

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Aeroespacial

**Projeto de otimização de um conector inovador  
para incorporação de sensores FBG em  
materiais compósitos para aplicações  
aeroespaciais**

Autor: Renan Henrique A. de Araújo  
Orientador: Cristian Vendittozzi, MSc, PhD

Brasília, DF  
2018





Renan Henrique A. de Araújo

**Projeto de otimização de um conector inovador para  
incorporação de sensores FBG em materiais compósitos  
para aplicações aeroespaciais**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Cristian Vendittozzi, MSc, PhD

Brasília, DF

2018

---

Renan Henrique A. de Araújo

Projeto de otimização de um conector inovador para incorporação de sensores FBG em materiais compósitos para aplicações aeroespaciais/ Renan Henrique A. de Araújo. – Brasília, DF, 2018-

102 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Cristian Vendittozzi, MSc, PhD

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2018.

1. FBG. 2. Conector FBG. I. Cristian Vendittozzi, MSc, PhD. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto de otimização de um conector inovador para incorporação de sensores FBG em materiais compósitos para aplicações aeroespaciais

CDU 02:141:005.6

---



Renan Henrique A. de Araújo

**Projeto de otimização de um conector inovador para  
incorporação de sensores FBG em materiais compósitos  
para aplicações aeroespaciais**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 04 de julho de 2018:

---

**Cristian Vendittozzi, MSc, PhD**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Sérgio Henrique da Silva  
Carneiro**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Giancarlo Santilli**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2018



# Resumo

Os sensores de fibra óptica, podem ser incorporados dentro de materiais (ou seja, integrados, do inglês *embedded*), devido ao seu tamanho extremamente pequeno, permitindo a produção de componentes inteligentes i.e., capazes de sentir tensões atuantes sobre o material devido ao ambiente operacional. Podendo, assim, relatar quaisquer avarias, em contínuo, em tempo real e sem interrupções do serviço. Os materiais mais apropriados para esse tipo de aplicação são laminados compósitos de fibra longa, porque permitem a incorporação mais fácil de fibras ópticas equipadas com sensores. Os sensores de fibra óptica mais adequados a essa aplicação são aqueles nomeados grade de Bragg, ou do inglês *Fiber Bragg Grating* (FBG). Entre os muitos processos de produção de componentes em compósito aquele que é mais utilizado para a produção de componentes de alto desempenho, sobretudo para aplicações aeroespaciais, é a cura em autoclave. A integração dos sensores em um laminado em compósito feito por esse processo apresenta uma série de problemas como aqueles relacionados à interferência da fibra óptica (que pode representar um elemento de distúrbio) no laminado ou pelas tensões excessivas que as mesmas das fibras do laminado aplicam sobre os sensores ópticos. Além disso, o principal problema consiste em garantir a transmissão de dados gravados dentro do laminado para o sistema de aquisição. As fibras ópticas que saem do laminado quebram frequentemente, devido à alta pressão atuante na fibra óptica no ponto de saída pelo laminado. Para resolver o problema, foram desenvolvidos conectores ópticos que deverão integrar no laminado. O conector foi modelado para os elementos finitos e submetido a uma análise estática, principalmente, para identificar o nível de interferência do conector com o material no qual ele será incorporado.

**Palavras-chaves:** Sensores em fibra óptica, FBG (Fiber Bragg Grating), materiais inteligentes, laminados compósitos reforçados em fibra de carbono (CFRP) e conectores ópticos.



# Abstract

Fiber optic sensors can be incorporated into materials, because of their extremely small size, allowing the production of intelligent components i.e., capable of sensing tensions on the material due to the operating environment. This way, it can report any malfunctions, in continuous, in real time and without interruptions of the service. The most appropriate materials for this type of application are long fiber composite laminates because they allow easier incorporation of sensor-equipped optical fibers. The most suitable fiber optic sensors for this application are those named Fiber Bragg Grating (FBG). Among the many composite component manufacturing processes, the one most commonly used for the production of high performance components, especially for aerospace applications, is autoclaving. The integration of the sensors into a composite laminate made by this process presents a number of problems such as those related to the interference of the optical fiber (which may represent a disturbance element) in the laminate or by the excessive stresses thereof that the fibers of the laminate apply on the optical sensors. In addition, the main problem is to ensure the transmission of recorded data within the laminate to the acquisition system. The optical fibers leaving the laminate often break due to the high pressure acting on the optical fiber at the exit point by the laminate. To solve the problem, optical connectors have been developed and integrated into the laminate. The connector was modeled for the finite elements and subjected to static analysis, mainly to identify the level of interference of the connector with the material in which it will be incorporated.

**Key-words:** Fiber Optic Sensor, FBG (Fiber Bragg Grating), Smart materials, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Optic Connector.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de fibra óptica. . . . .	23
Figura 2 – Esquema de fabricação e caracterização da rede de Bragg. . . . .	24
Figura 3 – Configuração da fibra óptica. . . . .	25
Figura 4 – Funcionamento do sensor óptico FBG. . . . .	25
Figura 5 – Lei de Snell representado. . . . .	26
Figura 6 – <i>Core</i> e <i>Cladding</i> com índice de refrações diferentes. . . . .	27
Figura 7 – Esquema do aparelho de aquisição de dados . . . . .	28
Figura 8 – Figura representando a refletividade pelo comprimento de onda. Mos- trando um comparativo quando não deformado e deformado. . . . .	29
Figura 9 – Representação de um material compósito. . . . .	30
Figura 10 – Preparação de um laminado CFRP com cadeia de sensores FBG <i>em- bedded</i> . . . . .	33
Figura 11 – Fibra de vidro integradas dentro das lâminas de fibra de carbono mos- trando as concentrações de tensões. . . . .	34
Figura 12 – Conector incorporado a placa compósito . . . . .	34
Figura 13 – Conector de fibra monomodo. . . . .	35
Figura 14 – Conector FC/PC. . . . .	36
Figura 15 – Conector FC/APC. . . . .	37
Figura 16 – Conector ST/PC. . . . .	37
Figura 17 – Conector LC/PC. . . . .	38
Figura 18 – Conector SC/PC. . . . .	39
Figura 19 – Componentes dos conectores. . . . .	39
Figura 20 – O Laser está passando livremente por dentro da fibra óptica saindo na extremidade. . . . .	40
Figura 21 – Esboço com um cilindro externo envelopado na fêmea . . . . .	40
Figura 22 – Esboço com a mola entre o anel e o cilindro magnético . . . . .	41
Figura 23 – Conector fêmea envelopado com termo-retrátil . . . . .	41
Figura 24 – Conector fêmea incorporado. . . . .	42
Figura 25 – Conector macho e conector fêmea . . . . .	43
Figura 26 – Imagem ilustrativa do termo tubo VITON . . . . .	44
Figura 27 – Conector pequeno com suas medidas . . . . .	45
Figura 28 – Conector grande com medidas . . . . .	45
Figura 29 – Hipótese principal: restrições no conector. . . . .	46
Figura 30 – Restrição e força aplicada - Compressão . . . . .	46
Figura 31 – Restrição e força aplicada - Torção . . . . .	46
Figura 32 – Restrição e força aplicada - Flexão vertical. . . . .	47

Figura 33 – Restrição e força aplicada - Flexão horizontal. . . . .	47
Figura 34 – Restrição e força aplicada - Tração. . . . .	47
Figura 35 – FV - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c. . . . .	50
Figura 36 – Deslocamento da flexão vertical para os conectores grandes. . . . .	51
Figura 37 – Medida do deslocamento da flexão vertical para os conectores grandes. . . . .	52
Figura 38 – Deslocamento da flexão vertical para os conectores pequenos. . . . .	52
Figura 39 – Medida de Deslocamento da flexão vertical para os conectores pequenos. . . . .	53
Figura 40 – Tensões principais da flexão vertical para os conectores grandes. . . . .	54
Figura 41 – Tensões principais da flexão vertical para os conectores pequenos. . . . .	54
Figura 42 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. . . . .	55
Figura 43 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. . . . .	55
Figura 44 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. . . . .	56
Figura 45 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. . . . .	56
Figura 46 – Medida da presença do conector, em flexão vertical, para os conectores grandes se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	57
Figura 47 – Medida da presença do conector, em flexão vertical, para os conectores pequenos se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	57
Figura 48 – C - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c. . . . .	58
Figura 49 – Deslocamento da compressão para os conectores grandes. . . . .	59
Figura 50 – Medida do deslocamento da compressão para os conectores grandes. . . . .	60
Figura 51 – Deslocamento da compressão para os conectores pequenos. . . . .	60
Figura 52 – Medida de Deslocamento da compressão para os conectores pequenos. . . . .	61
Figura 53 – Tensões principais da compressão para os conectores grandes. . . . .	62
Figura 54 – Tensões principais da compressão para os conectores pequenos. . . . .	62
Figura 55 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. . . . .	63
Figura 56 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. . . . .	63
Figura 57 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. . . . .	64



Figura 58 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. . . . .	64
Figura 59 – FH - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c. . . . .	65
Figura 60 – Deslocamento da flexão horizontal para os conectores grandes. . . . .	66
Figura 61 – Medida do deslocamento da flexão horizontal para os conectores grandes. . . . .	67
Figura 62 – Deslocamento da flexão horizontal para os conectores pequenos. . . . .	67
Figura 63 – Medida de Deslocamento da flexão horizontal para os conectores pequenos. . . . .	68
Figura 64 – Tensões principais da flexão horizontal para os conectores grandes. . . . .	69
Figura 65 – Tensões principais da flexão horizontal para os conectores pequenos. . . . .	69
Figura 66 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. . . . .	70
Figura 67 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. . . . .	70
Figura 68 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. . . . .	71
Figura 69 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. . . . .	71
Figura 70 – Medida da presença do conector, em flexão horizontal, para os conectores grandes se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	72
Figura 71 – Medida da presença do conector, em flexão horizontal, para os conectores pequenos se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	72
Figura 72 – TOR - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c. . . . .	73
Figura 73 – Deslocamento da torção para os conectores grandes. . . . .	74
Figura 74 – Medida do deslocamento da torção para os conectores grandes. . . . .	75
Figura 75 – Deslocamento da torção para os conectores pequenos. . . . .	75
Figura 76 – Medida de Deslocamento da torção para os conectores pequenos. . . . .	76
Figura 77 – Tensões principais da torção para os conectores grandes. . . . .	77
Figura 78 – Tensões principais da torção para os conectores pequenos. . . . .	77
Figura 79 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. . . . .	78
Figura 80 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. . . . .	78

Figura 81 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. . . . .	79
Figura 82 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. . . . .	79
Figura 83 – Medida da presença do conector, em torção, para os conectores grandes se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	80
Figura 84 – Medida da presença do conector, em torção, para os conectores pequenos se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	80
Figura 85 – TRA - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c. . . . .	81
Figura 86 – Deslocamento da tração para os conectores grandes. . . . .	82
Figura 87 – Medida do deslocamento da tração para os conectores grandes. . . . .	83
Figura 88 – Deslocamento da tração para os conectores pequenos. . . . .	84
Figura 89 – Medida de Deslocamento da tração para os conectores pequenos. . . . .	84
Figura 90 – Tensões principais da tração para os conectores grandes. . . . .	85
Figura 91 – Tensões principais da tração para os conectores pequenos. . . . .	85
Figura 92 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. . . . .	86
Figura 93 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. . . . .	86
Figura 94 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. . . . .	87
Figura 95 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. . . . .	87
Figura 96 – Medida da presença do conector, em tração, para os conectores grandes se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	88
Figura 97 – Medida da presença do conector, em tração, para os conectores pequenos se tratando de Tensões de Von Mises. . . . .	88
Figura 98 – Conector real R01. . . . .	99
Figura 99 – Conector R02 - foi alterado apenas a questão do cilindro magnético e a Sleeve. . . . .	100
Figura 100 – Conector R03 - foi alterado a questão do cilindro magnético, Sleeve e colocado o termoretrátil . . . . .	101
Figura 101 – Conector R01 real - pequeno . . . . .	102

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades do sensor FBG para a deformação . . . . .	27
Tabela 2 – FBG Sensor. . . . .	28
Tabela 3 – Propriedades da Fibra de Vidro/Epóxi e Fibra de Carbono/Epóxi . . .	31
Tabela 4 – Propriedades da resina epóxi . . . . .	32
Tabela 5 – Propriedades do Neodímio com Ferro e Boro . . . . .	43
Tabela 6 – Tabela referente a Malha. . . . .	50
Tabela 7 – Tabela FV - Deslocamento. . . . .	53
Tabela 8 – Tabela FV - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.	58
Tabela 9 – Tabela C - Deslocamento. . . . .	61
Tabela 10 – Tabela FH - deslocamento. . . . .	68
Tabela 11 – Tabela FH - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.	73
Tabela 12 – Tabela TOR - Deslocamento. . . . .	76
Tabela 13 – Tabela TOR - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.	81
Tabela 14 – Tabela TRA - Deslocamento. . . . .	84
Tabela 15 – Tabela TRA - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.	89
Tabela 16 – Tabela Total - Deslocamento. . . . .	89
Tabela 17 – Tabela Total - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.	90



# Lista de abreviaturas e siglas

FBG	Fiber Bragg Grating
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibra de carbono).
SHM	Structural Health Monitoring
EMI	Eletromagnetic interference
Ge	Germânio
GF	Gauge Factor
SG	Strain Gauge
Pa	Pascal
UV	Ultravioleta
MS	Multispar
CRFC	Compósitos de Carbono Reforçados com Fibras de Carbono.
VA	Venego Superiore
FRP	Fibra reforçado com polímero
FV	Flexão Vertical
C	Compressão
FH	Flexão Horizontal
TOR	Torção
TRA	Tração



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivos gerais	20
1.3	Objetivos específicos	20
1.4	Organização do trabalho	21
<b>2</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	Sensor de fibra óptica	23
2.2	Sensor de Bragg	24
2.2.1	Funcionamento do sensor FBG	25
2.2.2	Benefícios do sensor FBG	28
2.2.3	Sensibilidade de Sensores FBGs	29
2.3	Materiais Compósitos	30
2.3.1	Fibra de Carbono e Fibra de Vidro	30
2.3.2	Conceito e propriedades	31
2.3.3	Epóxi	31
2.3.4	Falhas	32
2.4	Aplicações do sensor FBG	32
2.5	Problemas encontrados	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
3.1	Estudo dos conectores de fibra óptica	35
3.1.1	Conector FC/PC	35
3.1.2	Conector FC/APC	36
3.1.3	Conector ST/PC	37
3.1.4	Conector LC/PC	37
3.1.5	Conector SC/PC	38
3.2	Conector utilizado atualmente	39
3.3	Propostas de soluções	40
3.4	Solução escolhida	42
3.4.1	Cilindro Magnético	42
3.4.2	Termo retrátil	43
3.5	Simulações	44
3.5.1	Materiais analisados	45
3.5.2	Restrições	45
3.5.3	Itens avaliados	48

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Malhas</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Análises</b>	<b>50</b>
4.2.1	Flexão vertical - (FV)	50
4.2.1.1	Deslocamento - FV com a presença dos conectores:	51
4.2.1.2	Tensões principais FV - com a presença dos conectores:	53
4.2.1.3	Tensões de Von Mises FV - com a presença dos conectores:	55
4.2.2	Compressão - (C)	58
4.2.2.1	Deslocamento C - com a presença dos conectores:	58
4.2.2.2	Tensões principais C - com a presença dos conectores:	61
4.2.2.3	Tensões de Von Mises C - com a presença dos conectores:	63
4.2.3	Flexão Horizontal - (FH)	65
4.2.3.1	Deslocamento FH - com a presença dos conectores:	65
4.2.3.2	Tensões principais FH - com a presença dos conectores:	68
4.2.3.3	Tensões de Von Mises FH - com a presença dos conectores:	70
4.2.4	Torção - (TOR)	73
4.2.4.1	Deslocamento TOR - com a presença dos conectores:	74
4.2.4.2	Tensões principais TOR - com a presença dos conectores:	76
4.2.4.3	Tensões de Von Mises TOR - com a presença dos conectores:	78
4.2.5	Tração - TRA:	81
4.2.5.1	Deslocamento TRA - com a presença dos conectores:	82
4.2.5.2	Tensões principais TRA - com a presença dos conectores:	85
4.2.5.3	Tensões de Von Mises TRA - com a presença dos conectores:	86
<b>4.3</b>	<b>Tabelas conclusivas</b>	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS</b>	<b>99</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

Há uma exigência de uma boa construção de qualidade e uma exploração durável e segura, principalmente, na parte aeroespacial. As estruturas aeroespaciais estão sujeitas a muitas mudanças adversas devido a possíveis danos, ao clima, pressurização, erros de projeto e construção, cargas aplicadas durante o voo, ou até mesmo alguns eventos inesperados como turbulência, impacto contra pássaros.

Nos tempos de hoje, é definida uma estrutura inteligente (ou, do inglês, *smart structure*) aquela que é capaz de gerar e comunicar informações sobre as mudanças da condição da sua saúde estrutural para seus operadores e decisores, em tempo real, automaticamente ou sob demanda, sendo confiável. Quer dizer, deve conter um sistema que inclui um sistema nervoso e um cérebro que estejam em operação contínua sendo capaz de detectar automaticamente o dano.

Neste trabalho, busca-se um sistema que seja capaz de detectar, reconhecer, localizar, quantificar ou avaliar o dano estrutural. Posteriormente, comunica esse fato à inteligência do sistema ou aos gerentes da estrutura. Os dados resultantes de monitoramento podem ser usados para otimizar a operação, manutenção, reparo, substituição de componentes e até mesmo evitar acidentes trágicos. Esse sistema pode ser nomeado como um sistema de monitoramento de saúde estrutural (ou do inglês *Structural Health Monitoring*, SHM).

O sistema de monitoramento de saúde estrutural pode ser compreendido como integração de inteligência de detecção com dispositivos de atuação para permitir condições de carregamento e danificações em uma estrutura. Ou seja, seu principal objetivo é semelhante ao corpo humano que consiste em detectar comportamentos estruturais incomuns indicando seu mau funcionamento. Com isto, são registrados, analisados, localizados e previstos com testes não destrutivos incorporados em sua estrutura. [1]

O processo SHM envolve a observação durante um certo tempo usando medidas de resposta dinâmica e estática. Os dados que foram coletados por um certo período são oriundos da base de uma série de sensores em que são extraídas suas características, as quais são sensíveis, mostrando os danos estruturais estáticos dessas características para determinar a saúde do sistema. [2]

Os sensores de fibra óptica são os mais adequados para os requisitos da técnica do SHM. Pois estes podem mensurar aplicações mecânicas (deformação, deslocamento, abertura de fissuras, carregamentos aplicados) e físicas (temperatura, umidade, pressão).

Para o SHM, esses parâmetros podem ser obtidos com sucesso utilizando esses sensores de fibra óptica devido ao seu pequeno tamanho e à grande variedade de parâmetros mensuráveis, a possibilidade de multiplexagem, de ser confiáveis a ambientes exigentes, da possibilidade de um monitoramento remoto em longa distância e de ser compatível com as redes de transmissão de dados. [3]

Os sensores de fibra óptica que atendem a esses requisitos são baseados na rede de Bragg, aqueles que são nomeados malha (ou grade) de Bragg, do inglês *Fiber Bragg Grating* (FBG). Em relação às estruturas aeroespaciais, os casos a serem estudados são componentes compósitos, materiais utilizados com frequência na indústria aeroespacial, em que parece mais fácil, devido as características dos materiais utilizados (especialmente os polímeros da matrizes), colocar os FBG por dentro. Por serem componentes aeroespaciais, os laminados de fibras longas são fabricados em autoclave para obter melhores resultados na fabricação [4]. Na autoclave, em condições de temperatura e pressão elevadas, se gera um ambiente perigoso para os sensores que são incorporados entre as camadas (ou em inglês ply) do laminado. [5]

Neste trabalho, é destacada a exigência de um conector na extremidade da fibra, que permite a saída dos dados pelo laminado, informando a saúde do material. Esse conector deve aguentar a pressão e a temperatura no processo da autoclave, e, também, deve garantir que não afete as propriedades mecânicas do laminado, em que ele esteja incorporado. Portanto, tem por objetivo a viabilidade dos conectores dedicados para sensores FBG incorporados em materiais compósitos, buscando propor melhorias a um conector de recém desenvolvimento que ainda apresenta problemas na sua utilização.

## 1.2 Objetivos gerais

O presente trabalho tem por objetivo realizar a avaliação técnica dos conectores do sensor FBG incorporados em materiais compósitos, buscando propor melhorias ao conector. Por conseguinte, as propostas de melhorias foram examinadas e uma delas foi a escolhida para análise via modelagem de elementos finitos.

## 1.3 Objetivos específicos

- Identificar os problemas do conector FBG já existente;
- Procurar solução para o conector FBG;
- Avaliar as propostas de soluções;
- Analisar a solução escolhida via modelo de elementos finitos utilizando o software

## 1.4 Organização do trabalho

Para a realização deste trabalho, foram documentados cinco capítulos. O primeiro capítulo, a Introdução, apresenta a contextualização, os objetivos e a organização. No segundo capítulo, o embasamento teórico trata do sensor FBG, dos materiais compósitos, das aplicações desse sensor e dos problemas encontrados quando o sensor é incorporado ao material. No terceiro capítulo, demonstra-se a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, em que se encontra o estudo dos conectores para os sensores de fibra óptica monomodos, qual conector é utilizado no sensor FBG atualmente e seus problemas, possíveis soluções desses problemas e, também, o desenvolvimento da modelagem de elementos finitos (MEF) para verificação de uma das soluções escolhidas. O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões com a qualidade da malha e as análises do comportamento do conector na placa. No quinto e último capítulo, encontra-se a conclusão de todo o trabalho e as futuras evoluções de pesquisa.



## 2 Embasamento Teórico

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica para a elaboração de conceitos e tomadas de decisões. Portanto, há um estudo do sensor óptico baseado na rede de Bragg, que explica como é constituída sua fabricação, o seu funcionamento e seus benefícios. Posteriormente, apresenta-se um estudo sobre os materiais compósitos, aplicações do sensor FBG e os problemas encontrados ao inserir nos materiais.

### 2.1 Sensor de fibra óptica

A fibra óptica é transparente e flexível, feita de sílica fundida (ou dióxido de silício,  $(SiO_2)$ ) para um diâmetro de 125 micrômetros. As fibras ópticas são utilizadas para transmitir informações, por meio da luz, permitindo transmissões em longa distância [6], são imunes às interferências eletromagnéticas, são utilizadas para transmitir o sinal de televisão, internet e, também, para conectar um sensor a um sistema de medição. [7]

As fibras ópticas como sensores são envelopados por um núcleo com material de revestimento transparente com um menor índice de refração. A luz é mantida dentro do núcleo pelo fenômeno de reflexão total guiando, então, as ondas, consoante Fig. 1.

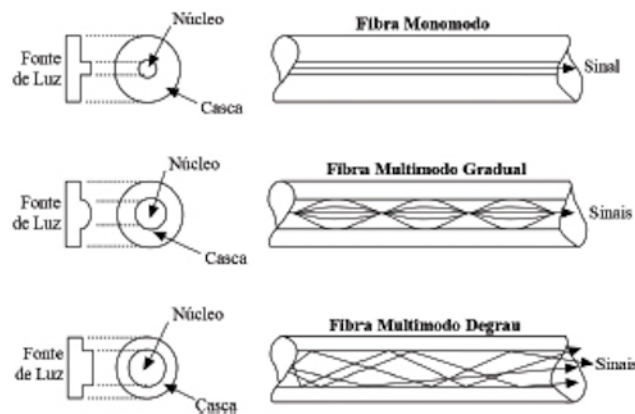


Figura 1 – Tipos de fibra óptica. [8]

Algumas fibras são chamadas de fibras de monomodo e multimodo. A diferença entre elas está na variação de densidade que ocorre entre essas duas camadas de material. A monomodo muda de densidade rapidamente, a luz transmitida reflete, de maneira mais eficiente, e com isso permite longas distâncias. Em relação à fibra multimodo, a luz é refletida de maneira mais suave, passa, lentamente, de uma densidade para outra e com isso percorre distância mais perto [7]. A principal diferença está no tamanho do diâmetro, a multimodo tem um diâmetro maior permitindo a entrada de mais luz e a reflexão desta

em modos diferentes. No caso específico para os sensores, especialmente FBG, utiliza-se a fibra monomodo.

Foi demonstrada, pela primeira vez, por Daniel Colladon e Jacques Babinet, em Paris, na década de 1840, a guiagem de sinais ópticos por meio de fios de água. John Tyndall incluiu uma demonstração nas palestras públicas em Londres, 12 anos depois [9]. Tyndall escreveu sobre a propriedade da reflexão interna total em 1870 [10]. Isto somente foi possível devido à Lei de Snell-Descartes, que será descrita, posteriormente, neste capítulo.

## 2.2 Sensor de Bragg

O *Fiber Bragg Grating* (FBG) é um sensor constituído por uma microestrutura (malha ou grade) gerada diretamente no núcleo, do inglês *core*, da fibra óptica monomodo. O primeiro sensor de Bragg foi apresentado por Ken Hill em 1978 [11]. As grades, inicialmente, foram fabricadas utilizando laser visível propagando ao longo do núcleo da fibra. Posteriormente, Gerald Meltz e seus colegas demonstraram uma técnica que era mais flexível, em que a iluminação a laser ocorreu ao lado da fibra. Essa técnica usa o padrão de interferência da luz laser ultravioleta (Fig. 2) para criar a estrutura periódica da rede de fibra de Bragg e é utilizada nos tempos atuais. [12]

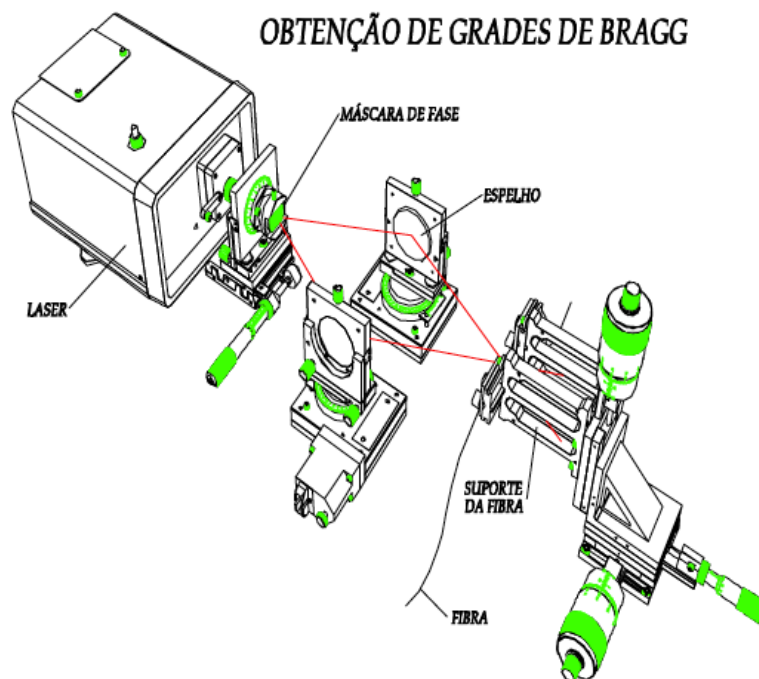


Figura 2 – Esquema de fabricação e caracterização da rede de Bragg. [13]

### 2.2.1 Funcionamento do sensor FBG

Os sensores de Fibra Óptica podem ser utilizados para o monitoramento estrutural, pois são pequenos, leves e imunes a interferências eletromagnéticas (EMI), fornecendo, assim, um sinal livre de ruídos externos. Devido ao fato de os sensores serem leves e robustos, podem ser incorporados à estrutura de forma que não alteram a integridade desta. Além de serem sensíveis a qualquer parâmetro que possa modificar a intensidade, frequência, polarização ou fase da luz percorrida por meio da fibra.

O FBG inclui um segmento de fibra óptica no qual foi feita uma modulação periódica do índice de refração do núcleo, conforme Fig. 3. Geralmente, a fibra FBG pode ser fabricada dopando o dióxido de silício com um elemento fotossensível, como o germânio (Ge) utilizando uma fonte de laser UV em 244-248 nm. [13]

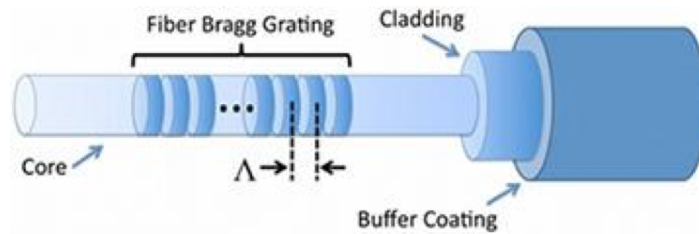


Figura 3 – Configuração da fibra óptica utilizada para as nossas aplicações, ou seja, core (núcleo), cladding (revestimento) e buffer coating (revestimento externo). [14]

O princípio de funcionamento do FBG baseia-se na medição das mudanças na reflexão do sinal, que é o comprimento de onda central da luz refletida de um reticulado de Bragg, dependente do índice de refração efetivo do núcleo e da periodicidade do *grating*, representado na Fig. 4.

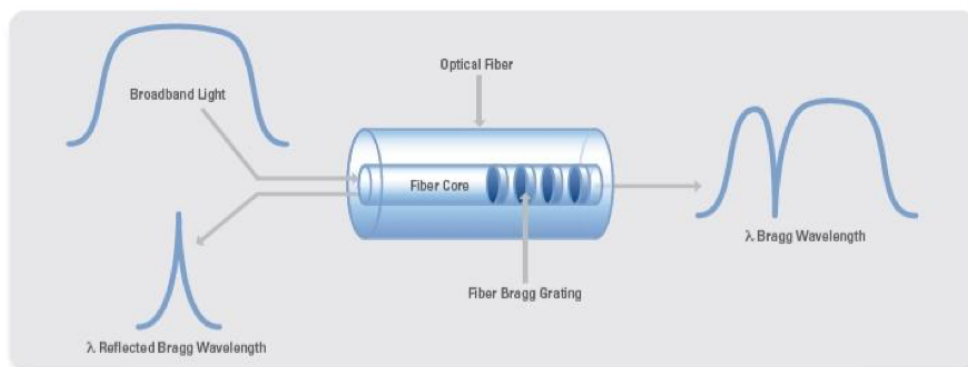


Figura 4 – Funcionamento do sensor óptico FBG. [14]

De acordo com a condição de Bragg, o comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_b$ ) pode ser expresso como: [15]

$$\lambda_b = 2n_{ef}\Lambda \quad (2.1)$$

Em que  $\Lambda$  é o espaçamento periódico da grade,  $n_{ef}$  é o índice refração efetivo da fibra do núcleo. Assim o comprimento de onda de Bragg se deslocará com mudanças de índice de refração. Quando uma deformação mecânica ou térmica externa for submetida ao segmento da fibra onde a grade está gravada, o índice de refração efetivo será alterado, assim, como o espaçamento periódico. O deslocamento do comprimento de onda de Bragg, causado pela mudança de tensão e mudanças na temperatura, pode ser expressos na forma de:

$$\Delta\lambda_B = \alpha\Delta\varepsilon + \beta\Delta T \quad (2.2)$$

em que,

$$\alpha = \lambda_B(1 - p_e) \quad (2.3)$$

$$\beta = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 1 - \frac{n_{ef}^2}{2}[p_{12} - (p_{11} - p_{12})v]\Delta\varepsilon \quad (2.5)$$

em que,

$$p_e = n_{ef}^2[p_{12} - (p_{11} - p_{12})v] \quad (2.6)$$

Em que,  $\Delta\lambda_b$  é a mudança de comprimento de onda e  $\lambda_0$  é o comprimento inicial da onda,  $p_e$  é o coeficiente de deformação óptica,  $\varepsilon$  é a deformação sofrida pelo grade,  $\alpha_\Lambda$  é o coeficiente da expansão térmica e  $\alpha_n$  é o coeficiente termo-óptico. O  $\alpha_n$  que descreve a mudança no índice de refração, quando o outro descreve a expansão do grade devido à temperatura [15].

