



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



CTN01_00176_163601



TRIM

Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina

Analisi strutturale winch e progetto nuova campana

Sotto-Progetto	Alleggerimento	
Obiettivo Realizzativo	Studio di un sistema velico alleggerito per una unità da diporto di 70 m a vela	
Descrizione attività	Analisi strutturale winch e progetto nuova campana	
Tipo di documento	Rapporto Tecnico	
Codice del documento	SP.1-OR.1-D.2	
Data di emissione	28/02/2022	
Redazione	Andrea Corvi	 UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE



FINCANTIERI



AZIMUT BENETTI
GROUP





Titolo documento **Analisi strutturale winch e progetto nuova campana**

Codice documento SP.1-OR.1-D.2

Distribuzione Pubblico

Rev.	Data	Pagine	Redazione	Responsabile
0	28/02/2022	2+31	Andrea Corvi	Andrea Corvi

L'attività descritta nella presente pubblicazione è stata finanziata dal Progetto TRIM — Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina — coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dell'iniziativa dei Cluster Tecnologici Nazionali.

Indice

Elenco delle figure	2
Elenco delle tabelle	3
Sommario	4
1 Impostazione dell'analisi	5
1.1 Il winch SX 500 di Perini Navi	5
1.2 Il winch SX 500 di Perini Navi	6
1.3 Il modello FEM	12
1.4 Gestione dei contatti tra gli elementi	14
1.5 Vincoli del modello	14
1.6 Carichi applicati al modello	15
2 Risultati delle analisi	16
2.1 Basamento	16
2.2 Supporti laterali del tamburo	18
2.3 Tamburo di avvolgimento	19
3 Progetto di un tamburo in materiale composito	25
3.1 Verifica di resistenza	25
3.2 Analisi dei carichi di progetto sul tamburo Perini	26
3.3 Calcolo del laminato	29
4 Conclusioni	30
Riferimenti bibliografici	31

Elenco delle figure

1	Il winch SX 500 di Perini Navi.	5
2	Modello CAD realizzato.	6
3	Modello FEM in cui si evidenzia la <i>mesh</i> utilizzata.	13
4	Schema dei vincoli.	14
5	Punto di applicazione del carico (tiro della scotta).	15
6	Andamento degli spostamenti sul basamento.	16
7	Sollecitazioni di von Mises sul basamento.	17
8	Sollecitazioni di von Mises sul basamento.	17
9	Distribuzione dello stato di tensione di von Mises sui supporti del tamburo.	18
10	Individuazione dei punti maggiormente sollecitati.	18
11	Sollecitazioni di von Mises sul basamento.	19
12	Punto di applicazione del carico.	19
13	Stato di deformazione sul winch.	20
14	Distribuzione delle tensioni di von Mises sul winch con evidenziate le tensioni sul tamburo.	21
15	Stato di deformazione sul tamburo.	21
16	Stato di tensione sul tamburo.	22
17	Stato di tensione sul tamburo.	22
18	Stato di tensione sul tamburo.	23
19	Stato di tensione sul tamburo con evidenziata la sua struttura con i rinforzi.	23
20	Stato di tensione sul tamburo con evidenziata la sua struttura con i rinforzi.	24
21	Zone, indicate in rosso, in cui la tensione massima ammissibile del materiale viene superata.	24
22	Schema di carico dovuto all'avvolgimento del cavo sul tamburo.	25
23	Azione flessionale locale sul tamburo.	25
24	Schema di carico sul tamburo tenendo conto sia delle azioni di compressione che di flessione sul mantello.	26
25	Fattore relativo alla temperatura di esercizio (K_2).	28
26	Determinazione del fattore K_3 in funzione dei cicli di vita del winch.	28



Elenco delle tabelle

1	Componenti principali del winch SX 500.	7
2	Caratteristiche dell'analisi effettuata.	9
3	Caratteristiche dell'analisi effettuata.	9
4	Proprietà dei materiali considerati nei calcoli.	10



Sommario

Nell'ambito del Progetto TRIM il CNR-INM ha affidato al DIEF lo svolgimento di attività di ricerca che fanno riferimento al programma del Progetto "Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina" (TRIM) e si riferiscono in particolare allo sviluppo del Sotto-Progetto 1 (SP 1) "Alleggerimento". Questo si articola su sette Obiettivi Realizzativi (OR).

Le attività oggetto della presente convenzione sono inquadrare nell'OR 1.1 "Studio sistema velico alleggerito per una unità da diporto di 70 m a vela", nel cui ambito il DIEF è impegnato temi:

1.1.5 Analisi strutturale winch e progetto nuova campana

1.1.6 Individuazione materiali metallici e ceramici per inserti antiusura

Il presente rapporto tecnico è relativo all'attività 1.1.5.

1 Impostazione dell'analisi

1.1 Il winch SX 500 di Perini Navi

Attraverso un confronto con Perini Navi SpA, ugualmente coinvolta nel progetto, si è deciso di concentrare l'attenzione sull'ottimizzazione di un Captive Winch di produzione Perini Navi idoneo per imbarcazioni a vela di dimensioni superiori ai 60 metri.

Con l'incremento del numero di regate di superyacht e, parallelamente, con la crescita della richiesta di sistemi per l'easy sailing, le barche vengono spinte molto più duramente dai loro equipaggi che devono essere sempre meno numerosi. Questo ha comportato che lo sviluppo di sistemi di regolazione delle vele sempre più sofisticati e in grado di essere gestiti da equipaggi ridotti. In particolare per i superyacht a vela (anche superiori ai 60 metri di lunghezza fuori tutto, sono stati sviluppati verricelli da nascondere preferibilmente sottocoperta in grado di assorbire le scotte (captive winch).

L'avvento dei captive winch ha permesso ai superyacht di avere coperte sgombre senza creare intralci agli ospiti e dell'equipaggio, rendendolo più sicura la navigazione. Con i sistemi elettronici di controllo si è ora in grado di controllare la tensione delle drizze e delle scotte con pulsanti posizionati sulle consolle delle timonerie o anche attraverso connessioni *wifi* della barca.

L'oggetto dell'attività di ricerca è individuato da Perini Navi con la sigla SX 500 è descritto in Figura 1).

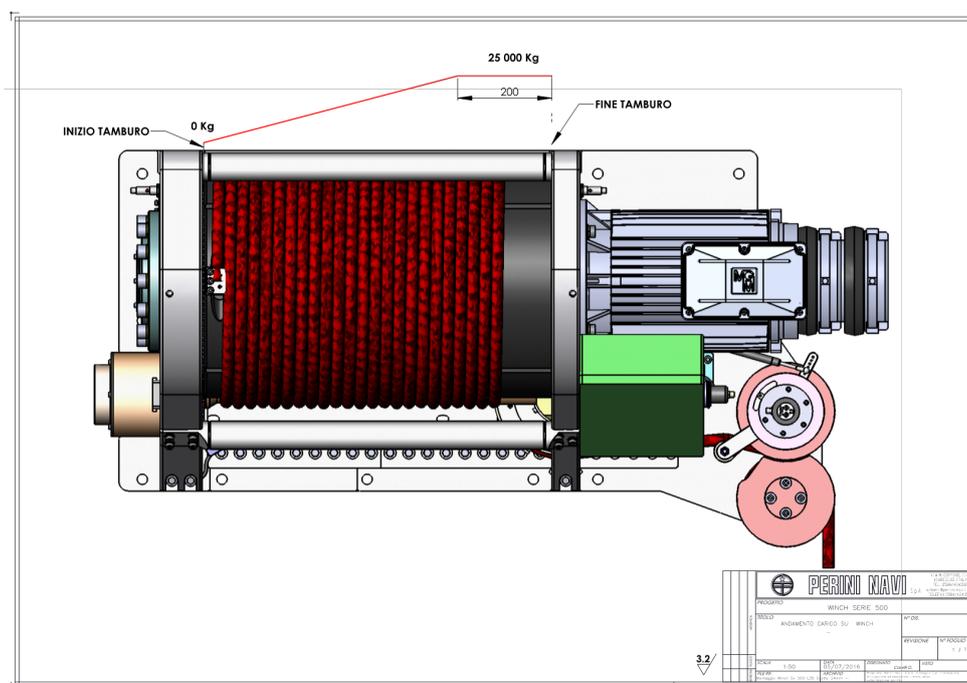


Figura 1: Il winch SX 500 di Perini Navi.

I disegni del winch sono stati forniti al DIEF da Perini Navi. Il meccanismo è composto da un tamburo su cui si avvolgono le cime, supportato da due montanti laterali vincolati ad un basamento. Sono inoltre elementi del winch una slitta guida-cima, dei distanziali e una carenatura.

1.2 Il winch SX 500 di Perini Navi

Partendo dal modello CAD (Figura 2) è stato possibile implementare un modello FEM utilizzando il software SOLIDWORKS® [1].

SOLIDWORKS è un software di disegno e progettazione tridimensionale parametrica, prodotto e commercializzato dalla Dassault Systèmes. Nasce come software appositamente dedicato per l'ingegneria meccanica ed è quindi particolarmente utile per la progettazione di apparati meccanici, anche complessi. Il software prevede la creazione di disegni 2D e 3D di solidi e superfici, attraverso un sistema geometrico di tipo parametrico e completamente personalizzabile. **SOLIDWORKS** consente di portare disegni da 2 a 3 dimensioni e viceversa, con semplici operazioni, importando ed esportando file in formati DWG, DXF [2].

Il software è inoltre in grado di importare ed esportare geometrie in una grande varietà di formati tridimensionali, in particolare è in grado di importare (anche solo se come corpo grafico) file creati con altri programmi di progettazione meccanica. Il disegno parametrico consente di impostare numerosi tipi di relazioni (parallelismo, concentricità, perpendicolarità, collinearità, uguaglianza, coassialità, simmetria e moltissimi altri).

