografia

- [1] [Online]. Available: <https://datacalculus.com/en/blog/satellite-telecommunications/satellite-communications-engineer/satellite-ground-station-design-a-comprehensive-guide-for-satellite-communications-engineers>.
- [2] [Online]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/it/antenne-paraboliche/>.
- [3] [Online]. Available: <https://antechspace.com/>.
- [4] F. Granelli, *Corso di "introduzione alle comunicazioni mobili" - Comunicazioni satellitari*, Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione (unitn).
- [5] A. Zaim, *Understanding the Physics and Functioning of Parabolic Antennas: A Concise Overview*.
- [6] «You Math,» [Online]. Available: <https://www.youmath.it/domande-a-risposte/view/6101-fuoco-parabola.html>.
- [7] T. G. A. Stutzman W.L, *Antenna Theory and Design*, Wiley.
- [8] AriParma, «Paraboloidi,» [Online]. Available: <https://www.ariparma.it/risorse/articoli/Paraboloidi.pdf>.
- [9] P. S. Ashokbhai, *ANALYSIS OF ANTENNA STRUCTURE*.
- [10] E. Satellite, «Antenne paraboliche,» [Online]. Available: <http://electronic-satellite.com/PARABOLA/index.htm>.
- [11] T. edu, «Teoria dell'antenna - Riflettore parabolico,» [Online]. Available: <https://tutorial.edu.lat/pub/antenna-theory/antenna-theory-parabolic-reflector/teoria-dell-antenna-riflettore-parabolico>.
- [12] MathWorks, «Cassegrain antenna,» [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/antenna/ref/cassegrain.html>.

- [13] Mathworks, «Gregorian Antenna,» [Online]. Available:
<https://it.mathworks.com/help/antenna/ref/gregorian.html>.
- [14] J. A. L. Fernandez, *Present radiotelescopes: single-dish, interferometer and telescope networks*, 2009.
- [15] ITU, «ITU RADIO REGULATORY FRAMEWORK FOR SPACE SERVICES,» [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/ITU-Space_reg.pdf.
- [16] Italspazio(srl). [Online]. Available: <https://www.italspazio.com/it/su-quali-bande-viaggiano-le-frequenze-satellitari/>.
- [17] D. Microwave, «Guadagno delle antenne paraboliche,» [Online]. Available:
<https://www.dolphmicrowave.com/it/cose-il-guadagno-dellantenna-parabolica-come-calcolarlo-in-4-passaggi/>.
- [18] E. Ugochi, *Analysis Of Antenna Point Loss In SatelliteCommunication Link*, Department of Electrical/Electronic Engineering, Imo StateUniversity (IMSU), 2019.
- [19] G. Sumi, «A cosa serve un'antenna parabolica: In dettaglio,» [Online]. Available:
<https://groupsumi.it/blog/a-cosa-serve-unantenna-parabolica-in-dettaglio>.
- [20] E. Cenacchi, *Particolarità innovative, previsione delle prestazioni e suo utilizzo nei campi della ricerca avanzata in astronomia*, 2004.
- [21] M. Altavilla, *Analisi strutturale dell'impatto dell'installazione dei sistemi di bordo nella struttura primaria di un velivolo commerciale*, 2024.
- [22] T. R. L. Z. J. O.C. Zienkiewicz, *The Standard Discrete System and Origins of the Finite Element Method*, 2013.
- [23] B. K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.
- [24] Biblus, «Analisi FEM: cos'è il metodo degli elementi finiti,» [Online]. Available:
<https://biblus.acca.it/analisi-fem/>.