Para compreender o princípio do funcionamento, é importante refletir acerca da Lei de Snell (Eq. 2.7), ou, então, da Lei de Refração (Fig.5).

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r) \quad (2.7)$$

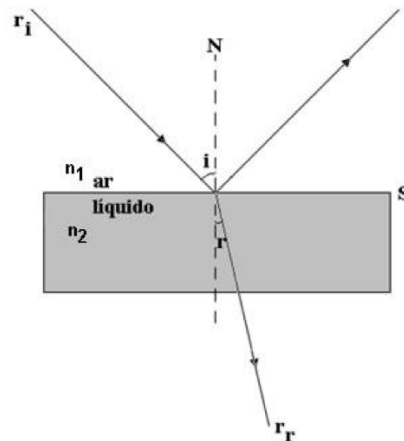


Figura 5 – Lei de Snell representado. [16]



O FBG atua como um espelho seletivo de comprimento de onda. Na parte interna, pode-se entender o funcionamento como um filtro de faixa estreita. Ou seja, se uma fonte de luz for injetada na fibra óptica, apenas a luz que se encontra nessa região estreita, centrada na onda de Bragg, será refletida. A luz restante continuará a trajetória da fibra sem apresentar perdas representativas. [17]

O comprimento de onda de Bragg é definido pelo índice de refração do seu núcleo e definido pelo período da microestrutura. O sensor de bragg possui uma estrutura simétrica refletindo o comprimento de onda independentemente do sentido da luz dentro da fibra devido à diferença do Índice de Refração *Core* e *Cladding* (Fig 6). O índice do core deve ser maior que o do *Cladding*.

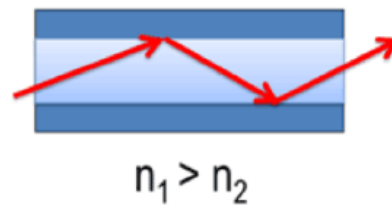


Figura 6 – *Core* e *Cladding* com índice de refrações diferentes. [3]

O produto do seno do ângulo de incidência pelo valor do índice de refração do meio em que se propaga o raio incidente ( $n_1$ ) é igual ao produto do seno do ângulo de refração pelo Índice de Refração do Meio, em que se propaga o raio refratado ( $n_2$ ).

As propriedades do sensor FBG estão resumidas na Tab. 1. As razões pelas quais optar por um sensor óptico a um sensor elétrico ou mecânico são: a imunidade à interferência eletromagnética; alta resolução e precisão; estabilidade; instalação fácil e barata; capacidade de compensar os efeitos devidos a temperatura; dimensões muito pequena. Ou seja, esse sensor é ideal para se colocar em qualquer sistema de engenharia para avaliar a mudança da temperatura, pressão, deformação, as vibrações.

Tabela 1 – Propriedades do sensor FBG para a deformação [18]

Propriedades	Valor	Unidade
Faixa de comprimento de onda	1520-1560	mm
Comprimento do FBG	10	mm
Limite de deformação	3000	$\mu\epsilon$
Sensibilidade a deformação	$\sim 1.2$	pm/ $\mu\epsilon$

Os dados são transmitidos por meio da fibra óptica que contém um sensor FBG. Portanto, precisa-se de um aparelho de aquisição de dados permitindo a leitura dos sensores (Fig. 7).

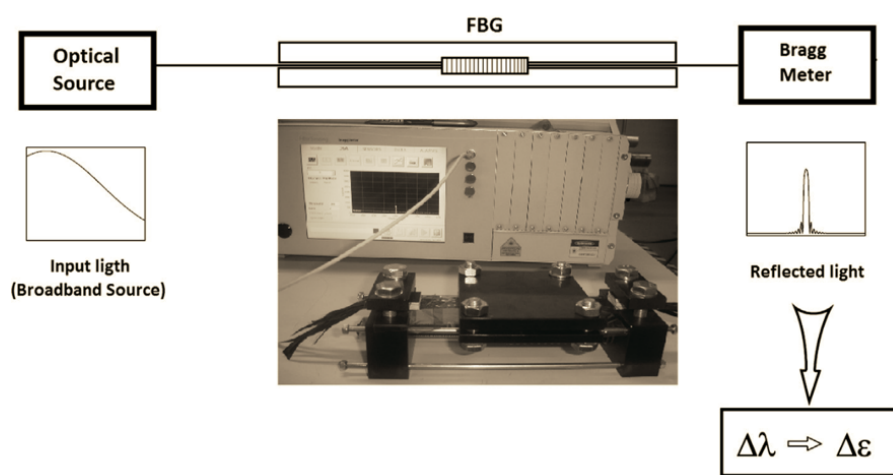


Figura 7 – Esquema do aparelho de aquisição de dados [19]

### 2.2.2 Benefícios do sensor FBG

A Tab. 2 apresenta os benefícios desse sensor.

Tabela 2 – FBG Sensor [20].

Tipo	Tecnologia	Velocidade de medição	Imunidade de ruído elétrico	Configuração do sensor	Montagem
Óptico	FBG	Tipicamente < 100 kHz	ALTO	Multiplexagem	Incorporável e Superfície

\*A multiplexagem é a capacidade de colocar uma série de FBG (de diferentes comprimentos de onda) em uma única cadeia de medida e uma única fibra óptica, permitindo um monitoramento multi-paramétrico (cada sensor pode medir uma quantidade diferente como T, P, RH%, pH, etc.).

As áreas de aplicação incluem aqueles que experimentam altas tensões e EMI. Portanto, o sensor de fibra óptica FBG, além de poder realizar testes nesses locais, pode, também, funcionar como vários sensores, utilizando-se da multiplexagem, e até mesmo incorporar-se ao componente estrutural.

Além disto, o sensor do FBG possui as seguintes características:

1. Insensibilidade ao ruído eletromagnético;
2. Baixa influência por água e corrosão;
3. Tamanho pequeno (parte integrada da fibra);
4. Baixa perda de transmissão permite grandes distâncias entre central de processamento (*acquisition system*) e a posição do sensor;
5. Vários sensores na mesma fibra implicam menos cabeamento (rede de sensores distribuídos – multiplexagem e possibilidade de monitoramento multi-paramétrico).

6. A tensão é proporcional ao comprimento de onda, portanto, não depende da intensidade de luz.

### 2.2.3 Sensibilidade de Sensores FBGs

Uma rede de Bragg pode representar os efeitos da tração e compressão conforme Fig. 8, mostrando o comprimento de onda pela reflexividade e fazendo um comparativo da rede sem deformação e com a deformação. Com base nas deformidades ocorridas no material, faz com que ocorram distorções no sensor devido à aplicação de força no material. Com isso, o comprimento de onda de Bragg é alterado devido às deformações ocorridas, e isto é mostrado diretamente no sistema de aquisição de dados que faz um comparativo entre a onda refletida e a onda remanescente.

A partir da Fig. 8, percebe-se uma deformação longitudinal sobre a fibra óptica. A fórmula que representa a deformação longitudinal sobre a fibra é a Eq. 2.8:

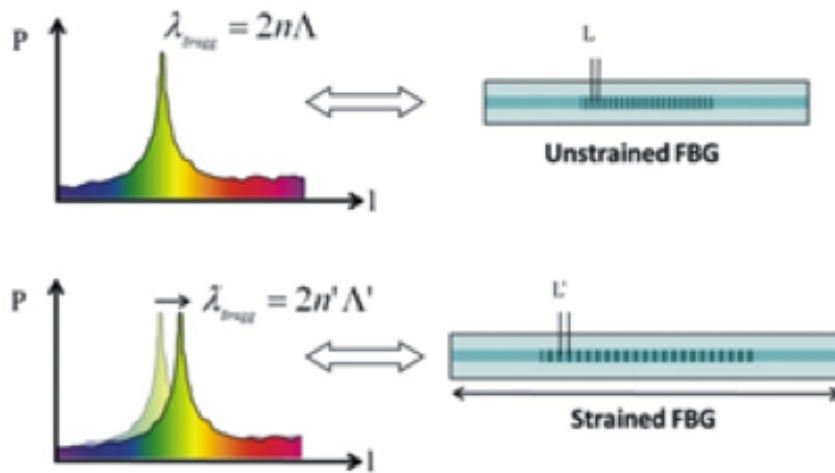


Figura 8 – Figura representando a refletividade pelo comprimento de onda. Mostrando um comparativo quando não deformado e deformado. [21]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon_l - \left(\frac{n_{ef}^2}{2}\right)[p_{11}\varepsilon_t + p_{12}(\varepsilon_l + \varepsilon_t)] \quad (2.8)$$

$p_{ij}$  ( $p_{11}$  e  $p_{12}$ ) constitui o tensor elasto-ótico para sílica; deformações transversais e longitudinais ( $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_l$ ); o comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) e o Índice de Refração Efetivo do núcleo da fibra óptica ( $n_{ef}$ ).

Com o aumento da temperatura, o comprimento de onda de Bragg desloca-se para maiores comprimentos de onda, devido aos efeitos combinados com a refração efetivo e a expansão térmica. Quanto menor o deslocamento menores são as ondas de comprimento:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2.9)$$

O coeficiente termo-ótico é representado por:

$$\xi = \left(\frac{1}{n_{ef}}\right)\left(\frac{\partial n_{ef}}{\partial T}\right) \quad (2.10)$$

E o coeficiente de expansão térmica:

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \quad (2.11)$$

Esses coeficientes variam de acordo com o material.

Os efeitos que são causados pelas deformações e a temperatura alteram o valor do comprimento de onda de Bragg, tornando-se excelentes dispositivos para sensores de reação e o monitoramento dessas variações.

## 2.3 Materiais Compósitos

Os compósitos (Fig. 9) são materiais formados pela união de mais materiais com o objetivo de obter um produto de melhor qualidade, que apresente as melhores características de cada material integrante.

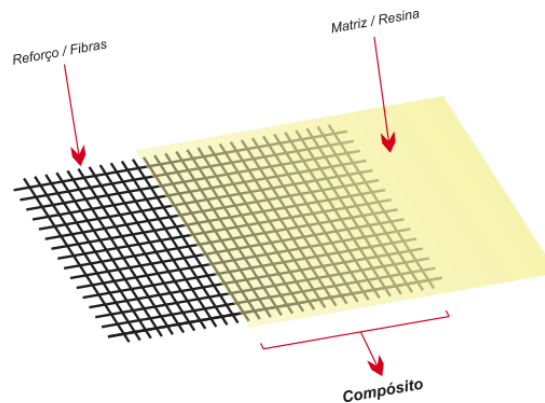


Figura 9 – Representação de um material compósito.

### 2.3.1 Fibra de Carbono e Fibra de Vidro

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos no mercado de maneira definitiva na parte aeroespacial. O desenvolvimento da fibra de carbono, vidro, boro, quartzo ofereceram ao projetista oportunidade de flexibilizar os projetos estruturais atendendo as necessidades do voo. Ao mesmo tempo, compósito de carbono/carbono (compósitos de carbono reforçados com fibra de carbono – CRFC) e tecidos de fibras de quartzos foram submetidos a diversas condições térmicas e de erosão. [22].

Com esses avanços dos materiais compósitos, a estrutura ficou mais leve e com alto desempenho, favorecendo o mercado de mísseis, foguetes e aeronaves com geometrias complexas. [22].

Entre os compósitos mais utilizados na indústria aeroespacial, estão aqueles de fibra longas, de vidro ou carbono, em matriz polimérica, como uma resina epóxi.

### 2.3.2 Conceito e propriedades

A fibra de carbono é composta por vários filamentos de carbono que são finos, na ordem de 5 a 10 micrômetros de diâmetros. É uma fibra sintética e possui propriedades mecânicas semelhantes a um aço e mais leve que um plástico, ou seja, resistentes a cargas de tensões muito altas. A sua dureza é maior do que a do aço e resiste a altas temperaturas.

Para a produção das fibras carbônicas, o método mais utilizado é a pirólise. Coloca-se algum material com alto porcentual em carbono em sua matriz molecular que retém a sua forma fibrosa por meio de tratamentos térmicos resultando em carbonização.

As fibras de carbono sozinhas não possuem propriedades tão vantajadas, mas, quando combinadas com outros materiais, as suas características se tornam bem interessantes.

Já o polímero reforçado de fibra de vidro (PRFV) possui alta resistência à flexão, impacto e tração, sendo muito empregado em aplicações estruturais aeroespaciais. São leves e não conduzem corrente elétrica, sendo utilizado, também, como isolante estrutural. Permite ampla flexibilidade ao projeto, possibilitando a moldagem de peças complexas, grandes ou pequenas, sem emendas e com grande valor funcional. A Tab. 3 apresenta algumas características das fibras com a matriz epóxi.

Tabela 3 – Propriedades da Fibra de Vidro/Epóxi e Fibra de Carbono/Epóxi

	Fibra de Vidro/Epóxi	Fibra de Carbono/Epóxi
Diâmetro do Filamento[micrômetro]	9	7
Densidade[g/cm <sup>3</sup> ]	2.48-2.49	1.79
Resistência à Tração[MPa]	4845	5000
Módulo de Tração[GPa]	85.5-86.9	245
Número de filamentos por tonelada	6.000	24.000
Densidade Linear Nominal[tex]	363	1600

Temperatura de cura de uma resina epóxi é de 177 °C. [23]

### 2.3.3 Epóxi

A resina epóxi (matriz) é um polímero termofixo que endurece quando reage com um agente catalisador [24]. Algumas de suas propriedades mecânicas estão na Tab. 4 retirada do software Ansys Inc:

Tabela 4 – Propriedades da resina epóxi [25]

	Valor	Unidade
Densidade	1.16E-09	mm <sup>-3</sup> t
Módulo de Young	3780	MPa
Coefficiente de Poisson	0.35	
Módulo de Compressão (Bulk modulus)	4.2E+09	Pa
Tensão de Cisalhamento	1400	MPa
Módulo de Tração (Tensile Yield Strength)	54.6	MPa

### 2.3.4 Falhas

Materiais compósitos podem ser vistos e analisados na escala micro (fibra e matriz) e na escala macro (lâmina e do laminado).

Na escala micro, há uma escala de observação da ordem do diâmetro da fibra, o tamanho da partícula. Portanto, o estudo é da interação que constitui uma parte micro. Trata dos estados de tensões e deformação, e de falhas de central, como falha de flambagem, quebra, falha da matriz, compressão, cisalhamento e falha interfacial. Na meso é mais rápido e eficiente considerar como homogêneo, mesmo sabendo que é anisotrópico utilizando as médias na análise. E, na macro, a análise é aplicada na forma da Teoria do Laminado, o seu comportamento geral em função das propriedades da lâmina e da sequência de empilhamento. Os métodos como os elementos finitos juntamente com a Teoria dos Laminados podem prever o comportamento elástico da estrutura, assim como o estado de tensão em cada lâmina. Portanto, danos em estruturas compósitas são difíceis de serem detectados e analisados [26]. Para isto, é essencial monitorar a estrutura em tempo real ou periodicamente.

## 2.4 Aplicações do sensor FBG

Os sensores FBG têm sido aplicado cada vez mais para monitorar as estruturas, principalmente na área aeroespacial. Uma vantagem dos sensores é de se incorporar dentro dos materiais compósitos.

Pesquisadores dos departamentos DICMA e DIAEE, da Universidade Sapienza de Roma, realizaram testes em colaboração com Alenia Aermacchi nas plantas de Venego Superiore (VA); foram feitos testes internos com material compósito CFRP para serem usados em testes destrutivos após o seu envelhecimento usando o método de *hot-and-wet* (mergulhando em água a 70 graus Celsius por 31 dias) para reproduzir um componente estrutural da aeronave [27].

Eles utilizaram os sensores FBG para testar a incorporação das fibras ópticas no ambiente real; medir a deformação do CFRP antes e depois da câmara de vácuo; medir a

deformação do componente CFRP antes e depois do envelhecimento (colados na superfície do mesmo componente); medir a deformação nos testes destrutivos e fazer o comparativo com os Strain Gauges; durante os testes destrutivos, foram utilizados 2 sensores FBG dentro dos laminados e 3 sensores FBG ao lado de fora (Fig. 10). [27]

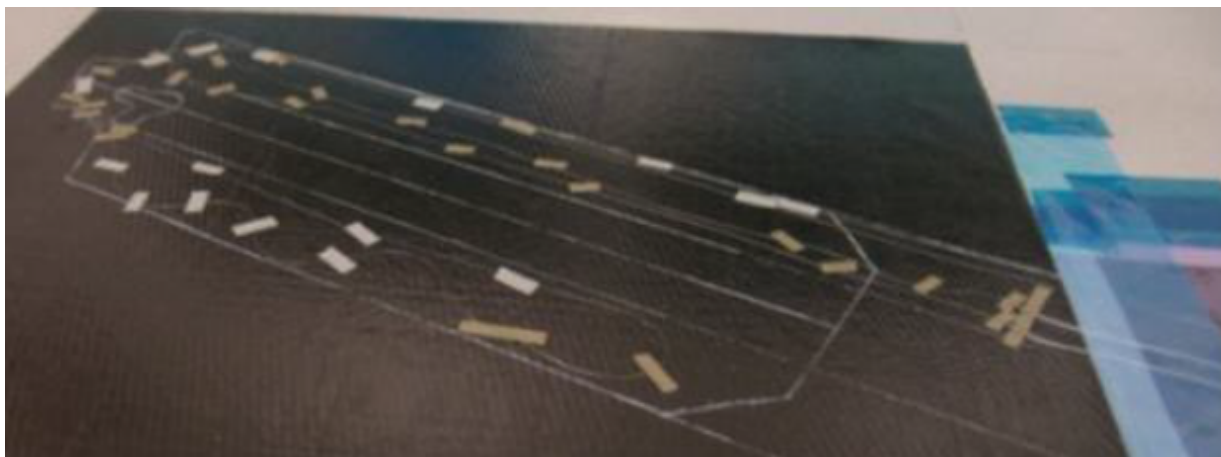


Figura 10 – Preparação de um laminado CFRP com cadeia de sensores FBG *embedded*. [27]

O impacto, a vibração e o carregamento podem causar danos às estruturas compostas do CFRP, como delaminação e fissura na matriz. O dano interno pode ser invisível para os olhos humanos, mas não para os sensores FBG. Nessas situações, os sensores são incorporados à área circundante mais próxima das localizações críticas da estrutura, podendo, assim, analisar os níveis de deformação. Em CFRP o dano começa normalmente em concentração de tensão, o que é essencial à implementação do SHM para identificação desses danos. [28]

## 2.5 Problemas encontrados

Um dos problemas encontrados consiste na dificuldade da fabricação, principalmente, em laminados, para aplicações aeroespaciais, que utilizam a autoclave. O processo de autoclave gera um ambiente perigoso, pois há um aumento de temperatura e pressão em um ambiente devidamente fechado e lacrado, dentro é colocado o compósito com a fibra óptica já incorporada. Com isso, tensões cisalhantes são originadas em volta da saída da fibra, onde acontecem a quebra da mesma.

Sendo um componente aeroespacial realizado em compósito, definido como de alto desempenho, o resultado apresentado na (Fig. 11) não é aceitável em relação à introdução de uma fibra óptica com diâmetro de  $125\ \mu\text{m}$  entre duas lâminas de  $150\text{-}300\ \mu\text{m}$ . Pelo fato da autoclave representar um ambiente arriscado. Portanto, todas as preocupações

precisam ser tomadas para não aplicar cargas no sensor na matriz que ainda não foi curada. [28]

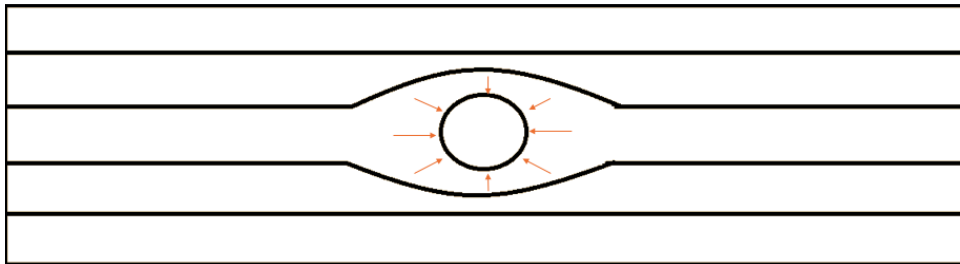


Figura 11 – Fibra de vidro integradas dentro das lâminas de fibra de carbono mostrando as concentrações de tensões.

Outro problema encontrado refere-se à central de processamento (do inglês, *data acquisition system*). Pois, em virtude da variação de deformação que sofre o material, há alteração dos valores demonstrados no sistema em relação à variação na rede de Bragg. A questão é calibrar o sistema já com a solitação da própria estrutura e colocar na saída, o conector, onde não ocorra carga e nem deformações. [29]

Alguns métodos são necessários se desenvolver para proteger os sensores durante os processos de fabricação de compósitos de plástico reforçado com fibras (PRF) e polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), pois não há uma maneira de substituir os sensores danificados após a fabricação dos componentes, portanto, há um rigoroso processo que deve ser desenvolvido para seguir durante a fabricação [28]. Por isso, este trabalho foca no projeto de otimizar um conector já existente Basile[30], representado na Fig. 12, que resista às tensões mecânicas solicitadas, não permita a entrada de resina durante o processo de fabricação do laminado e evita a quebra da fibra.

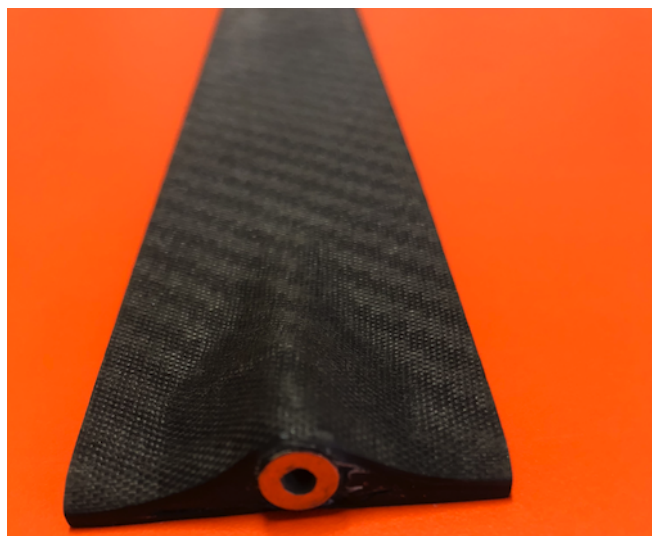


Figura 12 – Conector incorporado a placa compósito



## 3 Metodologia

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos. Dessa forma, apresentam-se caminhos de um estudo dos conectores monomodos presentes hoje no mercado, o conector, atualmente utilizado para o sensor FBG e seus problemas, propostas de soluções, solução escolhida e o desenvolvimento da modelagem em elementos finitos.

### 3.1 Estudo dos conectores de fibra óptica

Conectores ópticos são dispositivos que servem de interface entre a conexão da fibra óptica de um cabo com o dispositivo desejado.

Por se tratar de um sensor FBG, procurou-se conectores de fibra óptica monomodos que possuem um diâmetro muito menor no núcleo, e uma casca mais espessa (Fig. 13). Portanto, há uma menor perda de luz, mesmo em curva e em distâncias longas. Isto deve-se ao menor diâmetro que permite a reflexão direta do feixe de luz. Os conectores são: FC/PC, FC/APC, ST/PC, LC/PC e SC/PC.

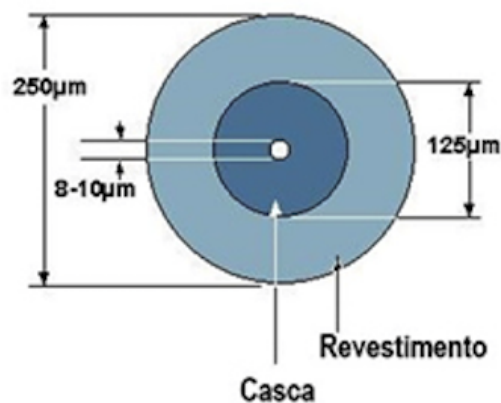


Figura 13 – Conector de fibra monomodo. [31]

#### 3.1.1 Conector FC/PC

O conector FC/PC (*Fiber Connector/Physical Contact*), de cor amarela na Fig. 14, com rosca, é projetado para ambientes de alta vibração. O termo PC significa que é um contato físico, ou seja, esse conector permite que a superfície de duas fibras conectadas fiquem em contato direto. A ponteira cerâmica já tem um pré-raio definido que minimiza os reflexos posteriores. A ponteira de cerâmica, também, é acionada por mola para controlar a força na fibra quando o conector é parafusado. Há um modelo de conector FC/PC que

é ajustável, permitindo o alinhamento preciso com o eixo. Assim, posteriormente, pode utilizar uma cola para travar o alinhamento. As características principais do conector são: [32]

- Conectores FC/PC com chaves estreitas de 2,0 mm para modo único ou fibras de manutenção com polarização;
- Conector aparafusado para alta estabilidade;
- Pré-Radiado, com Mola, Ø2,5 mm, Ferrule cerâmico;
- Alívio de tensão para tubulação de Ø3,0 mm ou Ø900 µm tubulação e capa incluídos.

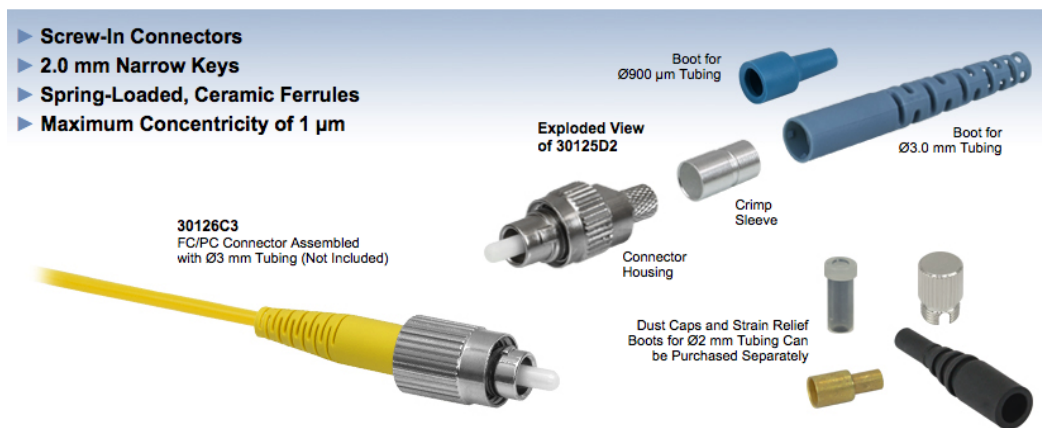


Figura 14 – Conector FC/PC. [32]

### 3.1.2 Conector FC/APC

O conector FC/APC (*Fiber Connector/Angled Physical Contact*), de cor verde, Fig.15, com rosca, é projetado para ambientes de alta vibração e reflexos mínimos de volta. O termo APC refere-se a um contato físico inclinado, ou seja, esse conector permite que a superfície de duas fibras conectadas fiquem em contato direto. Portanto, a extremidade da fibra é polida em um ângulo de 8 graus (ponteira cerâmica) para evitar que a luz refletida se desloque voltando pela fibra. Utiliza-se o mesmo conector no acoplamento para não ocorrer perda significativa. As principais características do conector são: [33]

- Conectores FC/APC com chaves estreitas de 2.0 mm;
- Conector aparafusado para alta estabilidade;
- 8 ° Pré-Angulado, com Mola, Ø2,5 mm, Ferrule cerâmicas;
- Alívio de tensão para tubulação de Ø3,0 mm ou Ø900 µm tubulação e capa incluídos.



Figura 15 – Conector FC/APC. [33]

### 3.1.3 Conector ST/PC

Esse conector ST/PC (ponta reta, ou em inglês *Straight Tip*), representado na Fig. 16, possui uma montagem rápida devido ao seu formato de baioneta, ou seja, permite conexões e desconexões rápidas e, também, possui uma ponteira cerâmica com ponta pré arredondada para minimizar reflexos posteriores. As características principais do conector são: [34]

- Conector ST/PC;
- Conector estilo baioneta para fácil inserção;
- Pré-Radiado, com Mola, Ø2,5 mm, Ferrule cerâmico;
- Alívio de tensão para tubulação de Ø3,0 mm de tubo e capa incluídos.

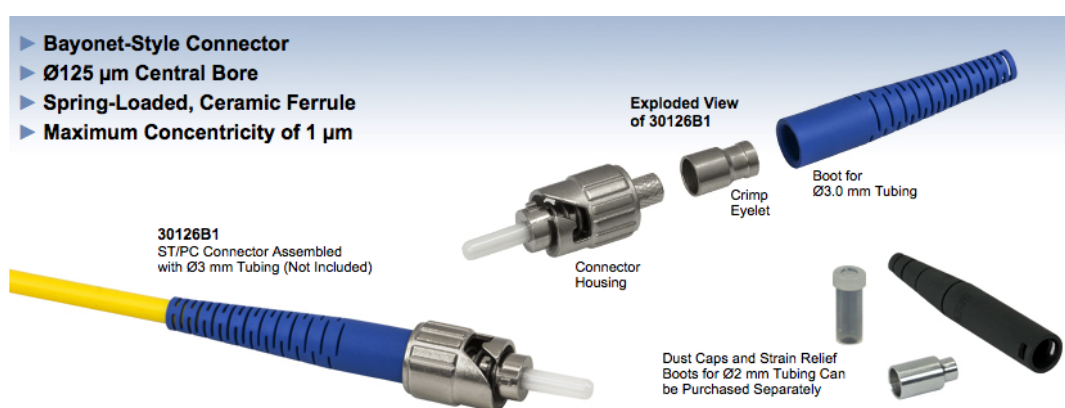


Figura 16 – Conector ST/PC. [34]

### 3.1.4 Conector LC/PC

Esse conector LC/PC (brilhoso, ou no inglês *Lucent Connector*), representado na Fig. 17, foi desenvolvido para atender necessidade de conectores de fibra óptica menores e

mais fáceis de se utilizar. Embalado com uma bainha de alívio de tensão para tubulação de  $\text{Ø}900 \mu\text{m}$  e uma tampa contra poeira, esse conector tem uma ponteira de cerâmica de  $\text{Ø}1,25 \text{ mm}$  carregada por mola. As características principais do conector são: [35]

- Conector LC/PC;
- Ferrule pequena e tamanho de caixa menor que o conector SC/PC;
- Com mola,  $\text{Ø}1,25 \text{ mm}$ , Ferrule cerâmica;
- Alívio de tensão para tubulação de  $\text{Ø}900 \mu\text{m}$  de tubo e capa incluídos;

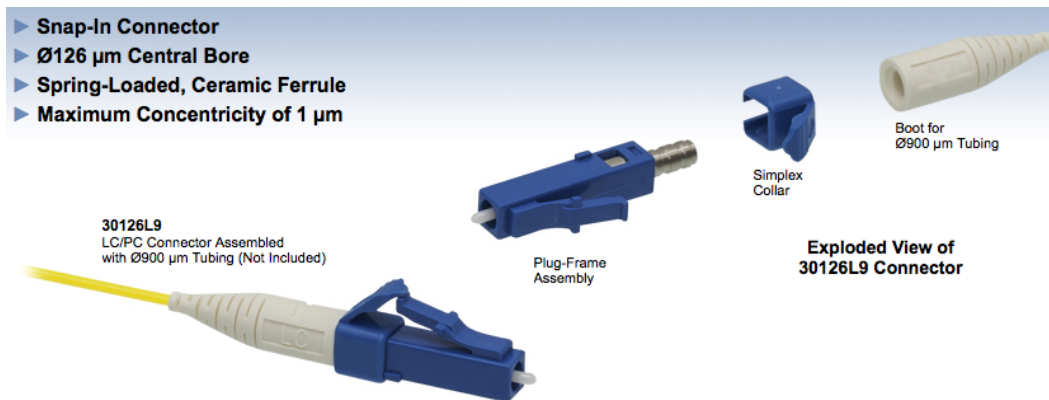


Figura 17 – Conector LC/PC. [35]

### 3.1.5 Conector SC/PC

Este conector SC/PC (conector de assinante, do inglês *Subscriber Connector*), representado na Fig.18, permite a montagem fácil e rápido da estrutura interna no invólucro externo por encaixe. Possui uma ponteira cerâmica pré-radial minimizando os reflexos posteriores. O conector vem com a bainha de alívio de tensão para tudo de  $\text{Ø}3 \text{ mm}$  e  $\text{Ø}900 \mu\text{m}$  e uma tampa de conector de fibra. As características principais do conector são: [36]

- Conector SC/PC;
- Pré-Radiado, com Mola,  $\text{Ø}2,5 \text{ mm}$ , Ferrule cerâmico;
- Com mola,  $\text{Ø}1,25 \text{ mm}$ , Ferrule cerâmica;
- Alívio de tensão para tubulação de  $\text{Ø}3,0 \text{ mm}$  e  $\text{Ø}900 \mu\text{m}$  de tubo e capa incluídos.