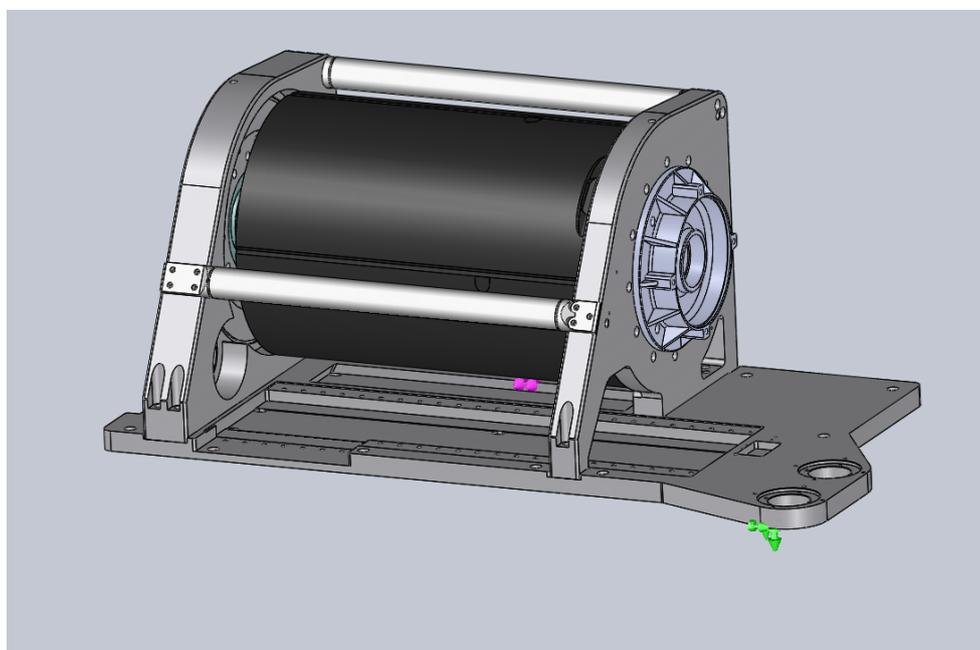


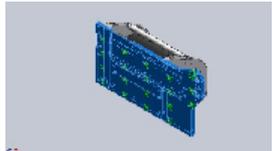
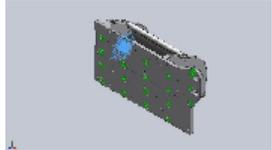
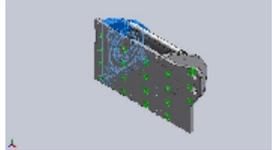
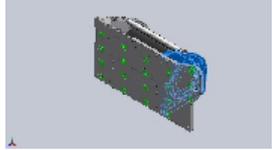
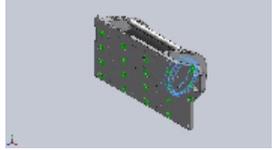
Figura 2: Modello CAD realizzato.

In Tabella 1 è riportato il dettaglio dei componenti la struttura con le principali caratteristiche volumetriche e di massa.

Le caratteristiche dell'analisi e le unità di misura utilizzate sono riportate, rispettivamente, in Tabella 2 e in Tabella 3.

Le proprietà dei materiali sono riportate in Tabella 4.

Tabella 1: Componenti principali del winch SX 500.

Corpi solidi			
Nome documento e Riferimento	Trattato come	Proprietà volumetriche	Percorso/Data documento modificati
Importato1	Corpo solido	Massa: 16.1144 kg Volume: 0.002 092 78 m ³ Densità: 7700 kg/m ³ Spessore: 157.921 N	WINCH PERINI NAVI\Scudo a flangia B5 Fi 350 BA-BM 160 - DA CODIFICARE Winch 500 Exp.sldprt Jul 28 11:31:52 2016
Foro filettato M5-1 	Corpo solido	Massa: 88.051 kg Volume: 0.032 018 5 m ³ Densità: 2750 kg/m ³ Spessore: 862.899 N	WINCH PERINI NAVI\Basamento Sx Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 18:50:07 2016
Ripetizione Circolare4 	Corpo solido	Massa: 19.2247 kg Volume: 0.002 403 08 m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 188.402 N	WINCH PERINI NAVI\ Cella di carico torsionale Gicam Cod. Winch 500 Exp.SLDPRT Jul 28 11:21:16 2016
Foro filettato M6-2 	Corpo solido	Massa: 46.8158 kg Volume: 0.017 023 9 m ³ Densità: 2750 kg/m ³ Spessore: 458.795 N	WINCH PERINI NAVI\Fianco Sx lato riduttore Winch 500 Exp.SLDPRT Jul 19 16:25:41 2016
Foro filettato M3-1 	Corpo solido	Massa: 33.0801 kg Volume: 0.012 029 1 m ³ Densità: 2750 kg/m ³ Spessore: 324.185 N	WINCH PERINI NAVI\Fianco Sx motore Winch 500 Exp.sldprt Jul 19 18:50:07 2016
Smusso3 	Corpo solido	Massa: 25.2461 kg Volume: 0.003 216 06 m ³ Densità: 7850 kg/m ³ Spessore: 247.412 N	WINCH PERINI NAVI\Supporto cuscinetto Winch 500 Exp.SLDPRT Jul 28 11:21:15 2016
Smusso1	Corpo solido	Massa: 88.051 kg Volume: 0.032 018 5 m ³ Densità: 2750 kg/m ³ Spessore: 862.899 N	WINCH PERINI NAVI\Basamento Sx Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 18:50:07 2016

(continua alla pagina successiva)

Corpi solidi			
Nome documento e Riferimento	Trattato come	Proprietà volumetriche	Percorso/Data documento modificati
Smusso1	Corpo solido	Massa: 22.7007 kg Volume: 0.008 534 08 m ³ Densità: 2660 kg/m ³ Spessore: 222.466 N	WINCH PERINI NAVI\ Settore tamburo Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 28 11:31:53 2016
Smusso1	Corpo solido	Massa: 22.7007 kg Volume: 0.008 534 08 m ³ Densità: 2660 kg/m ³ Spessore: 222.466 N	WINCH PERINI NAVI\ Settore tamburo Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 28 11:31:53 2016
Smusso1	Corpo solido	Massa: 22.563 kg Volume: 0.008 482 33 m ³ Densità: 2660 kg/m ³ Spessore: 211.117 N	WINCH PERINI NAVI\ Settore tamburo Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 28 11:31:53 2016
Smusso3	Corpo solido	Massa: 0.945 451 kg Volume: 0.000 123 181 m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 9.657 42 N	WINCH PERINI NAVI\ Finale Sx Lungo a saldare tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 16:25:40 2016
Raccordo1	Corpo solido	Massa: 0.934 249 kg Volume: 0.000 116 781 m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 9.155 64 N	WINCH PERINI NAVI\ Finale Sx a saldare tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 16:25:40 2016
Cordone di saldatura1	Corpo solido	Massa: 0.003 448 18 kg Volume: 4.478 16 × 10 ⁻⁰⁰⁷ m ³ Densità: 7700 kg/m ³ Spessore: 0.033 792 2 N	WINCH PERINI NAVI\ Saldatura Sx corto finale tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp.sldprt Jul 19 16:25:40 2016
Cordone di saldatura1	Corpo solido	Massa: 0.003 448 18 kg Volume: 4.478 16 × 10 ⁻⁰⁰⁷ m ³ Densità: 7700 kg/m ³ Spessore: 0.033 792 2 N	WINCH PERINI NAVI\ Saldatura Sx finale tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp.sldprt Jul 19 16:25:40 2016
Specchia1	Corpo solido	Massa: 4.903 48 kg Volume: 0.000 612 935 m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 48.0541 N	WINCH PERINI NAVI\ Tubo Sx da saldare per irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 16:25:41 2016
Smusso2	Corpo solido	Massa: 0.571 194 kg Volume: 7.139 92 × 10 ⁻⁰⁰⁵ m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 5.5977 N	WINCH PERINI NAVI\ Finale a saldare tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 16:27:09 2016
Smusso2	Corpo solido	Massa: 0.571 194 kg Volume: 7.139 92 × 10 ⁻⁰⁰⁵ m ³ Densità: 8000 kg/m ³ Spessore: 5.5977 N	WINCH PERINI NAVI\ Finale a saldare tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 19 16:27:09 2016

(continua alla pagina successiva)

Corpi solidi			
Nome documento e Riferimento	Trattato come	Proprietà volumetriche	Percorso/Data documento modificati
Cordone di saldatura1	Corpo solido	Massa: 0.003 448 18 kg Volume: $4.478\ 16 \times 10^{-007}\ m^3$ Densità: $7700\ kg/m^3$ Spessore: 0.033 792 2 N	WINCH PERINI NAVI\ Saldatura Sx finale tubo irrigidimento 2 Winch 500 L35 Exp.sldprt Jul 19 16:27:09 2016
Cordone di saldatura1	Corpo solido	Massa: 0.003 448 18 kg Volume: $4.478\ 16 \times 10^{-007}\ m^3$ Densità: $7700\ kg/m^3$ Spessore: 0.033 792 2 N	WINCH PERINI NAVI\ Saldatura Sx finale tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp.sldprt Jul 19 16:27:09 2016
Smusso1	Corpo solido	Massa: 4.942 74 kg Volume: $0.000\ 617\ 842\ m^3$ Densità: $8000\ kg/m^3$ Spessore: 211.117 N	WINCH PERINI NAVI\ Settore tamburo Winch 500 L35 Exp.SLDPRT Jul 28 11:31:53 2016

Tabella 2: Caratteristiche dell'analisi effettuata.

Nome studio	ANALISI
Tipo di analisi	Analisi statica
Tipo di mesh	Mesh di elementi solidi
Effetto termico	Attivo
Opzione termica	Includi carichi di temperatura
Temperatura di deformazione zero	298 K
Includi effetti della pressione fluida da SOLIDWORKS Flow Simulation	Disattivo
Tipo di solver	FFEPlus
Effetto in piano	Disattivo
Molla morbida	Disattivo
Sostituzione inerziale	Disattivo
Opzioni di unione non congruenti	Automatica
Grande spostamento	Disattivo
Computa forze del corpo libero	Attivo
Attrito	Disattivo
Usa metodo adattivo	Disattivo
Cartella Risultato	Documento SOLIDWORKS (WINCH PERINI NAVI)

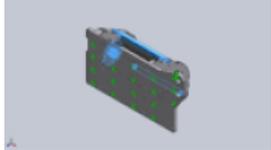
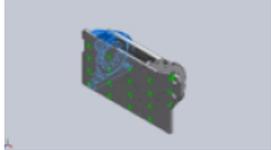
Tabella 3: Caratteristiche dell'analisi effettuata.