- [25] L. A. Terrizzi A.M., *Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti (FEM)*, 2023.
- [26] T. Luca, *Sviluppo ed implementazione dell'accoppiamento FEM-Peridinamica in ambiente Patran/Nastran*, 2024.
- [27] M. Bisin, *Ottimizzazione strutturale di un cerchione automobilistico con metodo BGM*, 2024.
- [28] F. CAD, «FEM Mesh,» [Online]. Available:
https://wiki.freecad.org/FEM_Mesh#Meshing_software.
- [29] Hexagon, «Patran e Nastran Product Documentation,» [Online]. Available:
<https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/Patran-Doc-Release-2023>.
- [30] T. Mattia, *Analisi agli elementi finiti del ponte anteriore di un mezzo telescopico*, 2019.
- [31] M. MFG, «Guida completa all'alluminio 6063-T6 e 6063-T5,» [Online]. Available:
<https://shop.machinemfg.com/it/comprehensive-guide-to-aluminum-6063-t6-and-6063-t5/>.
- [32] M. Andrea, *Progetto della struttura di supporto del sistema di propulsione per il satellite Microscope*, 2004.
- [33] F. C. Analyst, «Pillole Di FEM #5 - Analisi Modale - Quando l'analisi dinamica è semplice,» [Online]. Available: <https://www.fgcaeanalyst.com/post/analisi-modale>.
- [34] C. L. IITR, «Free-Free Modal Analysis,» [Online]. Available:
<https://computationalmechanics.in/free-free-modal-analysis/>.
- [35] E. R. A. University, «Bluff Body Flows,» [Online]. Available:
<https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/bluff-body-flows/>.
- [36] E. 3D, «METODO CFD: Fluidodinamica Computazionale,» [Online]. Available:
<https://www.engineering3d.it/metodo-cfd-fluidodinamica.html>.
- [37] I. p. industriale, «Introduzione all'Analisi CFD,» [Online]. Available:
<https://www.ilprogettistaindustriale.it/introduzione-allanalisi-cfd/>.

- [38] A. W. Hub, «Flusso laminare e flusso turbolento: spiegazione delle differenze chiave,» [Online]. Available: <https://aquaworldhub.com/it/flusso-laminare-vs-flusso-turbolento/>.
- [39] E. 3. Design, «SOLIDWORKS FLOW SIMULATION, cos'è e perchè utilizzarlo,» [Online]. Available: <https://www.ekasrl.it/2024/05/06/solidworks-flow-simulation-cose-e-perche-utilizzarlo/>.
- [40] FormaMe, «Analisi CFD di flusso esterno in Flow Simulation,» [Online]. Available: <https://www.formame.it/analisi-cfd-di-flusso-esterno-in-solidworks-flow-simulation/>.
- [41] A. Tools, «NACA 65(1)-412 (naca651412-il),» [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca651412-il>.
- [42] N. F., *Corso di Meccanica del volo - Portanza aerodinamica, profili ed ali*.
- [43] D. N. Carlo, *Corso di Aerodinamica degli aeromobili*.
- [44] G. Di Cicca, *Appunti di Aerodinamica*, 2023.
- [45] G. Cafiero, *Appunti di Gasdinamica*.
- [46] Il progettista Industriale, «Eurocodice: un salvagente per ingegneri strutturisti,» [Online]. Available: <https://www.ilprogettistaindustriale.it/eurocodice-un-salvagente-per-ingegneri-strutturisti/>.
- [47] G. Serra, *Una Soluzione Alternativa al Problema della Ricostruzione Olografica della Superficie delle Antenne a Riflettore da Dati in Far-Field o in Near-Field*, 2008 .
- [48] Oracle, «RMSE (Radice dell'errore quadratico medio),» [Online]. Available: https://docs.oracle.com/cloud/help/it/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_RMSE.htm.
- [49] M. Laura, «Approssimazione mediante il metodo dei minimi quadrati,» [Online]. Available: https://www.dm.unibo.it/~montelau/html/Lezione14-15_MC.pdf.
- [50] Facoltà di Ingegneria e Architettura, UniCa, *Determinazione delle matrici che caratterizzano le proprietà di una struttura*.

- [51] Forma Me, «Qualità della Mesh,» [Online]. Available: <https://www.formame.it/qualita-della-mesh-in-solidworks-simulation-vediamo-come-valutarla/>.
- [52] hiStructural, «Understanding RBE2 vs. RBE3 in NASTRAN,» [Online]. Available: <https://www.histructural.com/post/understanding-rbe2-vs-rbe3-in-nastran>.
- [53] «Science and Technology quality articles,» [Online]. Available: <https://readfast.in/the-differences-ansys-comsol-and-abacus-fea-software/>.