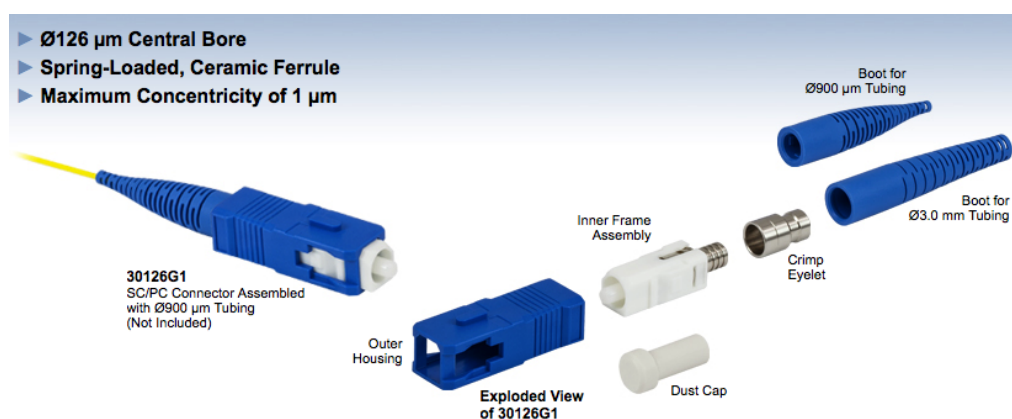


Figura 18 – Conector SC/PC. [36]

## 3.2 Conector utilizado atualmente

O conector o qual é utilizado partiu-se de terminais FC/PC. Eles são magnéticos para assegurar a segurança do encaixe entre os conectores e deixar alinhados os acessórios interligados. Eles satisfazem três requisitos: Basile[30]

1. Boa qualidade de sinal, quando em comparação com os conectores do mercado;
2. Tamanho reduzido para permitir a integração no material compósito;
3. Boas propriedades de vedação mecânica sem perdas significativas de sinal.

O conector magnético é composto por estas partes principais (Fig. 19):

- Fibra óptica;
- Ferula (Zircônio + Aço Inoxidável) FC/PC;
- *Sleeve* (manga cilíndrica elástica em cerâmica);
- Ímãs ( $Nd_2Fe_{14}B$ ).

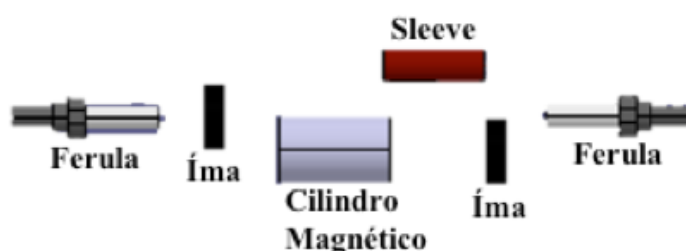


Figura 19 – Componentes dos conectores

Esse conector tem alguns problemas, como a fixação do *sleeve*. Por isto, às vezes os pesquisadores que o desenvolveram colocam um pouco de resina na sua ponta fêmea (a que fica incorporada no material) para fixá-la.

Outro problema refere-se ao fato de que, no processo da cura, a resina epóxi pode cair por dentro do conector e tampar a fibra óptica, deixando de atravessar o laser através da fibra e de aferir o valor. É necessário, apenas, uma gotinha de  $9\ \mu\text{m}$  de diâmetro para não permear o laser (ou seja, do mesmo valor do diâmetro do *core*). O laser deve transpor de uma forma limpa e livre de qualquer interferência, conforme Fig. 20. Mais um problema é representado na utilização de uma *sleeve* cerâmica (de zircônio) que, sendo muito fina, tende a quebrar durante a inserção do conector macho, dificultando o alinhamento dos *cores* das duas extremidades da fibra e preenchendo a parte interna do conector fêmea com resíduos (considerando também que os resíduos de zircônio são muito duros e poderiam arranhar irreparavelmente a ponteira do conector fêmea).



Figura 20 – O Laser está passando livremente por dentro da fibra óptica saindo na extremidade.

### 3.3 Propostas de soluções

A primeira solução a qual foi esboçada está representado na Fig. 21. O objetivo consistiu em criar um conector fêmea, apenas, com um cilindro externo com sua extremidade magnética e a ferula fêmea. O conector macho conterá a *Sleeve* dentro do cilindro magnético conectado à ferula macho e pronta para ser encaixada na fêmea. Descartou-se-a, pois o risco de quebrar a ferula fêmea é alto.

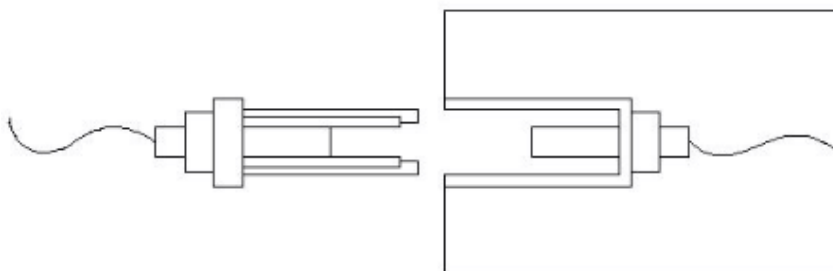


Figura 21 – Esboço com um cilindro externo envelopado na fêmea

Uma segunda solução esboçada está representada na Fig. 22. Buscou-se inserir molas entre o anel magnético para ajudar na questão do impacto e alinhamento. A aproximação das ferulas devem ser alinhadas. Essas molas, juntamente a sleeve, facilitariam o processo de alinhamento devido ao encaixe mais suave e a flexibilidade. Também foi pensado em colocar um cilindro externo para proteger o conector fêmea. Porém, isto é muito ruim ao material o qual está incorporado. Pois a intenção do conector é ser o menos invasivo possível para que se possam extrair os dados da saúde do material.

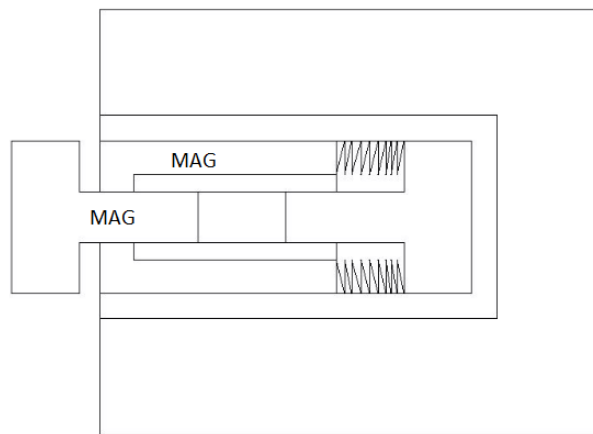


Figura 22 – Esboço com a mola entre o anel e o cilindro magnético

A terceira solução foi estreitar o furo do cilindro magnético na ponta, fazendo uma barreira para que possa colocar a *sleeve*, assim garantindo a flexibilidade dentro do conector sem deixá-la escapar. A sleeve de cerâmica deve ser substituída por um metal (latão), menos frágil, mas que ainda garanta uma boa elasticidade e o consequente alinhamento correto das ferulas. É importante, também, inserir um termo retrátil de alta temperatura na superfície exterior para aderir ao conector, o que evitaria que a resina entrasse dentro deste durante o processo da autoclave. O desenho desse conector está representado na Fig.23.

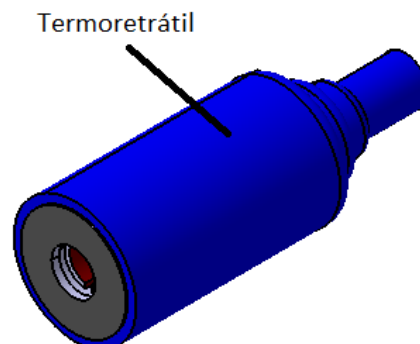


Figura 23 – Conector fêmea envolvido com termo-retrátil



## 3.4 Solução escolhida

A solução escolhida foi a terceira, pois o termo-retrátil assegura a não entrada da resina dentro do conector. Mas, para a sua validação, devem-se fazer as análises verificando-se os efeitos que podem ocorrer no material ao qual ele está incorporado. Para isto, serão realizadas análises relativas ao tamanho real do conector que foi desenvolvido pelos pesquisadores da Sapienza e, também, em tamanho menor que está em desenvolvimento.

### 3.4.1 Cilindro Magnético

O cilindro magnético constitui um auxílio externo feito de neodímio ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) para que haja o alinhamento da Ferula, é preciso de uma Sleeve que faça a conexão entre ferulas do conector macho com a fêmea. Sabemos que a fêmea (Ferula + Sleeve + Cilindro + Anel Magnético) está incorporada ao material (Fig.24).

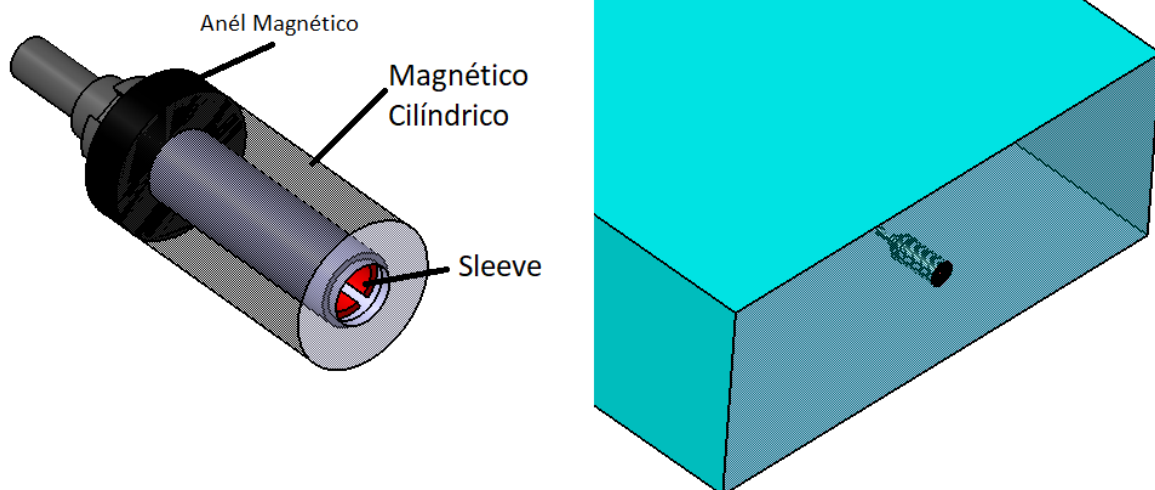


Figura 24 – Conector fêmea incorporado.

Atualmente, esse cilindro magnético não trava a Sleeve. Às vezes ela pode ser retirada quando o conector macho, também, é retirado. Assim, é possível desalinhar e dificultar a reinsertão da Sleeve. Para solucionar esse tipo de problema, pensou-se na criação de uma borda extra do molde magnético para que a Sleeve não saia quando colocado e retirado o conector macho (Fig.25).



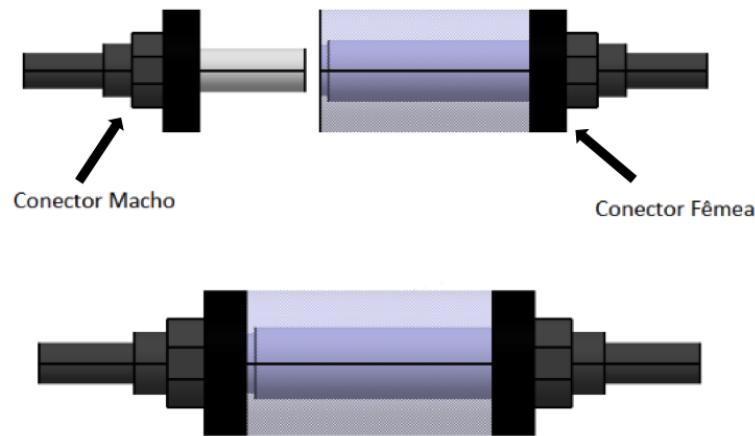


Figura 25 – Conector macho e conector fêmea

As propriedades do material do cilindro magnético são representadas na Tab. 5:

Tabela 5 – Propriedades do Neodímio com Ferro e Boro [37]

Característica	Valor	Unidade
Densidade	7.5	g/cc
Dureza de Vickers	570	D.P.N
Força compressiva	780	N/mm <sup>2</sup>
Resistência a tração	8	kg/mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	1.6E11	N/m <sup>2</sup>
Resistência a flexão	9.8E-12	N/m <sup>2</sup>
Compressibilidade	9.8E-12	N/m <sup>2</sup>
Rigidez	0.64	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de poisson	0.24	
Tempo de cura	310	Celsius

### 3.4.2 Termo retrátil

O termo retrátil pode ser encontrado como termotubo, ou seja, é um tubo que contrai quando aplicado calor à tubagem termocontrátil, sendo assim, o processo no interior do tubo é ativado. Ele permite que o tubo e o objeto que está sobreposto se tornem um produto unificado. Normalmente, é utilizado para isolamento, alívio de tensão, agrupamento ou qualquer acabamento profissional [38]. Nesse caso, especificamente, o conector será utilizado para isolamento, garantindo a não entrada da resina até a fibra óptica.

Ele fornece durabilidade extra, resistência ao calor, e, também, é projetado para dar um ajuste ao material e impedir que não saia mais com o tempo ou o uso. A instalação é fácil, alguns precisam, apenas, de um isqueiro para acionar o termo-retrátil. Mas, nesse caso, prefere-se o uso de um soprador térmico para que o calor se concentre uniformemente. [38]

No caso específico, utiliza-se um termo retrátil VITON (Fig.26) que possui as seguintes características: [39]

- Não têm rachaduras na faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $200^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de encolhimento:  $175^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de operação:  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $200^{\circ}\text{C}$
- Contração: 2:1



Figura 26 – Imagem ilustrativa do termo tubo VITON [39].

Portanto, ele atende à temperatura da resina de cura de alguns componentes aeronáuticos que chegam até  $177^{\circ}\text{C}$  com  $0.7\text{ MPa}$ . [5].

Também foi pensado no termo-retrátil TEFLON devido a suas qualidades térmicas e físicas. Porém, devido à substância ser praticamente inerte, tem como virtude não reagir com outras substâncias químicas. Portanto, não iria reagir com a resina epóxi e, então, ela foi descartada. [40]

### 3.5 Simulações

Inicialmente foi realizado o processo de modelagem computacional dos conectores incorporados às placas, em MEF (Método de Elementos Finitos) pelo software CatiaV5®19. A partir daí, foram examinadas as placas para análise estática de Von Mises, tensões principais e o deslocamento para verificar a influência dos conectores nas placas.

O software CatiaV5®19 é excelente para o desenvolvimento do desenho CAD e também para as análises estáticas. O elemento utilizado é o tetraedro linear de quatro nós (T4). Utilizou-se esse elemento para as análises em virtude de este se articular melhor a desenhos complexos e, também, em virtude de este ser um conector cilíndrico e uma placa retangular, não há uma necessidade de mais graus de liberdade entre os nós intermediários. Ou seja, com quatro graus de liberdade (nas pontas) do tetraedro para essas análises, já

se obtém um resultado satisfatório. Esse assunto será retomado posteriormente na seção das malhas, na pág. 50.

### 3.5.1 Materiais analisados

O procedimento adotado consistiu em verificar dois tipos de conectores (menor e grande, respectivamente nas Fig. 27 e 28) e em dois tipos de placas (10x50x100mm e 20x100x200mm). Os conectores foram feitos de forma sólida (totalmente preenchidos de material sem os furos internos no conector) para analisar o comportamento do material ao qual eles estavam incorporados. Aplicaram-se as propriedades do ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) (Tab. 5) para o conector e Epóxi (Tab. 4) para as placas.

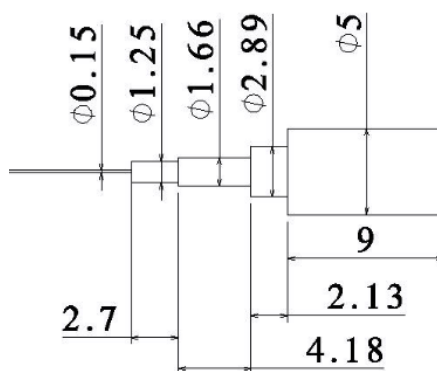


Figura 27 – Conector pequeno com suas medidas

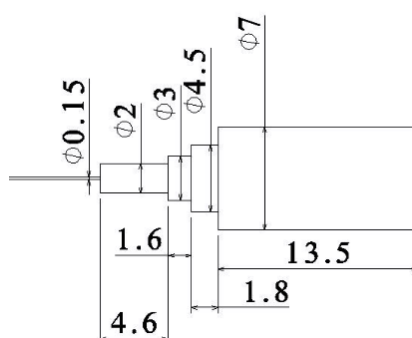


Figura 28 – Conector grande com medidas

### 3.5.2 Restrições

As forças aplicadas foram de 1000 N, pois o artigo referência [41] utilizou este mesmo valor. Desse modo, o que estamos analisando é o efeito que este conector causa a placa a sua volta. Portanto, a hipótese principal é o não deslizamento do conector no furo, pois assim possibilita analisar o efeito do conector na placa Fig. 29. Ou seja, o conector ficou restrito com a parte maior dentro do material em todos os casos.

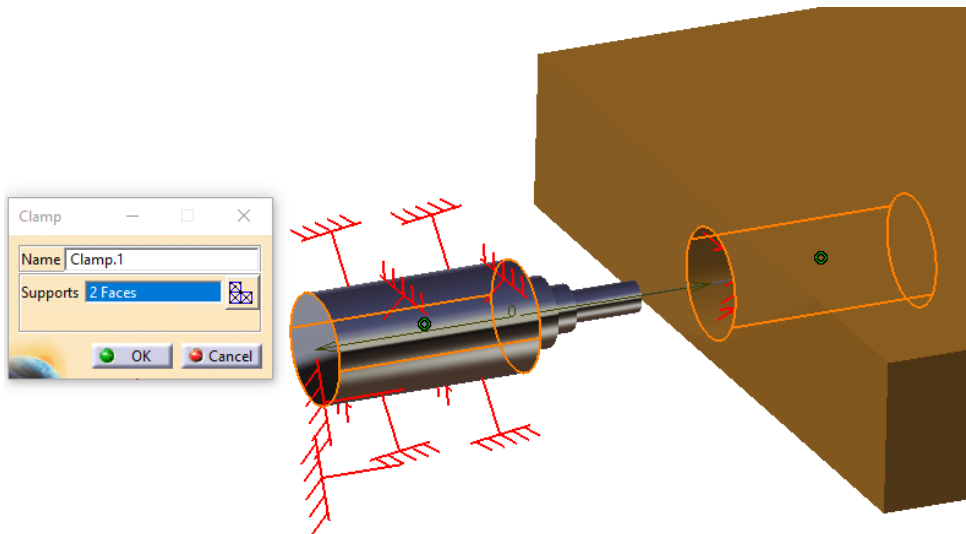


Figura 29 – Hipótese principal: restrições no conector.

No caso da compressão (Fig. 30), a placa foi restrita na parte inferior e colocou-se uma força distribuída sobre a placa na parte superior.

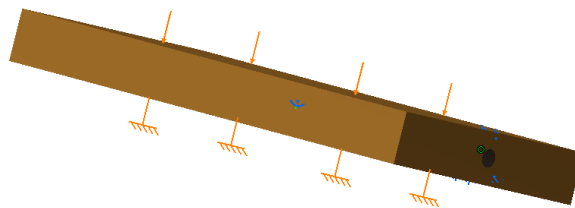


Figura 30 – Restrição e força aplicada - Compressão

Na torção (Fig. 31), a restrição encontra-se na ponta da placa justamente onde o conector está e colocou força verticalmente sobre as duas pontas laterais para verificar a reação da placa à torção.

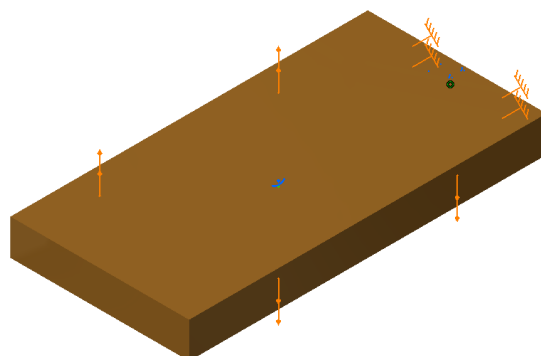


Figura 31 – Restrição e força aplicada - Torção

Na flexão vertical (Fig. 32), a restrição ocorre na extremidade, justamente onde o conector está, e a força vertical concentrada é da aplicada no lado oposto ao conector.

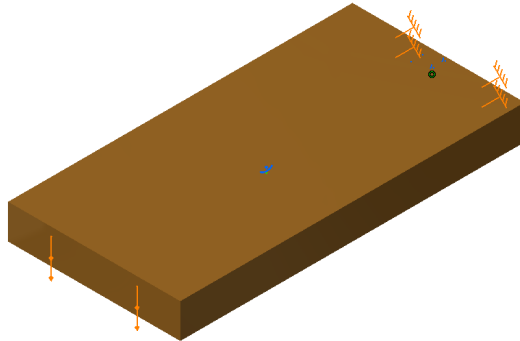


Figura 32 – Restrição e força aplicada - Flexão vertical.

Na flexão horizontal (Fig. 33) é a mesma restrição da flexão e da torção, mas a força concentrada é aplicada ao lado da placa com uma força horizontal.

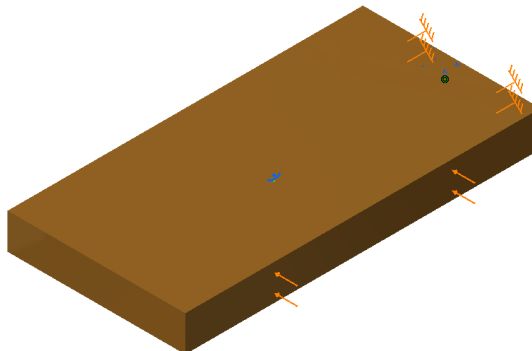


Figura 33 – Restrição e força aplicada - Flexão horizontal.

A tração (Fig. 34) possui restrição igual à da flexão de avanço, flexão e torção. Aplica-se sua força, horizontalmente, na extremidade oposta onde se encontra o conector.

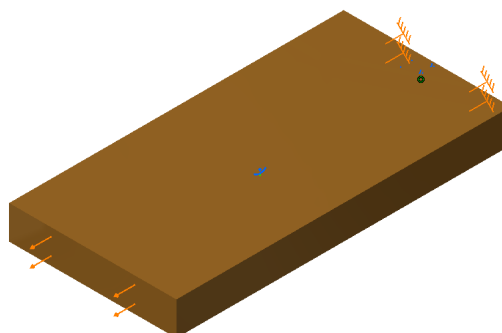


Figura 34 – Restrição e força aplicada - Tração.

### 3.5.3 Itens avaliados

Nas análises foram utilizadas duas configurações dimensionais para a placa: Placa de tipo A (ou, placa pequena, de 10x50x100 mm, placa de 10) e placa tipo B (ou, placa maior, de 20x100x200mm, placa de 20).

A seguir os itens que foram analisados:

1. Conector grande com placa tipo A;
2. Conector grande com placa tipo B;
3. Conector grande revestido de termo-retrátil com placa tipo A;
4. Conector grande revestido de termo-retrátil com placa tipo B;
5. Conector pequeno com placa tipo A;
6. Conector pequeno com placa tipo B;
7. Conector pequeno revestido de termo-retrátil com placa tipo A;
8. Conector pequeno revestido de termo-retrátil com placa tipo B;
9. Placa tipo A sem conector;
10. Placa tipo B sem conector.

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados<sup>1</sup> e suas respectivas discussões. Dessa forma, foi analisado o comportamento do conector na placa inserida, mostrou-se a qualidade da malha utilizada e o tipo de elemento. Para os itens analisados, foram feitas os ensaios à flexão vertical (FV), compressão (C), flexão horizontal (FH), torção (TOR) e tração (TRA). Nessas análises estáticas preliminares foram verificados os seguintes itens:

1. Deslocamento: a análise do conector presente dentro da placa. Isto é possível em virtude da hipótese principal (Fig. 29). Além disso, mensurou-se a presença desse conector. [42]

2. Tensões Principais: em cada ponto, o tensor de tensões principais máximas fornecem as direções relativas às quais a peça está: em um estado de pura tensão ou compressão. Portanto, demonstrará como a força está sendo aplicada na placa. [42]

3. Tensões de Von Mises: as imagens de tensões de Von Mises são utilizadas para verificar os padrões de campo de tensão de Von Mises. É um critério de falha, ou seja, o valor máximo da tensão de Von mises deve ser menor que o valor de limite de escoamento. Assim, é utilizado para determinar se, em um dado material, haverá (ou não) fratura. São utilizados para materiais dúcteis. O critério de Von Mises se enuncia como: “Um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração”. A equação que representa a expressão geral do critério: [43]

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 < 2\sigma_e \quad (4.1)$$

Onde  $\sigma_e$  representa a tensão de escoamento do material.

### 4.1 Malhas

As malhas, ou do inglês *Mesh*, foram bem refinadas. O tipo do elemento utilizado foi do tetraedro linear de quatro nós (T4). O software CatiaV5®19 gerou um relatório mostrando o número de nós, elementos e também mostrou uma qualidade ótima em relação aos elementos (Tab. 6). Pode-se verificar, também, que, em relação à malha, há qualidade dos elementos acima de 99% para todos, o que é algo muito bom para as análises.

<sup>1</sup> Haverá termos e medidas repetidas nas apresentações dos ensaios, pois são experimentos comparativos.

Tabela 6 – Tabela referente a Malha.

Nº	Malha		Tipo do Elemento	Qualidade do elemento - Stretch (esticado)		Qualidade do elemento - Aspect Ratio	
	Nós	Elementos		Bom	Ruim	Bom	Ruim
1	32438	144324	TE4 (100%)	143171 (99.20%)	1153 (0.80%)	143942 (99.74%)	308 (0,21%)
2	179005	862359	TE4 (100%)	859728 (99.69%)	2631 (0.31%)	861008 (99.84%)	932 (0.11%)
3	32950	146627	TE4 (100%)	145450 (99.20%)	1177 (0.80%)	145892 (99.50%)	692 (0.47%)
4	178734	861941	TE4 (100%)	860107 (99.79%)	1832 (0.21%)	861224 (99.92%)	691 (0.08%)
5	79039	361505	TE4 (100%)	360911 (99.84%)	594 (0.16%)	360909 (99.84%)	405 (0.11%)
6	178381	858756	TE4 (100%)	856339 (99.60%)	1996 (0.23%)	856993 (99.68%)	2320 (0.27%)
7	32000	142468	TE4 (100%)	141286 (99.17%)	1170 (0.82%)	141612 (99.40%)	733 (0.51%)
8	178415	859503	TE4 (100%)	856968 (99.71%)	2518 (0.29%)	857621 (99.78%)	1554 (0.18%)
9	28694	126711	TE4 (100%)	126711 (100.00%)	-	126711 (100%)	-
10	170909	821701	TE4 (100%)	821701 (100.00%)	-	821701 (100%)	-

## 4.2 Análises

### 4.2.1 Flexão vertical - (FV)

Placas sem a presença do conector (Fig.35) em relação à flexão vertical:

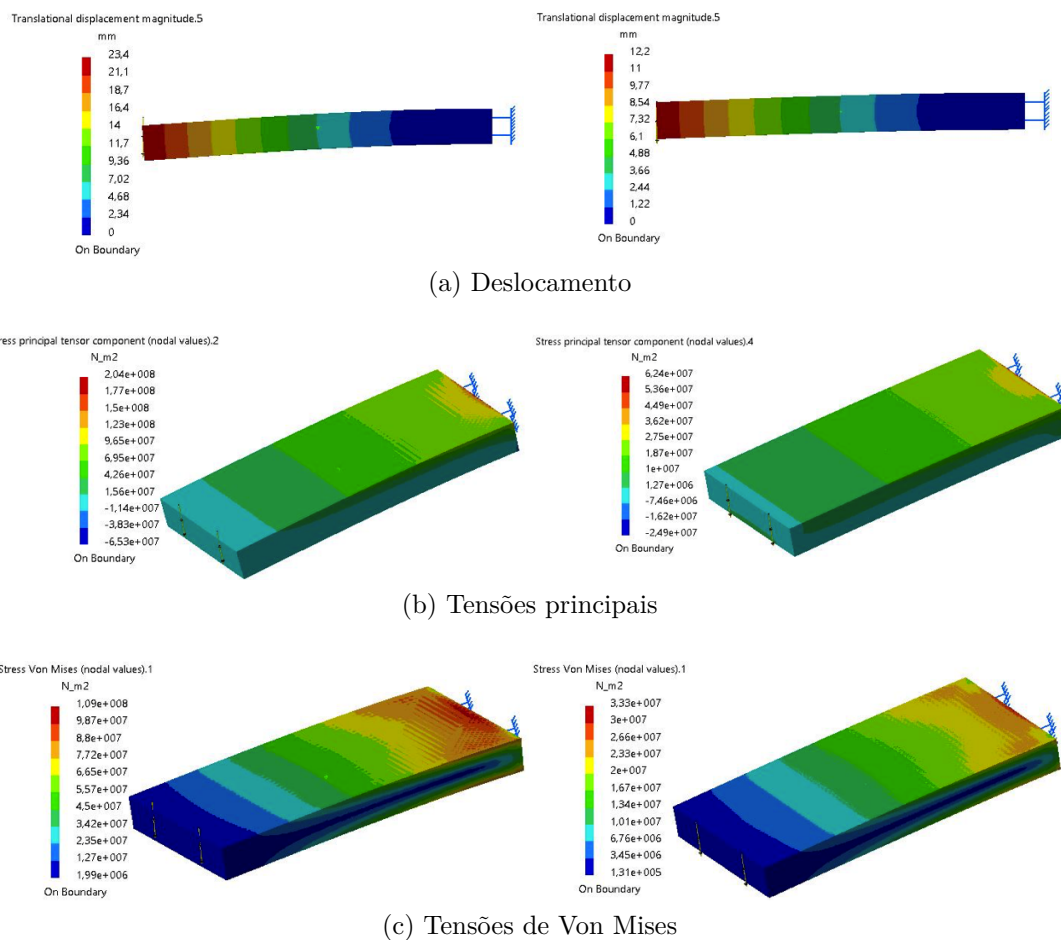


Figura 35 – FV - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c.