Sistema di unità	SI (MKS)
Lunghezza/Spostamento	mm
Temperatura	K
Velocità angolare	Rad/s
Pressione/Sollecitazione	N/m^2

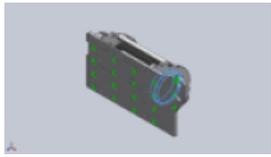
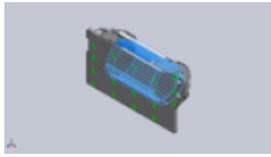
Tabella 4: Proprietà dei materiali considerati nei calcoli.

Riferimento modello	Proprietà	Componenti
	<p>Nome: Acciaio in linea</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Sollecitazione massima von Mises</p> <p>Snervamento: $6.20422 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $7.23826 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $2.1 \times 10^{+011} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.28</p> <p>Densità di massa: 7700 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $7.9 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $1.3 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (Importato1) (BMBMA 160 L B5 Winch 500 Exp-1/Scudo a flangia 85 F1 350 BA-BM 160 - DA CODIFICARE Winch 500 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Cordone di saldatura1) (Tubo irrigidimento Sx Frontale Winch 500 L35 Exp-1/Saldatura Sx corto finale tubo irrigidimento Winch 500L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Cordone di saldatura1) (Tubo irrigidimento Sx Frontale Winch 500 L35 Exp-1/Saldatura Sx finale tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Cordone di saldatura1) (Tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1/Saldatura finale tubo irrigidimento 2 Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Cordone di saldatura1) (Tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1/Saldatura finale tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1).</p>
Dati curva: N/A		
	<p>Nome: 6082 T6</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Non conosciuto</p> <p>Snervamento: $2.9 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $3.3 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $7 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.33</p> <p>Densità di massa: 2750 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $2.6 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $2.4 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (Foro filettato M5-1) (Basamento Sx Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Foro filettato M3-1) (Fianco Sx motore Winch 500 L35 Exp-1).</p>
Dati curva: N/A		

(continua alla pagina successiva)

Riferimento modello	Proprietà	Componenti
	<p>Nome: AISI 316</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Non conosciuto</p> <p>Snervamento: $3.15 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $5.6 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $1.9 \times 10^{+011} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.29</p> <p>Densità di massa: 8000 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $7.5 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $1.8 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (RipetizioneCircolare4) (Cella di carico torsionale Gicam Cod. Winch 500 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso3) (Tubo irrigidimento Sx Frontale Winch 500 L35 Exp-1/Finale Sx lungo a saldare tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp-2).</p> <p>CorpoSolido 1 (Raccordo1) (Tubo irrigidimento Sx Frontale Winch 500 L35 Exp-1/Finale Sx a saldare tubo irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Specchia1) (Tubo irrigidimento Sx Frontale Winch 500 L35 Exp-1/Tubo Sx da saldare per irrigidimento Frontale Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso2) (Tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1/Finale a saldare tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso2) (Tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1/Finale a saldare tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-2).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso2) (Tubo irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1/Tubo da saldare per irrigidimento Winch 500 L35 Exp-1).</p>
Dati curva: N/A		
	<p>Nome: 6082 T6</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Non conosciuto</p> <p>Snervamento: $3.1 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $3.58 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $7 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.33</p> <p>Densità di massa: 2750 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $2.6 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $2.4 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (Foro filettato M6-2) (Fianco Sx lato riduttore Winch 500 L35 Exp-1).</p>
Dati curva: N/A		

(continua alla pagina successiva)

Riferimento modello	Proprietà	Componenti
	<p>Nome: Fe410</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Non conosciuto</p> <p>Snervamento: $2.751 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $8.61695 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $1.2 \times 10^{+011} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.31</p> <p>Densità di massa: 7850 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $7.7 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $1.1 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (Smusso3) (Supporto cuscinetto Winch 500 Exp-1).</p>
Dati curva: N/A		
	<p>Nome: AL6005 T6</p> <p>Tipo di modello: isotropico elastico lineare</p> <p>Fallimento di default: Non conosciuto</p> <p>Snervamento: $1.35 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Resistenza alla trazione: $2.85 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Modulo elastico: $7 \times 10^{+010} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di Poisson: 0.33</p> <p>Densità di massa: 2660 kg/m^3</p> <p>Modulo di taglio: $2.1 \times 10^{+008} \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente di espansione termica: $2.4 \times 10^{-005} \text{ K}^{-1}$</p>	<p>CorpoSolido 1 (Smusso1) (Tamburo Winch 500 L35 Exp-1/Settore tamburo Winch 500 L35 Exp-1).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso1) (Tamburo Winch 500 L35 Exp-1/Settore tamburo Winch 500 L35 Exp-2).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso1) (Tamburo Winch 500 L35 Exp-1/Settore tamburo Winch 500 L35 Exp-3).</p> <p>CorpoSolido 1 (Smusso1) (Tamburo Winch 500 L35 Exp-1/Settore tamburo Winch 500 L35 Exp-4).</p>
Dati curva: N/A		

1.3 Il modello FEM

Al fine di analizzare il comportamento strutturale e quindi di conoscere le sollecitazioni sui componenti del captive winch, per poterne valutare un'eventuale ottimizzazione, è stato realizzato un modello agli elementi finiti utilizzando l'applicativo SOLIDWORKS Simulation. Questo è costituito da una gamma di strumenti di analisi strutturale che sfrutta l'analisi degli elementi finiti (FEA) per prevedere il comportamento fisico di un prodotto nel mondo reale attraverso l'esecuzione di collaudi virtuali sui modelli CAD. La gamma offre funzionalità di analisi dinamica, statica lineare e non lineare.

Il metodo agli elementi finiti FEM [3] si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini 2D, tetraedri e esaedri per domini 3D). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è assunta essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (shape functions). Da notare che talora la funzione viene approssimata, e non necessariamente saranno i valori esatti della funzione quelli calcolati nei punti, ma i valori che forniranno il minor errore su tutta la soluzione.

Il modello sviluppato per il winch di Perini Navi è costituito da 1 714 732 nodi per un totale di 1 080 164 elementi solidi isoparametrici tetraedrici (Figura 3) la cui descrizione è riportata in Tabella 5.

Gli elementi isoparametrici sono usati nella soluzione di vari problemi che vanno dall'elasticità bi e tri-dimensionale, allo studio di piastre e gusci di forma qualsiasi. Parte del loro successo deriva dal fatto che, una volta compreso il comportamento di un elemento, è possibile estendere in modo molto semplice le stesse idee ad altri elementi isoparametrici. Mentre i lati degli elementi lineari sono rettilinei, quelli degli elementi quadratici o di ordine superiore possono essere sia rettilinei che curvi, il che li rende molto adatti a modellare strutture curve e di geometria complessa come quella dei componenti del captive winch.

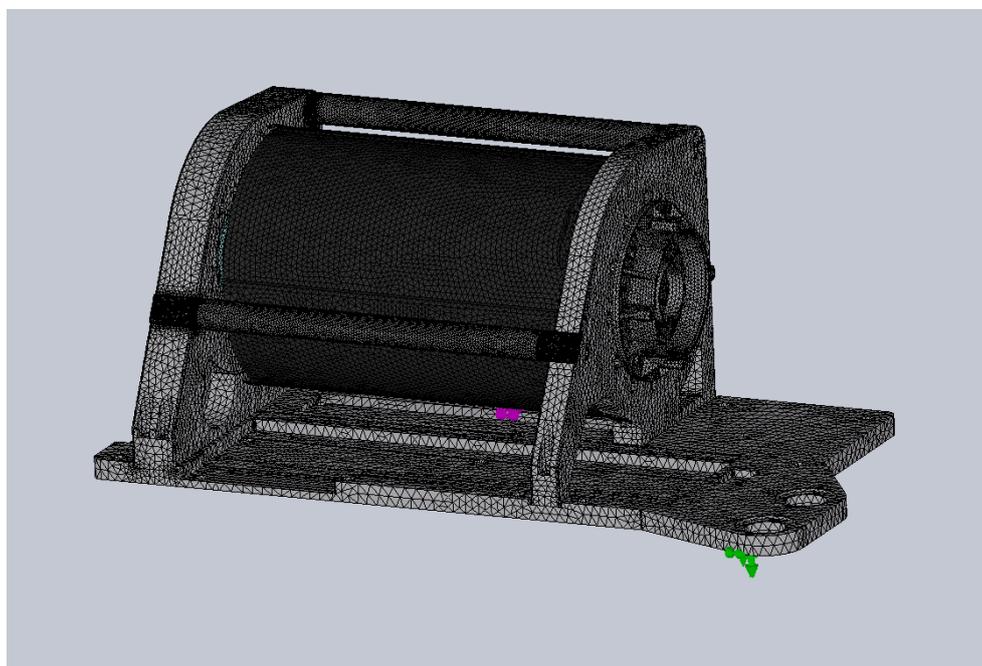


Figura 3: Modello FEM in cui si evidenzia la *mesh* utilizzata.

1.4 Gestione dei contatti tra gli elementi

Per la gestione dei contatti tra gli elementi costituenti il winch si è optato per un accoppiamento rigido biparte senza compenetrazione ovvero per una mesh congruente.

In una mesh congruente le entità a contatto sono sottoposte a mesh in modo che esista una corrispondenza da nodo a nodo tra le mesh di ciascuna entità. I nodi in corrispondenza possono essere uniti (per un contatto unito) o sovrapposti. Per un contatto senza compenetrazione, vengono creati elementi di contatto da nodo a nodo tra i nodi coincidenti sulle facce di origine e di destinazione.

I risultati basati su una mesh congruente sono più precisi di quelli basati su una mesh non congruente.

Quando si richiede una mesh congruente, il software genera la mesh delle parti dell'assieme in modo da ottenere una transizione di mesh uniforme tra ogni due parti. I nodi lungo l'interfaccia vengono impressi uno sull'altro e possono essere uniti per garantire un contatto unito. Se la creazione di una mesh congruente non riesce su un'interfaccia, il software tenta di generare una mesh non congruente per le due parti sull'interfaccia comune.

1.5 Vincoli del modello

La struttura è stata vincolata sulla faccia inferiore della piastra.

Tutti i nodi sono vincolati per i 6 gradi di libertà (Figura 4).