## 4.2.1.1 Deslocamento - FV com a presença dos conectores:

Por meio do deslocamento da flexão vertical (Fig. 36 – 39), há uma diferença entre os conectores pequenos e grandes para as diferentes placas. A parte em azul escura refere-se a presença do conector na placa onde deve ser avaliado.

O maior conector é representado na Fig. 36 - 37, o seu valor máximo apresentado, sem a presença do termo-retrátil, para a placa de tipo A é de 18.8 mm, enquanto, para o tipo B, é de 12 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 35, sem nenhum conector, mostra a placa A fletindo 23.4 mm e a placa B flete 12.2 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando, assim, seu valor para menor. E, quando colocado o termo-retrátil, a placa A flete em sua ponta 18.7 mm, enquanto o B flete, 11.9mm. Portanto, essa diferença entre os conectores com e sem termo-retrátil é por volta de 0.1 mm como comprovado pela Fig. 37.

O conector pequeno é representado na Fig. 38 - 39, o seu valor máximo apresenta-se sem a presença do termo-retrátil para a placa de tipo A: 21.8 mm, enquanto, para a de tipo B, é de 12.2 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 35, sem nenhum conector, apresenta a placa fletindo 23.4 mm para uma placa tipo A. A placa tipo B, flete 12.2 mm. Quando colocado o termo-retrátil, a placa A flete em sua ponta 21.8 mm, enquanto o B flete 12.2mm. Portanto, essa diferença entre os conectores (com e sem termo-retrátil) não se alteram. A medida foi menos de 1 % conforme Fig. 39. Também se percebe que, para a placa de tipo B, o valor da flexão máxima não se alterou em comparação à placa sem nenhum conector (Tab. 7).

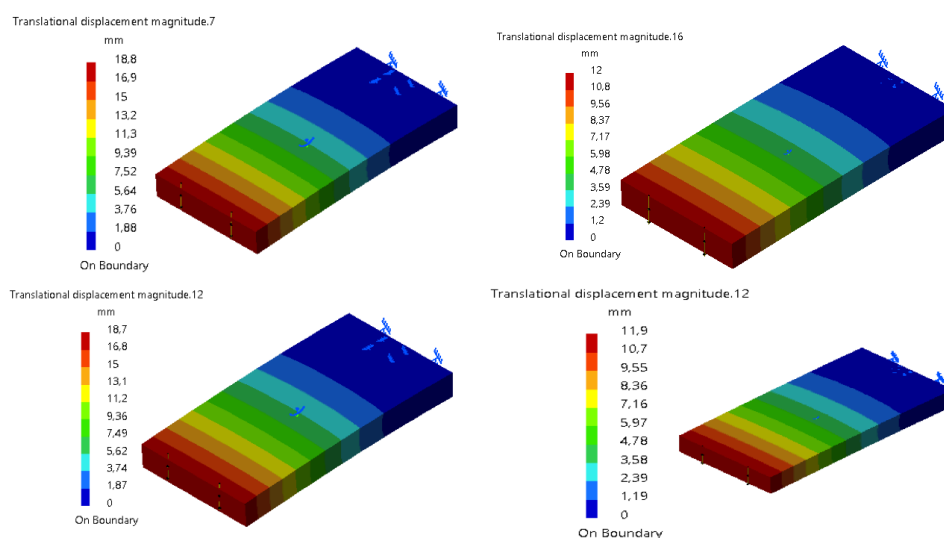


Figura 36 – Deslocamento da flexão vertical para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

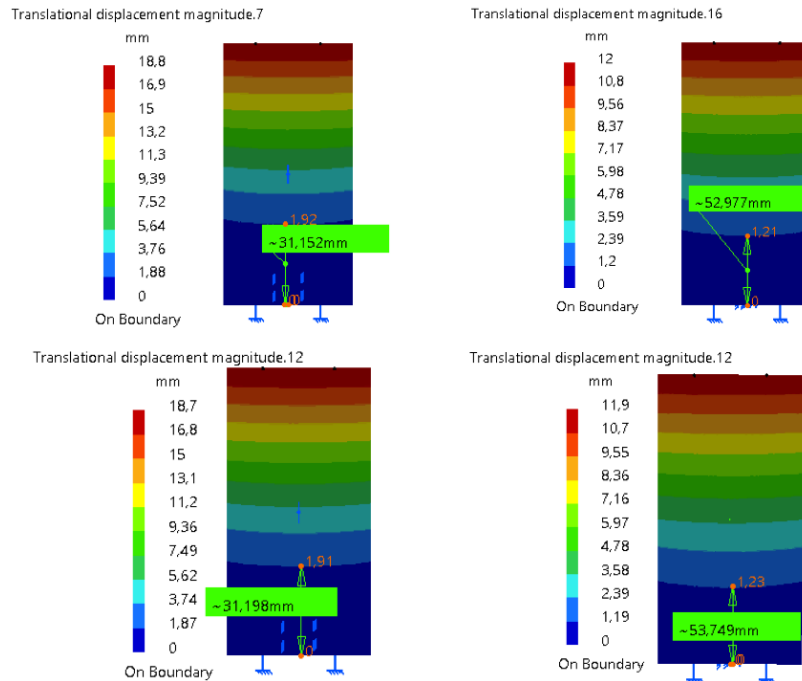


Figura 37 – Medida do deslocamento da flexão vertical para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

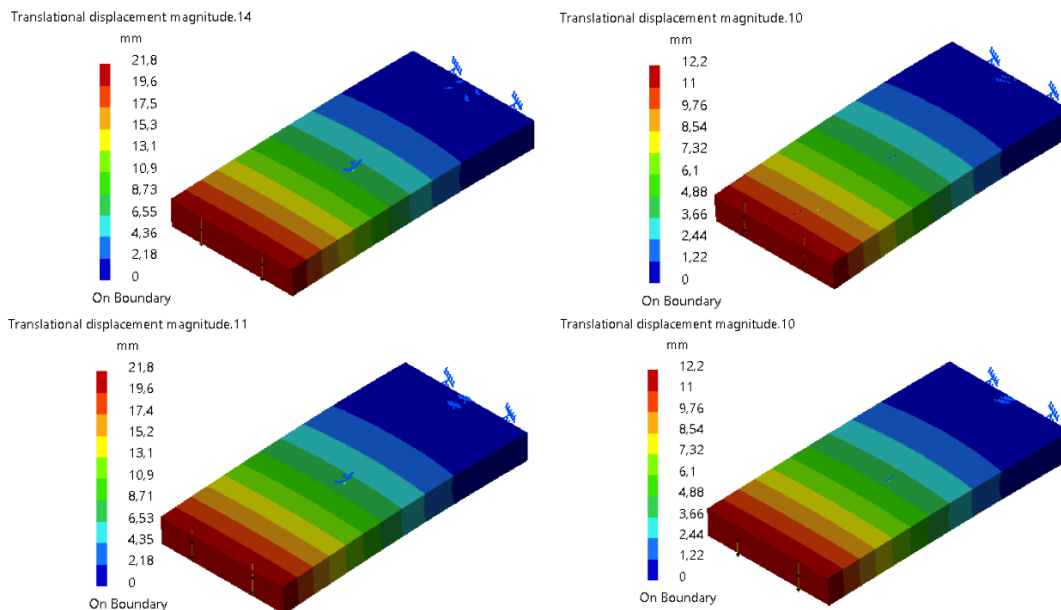


Figura 38 – Deslocamento da flexão vertical para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

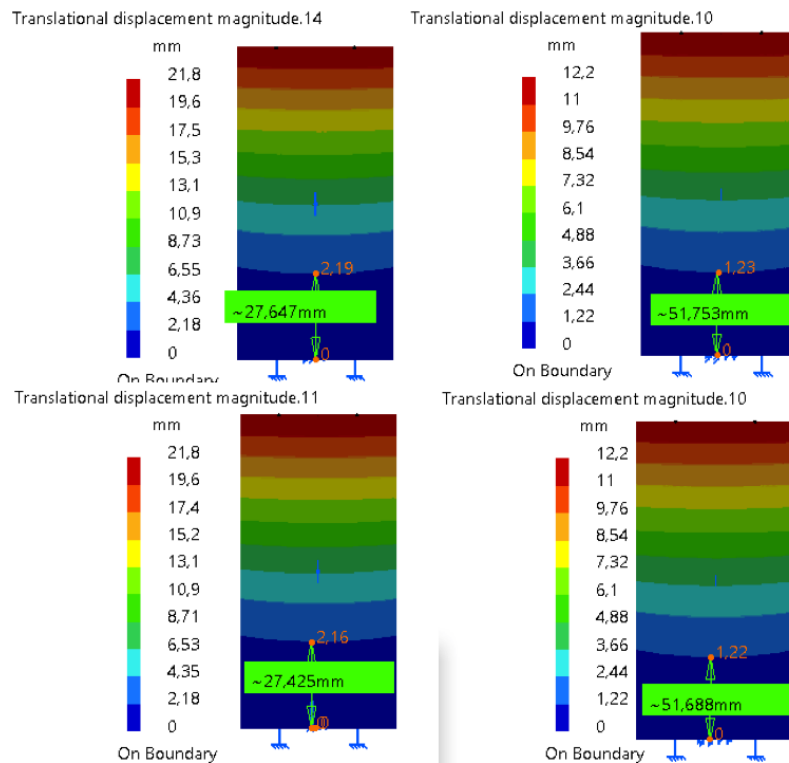


Figura 39 – Medida de Deslocamento da flexão vertical para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

Tabela 7 – Tabela FV - Deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
Sem Conector	23,4	12,2	-	-	-	-
Conector Grande	18,8	12	31,152	52,977	20%	1,64%
Conector Grande c/ termo	18,7	11,9	31,198	53,749	20,09%	2,46%
Conector Pequeno	21,8	12,2	27,647	51,753	6,84%	0,00%
Conector Pequeno c/termo	21,8	12,2	27,425	51,688	6,84%	0,00%

#### 4.2.1.2 Tensões principais FV - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões principais, da flexão vertical (Fig. 40 – 41), pode-se determinar onde ocorre a tração e compressão. As figuras revelam, a parte inferior foi comprimida enquanto a parte superior está sendo tracionada. Isto deve-se à força que foi aplicada na parte superior. Também, por meio das tensões principais, há uma prévia da interferência que o conector ocasiona na placa, o que gera uma área de perturbações em vermelho. Há uma diferença perceptível entre os conectores grandes (Fig. 40) e pequenos (Fig. 41), onde o conector pequeno gera menor interferência.

No conector grande, há uma considerável interferência na placa em relação ao pequeno. Por meio da comparação entre as placas de tipo A, percebe-se a presença do vermelho mais vivo e maior dentro da placa com o conector grande. Para a placa tipo B, quase não há interferência, sendo menos visível o vermelho presente em ambas.

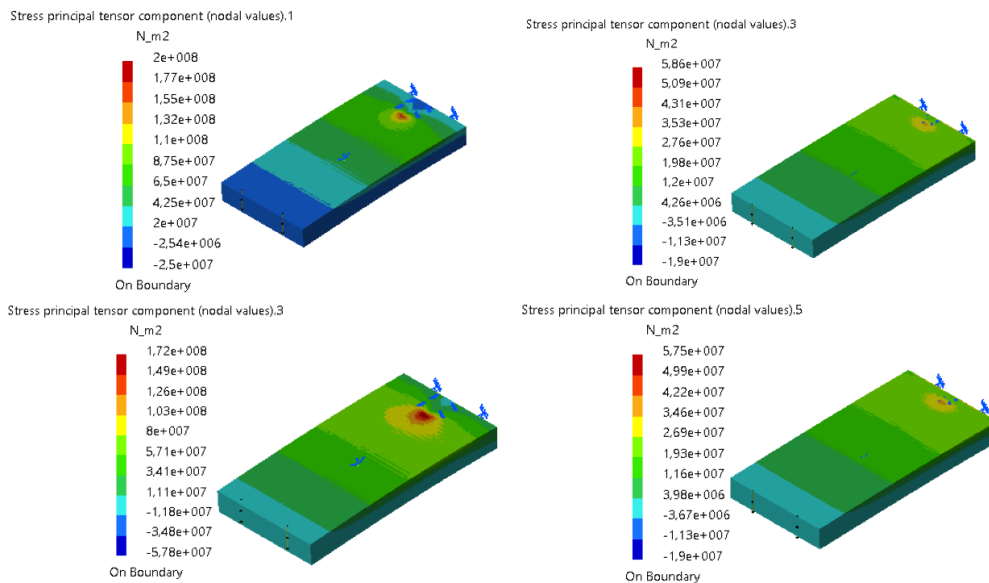


Figura 40 – Tensões principais da flexão vertical para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e a direita as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termorêtrates.

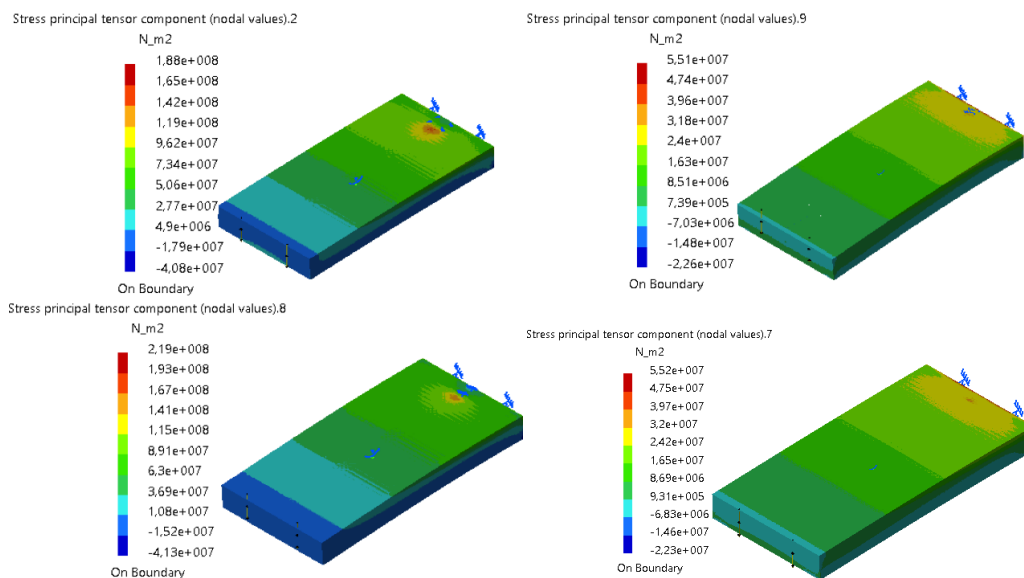


Figura 41 – Tensões principais da flexão vertical para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e a direita as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termorêtrates.

## 4.2.1.3 Tensões de Von Mises FV - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões de Von Mises, da flexão vertical (Fig. 42 – 47), pode-se determinar se haverá fratura (ou não) da placa. Além disso, devido à hipótese principal (Fig. 29), será possível visualizar o quanto o conector interferirá (ou não) na placa.

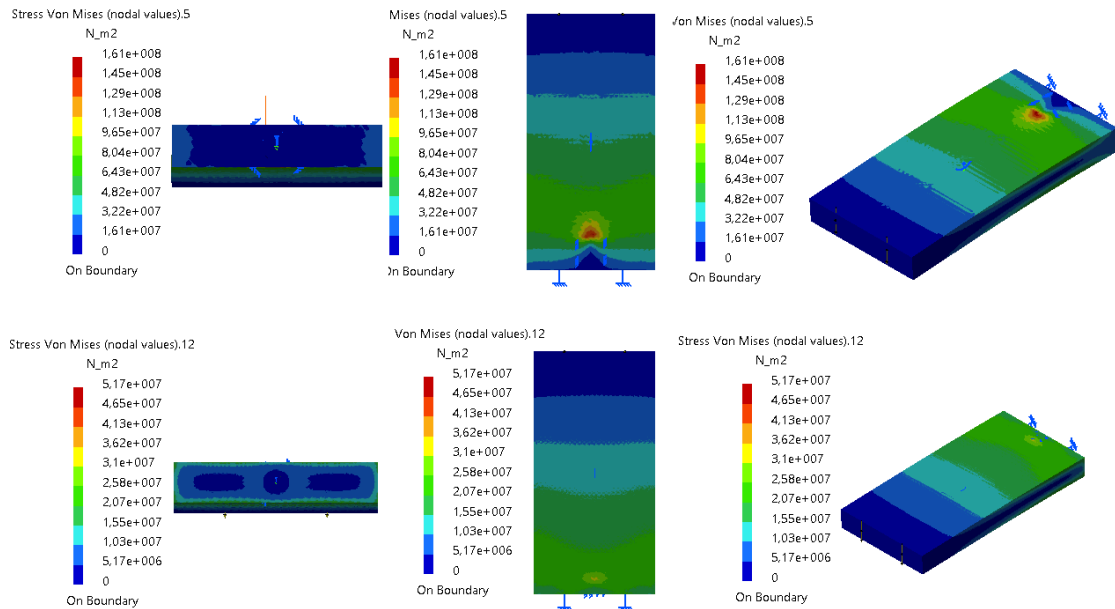


Figura 42 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

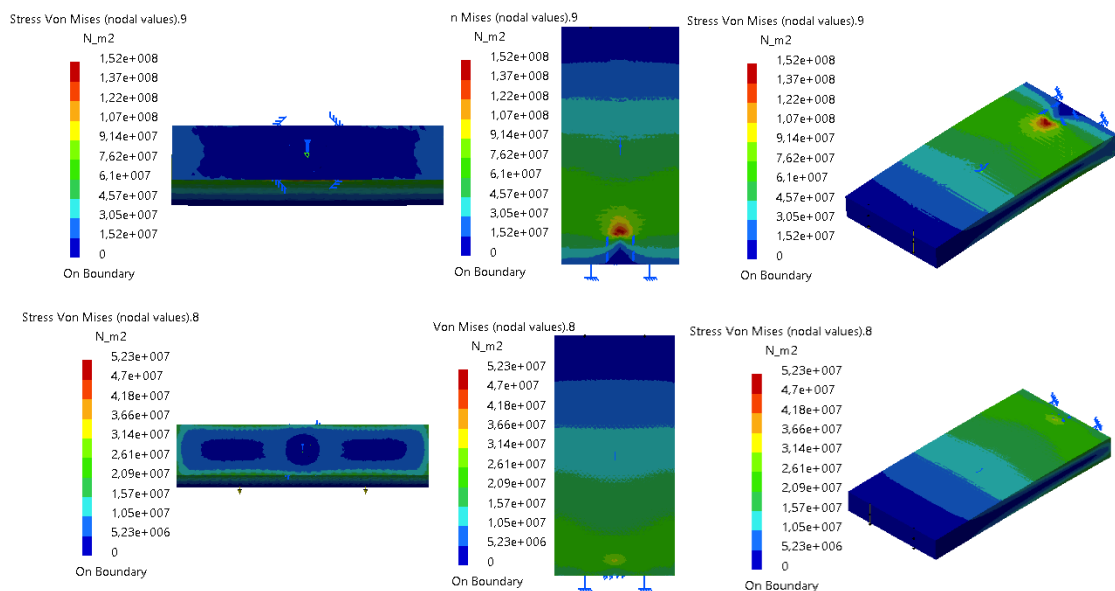


Figura 43 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Há diferença entre os conectores maiores sem a presença do termo-retrátil (Fig.

42) e os conectores com a presença do termo-retrátil (Fig. 43) que devem ser analisadas cuidadosamente. Pois na verdade, o conector é o maior ponto de fraqueza. Ou seja, as análises devem ser feitas ao contrário. Portanto, quando colocada a presença do termo-retrátil em vez de proteger mais a placa diminuindo a tensão de Von Mises, na verdade aumentará. Assim, há uma perturbação na placa.

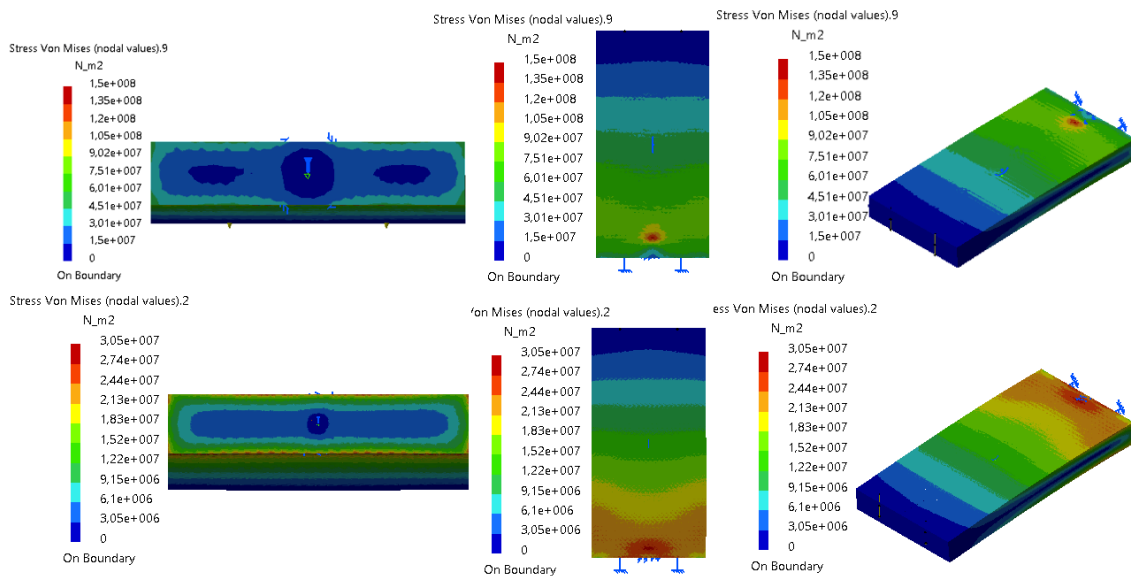


Figura 44 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

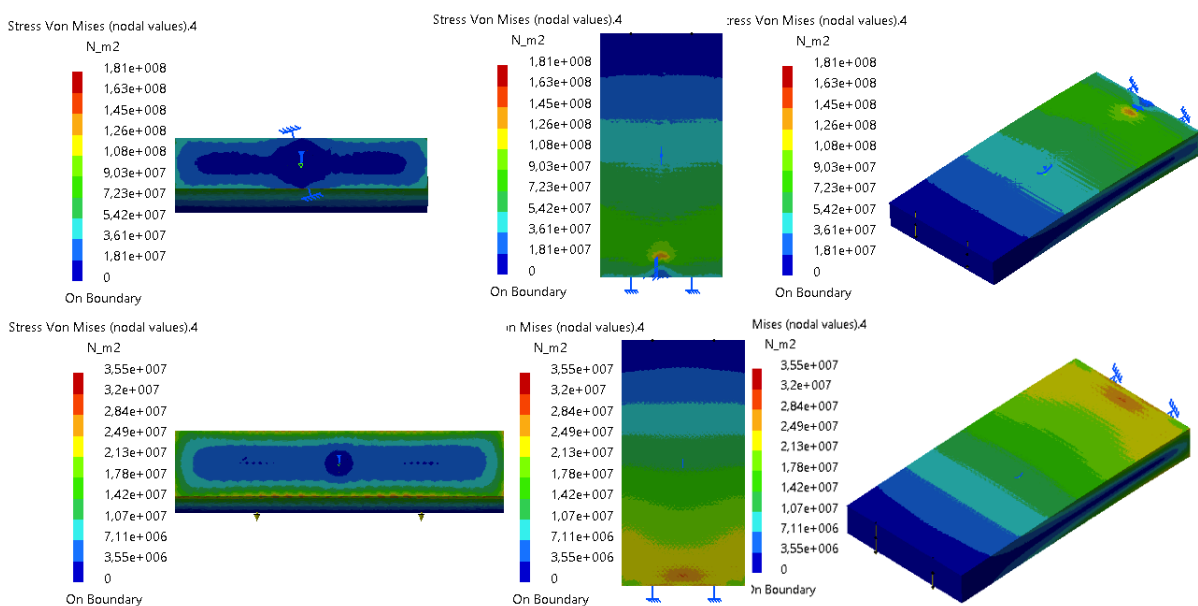


Figura 45 – Tensões de Von Mises da flexão vertical para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil (Fig. 44) e com a presença do termo-retrátil (Fig. 45) devem ser analisados da mesma forma que foi o conector grande. O conector pequeno quase não interfere na placa tipo A, tampouco na de tipo B. As Fig. 46 e 47 revelam as medidas das interferências dos conectores, sendo a primeira para os conectores grandes e a outra, para os conectores pequenos (Tab. 8).

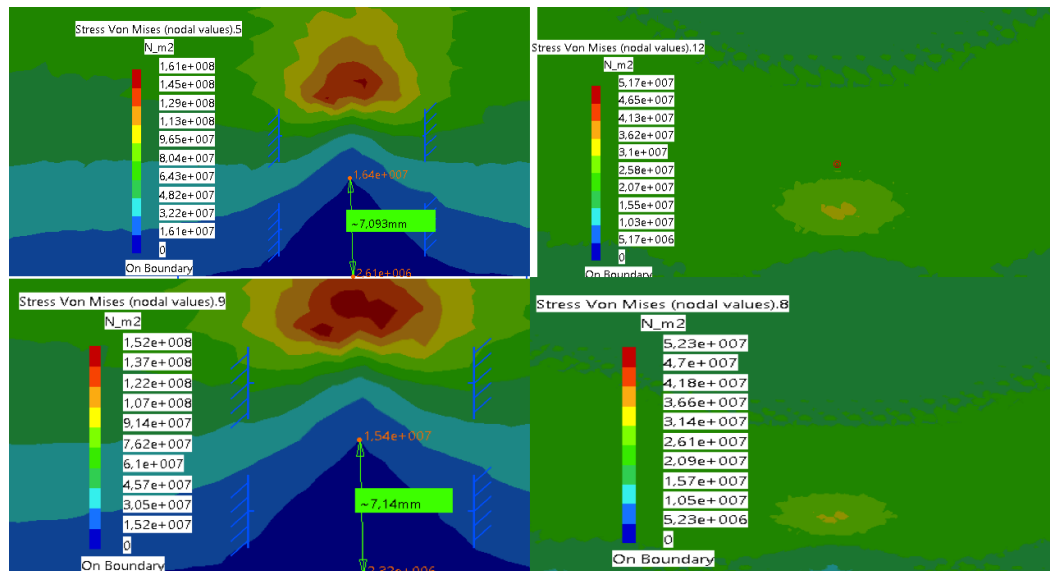


Figura 46 – Medida da presença do conector, em flexão vertical, para os conectores grandes em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

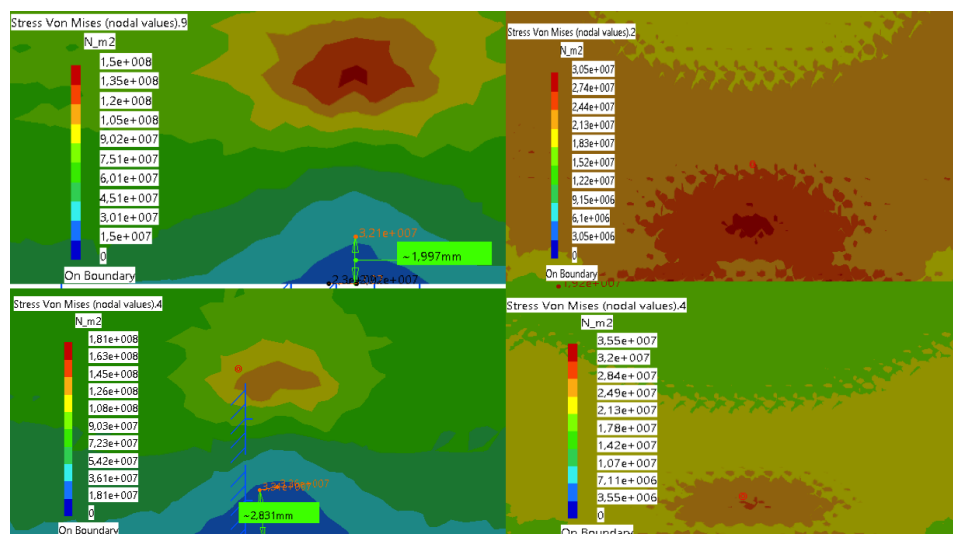


Figura 47 – Medida da presença do conector, em flexão vertical, para os conectores pequenos em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.



Tabela 8 – Tabela FV - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.

	Conector Grande	Conector Grande c/ Termo	Conector Pequeno	Conector Pequeno c/ Termo	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector grande	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector pequeno
Medida Placa 10 (mm)	7,093	7,14	1,997	2,831	1%	29%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	-	-	-	-

#### 4.2.2 Compressão - (C)

Placas sem a presença do conector (Fig.48) em relação à compressão:

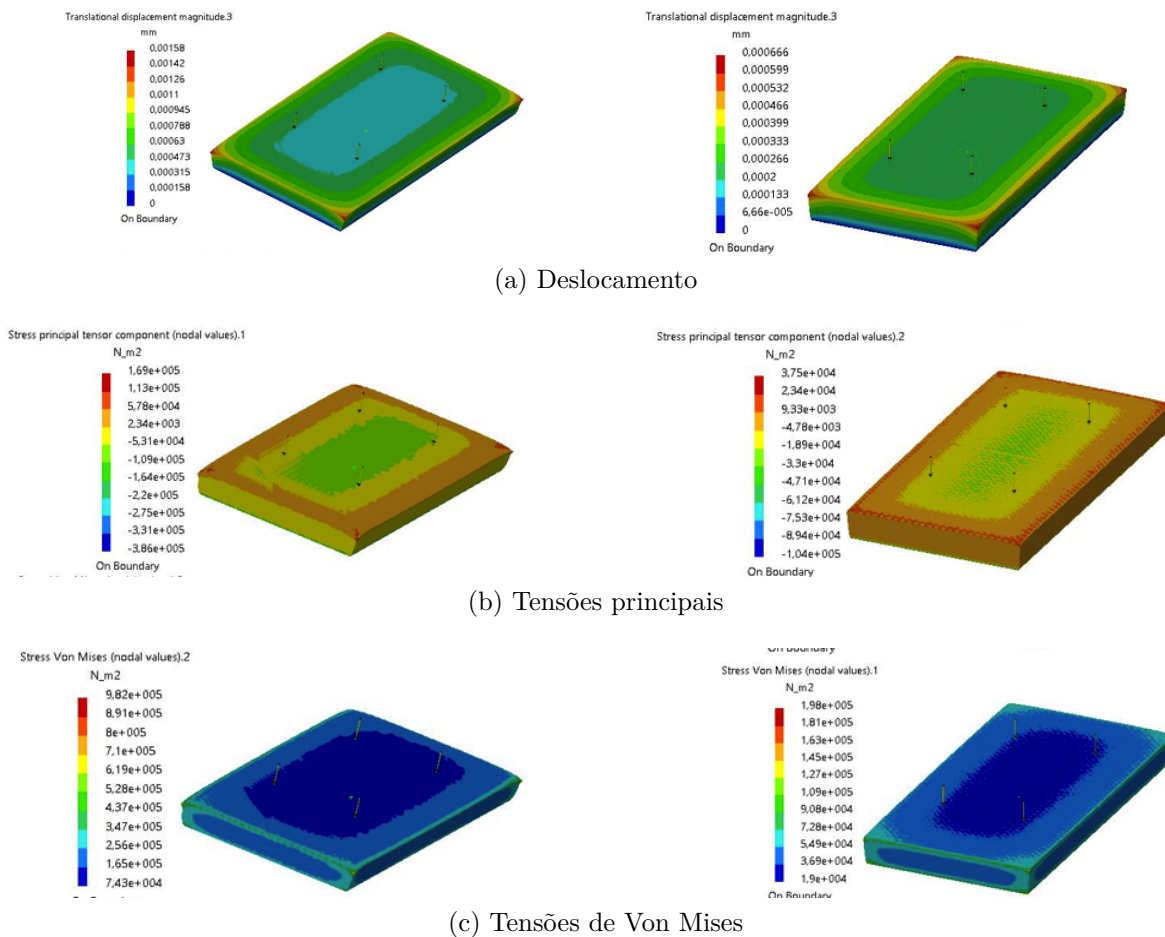


Figura 48 – C - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c.

##### 4.2.2.1 Deslocamento C - com a presença dos conectores:

Por meio do deslocamento da compressão (Fig. 49 – 52), há uma diferença entre os conectores pequenos e grandes para as diferentes placas. A parte em azul escura refere-se ao local onde está a presença do conector e este deve ser avaliado.



O conector grande é representado na Fig. 49 - 50, o seu valor máximo, mostrado sem a presença do termo-retrátil para a placa de 10, é de 0.00160 mm, enquanto, para a de 20, é de 0.000662 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 48, sem nenhum conector, revela a placa de 10 que comprime 0.00158 mm e a placa de 20 que comprime 0.000666 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando, assim, seu valor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa de 10 comprime 0.00156 mm, enquanto a de 20 comprime 0.000675mm. Portanto, essa diferença entre os conectores (com e sem termo-retrátil) é insignificante como demonstrado na Fig. 50.

O conector pequeno é representado na Fig. 51 - 52, seu valor máximo mostrado sem a presença do termo-retrátil para a placa de 10 é de 0.00157 mm, enquanto para a de 20 é de 0.00158 mm. Isto é esperado, pois a figura 48, sem nenhum conector, mostra a placa comprimindo 0.00157 mm para uma placa de 10, e, para uma placa de 20, 0.000663 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29) no conector, percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando seu valor. Quando instalado o termo-retrátil, a placa de 10 comprime em sua ponta 0.00158 mm, enquanto a de 20 é de 0.000673 mm. Portanto, essa diferença entre os conectores (com e sem termo-retrátil) não se altera. Em relação à medida (Fig. 52), foi analisada a presença do conector. Percebeu-se que, para a placa de 20, o valor da compressão máxima não alterou em comparação à placa sem nenhum conector (Tab. 9).

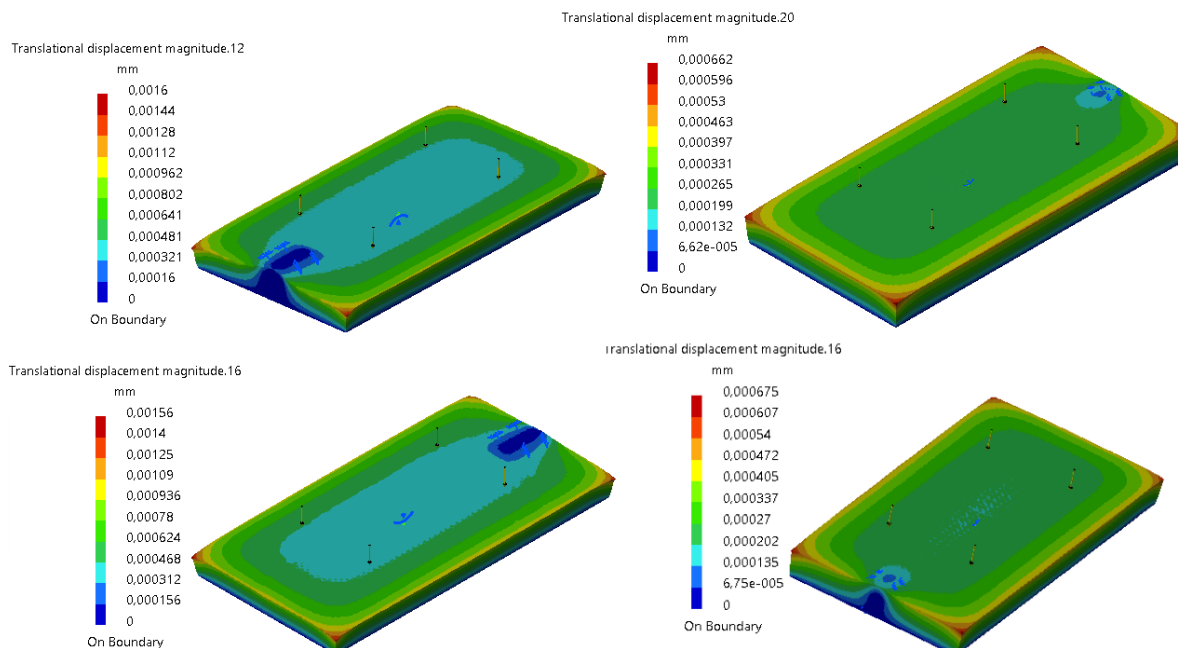


Figura 49 – Deslocamento da compressão para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

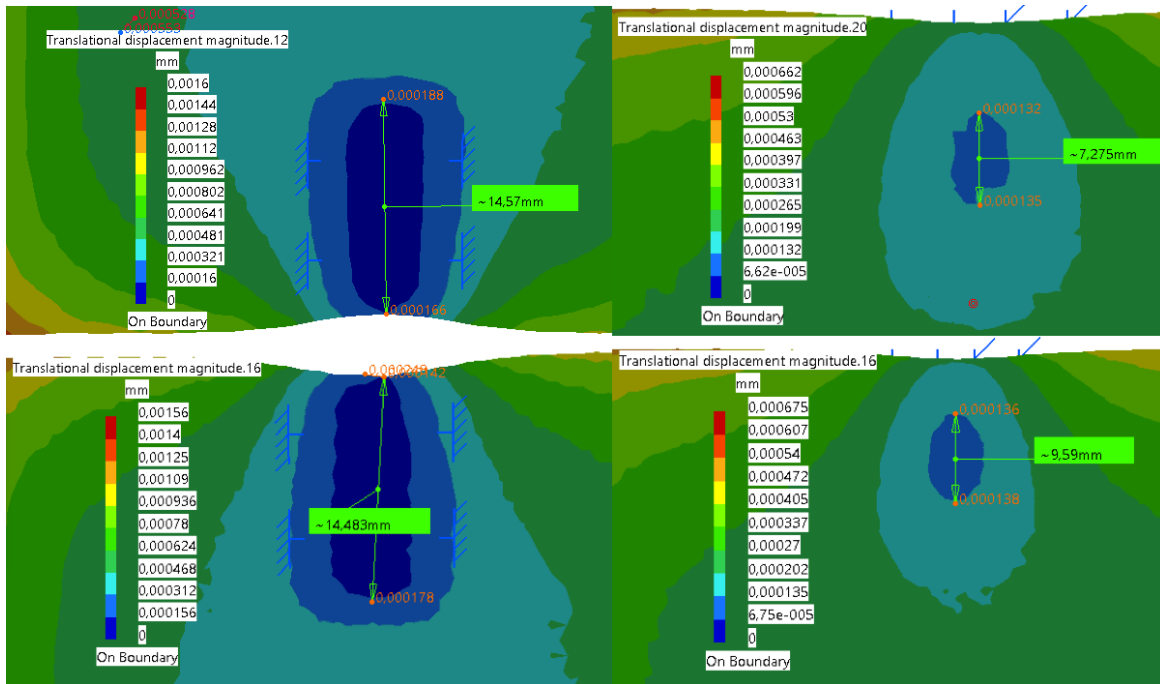


Figura 50 – Medida do deslocamento da compressão para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

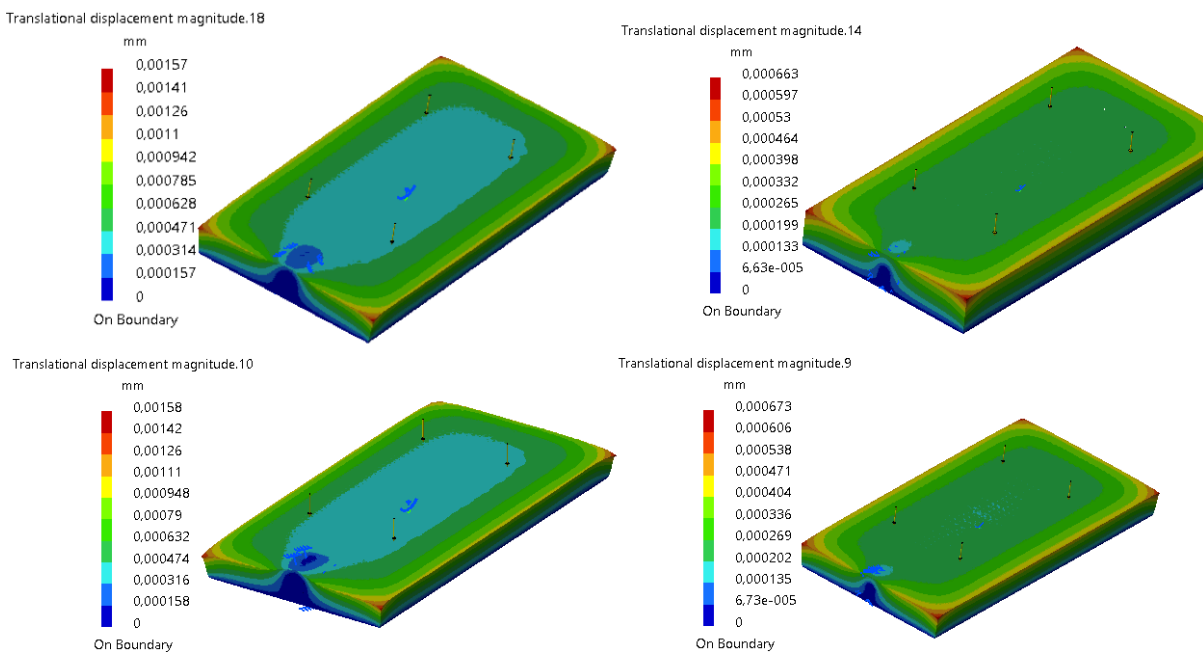


Figura 51 – Deslocamento da compressão para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

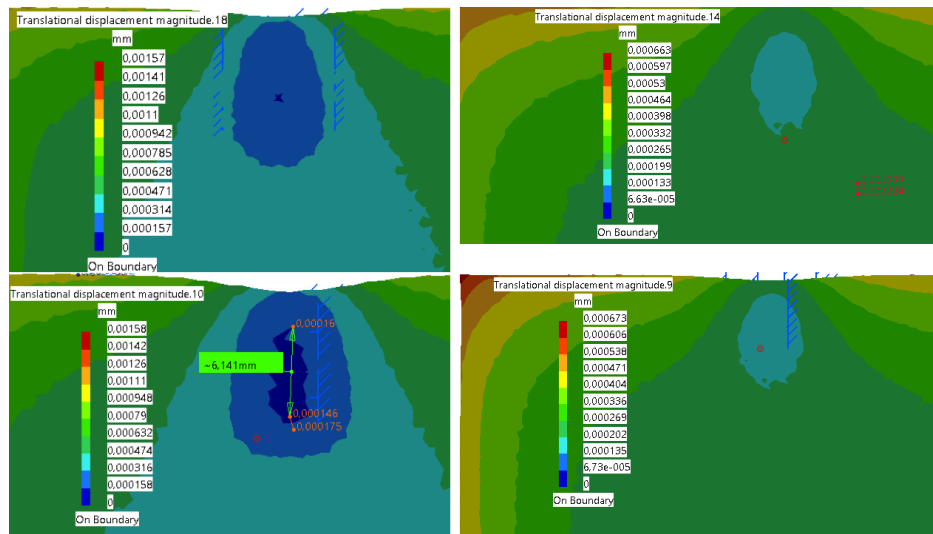


Figura 52 – Medida de Deslocamento da compressão para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. À última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

Tabela 9 – Tabela C - Deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
<b>Sem Conector</b>	0,00158	0,000666	-	-	-	-
<b>Conector Grande</b>	0,0016	0,000662	14,57	7,275	1%	-1%
<b>Conector Grande c/ termo</b>	0,00156	0,000675	14,483	9,59	-1%	1%
<b>Conector Pequeno</b>	0,00157	0,000663	-	-	-1%	0%
<b>Conector Pequeno c/termo</b>	0,00158	0,000673	6,141	-	0%	1%

As medidas de deslocamento da compressão foram analisadas de perto (aproximação das imagens) para verificar a influência que o conector gera na placa. Observou-se que, para a placa de 10, a presença do conector grande é perceptível tanto com termo-retrátil ou sem (parte em azul escuro) e não muito perceptível para a placa de 20. Já para o conector pequeno não se percebe sem o termo-retrátil, somente com. Na placa de 20, o conector pequeno não interferiu muito como na de 10.

#### 4.2.2.2 Tensões principais C - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões principais, na compressão (Fig. 53 – 54), pode-se verificar a placa sendo encolhida. Como mostrado as imagens, a parte superior foi comprimida enquanto a parte inferior está com engaste. Isto, deve-se a força que foi aplicada na parte superior. Além disso, por meio das tensões principais, há uma prévia da interferência que o conector ocasiona na placa, gerando uma área de perturbações em sua volta. Há uma

diferença perceptível entre os conectores grandes (Fig. 53) e pequenos (Fig. 54), em que o conector pequeno gera menor interferência.

No conector maior, há uma considerável interferência na placa em relação ao pequeno. Pode-se comparar entre todas as placas de 10, vendo a presença do verde ao redor do conector na placa com o conector grande. Enquanto, para a placa de 20, quase não há interferência, sendo menos visível.

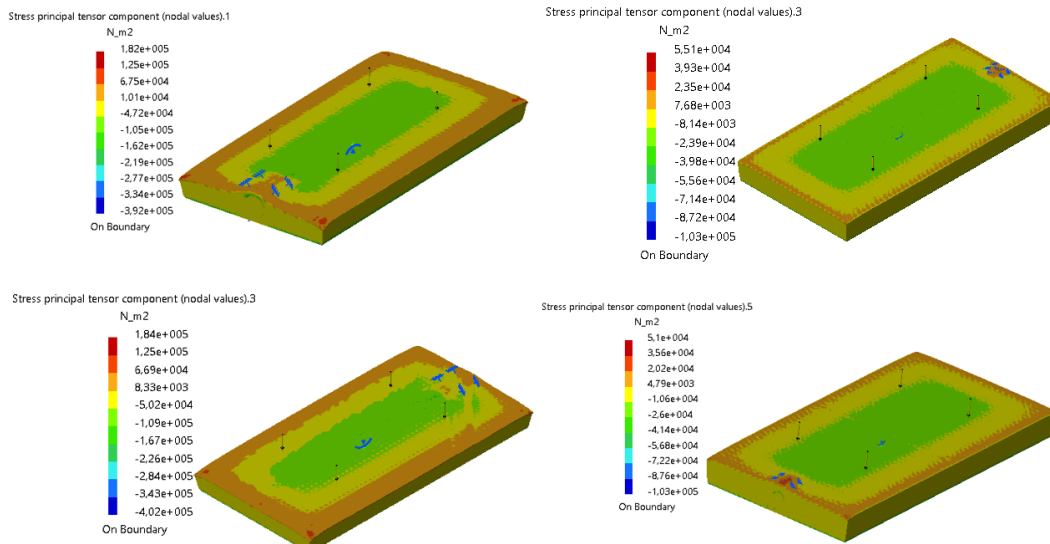


Figura 53 – Tensões principais da compressão para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

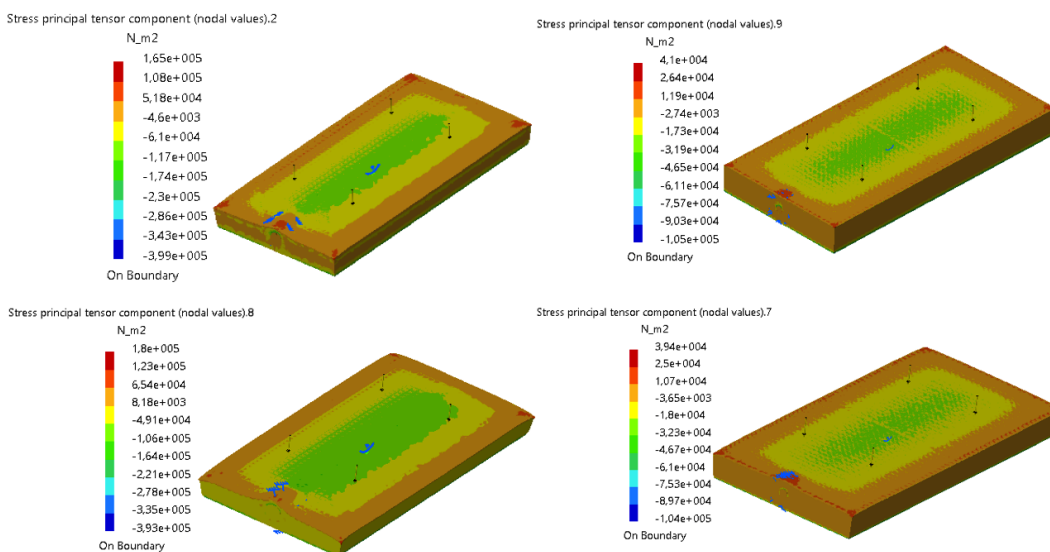


Figura 54 – Tensões principais da compressão para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

## 4.2.2.3 Tensões de Von Mises C - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões de Von Mises, da compressão (Fig. 55 – 58), pode-se determinar se a placa fraturará ou não. Além disso, devido à hipótese principal (Fig. 29), é possível visualizar o quanto o conector interfere na placa.

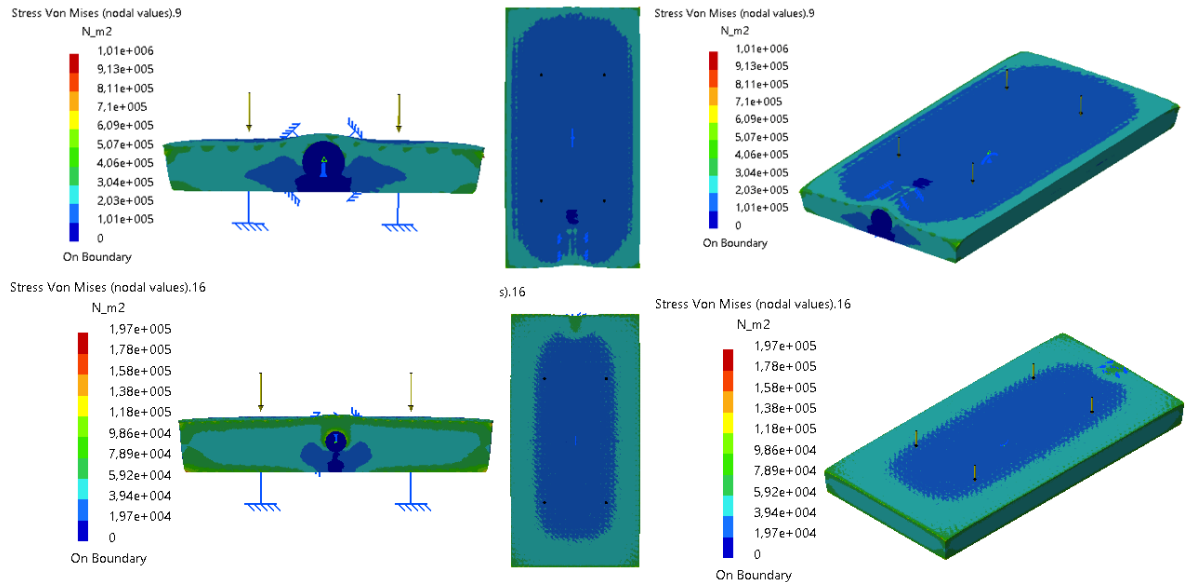


Figura 55 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

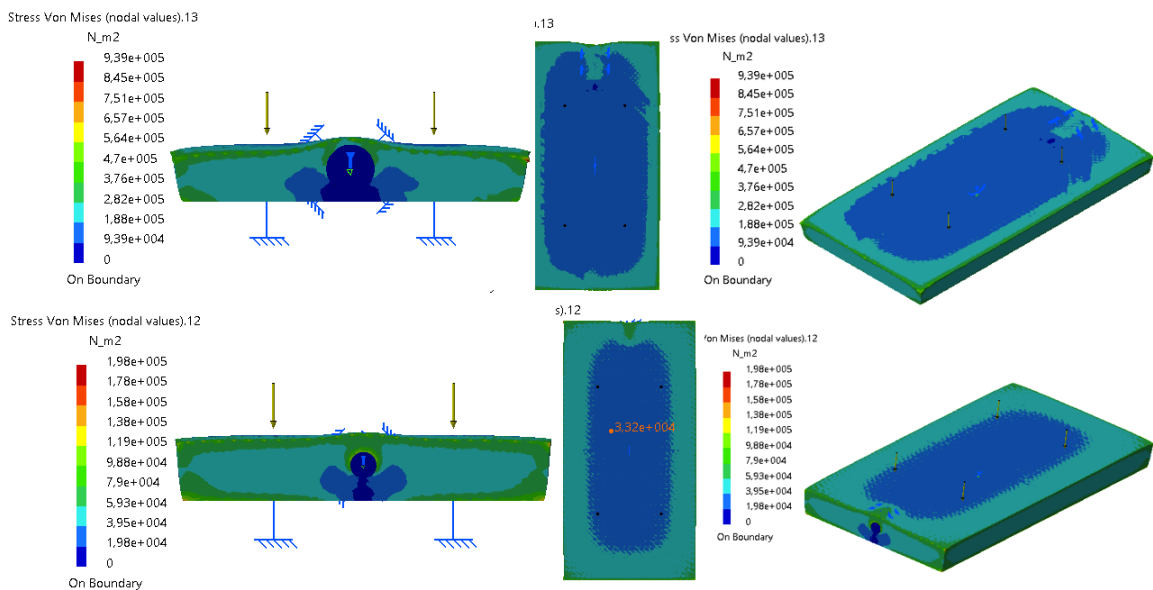


Figura 56 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

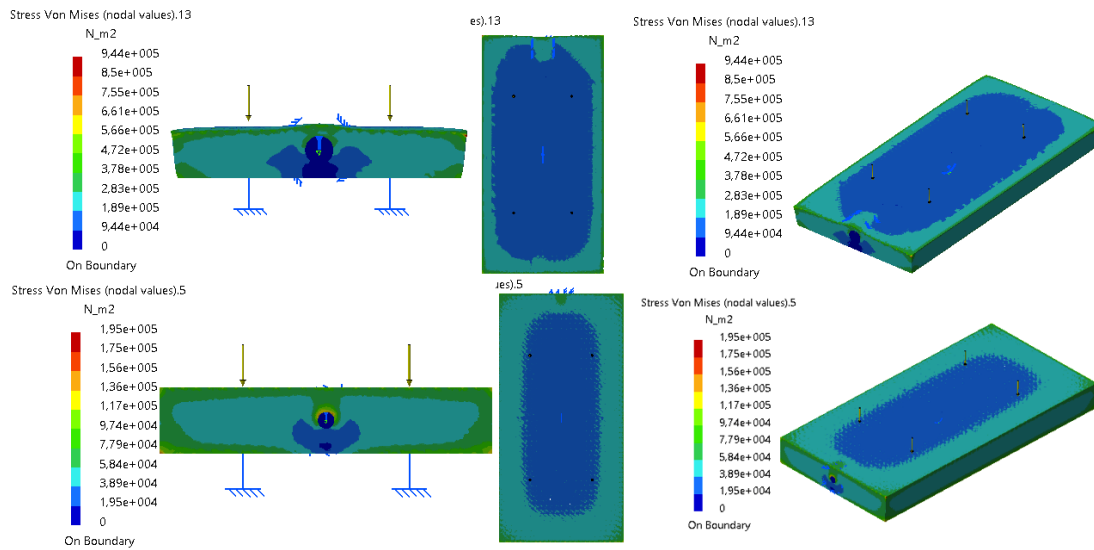


Figura 57 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

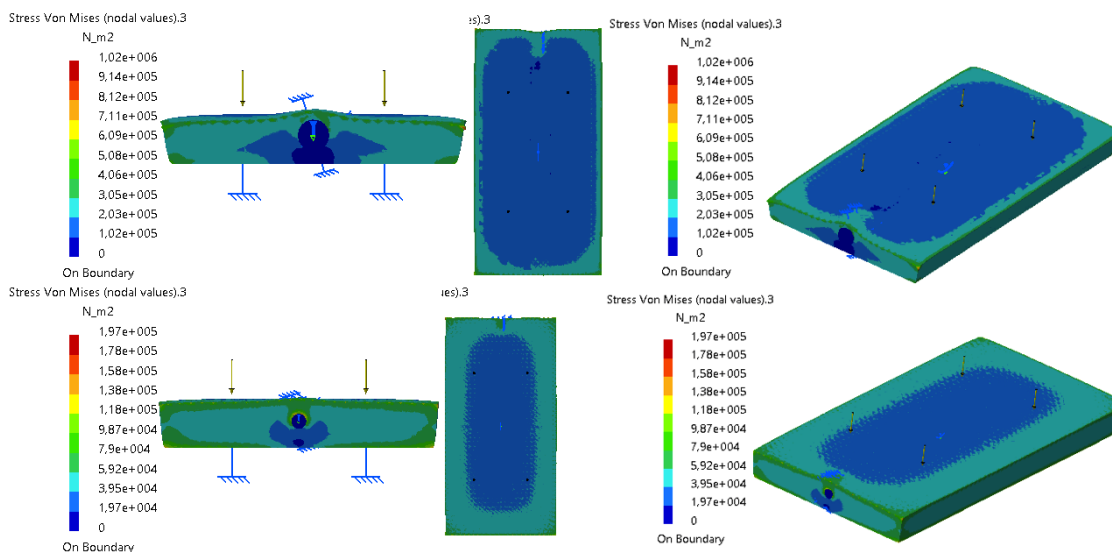


Figura 58 – Tensões de Von Mises da compressão para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem encontram-se as placas de Tipo A e na parte inferior as de Tipo B.

Há diferença nos conectores sem a presença do termo-retrátil (Fig. 55 e 57) e com sua presença (Fig. 56 e 58). Essas diferenças devem ser analisadas cuidadosamente. Pois na verdade, o conector é o maior ponto de fraqueza. Ou seja, as análises devem ser feitas ao contrário. Portanto, quando colocada a presença do termo-retrátil em vez de proteger mais a placa, diminuindo a tensão de Von Mises, na realidade prejudicará. Com isso, gerando uma perturbação à placa, o que é verificado pelo tamanho de azul que é ocasionado em volta do conector. Este tamanho é tão pequeno que pode ser desprezado.



### 4.2.3 Flexão Horizontal - (FH)

Placas sem a presença do conector (Fig.59) em relação a flexão horizontal:

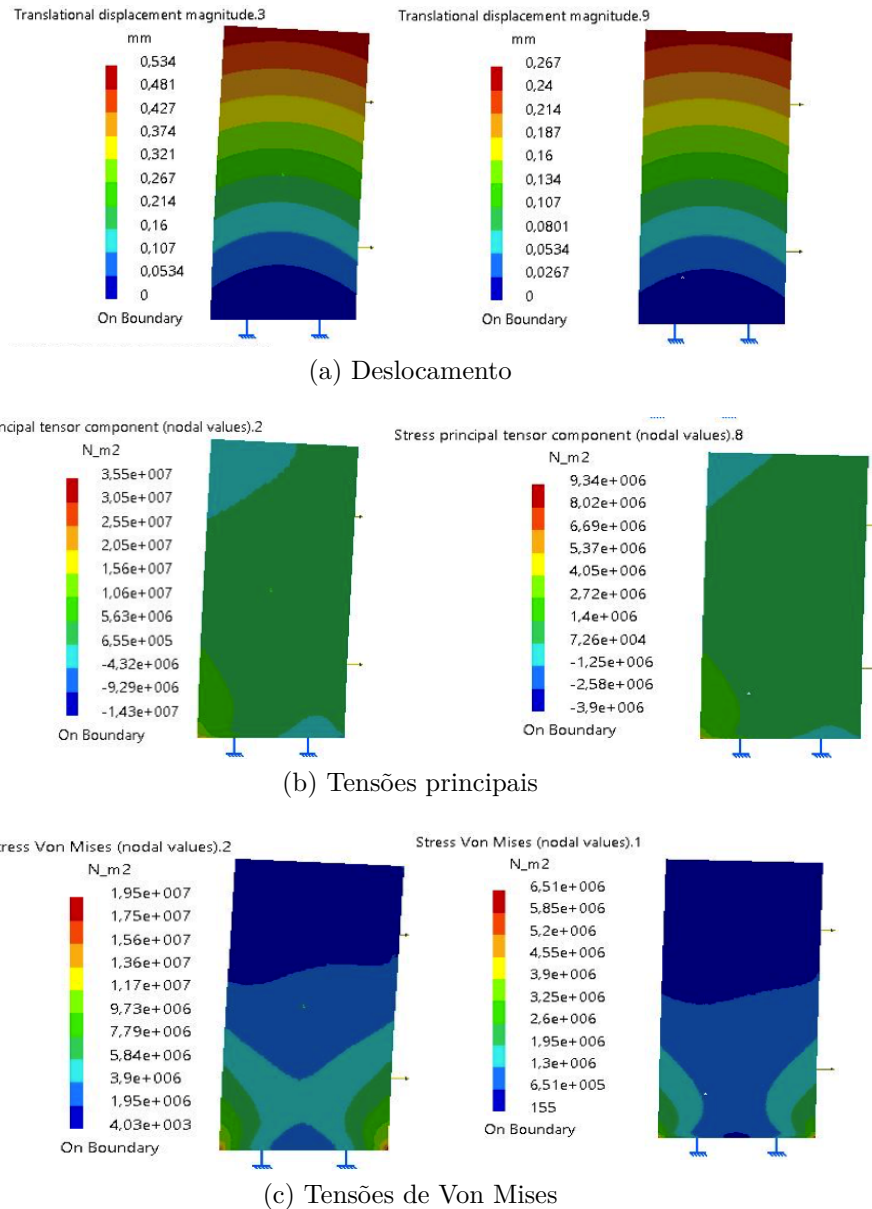


Figura 59 – FH - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c.

#### 4.2.3.1 Deslocamento FH - com a presença dos conectores:

Por meio do deslocamento da flexão horizontal (Fig. 60 – 63), há uma diferença entre os conectores pequenos e grandes para as diferentes placas. A parte em azul escura refere-se ao local que deve ser avaliado e onde está o conector.

O conector grande é representado na Fig. 60 - 61, o seu valor máximo mostrado sem a presença do termo-retrátil para a placa do tipo A, é de 0.5 mm, enquanto para o tipo

B é de 0.265 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 59 sem nenhum conector mostra a placa tipo A, flexionando de 0.534 mm e a placa tipo B flexiona 0.267 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando, assim, seu valor para menor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa A flexionou 0.5 mm, enquanto B, 0.265 mm. Portanto, não há diferença entre os conectores com e sem termo-retrátil. A medida é insignificante conforme Fig. 61.

O conector pequeno é representado na Fig. 62 - 63, seu valor máximo revelado, sem a presença do termo-retrátil, para a placa tipo A, é de 0.525 mm, enquanto para B, é de 0.00267 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 59, sem nenhum conector, mostra a placa de tipo A flexionando 0.534 mm e, para a placa tipo B, 0.267 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando seu valor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa A flexiona em sua ponta 0.525 mm, enquanto B, 0.267 mm. Portanto, essa diferença entre os conectores (com e sem termo-retrátil) é insignificante. Na questão da medida (Fig. 63), foi analisado a presença do conector. Percebeu-se, que para a placa B, o valor da flexão horizontal máxima não foi alterado em comparação com placa sem nenhum conector (Tab. 10).