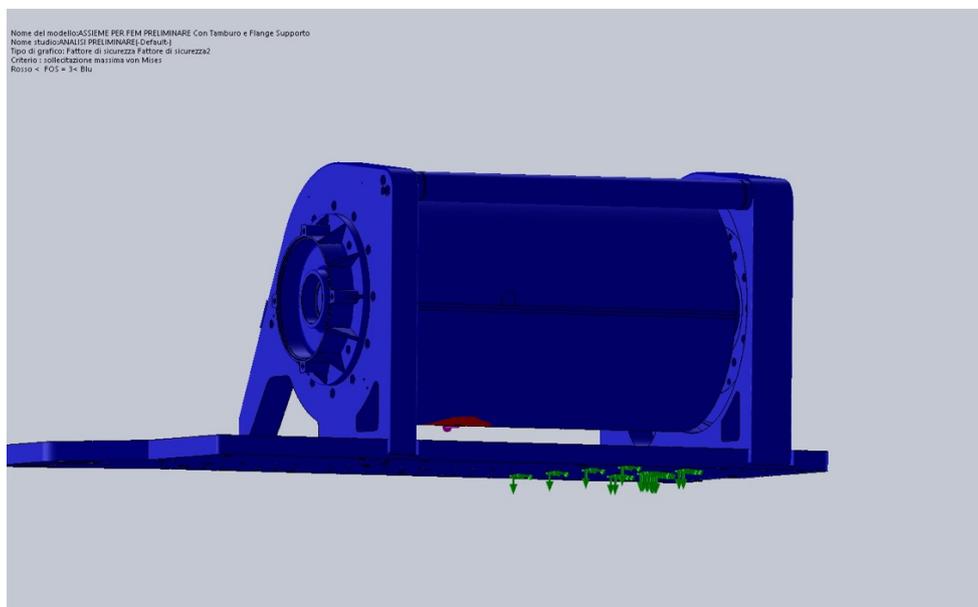


Figura 4: Schema dei vincoli.

1.6 Carichi applicati al modello

Per il carico è stato considerato, su indicazione di Perini Navi, il tiro della fune applicato tangenzialmente al cilindro entità 250 000.00 N.

Il carico viene applicato al tamburo nella posizione indicata in Figura 5.

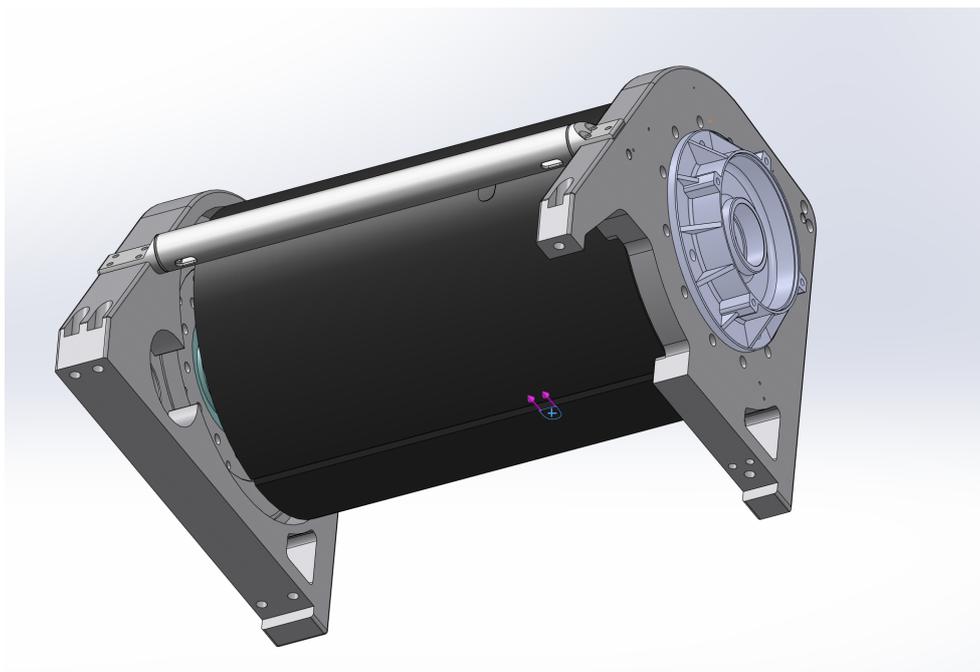


Figura 5: Punto di applicazione del carico (tiro della scotta).

2 Risultati delle analisi

I principali elementi con funzioni strutturali del captive winch sono il basamento, i due supporti laterali del tamburo e il tamburo stesso. Nel seguito si analizzano i risultati ottenuti con il FEM al fine di valutare la possibilità di intervenire per un alleggerimento del dispositivo.

2.1 Basamento

Il basamento è costituito da una piastra di lega alluminio-silicio-magnesio-manganese 6082 T6 vincolata al piano sottostante.

Sotto l'azione del carico massimo applicabile al winch di 250.00 kN, si è potuto rilevare uno spostamento massimo (Figura 6) in corrispondenza del collegamento di uno dei supporti del tamburo di circa 0.6 mm, totalmente accettabile su una struttura di questo tipo.

La tensione massima di von Mises (Figura 7 e Figura 8), sempre in corrispondenza del collegamento del supporto è risultata di 18 MPa quindi sensibilmente inferiore al limite di snervamento della lega 6082 T6.

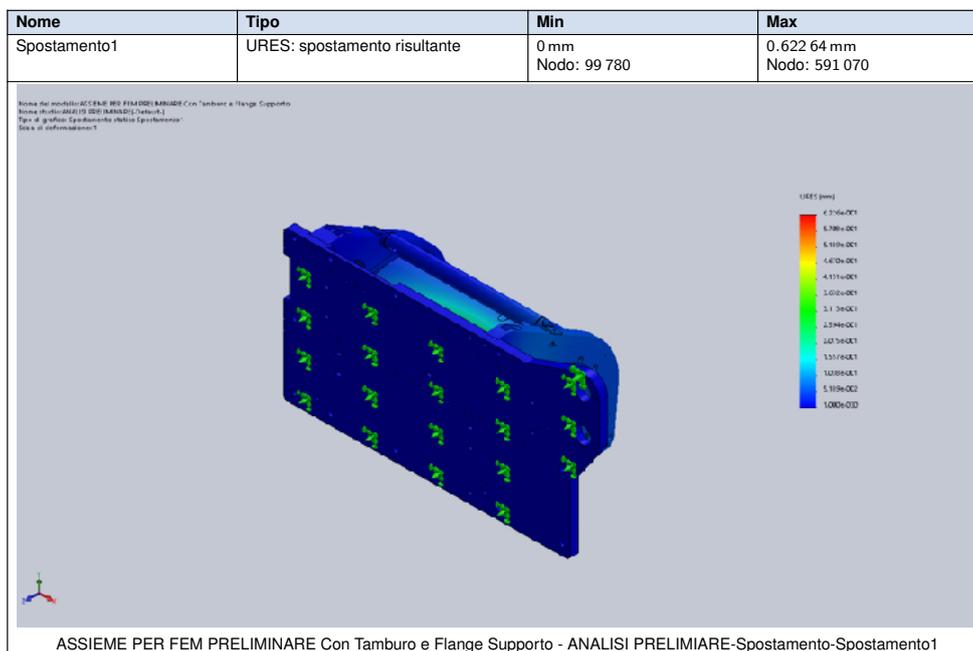


Figura 6: Andamento degli spostamenti sul basamento.

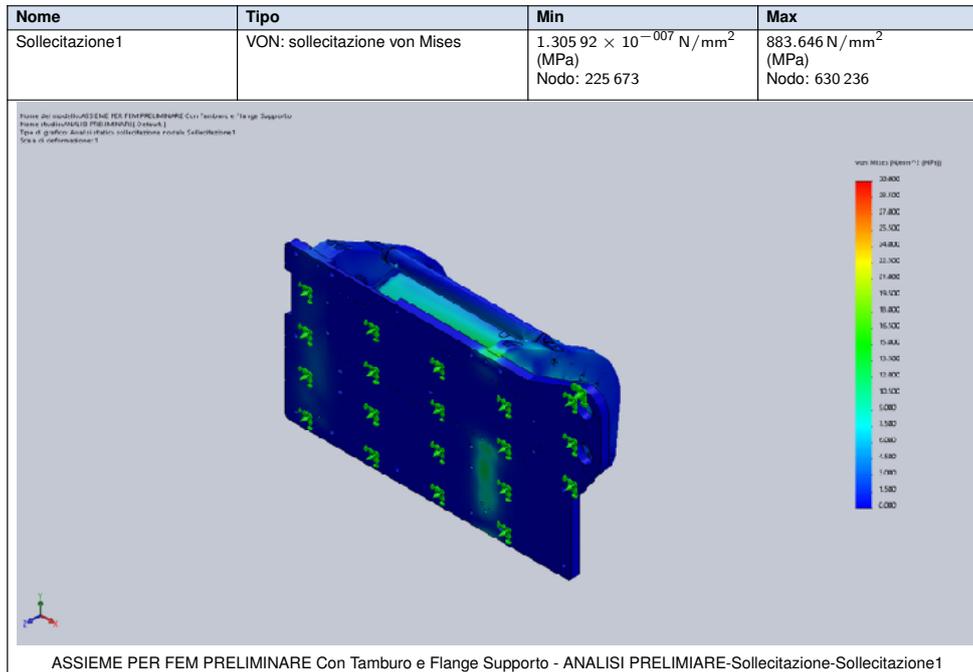


Figura 7: Sollecitazioni di von Mises sul basamento.

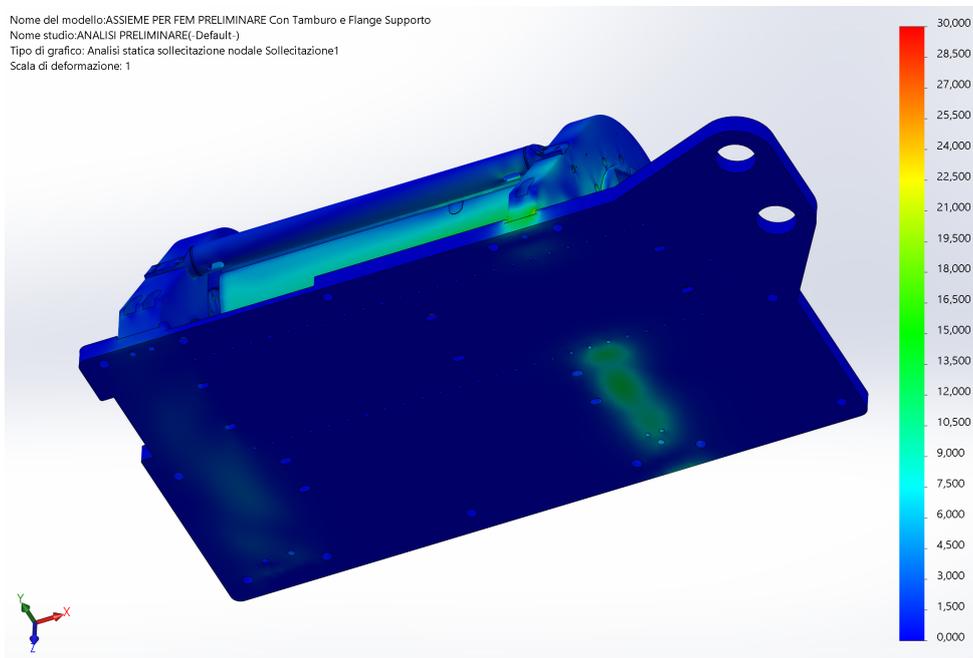


Figura 8: Sollecitazioni di von Mises sul basamento.