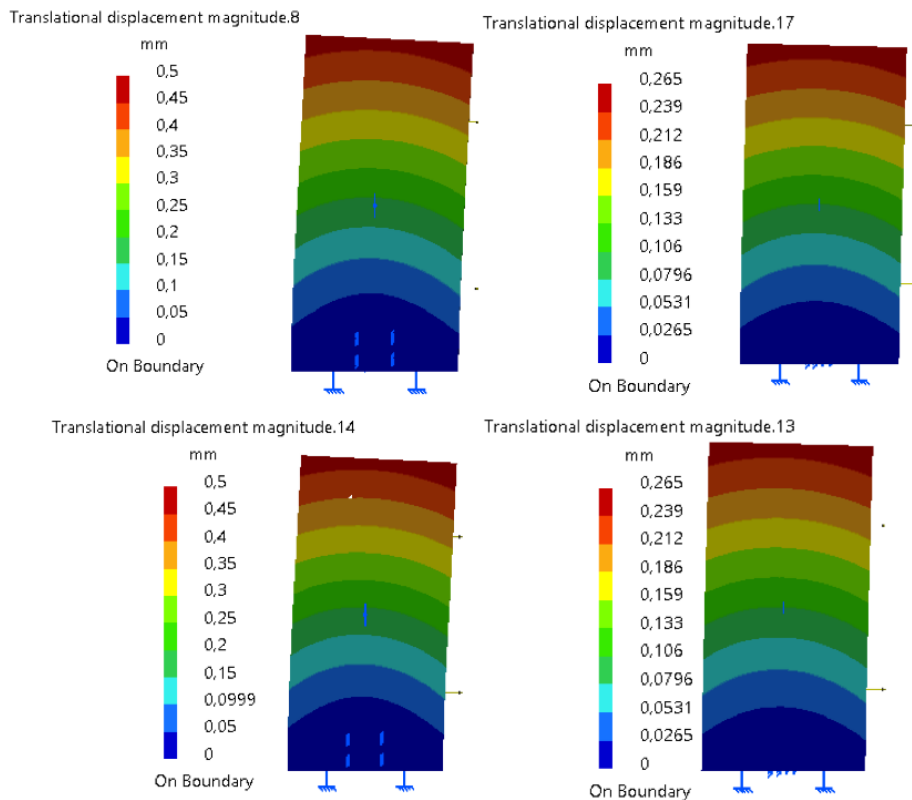


Figura 60 – Deslocamento da flexão horizontal para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.



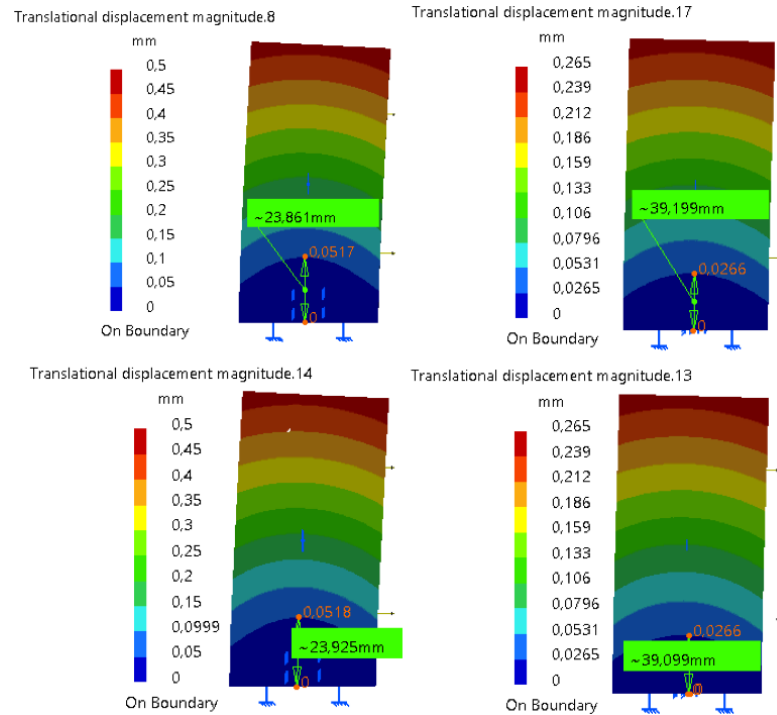


Figura 61 – Medida do deslocamento da flexão horizontal para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

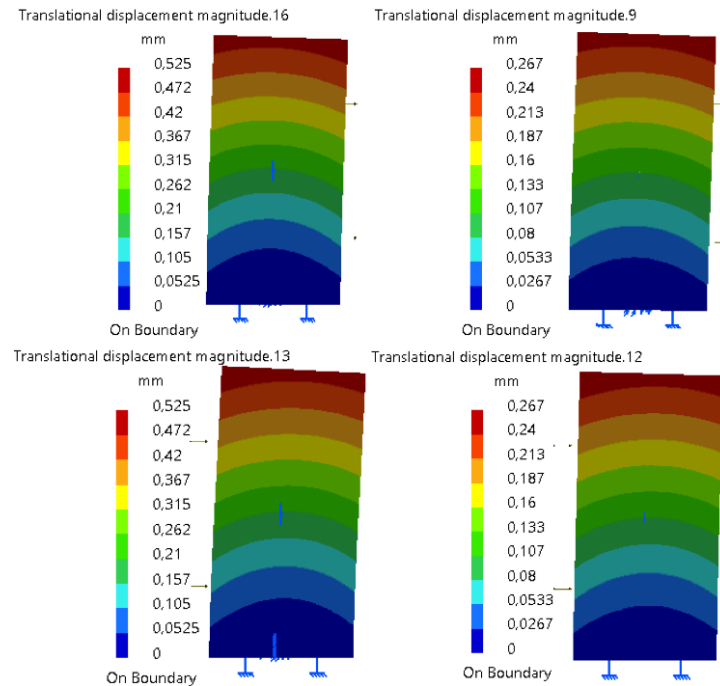


Figura 62 – Deslocamento da flexão horizontal para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

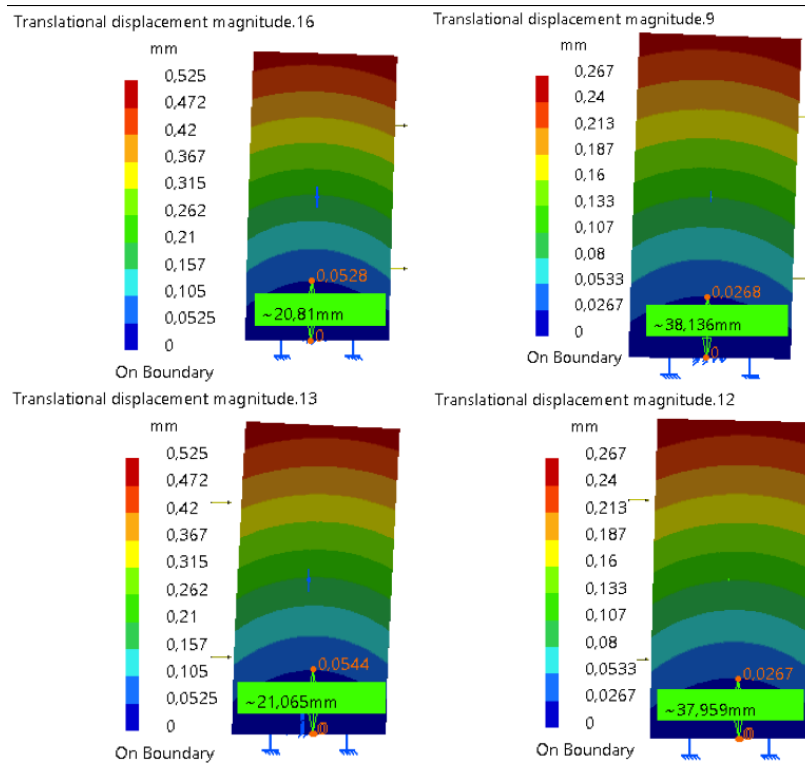


Figura 63 – Medida de Deslocamento da flexão horizontal para os conectores pequenos. A esquerda encontram-se as placas de Tipo A e a direita as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retrâteis.

Tabela 10 – Tabela FH - deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
<b>Sem Conector</b>	0,534	0,267	-	-	-	-
<b>Conector Grande</b>	0,5	0,265	14,57	7,275	-7%	-1%
<b>Conector Grande c/ termo</b>	0,5	0,265	14,483	9,59	-7%	-1%
<b>Conector Pequeno</b>	0,525	0,267	-	-	-2%	0%
<b>Conector Pequeno c/termo</b>	0,525	0,267	6,141	-	-2%	0%

#### 4.2.3.2 Tensões principais FH - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões principais, da flexão horizontal (Fig. 64 – 65), pode-se determinar onde há compressão e tração. Conforme as figuras mencionadas, a parte lateral foi comprimida, enquanto o outro lado está sendo tracionada. Isto deve-se à força que foi aplicada na lateral. Também, por meio das tensões principais, há uma prévia da interferência que o conector gera na placa, o que ocasiona uma área de perturbações com um plano em verde claro dentro de um outro verde escuro. Há uma diferença perceptível entre os conectores grandes (Fig. 64) e os pequenos (Fig. 65), essa interferência não se percebe no menor.

No conector grande, há uma grande presença nas placas em relação ao conector pequeno. Pode-se comparar entre todas as placas menores, vendo a presença do verde claro mais vivo dentro do verde escuro e maior dentro da placa com o conector grande. Para a placa maior, não há interferência, sendo visível, apenas, o verde escuro presente em ambos.

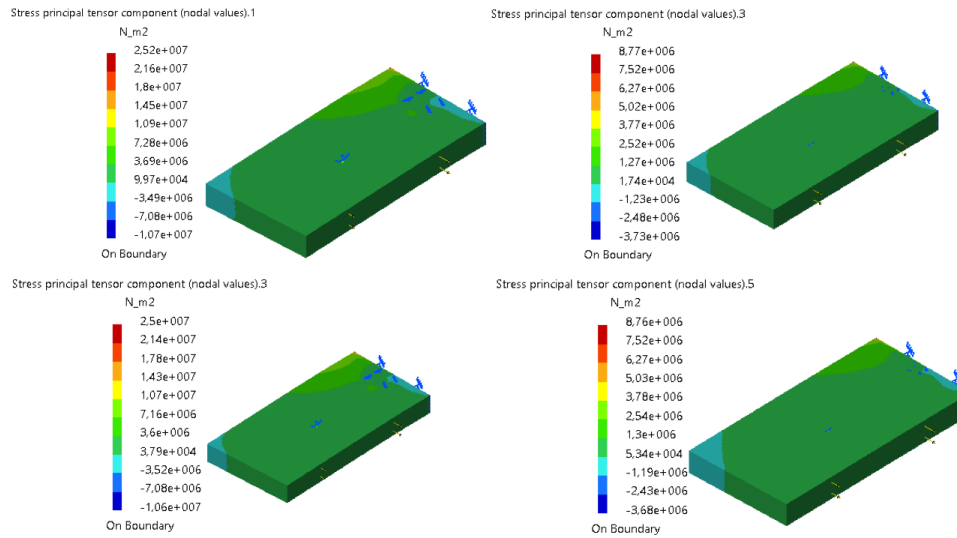


Figura 64 – Tensões principais da flexão horizontal para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

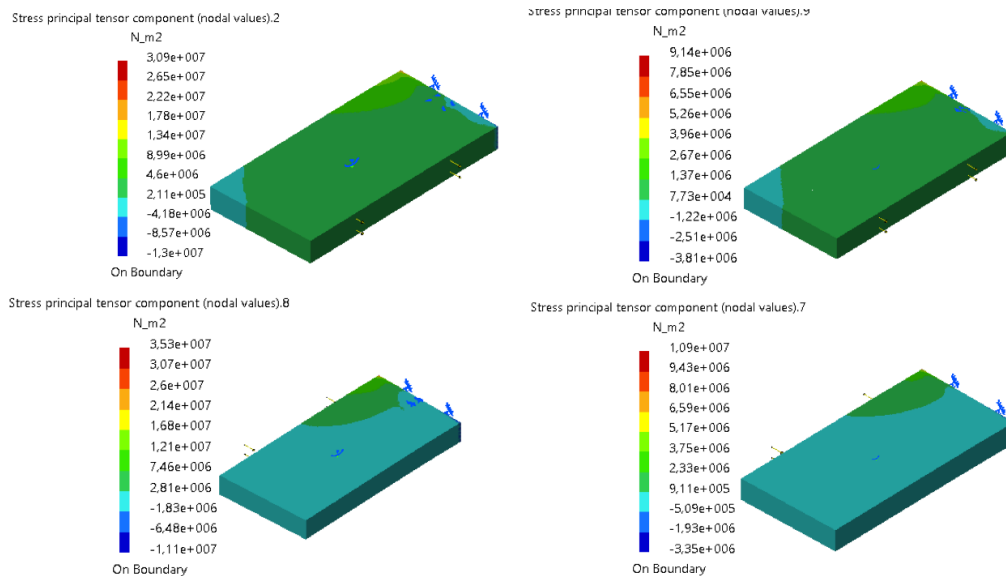


Figura 65 – Tensões principais da flexão horizontal para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

#### 4.2.3.3 Tensões de Von Mises FH - com a presença dos conectores:

Por meio das tensões de Von Mises, da flexão horizontal (Fig. 66 – 71), determina-se se a placa fraturará ou não. Além disso, devido à hipótese principal (Fig. 29), é possível verificar o quanto o conector interferirá na placa.

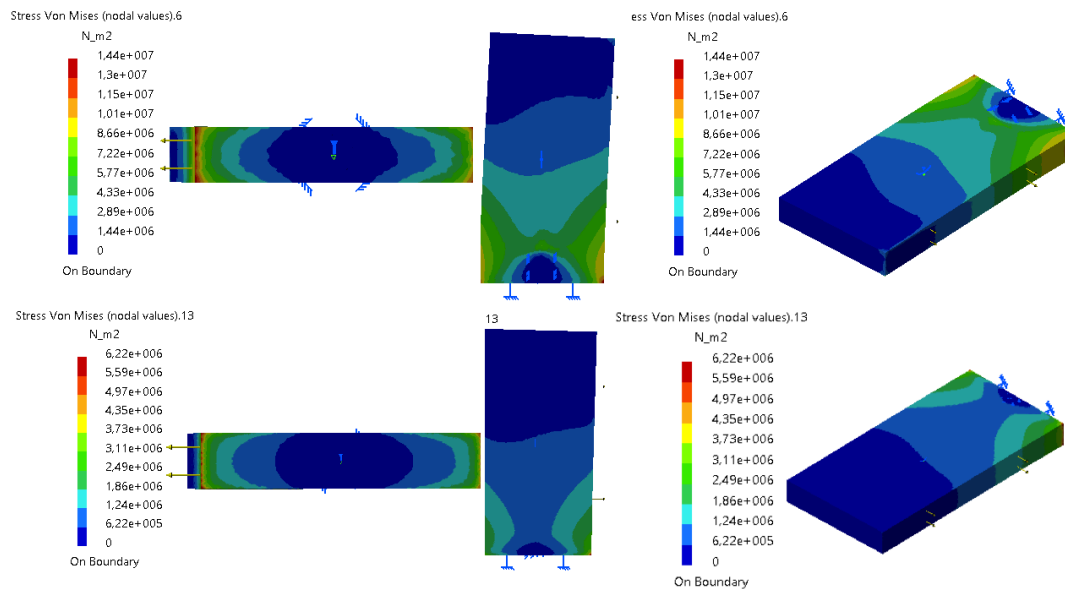


Figura 66 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

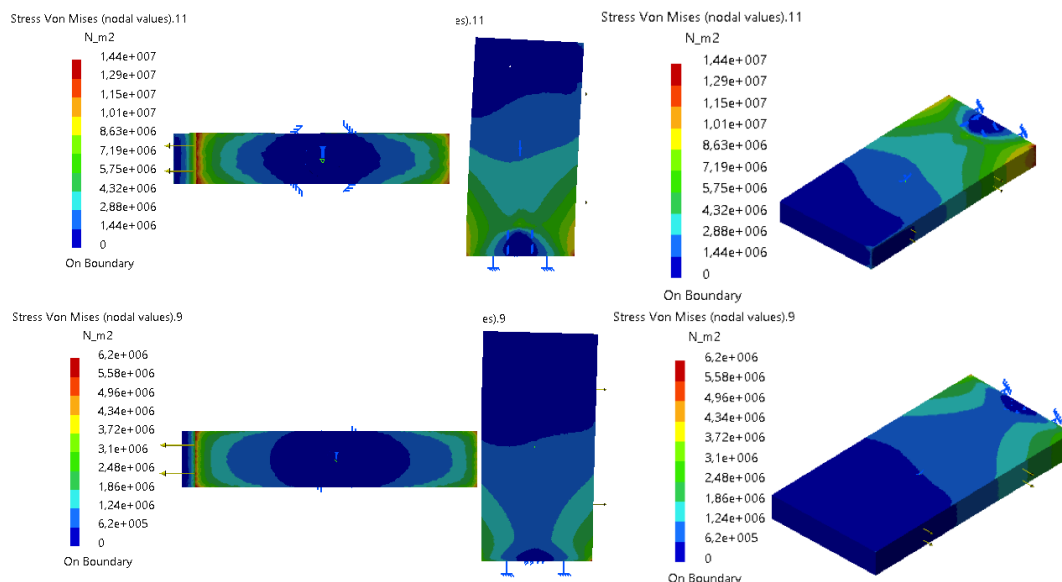


Figura 67 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Existe diferença dos conectores grandes sem a presença do termo-retrátil (Fig. 66) e com a presença (Fig. 67). Essas diferenças devem ser analisadas cuidadosamente. Pois,

na verdade, o conector é o maior ponto de fraqueza. Ou seja, as análises devem ser feitas ao contrário. Portanto, quando instalada a presença do termo-retrátil em vez de proteger mais a placa, diminuindo a tensão de Von Mises, na verdade aumentará a tensão. Com isso, gerando uma perturbação prejudicial a placa.

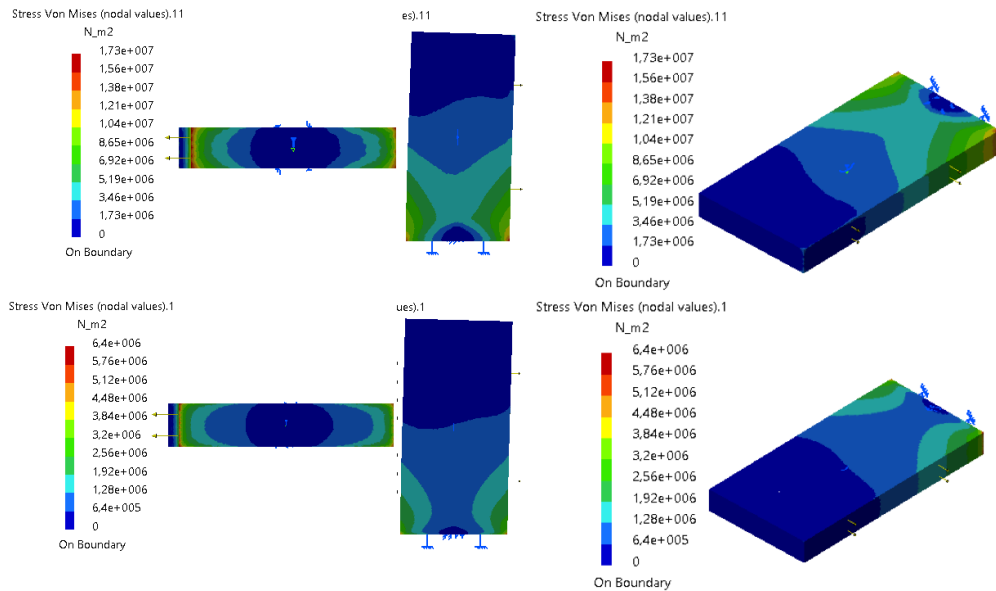


Figura 68 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

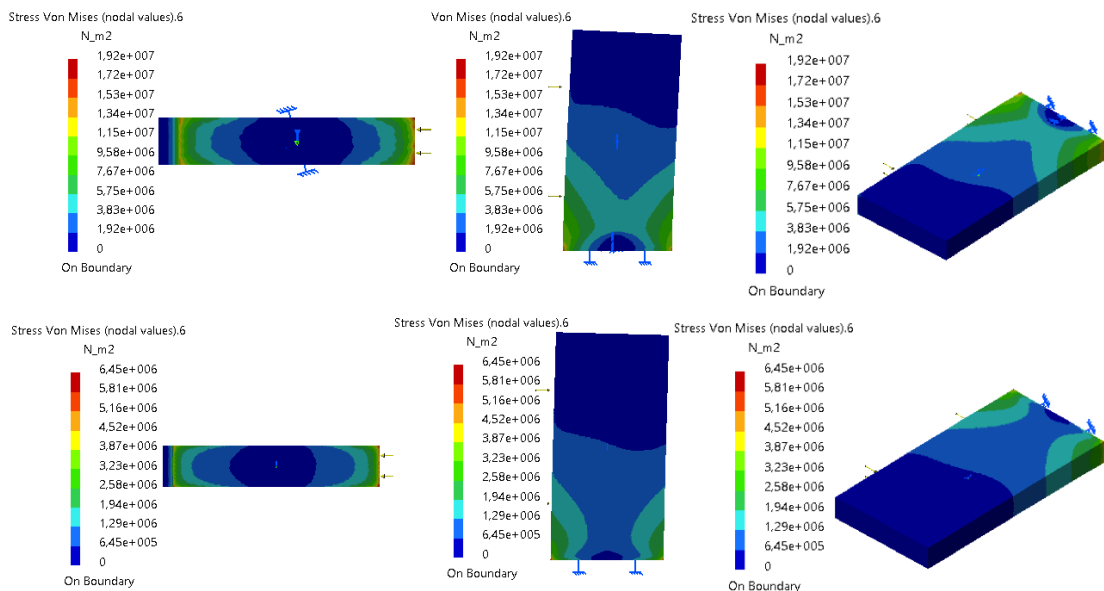


Figura 69 – Tensões de Von Mises da flexão horizontal para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Os conectores pequenos (sem (Fig. 68) e com (Fig. 69) o termo-retrátil) devem ser analisados da mesma forma que foi o conector grande. Como pode perceber, o conector

pequeno não interfere muito nas placas de tipo A e B. As Fig. 70 e 71 revelam as medidas das interferências dos conectores, sendo a primeira para os conectores grandes e a segunda para os conectores pequenos (Tab. 11).

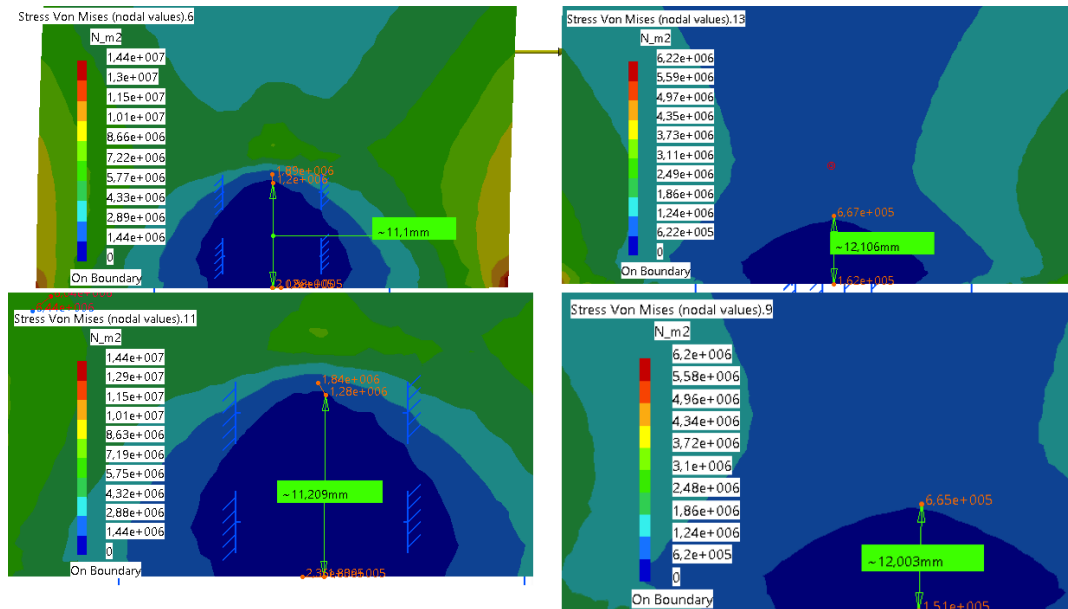


Figura 70 – Medida da presença do conector, em flexão horizontal, para os conectores grandes em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retrâteis.

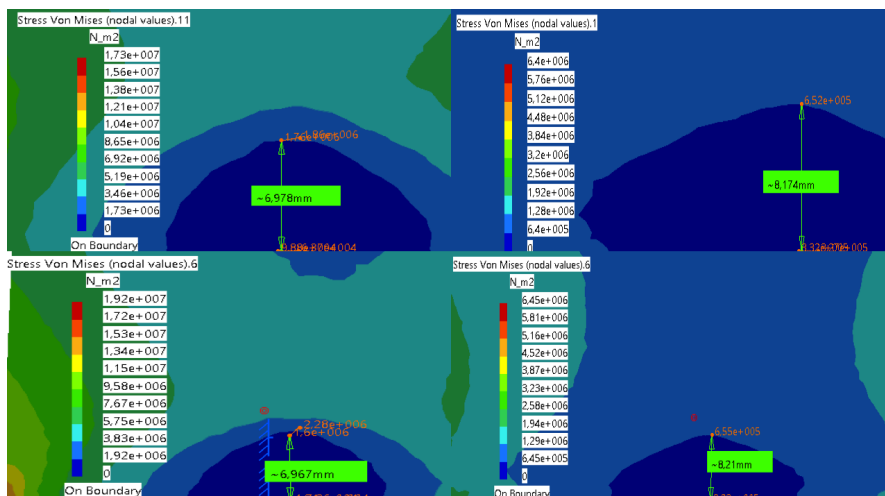


Figura 71 – Medida da presença do conector, em flexão horizontal, para os conectores pequenos em relação a Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retrâteis.

Tabela 11 – Tabela FH - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.

	Conector Grande	Conector Grande c/ Termo	Conector Pequeno	Conector Pequeno c/ Termo	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector grande	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector pequeno
Medida Placa 10 (mm)	11,1	11,209	6,978	6,967	1%	0%
Medida Placa 20 (mm)	12,106	12,003	8,174	8,21	-1%	0%

#### 4.2.4 Torção - (TOR)

Por meio do deslocamento, da torção (Fig.72) em relação a torção:

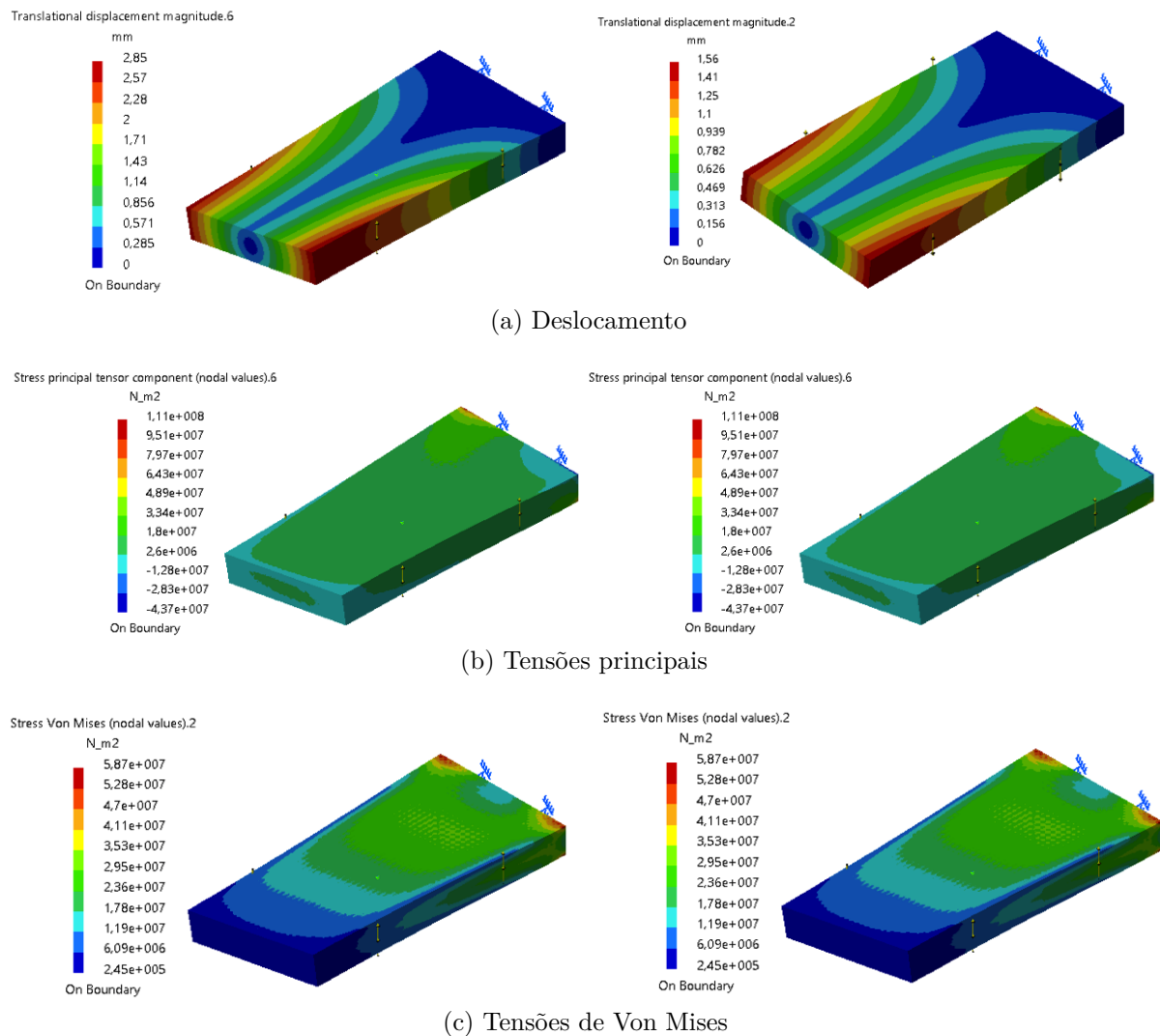


Figura 72 – TOR - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c.

#### 4.2.4.1 Deslocamento TOR - com a presença dos conectores:

Através do deslocamento, da torção (Fig. 73 – 76), há uma diferença entre os conectores pequenos e grandes para as diferentes placas. A parte em azul escura representa o local a ser avaliado e onde está o conector.

O conector grande é representado na Fig. 73 - 74, o seu valor máximo, revelado sem a presença do termo-retrátil, para a placa de 10, é de 2.8 mm, enquanto, para a de 20, é de 1.56 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 72, sem nenhum conector, mostra a placa torcendo de 2.85 mm e a placa de 20 torciona 1.56 mm. Ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando, assim, seu valor para menor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa de 10 diminui para 2.79 mm, enquanto a de 20, para 1,56 mm. Portanto, essa diferença entre os conectores com e sem termo-retrátil é insignificante consoante Fig. 74.

O conector pequeno é representado na Fig. 75 - 76, seu valor máximo, mostrado sem a presença do termo-retrátil, para a placa de 10, é de 2.88 mm, enquanto, para a de 20, é de 1.57 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 72, sem nenhum conector, mostra a placa torcionando 2.85 mm para uma placa de 10 e já a placa de 20 sendo 1.56 mm. Ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa, alterando, assim, seu valor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa de 10 torciona, em sua ponta, 2.89 mm, enquanto a de 20, 1.57 mm. Portanto, essa diferença entre os conectores, com e sem termo-retrátil, não se altera significativamente. Na questão da medida (Fig. 76), foi analisada a presença do conector. Percebeu-se que, para a placa de 20, o valor da torção máxima não foi alterada, em comparação aos conectores grandes e pequenos, com e sem termo-retrátil (Tab. 12).