2.2 Supporti laterali del tamburo

Sui supporti del tamburo sono state effettuate indagini sia per valutare lo stato di tensione delle zone di collegamento con il basamento sia per verificare i collegamenti con il tamburo di avvolgimento.

In Figura 9, Figura 10 e Figura 11 si può notare come la zona più sollecitata sia quella del supporto lato motore su cui si raggiunge un picco massimo della tensione di von Mises di circa 150 MPa, inferiore al limite di snervamento dell'acciaio con cui sono realizzati che è di 620 MPa.

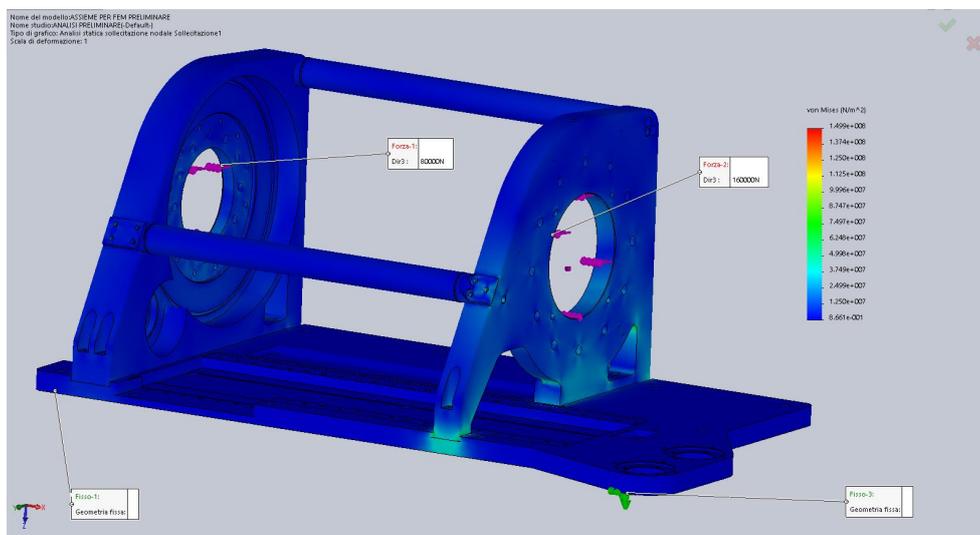


Figura 9: Distribuzione dello stato di tensione di von Mises sui supporti del tamburo.

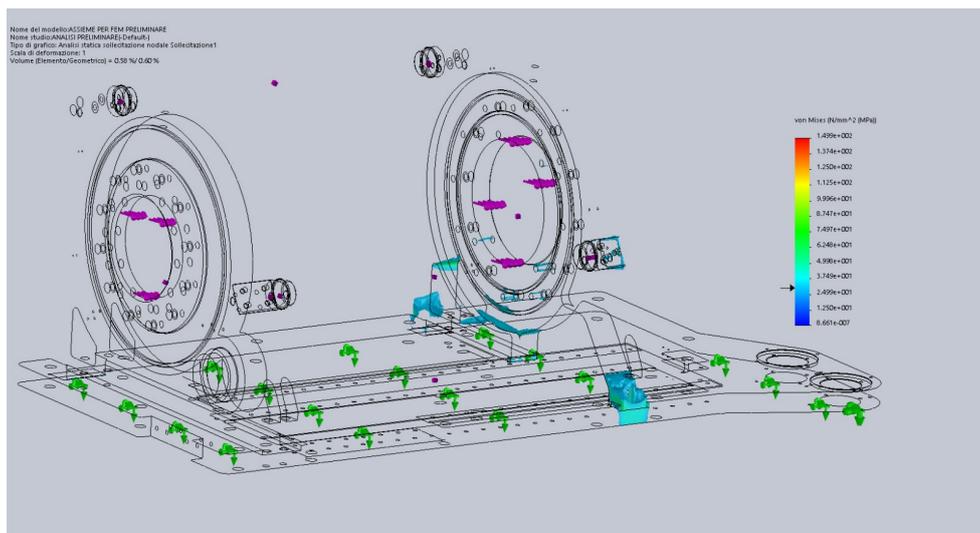


Figura 10: Individuazione dei punti maggiormente sollecitati.

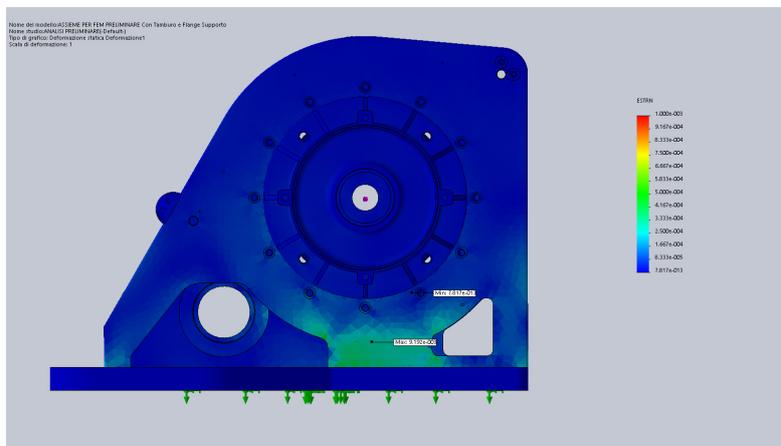


Figura 11: Sollecitazioni di von Mises sul basamento.

Nella zona di inserimento delle basi del tamburo si sono effettuate analisi in particolare per verificare il cedimento delle superfici al fine di evitare possibili irregolarità di rotazione del tamburo e disassemblamenti del componente. Come rilevabile dalle immagini precedenti, non sono state rilevate zone di particolare sollecitazione o cedimento tali da essere ritenute significative.

2.3 Tamburo di avvolgimento

L'elemento più sollecitato è risultato il tamburo di avvolgimento della scotta. Si ricorda che su di esso si è applicato un carico si trazione posto tangenzialmente la cilindro, in posizione sottostante e laterale così come suggerito dall'Ufficio Tecnico di Perini Navi (Figura 12).

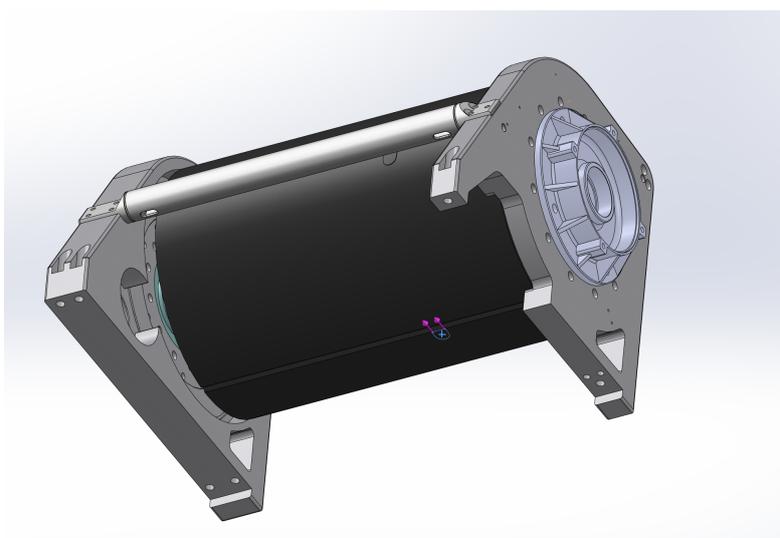


Figura 12: Punto di applicazione del carico.

Come si può notare dalle Figure 13-20, la zona di applicazione del carico risulta particolarmente soggetta a tensioni e, come si nota anche dalla Figura 21, esistono delle zone in cui la tensione massima ammissibile del materiale viene superata. In quest'ultima figura, sono indicate in verde tutte le parti che si trovano in sicurezza e in rosso quelle in cui è superata la tensione ammissibile.

Occorre però ricordare come il carico applicato sul tamburo nel corso della simulazione sia da considerarsi situazione estrema, sicuramente peggiorativa delle più gravose situazioni in cui si può trovare il winch. Infatti il carico viene applicato su un nodo e non su una parte della circonferenza del cilindro, come avviene nella realtà.

Inoltre, anche se localmente ci fosse il superamento del limite di snervamento del materiale, si avrebbe la redistribuzione del carico su un'area più ampia con conseguente riduzione delle tensioni di picco.

Si ritiene pertanto che il tamburo sia perfettamente in grado di sopportare i carichi di esercizio.

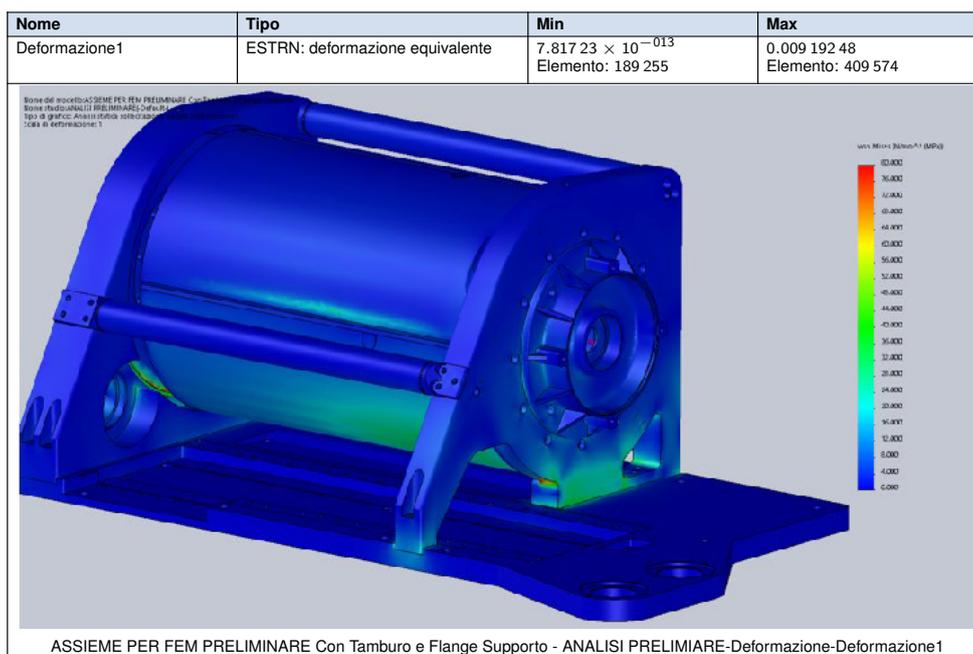


Figura 13: Stato di deformazione sul winch.

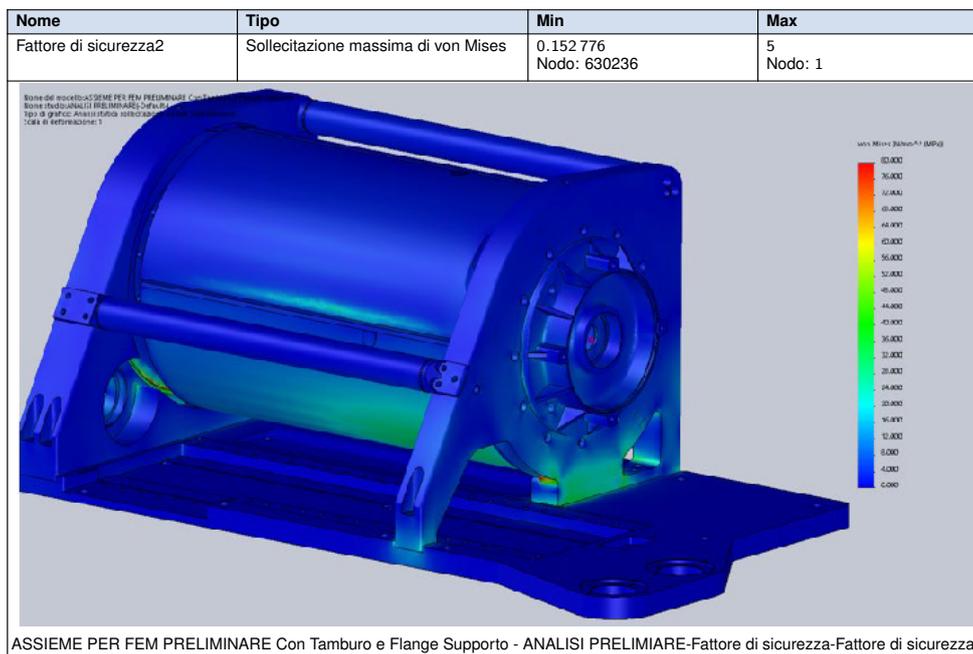


Figura 14: Distribuzione delle tensioni di von Mises sul winch con evidenziate le tensioni sul tamburo.

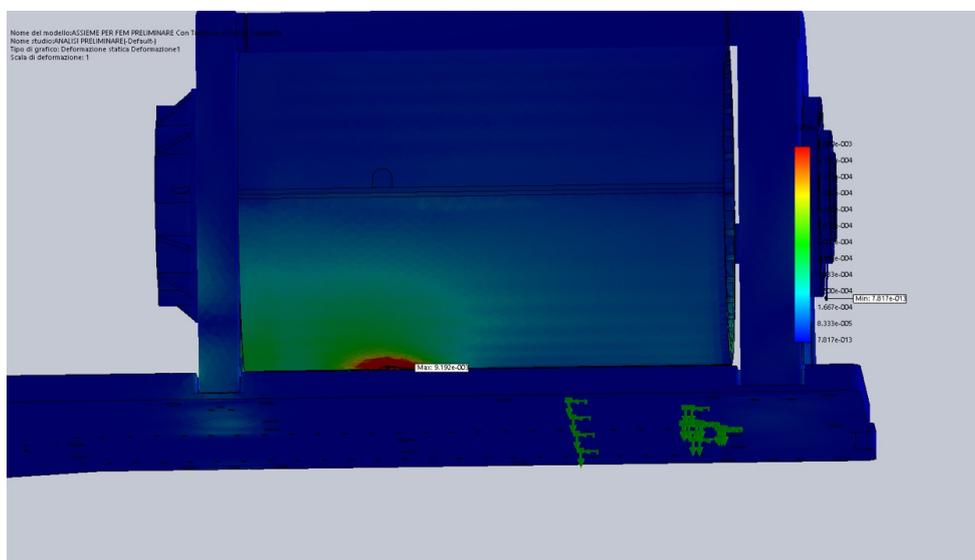


Figura 15: Stato di deformazione sul tamburo.

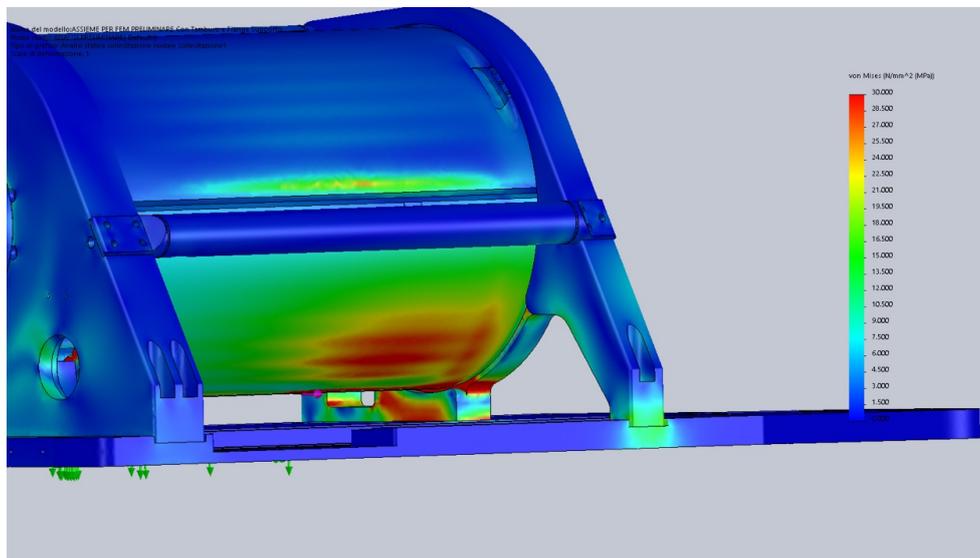


Figura 16: Stato di tensione sul tamburo.

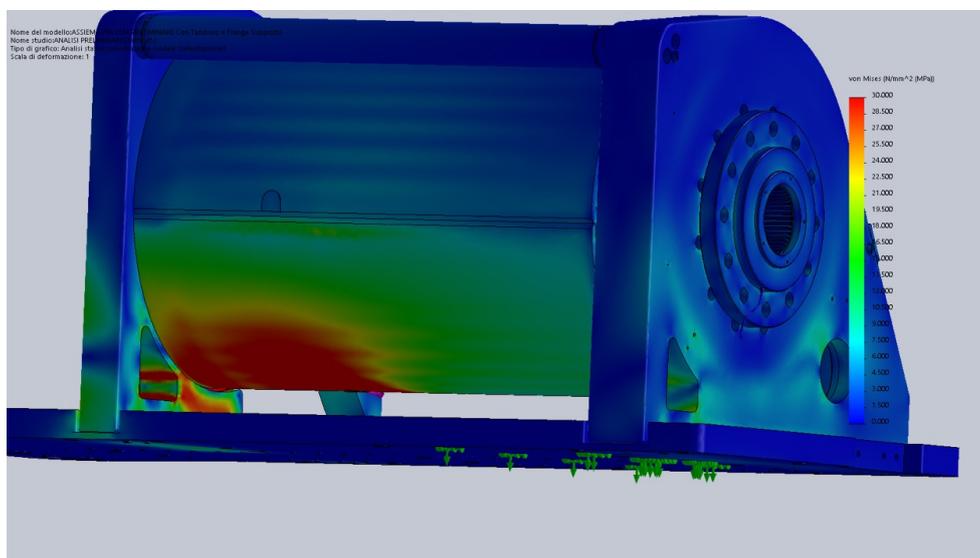


Figura 17: Stato di tensione sul tamburo.

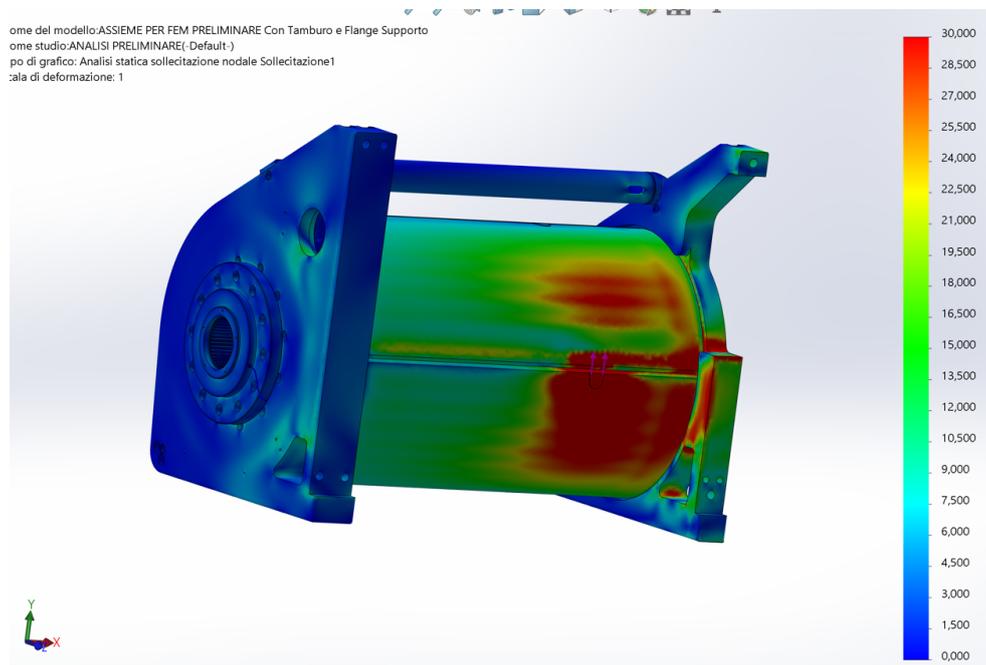


Figura 18: Stato di tensione sul tamburo.