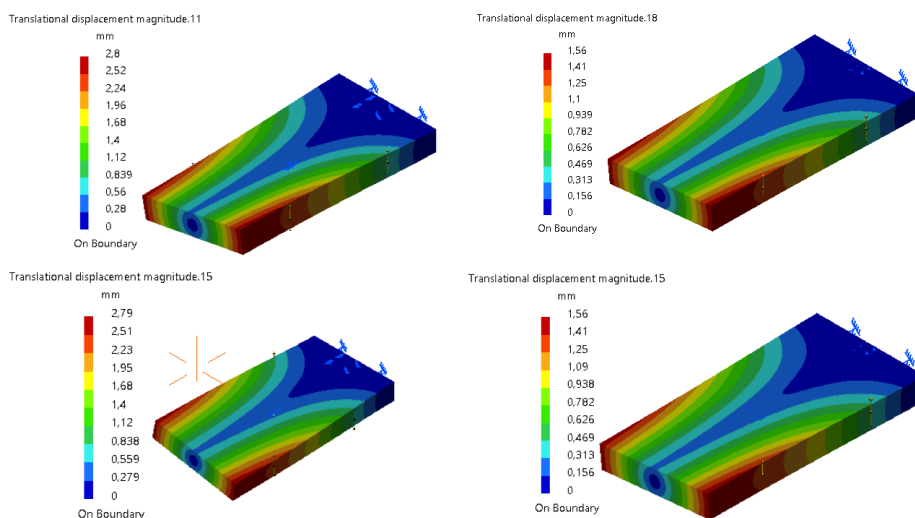


Figura 73 – Deslocamento da torção para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.



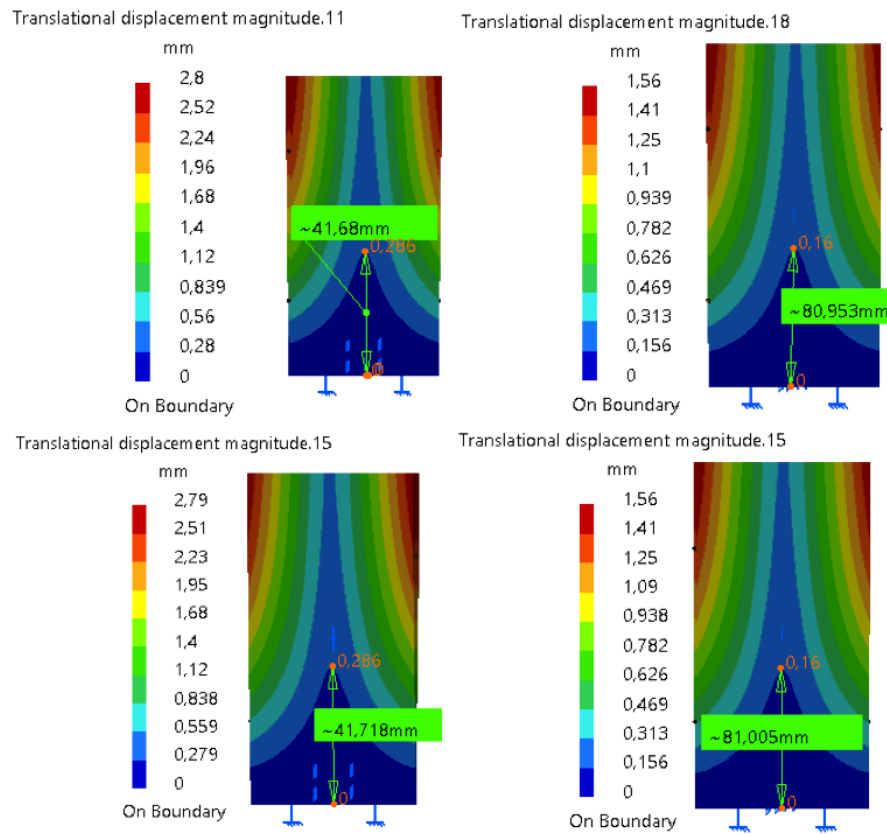


Figura 74 – Medida do deslocamento da torção para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

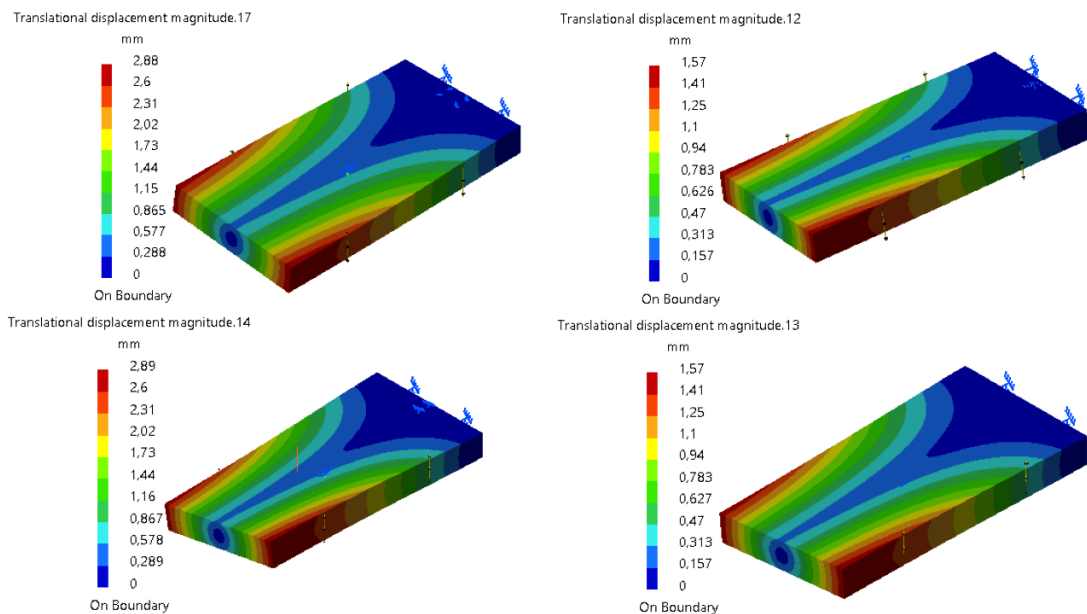


Figura 75 – Deslocamento da torção para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

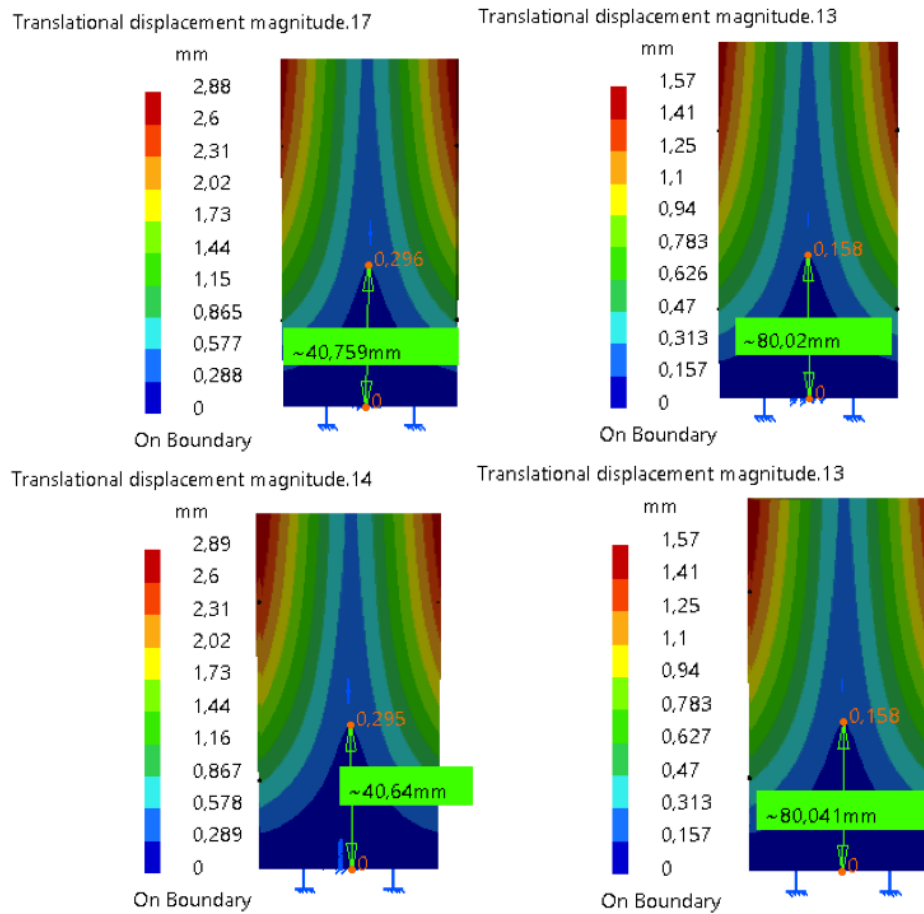


Figura 76 – Medida de Deslocamento da torção para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

Tabela 12 – Tabela TOR - Deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
<b>Sem Conector</b>	2,85	1,560	-	-	-	-
<b>Conector Grande</b>	2,8	1,560	41,68	80,953	-2%	0%
<b>Conector Grande c/ termo</b>	2,79	1,560	41,718	81,005	-2%	0%
<b>Conector Pequeno</b>	2,88	1,570	40,759	80,02	1%	1%
<b>Conector Pequeno c/termo</b>	2,89	1,570	40,64	80,041	1%	1%

#### 4.2.4.2 Tensões principais TOR - com a presença dos conectores:

Através das tensões principais, da torção (Fig. 64 – 65), pode-se determinar onde há tração e compressão. As partes laterais estão sendo comprimidas e tracionadas. Nos dois lados, estão sendo aplicadas forças ao contrário (momento sobre o eixo longitudinal), sendo assim a torção, apresentado nas imagens, próximo à restrição do conector, uma

divisão demonstrando as diferenças de cores, as compressões e trações. A cor azul revela a ocorrência de compressão, enquanto do outro lado, a cor verde, a tração.

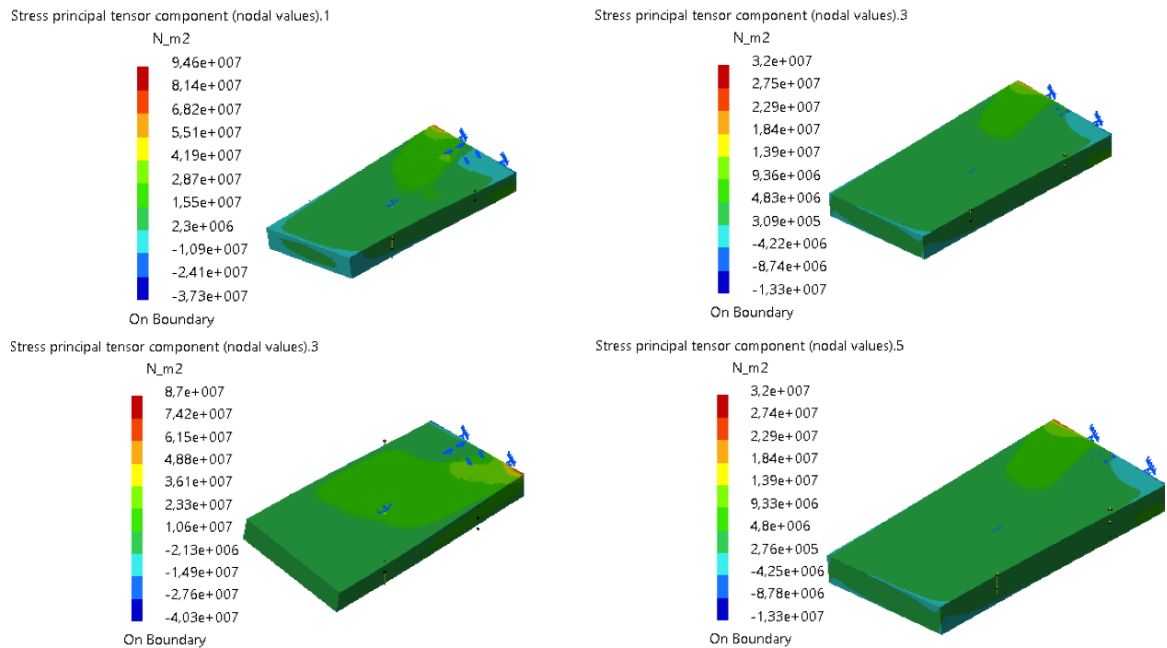


Figura 77 – Tensões principais da torção para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

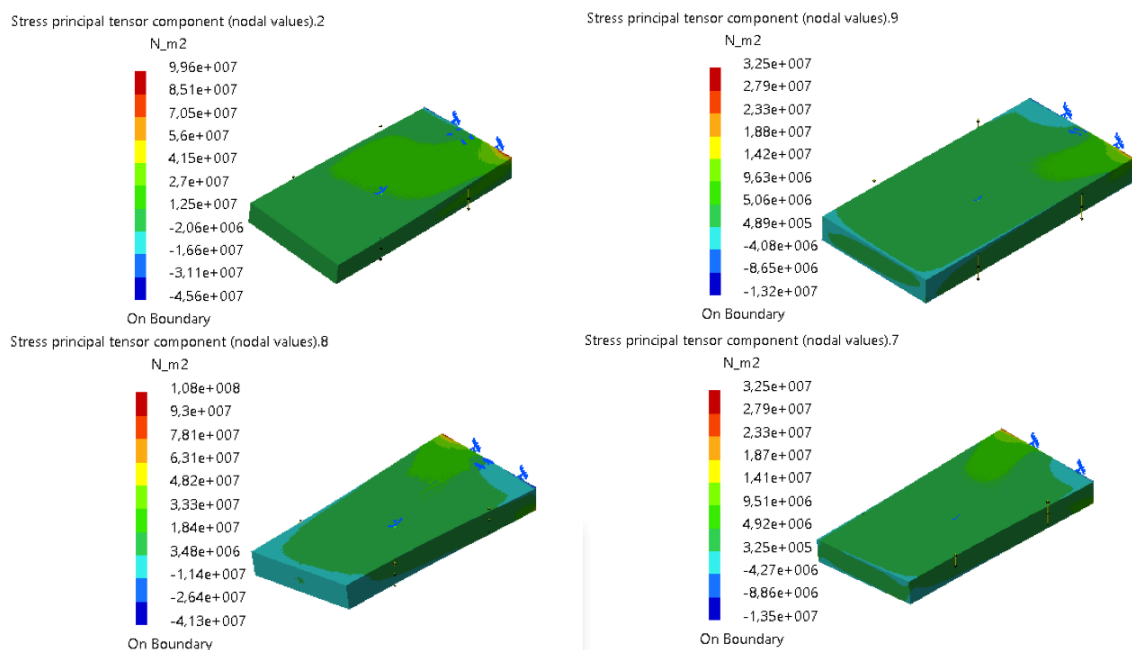


Figura 78 – Tensões principais da torção para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

#### 4.2.4.3 Tensões de Von Mises TOR - com a presença dos conectores:

Mediante as tensões de Von Mises, da torção (Fig. 79 – 84), consegue-se determinar se a placa irá romper ou não. Além disso, devido à hipótese principal (Fig. 29), pode-se visualizar o quanto o conector interferirá na placa.

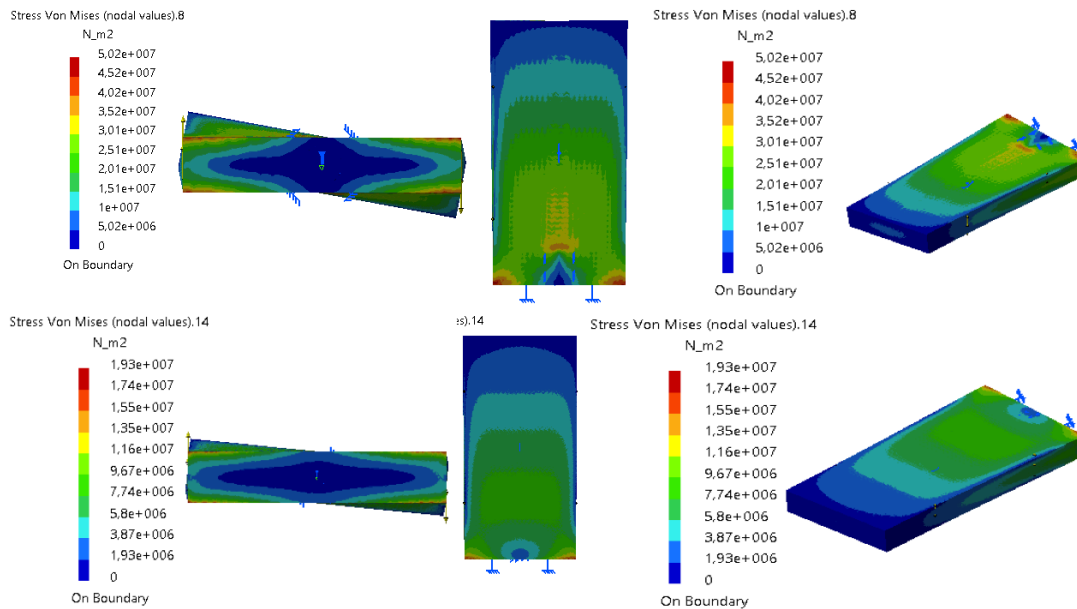


Figura 79 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

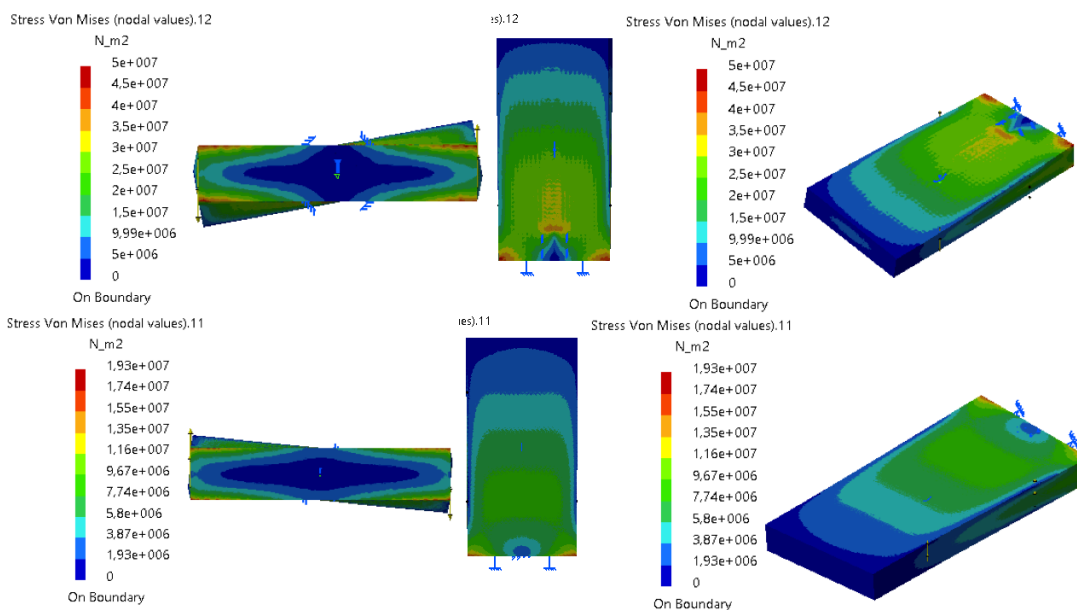


Figura 80 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

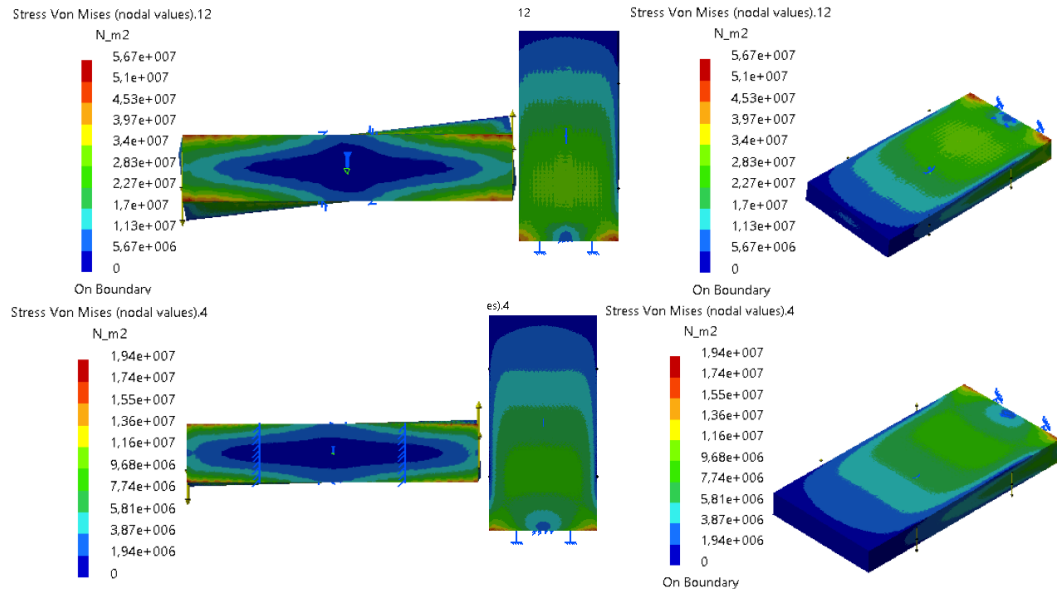


Figura 81 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

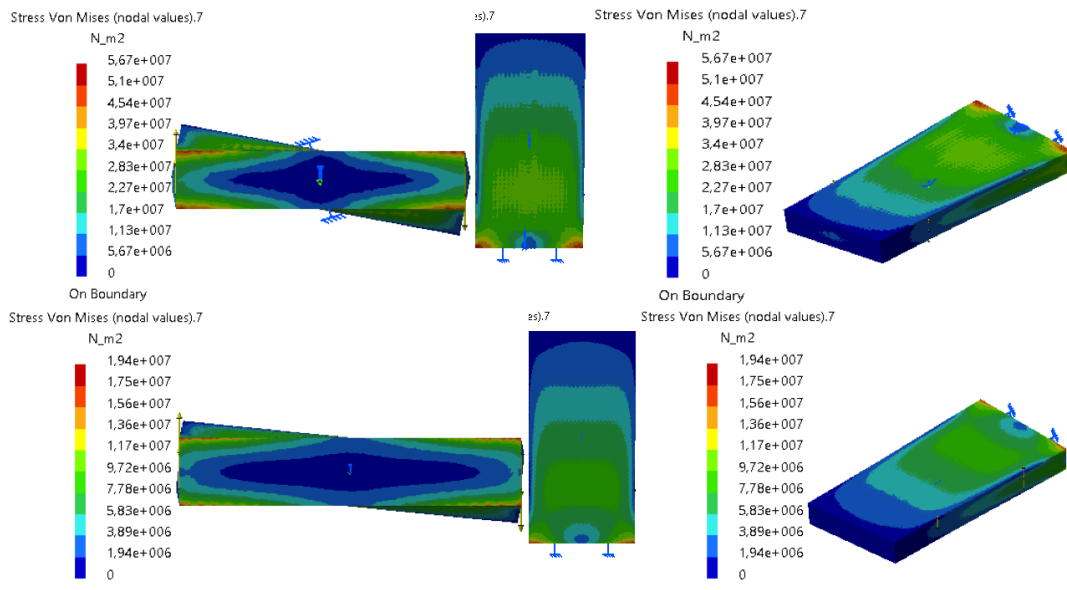


Figura 82 – Tensões de Von Mises da torção para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Os conectores sem (Fig. 79 e 81) e com (Fig. 80 e 82) o termo-retrátil possuem diferenças que devem ser analisadas cuidadosamente. Pois o conector é o maior ponto de fraqueza. Portanto, as análises devem ser feitas ao contrário. Então, quando colocada a presença do termo-retrátil, em vez de proteger mais a placa, diminuindo a tensão de Von Mises, na verdade aumentará. Com isso, provoca uma perturbação prejudicial à placa, o que é comprovado pelo tamanho em azul que é gerado em volta do conector. Além disto,

nos conectores grandes, percebe-se um vermelho próximo à presença dos conectores, nas placas de 10. Para isto, foi verificada a medida na qual o conector interfere na placa (Fig. 83 e 84) (Tab. 13).

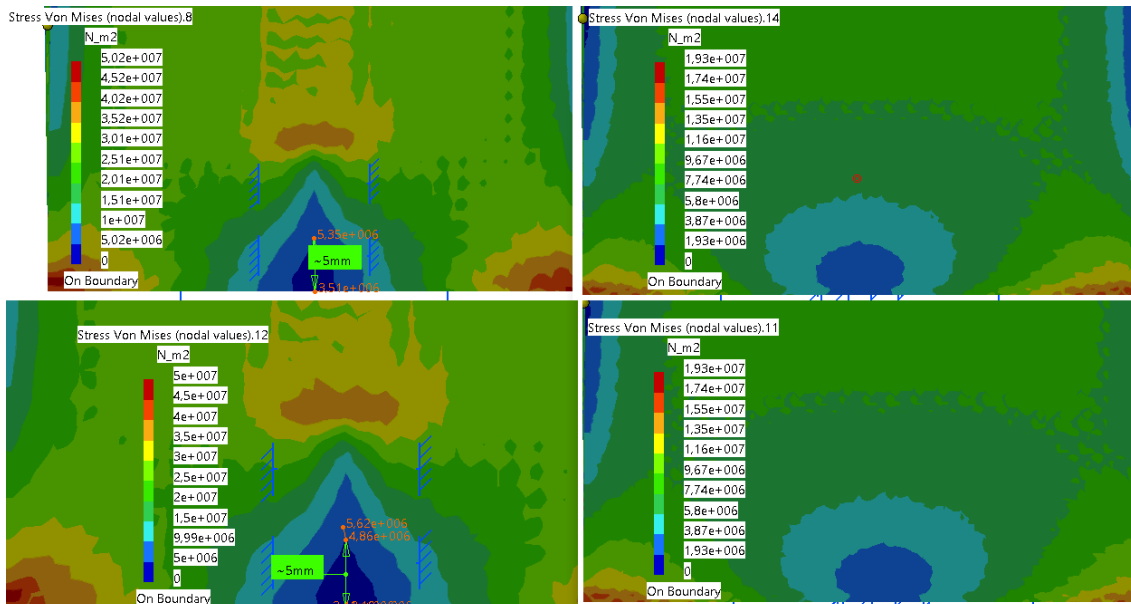


Figura 83 – Medida da presença do conector, em torção, para os conectores grandes em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

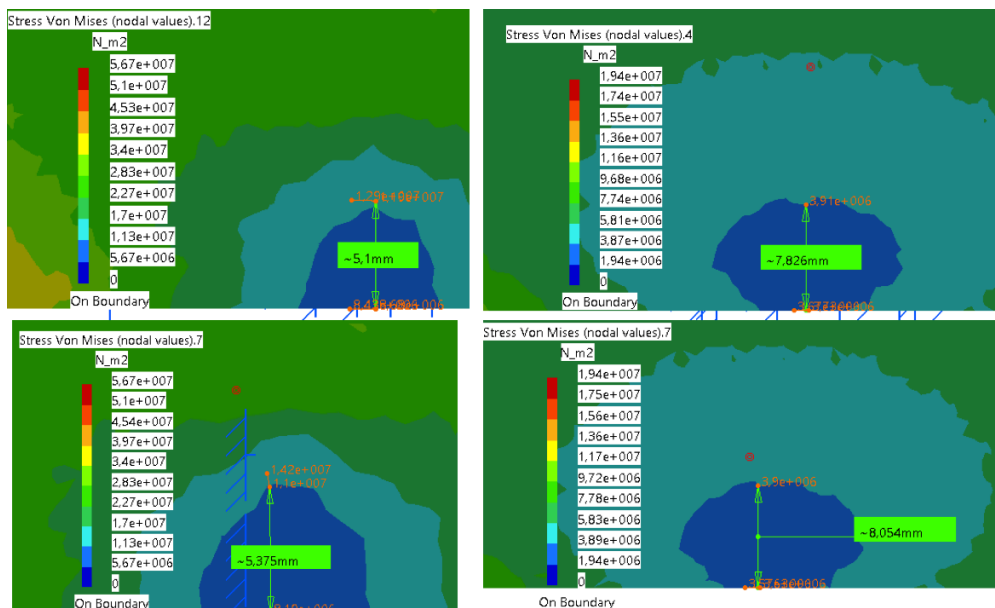


Figura 84 – Medida da presença do conector, em torção, para os conectores pequenos em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

Tabela 13 – Tabela TOR - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.

	Conector Grande	Conector Grande c/ Termo	Conector Pequeno	Conector Pequeno c/ Termo	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector grande	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector pequeno
Medida Placa 10 (mm)	5	5	5,1	5,375	0%	5%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	7,826	8,054	-	3%

#### 4.2.5 Tração - TRA:

Placas sem a presença do conector (Fig.85) em relação à tração:

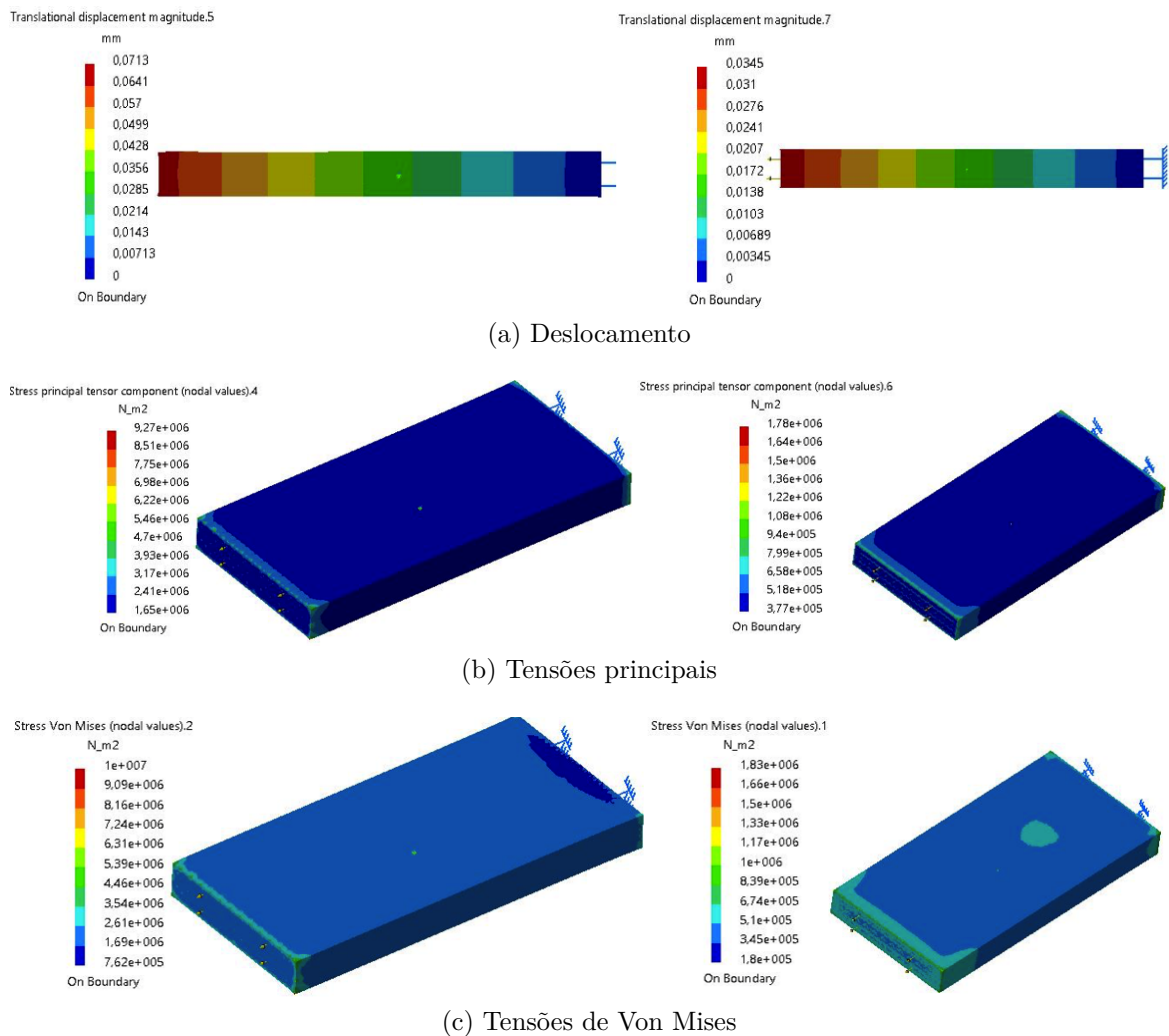


Figura 85 – TRA - à esquerda: placa 10x50x100mm (Tipo A) e à Direita: placa 20x100x200mm (Tipo B). O deslocamento, tensões principais e tensões de Von Mises são representados, respectivamente, pelos itens a, b e c.