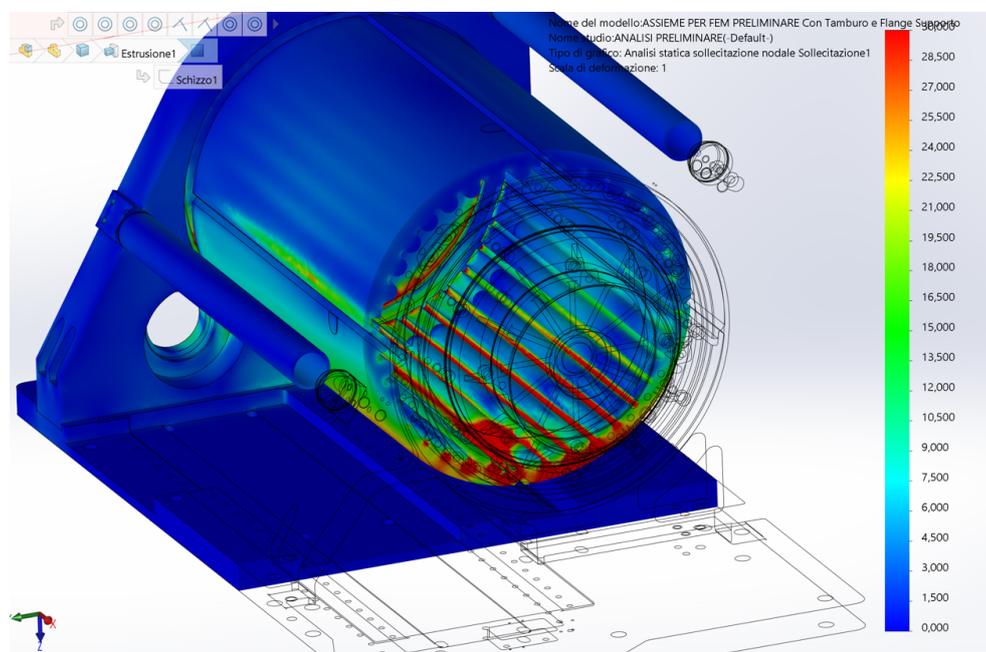


Figura 19: Stato di tensione sul tamburo con evidenziata la sua struttura con i rinforzi.

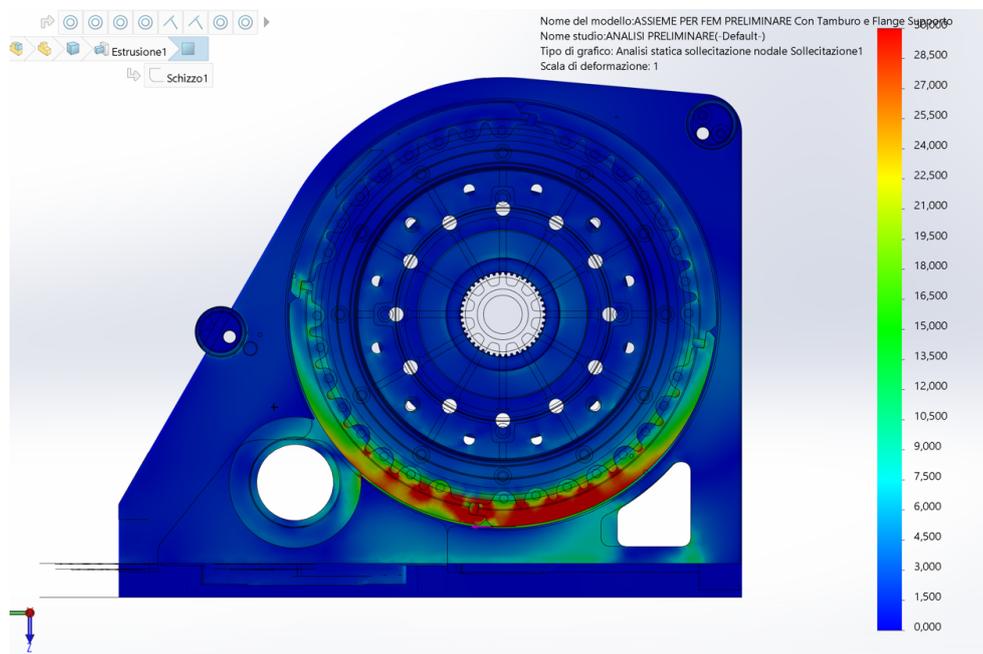


Figura 20: Stato di tensione sul tamburo con evidenziata la sua struttura con i rinforzi.

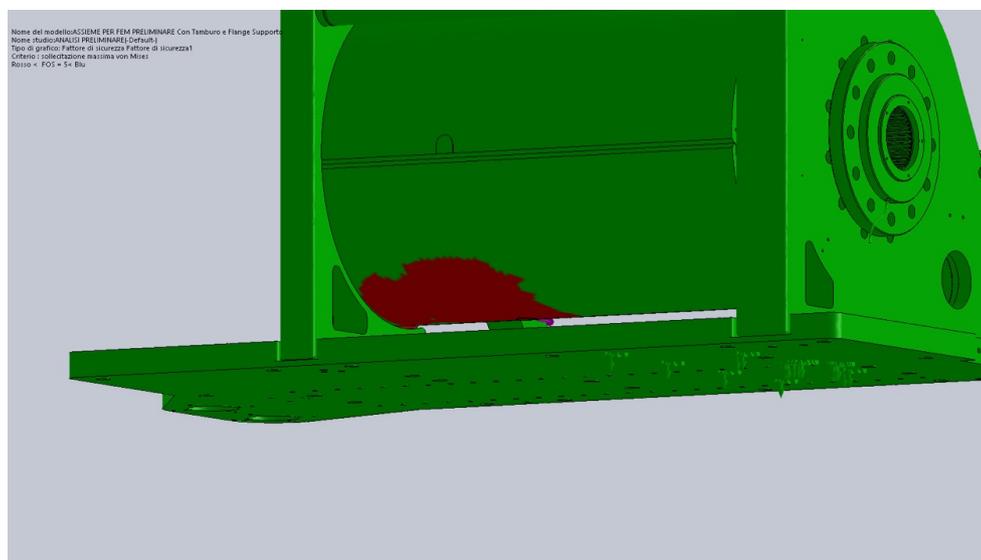


Figura 21: Zone, indicate in rosso, in cui la tensione massima ammissibile del materiale viene superata.

3 Progetto di un tamburo in materiale composito

3.1 Verifica di resistenza

Il tamburo è soggetto globalmente a flessione e a torsione, ma, in casi analoghi, si è notato che la rottura avviene sempre per eccessivo carico superficiale del mantello, ecco perché la sollecitazione globale viene trascurata a favore di quella locale, si fa riferimento a due configurazioni limite.

- **Tamburo completamente avvolto:** in questo caso la fune esce ad una sua estremità quindi la sollecitazione è simile ad una pressione uniforme (Figura 22), si trascura l'attrito e l'irrigidimento dovuto alle flange approssimando così il tamburo ad un cilindro infinito.

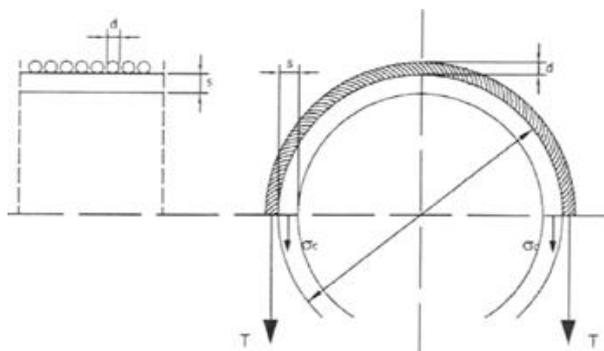


Figura 22: Schema di carico dovuto all'avvolgimento del cavo sul tamburo.

Si può scrivere così che all'equilibrio:

$$2T = 2\sigma_c s d \Rightarrow \sigma_c = \frac{T}{s d},$$

con σ_c tensione circonferenziale.

- **Tamburo con una spira isolata avvolta di un piano diametrale:** si ha in questo caso una sollecitazione di flessione e quindi di sforzo assiale oltre che di compressione. L'andamento della deformazione è mostrato in Figura 23 insieme alla distribuzione degli sforzi, dovuti alla flessione.

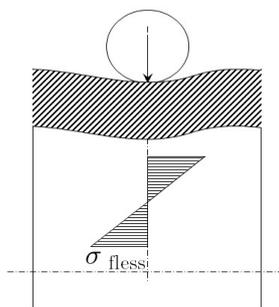


Figura 23: Azione flessionale locale sul tamburo.

Le relazioni di cui si dispone si riferiscono al caso ideale di un cilindro di piccolo spessore e di lunghezza infinita nel quale in una certa sezione ci sia una distribuzione uniforme di pressione radiale come se al posto della spira ci fosse un anello di forzamento. Si ha:

$$\sigma_{\text{fless}} = 1.61 T \sqrt{\frac{1}{s^2 d}}.$$

- **Caso reale:** si ha che il tamburo è di lunghezza finita e la fune sarà avvolta solo per un tratto. Il mantello assume una configurazione deformata come in Figura 24.

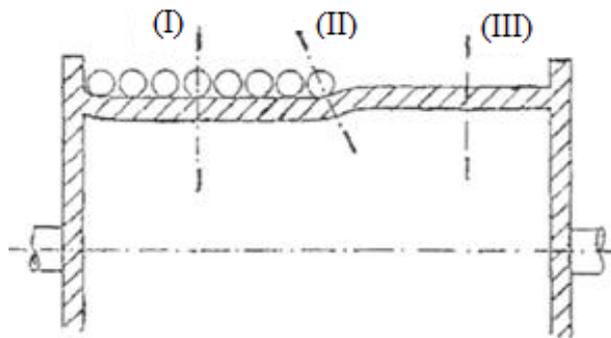


Figura 24: Schema di carico sul tamburo tenendo conto sia delle azioni di compressione che di flessione sul mantello.

Le sollecitazioni sul mantello saranno quindi dovute sia all'avvolgimento della fune sia agli effetti flessionali. La combinazione del loro effetto può essere approssimativamente stimata utilizzando il criterio della massima energia di deformazione di von Mises:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\text{fless}}^2 + \sigma_c^2} - \sigma_{\text{fless}} \sigma_c \leq \sigma_{\text{amm}}.$$

3.2 Analisi dei carichi di progetto sul tamburo Perini

Tenendo conto che il tamburo del winch ha un diametro $d = 500$ mm e che il carico di progetto è $P = 250\,000.00$ N, si possono valutare sul cilindro le tensioni massime di progetto.

Per la tensione circonferenziale;

$$\sigma_c = \frac{T}{s d},$$

dove: $T = 250\,000.00$ N, $d = 500$ mm, s (primo tentativo) = 1 mm, da cui:

$$\sigma_c = 33.33 \text{ N/mm}^2.$$

Per la tensione flessionale:

$$\sigma_{\text{fless}} = 1.61 T \sqrt{\frac{1}{s^2 d}}.$$

dove: $T = 250\,000.00\text{ N}$, $d = 500\text{ mm}$, s (primo tentativo) = 1 mm, da cui:

$$\sigma_{\text{fless}} = 309.84\text{ N/mm}^2.$$

La sollecitazione sul mantello è quindi stimabile con:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\text{fless}}^2 + \sigma_c^2 - \sigma_{\text{fless}}\sigma_c} \leq \sigma_{\text{amm}},$$

da cui si ha

$$\sigma_i = 294.60\text{ N/mm}^2.$$

A tale carico deve essere applicato un fattore di progetto.

La scelta del fattore di progetto nella progettazione di componenti in composito deve essere effettuata tenendo conto di alcuni importanti fattori che influiscono sia sulla analisi dello stato di sollecitazione cui è soggetto il componente da realizzare, sia sul comportamento strutturale dei materiali presi in considerazione, sia sulle tecnologie di realizzazione.

Nel seguito viene riportato un criterio per la definizione del fattore di progetto ispirato a quello previsto dalla normativa BS 4994 “Specification for Vessel and tanks in reinforced plastics” [4]. Il fattore di progetto K si determina attraverso la relazione:

$$K = K_0 K_1 K_2 K_3 K_4.$$

I valori dei fattori K_i vengono determinati come descritto nel seguito.

Fattore relativo al carico di rottura del materiale (K_0):

dipende dall'affidabilità della caratterizzazione del materiale. Operando con i compositi sarebbe opportuno caratterizzare sempre il materiale prima della sua applicazione ricavando provini da piastre realizzate con le stesse tecnologie e le stesse condizioni ambientali che saranno presenti nel corso della realizzazione del componente. Può assumere valori compresi tra 1.5 e 3. In questo caso, si può assumere un $K_0 = 1.5$ in quanto potranno essere effettuate le dovute caratterizzazioni dei laminati.

Fattore relativo alla tecnologia di fabbricazione (K_1):

dipende dal tipo di tecnologia utilizzata per la realizzazione del componente. Vale:

- 1.3 per stratificazione con pre-impregnati eseguita sotto vuoto con polimerizzazione in autoclave,
- 1.4 per formatura con pre-impregnati eseguita sotto vuoto (*bag moulding*) senza successivo uso di autoclave,
- 1.5 per deposizione automatica del composito per avvolgimento (*filament winding*),
- 1.6 per stratificazione e impregnazione manuale.

Per cui, nel caso in esame, $K_1 = 1.3$.

Fattore relativo alla temperatura di esercizio (K_2):

dipende dalla temperatura di transizione vetrosa della resina utilizzata nel composito. Si può ricavare dalla Figura 25.

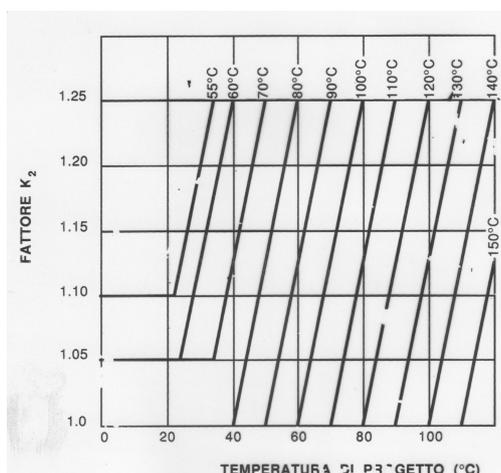


Figura 25: Fattore relativo alla temperatura di esercizio (K_2).

Nel caso in esame, considerando la scelta di una resina con una temperatura di transizione vetrosa superiore alla temperatura di esercizio, si può stimare un $K_2 = 1.00$.

Fattore relativo ai carichi ciclici (K_3):

può essere determinato dalla Figura 26 considerando le condizioni operative previste del componente. Qualora il progettista possieda informazioni più precise sul comportamento a fatica dello specifico materiale, il coefficiente K_3 può essere scelto nel modo più appropriato.

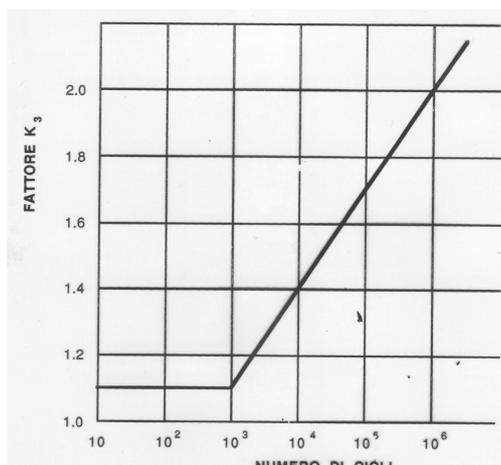


Figura 26: Determinazione del fattore K_3 in funzione dei cicli di vita del winch.

Nel caso in esame, stimando in modo cautelativo un numero di 10 000 cicli di carico (10 000 virate) si può assumere $K_3 = 1.4$.

Fattore relativo alla procedura di cura del laminato (K_4):

quando il componente è soggetto ad un completo ciclo di cura ed eventuale post-cura, come previsto dal fornitore della resina, K_4 può essere assunto uguale a 1.1. Altrimenti si assume il valore 1.5. Nel caso in esame si assume $K_4 = 1.1$.

In definitiva, si ottiene: $K = 3.00$. Si può considerare quindi una tensione massima di progetto $\sigma_p = \sigma_i K = 884.67 \text{ N/mm}^2$, arrotondata a $\sigma_p = 885.00 \text{ N/mm}^2$.

3.3 Calcolo del laminato

Considerato che la verifica dei laminati avviene secondo le relazioni della Classica Teoria della Laminazione, si può assumere un carico specifico di progetto massimo:

$$N_x = \sigma_p s = 884.67 \text{ N/mm}^2.$$

Per la realizzazione del manufatto si ipotizza l'utilizzo di un unidirezionale di vetro E le cui caratteristiche meccaniche sono:

$$E_1 = 42.70 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 11.70 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = 4.10 \text{ GPa}$$

$$N_{12} = 0,27$$

$$R_1 = 852 \text{ MPa}$$

$$R_2 = 228 \text{ MPa}$$

$$R_{12} = 89 \text{ MPa}$$

Spessore della lamina: $t = 0.15 \text{ mm}$.

Si considera inoltre lo spessore di un singolo strato di 0.15 .

Per il calcolo delle proprietà del laminato si utilizza il software eLaminate 3.3 della ESP Composites [5]. Come primo tentativo si può ipotizzare un laminato quasi isotropo costituito da 10 strati (15 mm) con la seguente sequenza di stratificazione: $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$ indicando con 0° la direzione delle fibre da disporre in direzione circonferenziale.

Con tale struttura, alla verifica con il software eLaminate, si ha che il laminato non è in condizione di sopportare i carichi. Si procede quindi a tentativi ripetendo il pacchetto di 10 strati come prima descritto.

In particolare, per uno spessore del laminato di 90 mm si ottiene un:

$$N_x = \sigma_p s = 5115 \text{ N/mm}^2.$$

Inserendo tale dato e la sequenza di laminazione in eLaminate si può verificare che tale laminato è in grado di soddisfare alle esigenze strutturali richieste.

In particolare, risulta che tale laminato, considerando una densità media del composito vetro/epoxy di 1400 kg/m^3 , avrebbe un peso di 126 kg/m^2 contro i circa 294 kg/m^2 del cilindro realizzato in acciaio con un risparmio in peso di 168 kg/m^2 .

4 Conclusioni

Nella presente attività è stato analizzato il comportamento strutturale di un captive winch progettato da Perini Navi per l'installazione su imbarcazioni a vela di lunghezza superiore a 60 m.

L'analisi ha permesso di evidenziare la possibilità di sostituire alcuni componenti, attualmente previsti in materiali metallici, con altri realizzati in materiali compositi.

In particolare, è stato effettuato un progetto di massima di un nuovo tamburo di avvolgimento della scotta per verificare la possibilità di realizzarlo in un composito di vetro e resina epossidica.

I calcoli effettuati hanno potuto dimostrare che un cilindro di adeguato spessore, realizzato in vetroresina, è in grado di sopportare i carichi di esercizio con un peso finale inferiore a un analogo realizzato in materiale metallico.

Lo svantaggio dell'impiego della vetroresina nei confronti dell'acciaio è però principalmente quello della minore resistenza all'usura.

Si ritiene quindi necessario valutare la possibilità di studiare la possibilità di realizzare il cilindro con l'inserimento di elementi duri (materiale ceramico) in grado di ridurre il danneggiamento del manufatto e quindi di prolungarne la vita.

Riferimenti bibliografici

- [1] Dassault Systèmes. SOLIDWORKS. <https://www.solidworks.com/it>.
- [2] Dassault Systèmes. SOLIDWORKS Simulation Student Guide. Disponibile all'indirizzo: https://www.solidworks.com/sw/images/content/Training/SolidWorks_Simulation_Student_Guide-ENG.pdf.
- [3] D. L. Logan. *A First Course in the Finite Element Method*. Thomson, Toronto, fourth edition, 2007.
- [4] British Standards Institution (BSI). Specification for Design and Construction of Vessels and Tanks in Reinforced Plastics. BS 4994:2016, 2016.
- [5] ESP Composites. eLaminate 3.3. <https://www.espcomposites.com/software/software.html>.