#### 4.2.5.1 Deslocamento TRA - com a presença dos conectores:

Por deslocamento, da tração (Fig. 86 – 89), há uma diferença entre os conectores pequenos e grandes para as diferentes placas. A parte em azul escuro refere-se ao local onde o conector deve ser avaliado e onde se encontra.

O conector grande é representado na Fig. 86 - 87, o seu valor máximo mostrado, sem a presença do termo-retrátil, para a placa tipo A, é de 0.0687 mm, enquanto para a tipo B, é de 0.0343 mm. Isto é esperado, pois a Fig. 85, sem nenhum conector, apresenta a placa de tipo A tracionando 0.0713 mm e a placa de tipo B tracionou de 0.0345 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência que esta faz à placa. Modificando, assim, seu valor para menor. Quando colocado o termo-retrátil, a placa A tracionou 0.069 mm, enquanto B, 0.0342 mm. Portanto, há diferença dos valores entre os conectores com e sem termo-retrátil, que são insignificantes. A Fig. 87 apresenta as medidas.

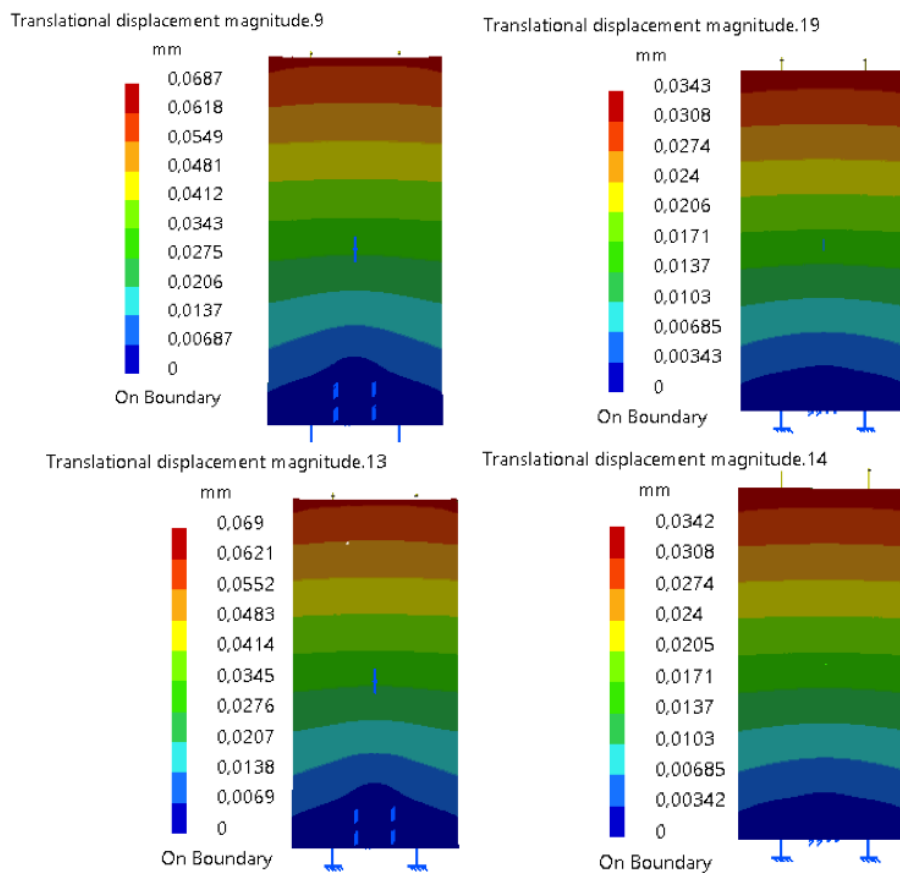


Figura 86 – Deslocamento da tração para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.



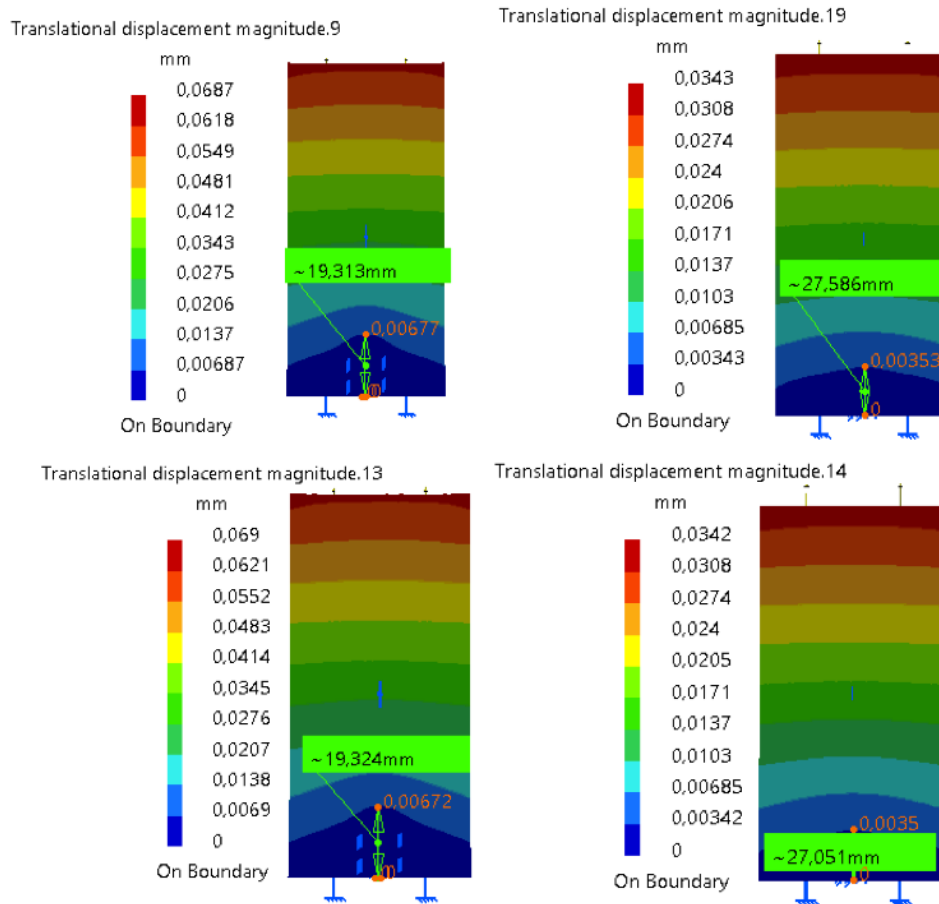


Figura 87 – Medida do deslocamento da tração para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas menores e, à direita, as placas maiores. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

O conector pequeno é representado na Fig. 88 - 89, seu valor máximo, apresentado sem a presença do termo-retrátil, para a placa tipo A, é de 0.0704 mm, enquanto para a de tipo B, é de 0.0343 mm. Isto é esperado, pois a figura 85, sem nenhum conector, mostra a placa de tipo A tracionando 0.0713 mm e a placa de tipo B, 0.0345 mm, ou seja, devido à hipótese principal (Fig. 29), percebe-se a resistência do conector a placa, alterando, assim, seu valor.

Quando colocado o termo-retrátil, a placa A traciona em sua ponta 0.0703 mm, enquanto B, 0.0344 mm. Portanto, essa diferença entre os conectores (com e sem termo-retrátil) é insignificante. Na questão da medida (Fig. 89), foi analisada a presença do conector conforme (Tab. 14). A imagem revela que não há interferência, ao utilizar ou não o termo-retrátil.

Então, pode-se afirmar que utilizar o conector grande seja mais prejudicial do que o pequeno, pois há uma maior presença deste dentro da placa. Isto ocasiona um ponto de fraqueza dentro da placa, pois gera tensões residuais em volta desta.

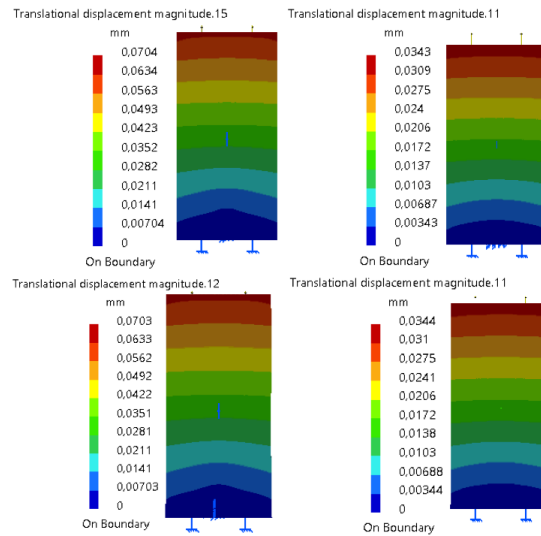


Figura 88 – Deslocamento da tração para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas Tipo A e, à direita, as Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retrâteis.

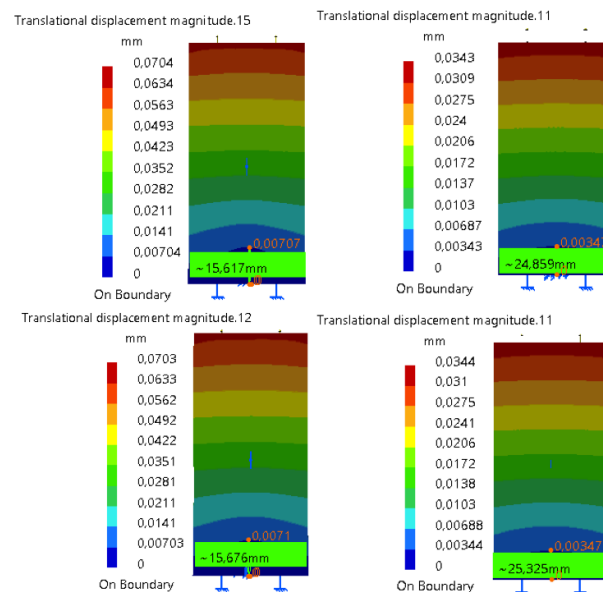


Figura 89 – Medida de Deslocamento da tração para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as Tipo A e, à direita, as Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retrâteis.

Tabela 14 – Tabela TRA - Deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
Sem Conector	0,0713	0,0345	-	-	-	-
Conector Grande	0,0687	0,0343	19,313	27,586	-3,8%	-0,6%
Conector Grande c/ termo	0,069	0,0342	19,324	27,051	-3,3%	-0,9%
Conector Pequeno	0,0704	0,0343	15,617	24,858	-1,3%	-0,6%
Conector Pequeno c/termo	0,0703	0,0344	15,676	25,325	-1,4%	-0,3%

## 4.2.5.2 Tensões principais TRA - com a presença dos conectores:

Diante das tensões principais, da tração (Fig. 64 – 65), identificam-se como tracionadas. Essas imagens demonstram o que ocorre com o conector, o qual é mostrado em azul escuro com sua presença. A presença do conector grande interfere tanto na placa menor quanto na placa maior. O conector pequeno interfere, somente, nas placas de tipo A, mas não interfere nas placas de tipo B.

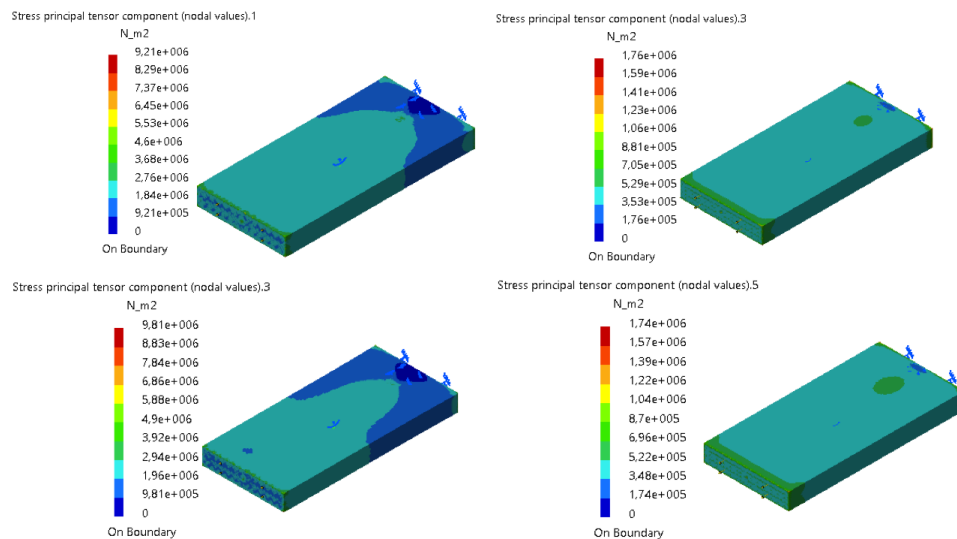


Figura 90 – Tensões principais da tração para os conectores grandes. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

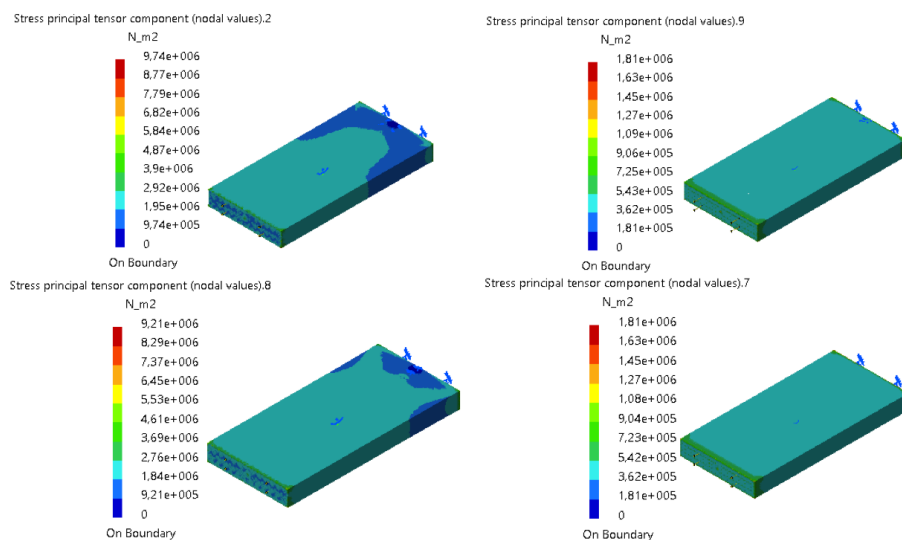


Figura 91 – Tensões principais da tração para os conectores pequenos. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

#### 4.2.5.3 Tensões de Von Mises TRA - com a presença dos conectores:

Através das tensões de Von Mises, da tração (Fig. 79 – 84), pode-se determinar se a placa fraturará ou não. Além disso, devido à hipótese principal (Fig. 29), é possível verificar o quanto o conector interferirá na placa.

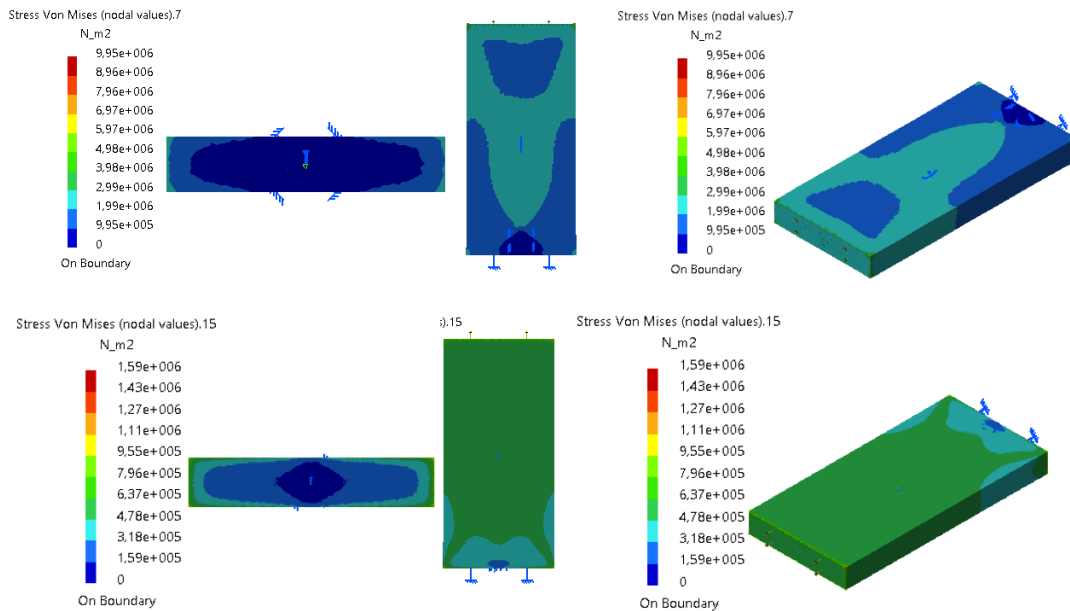


Figura 92 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores grandes sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

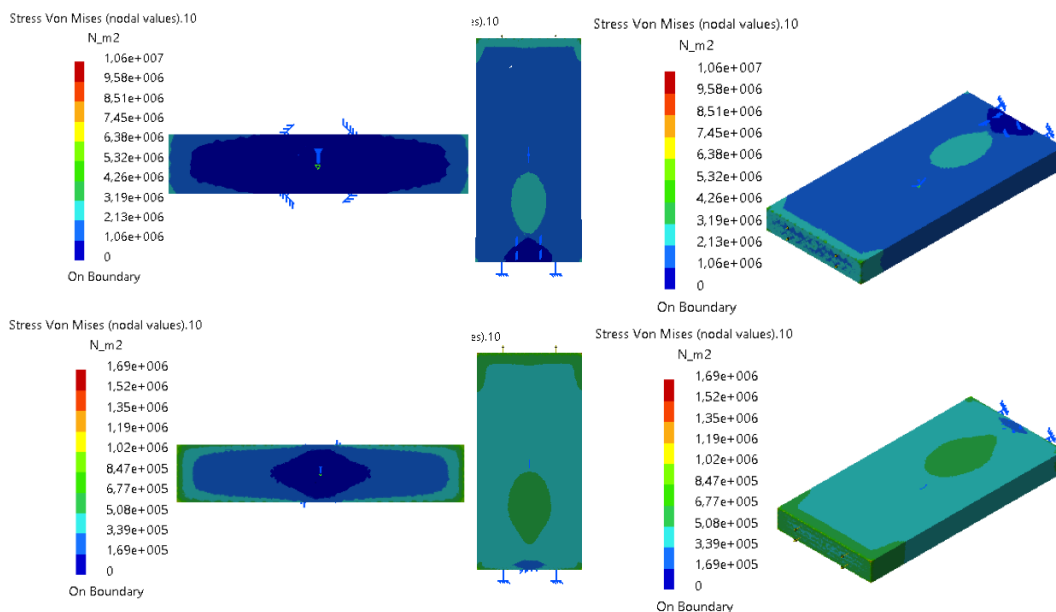


Figura 93 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores grandes com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Há diferença nos conectores maiores sem (Fig. 92) e com (Fig. 93) o termo-retrátil. Essas diferenças devem ser analisadas cuidadosamente. Na verdade, o conector é o maior ponto de fraqueza. Ou seja, as análises devem ser feitas ao contrário. Há uma presença maior do conector com termo-retrátil do que sem, isso ocorre em virtude de camada maior do termo-retrátil estar envelopado no conector, assim, resistindo a tração. Porém, ao fazer a análise de forma contrária, conclui-se que, na verdade está cedendo a tração.

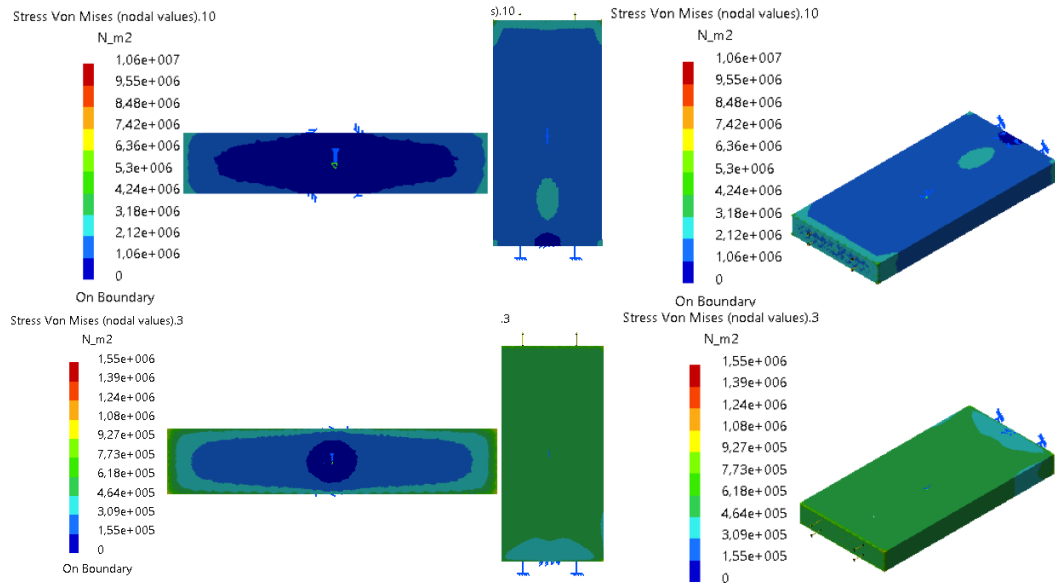


Figura 94 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores pequenos sem a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

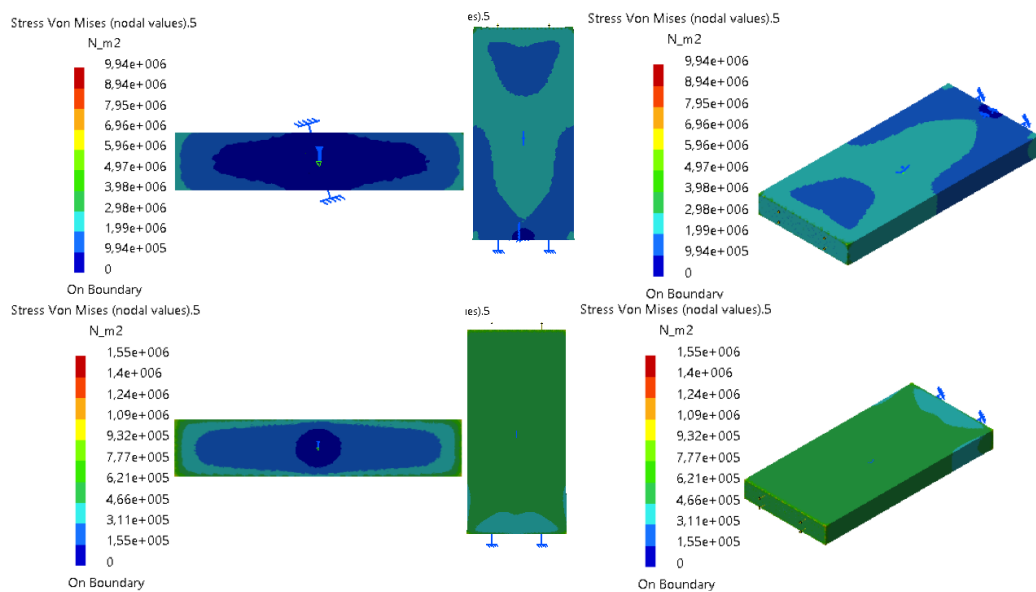


Figura 95 – Tensões de Von Mises da tração para os conectores pequenos com a presença do termo-retrátil. Na parte superior da imagem, encontram-se as placas de Tipo A e, na parte inferior, as de Tipo B.

Os conectores pequenos sem (Fig. 94) e com (Fig. 95) termo-retrátil devem ser analisados conforme conector grande. O conector pequeno quase não interfere na placa menor, tampouco na placa maior. As Fig. 46 e 47 revelam as medidas das interferências dos conectores, sendo a primeira para os conectores grandes e a segunda para os conectores pequenos (Tab. 15).

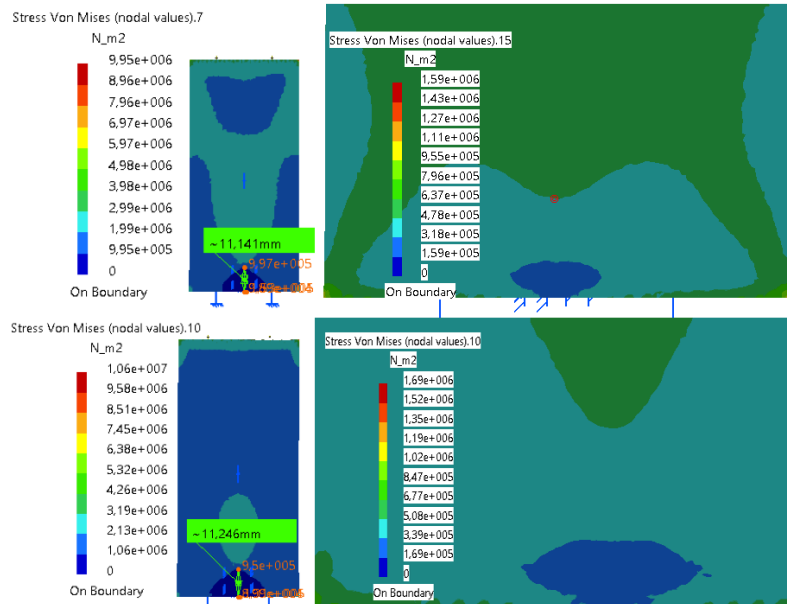


Figura 96 – Medida da presença do conector, em tração, para os conectores grandes em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

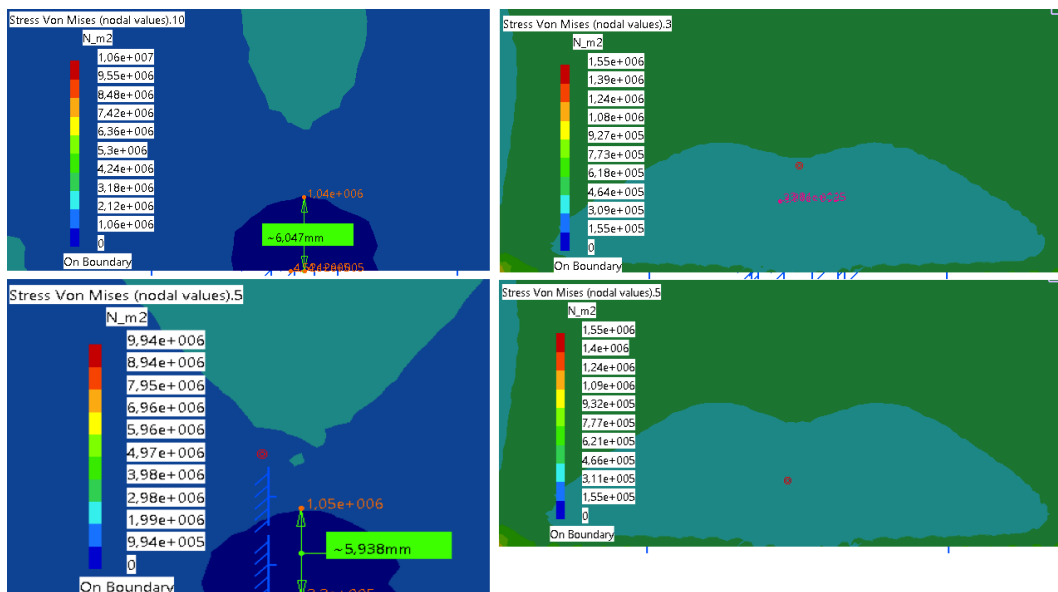


Figura 97 – Medida da presença do conector, em tração, para os conectores pequenos em relação às Tensões de Von Mises. À esquerda encontram-se as placas de Tipo A e, à direita, as de Tipo B. A última e a primeira linha representam, respectivamente, os conectores com e sem termo-retráteis.

Tabela 15 – Tabela TRA - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.

	Conector Grande	Conector Grande c/ Termo	Conector Pequeno	Conector Pequeno c/ Termo	Porcentagem em relação a presença do termorretrátil no conector grande	Porcentagem em relação a presença do termorretrátil no conector pequeno
Medida Placa 10 (mm)	11,141	11,246	6,047	5,938	1%	-2%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	-	-	-	-

### 4.3 Tabelas conclusivas

Tabela 16 – Tabela Total - Deslocamento.

	Placa 10 (mm)	Placa 20 (mm)	Medidas placa 10 (mm)	Medidas Placa 20 (mm)	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 10	Porcentagem em relação a placa sem conector Placa 20
<b>Flexão Vertical</b>						
Sem Conector	23,4	12,2	-	-	-	-
Conector Grande	18,8	12	31,152	52,977	20%	1,64%
Conector Grande c/ termo	18,7	11,9	31,198	53,749	20,09%	2,46%
Conector Pequeno	21,8	12,2	27,647	51,753	6,84%	0,00%
Conector Pequeno c/termo	21,8	12,2	27,425	51,688	6,84%	0,00%
<b>Compressão</b>						
Sem Conector	0,00158	0,000666	-	-	-	-
Conector Grande	0,0016	0,000662	14,57	7,275	1%	-1%
Conector Grande c/ termo	0,00156	0,000675	14,483	9,59	-1%	1%
Conector Pequeno	0,00157	0,000663	-	-	-1%	0%
Conector Pequeno c/termo	0,00158	0,000673	6,141	-	0%	1%
<b>Flexão Horizontal</b>						
Sem Conector	0,534	0,267	-	-	-	-
Conector Grande	0,5	0,265	14,57	7,275	-7%	-1%
Conector Grande c/ termo	0,5	0,265	14,483	9,59	-7%	-1%
Conector Pequeno	0,525	0,267	-	-	-2%	0%
Conector Pequeno c/termo	0,525	0,267	6,141	-	-2%	0%
<b>Torção</b>						
Sem Conector	2,85	1,560	-	-	-	-
Conector Grande	2,8	1,560	41,68	80,953	-2%	0%
Conector Grande c/ termo	2,79	1,560	41,718	81,005	-2%	0%
Conector Pequeno	2,88	1,570	40,759	80,02	1%	1%
Conector Pequeno c/termo	2,89	1,570	40,64	80,041	1%	1%
<b>Tração</b>						
Sem Conector	0,0713	0,0345	-	-	-	-
Conector Grande	0,0687	0,0343	19,313	27,586	-3,8%	-0,6%
Conector Grande c/ termo	0,069	0,0342	19,324	27,051	-3,3%	-0,9%
Conector Pequeno	0,0704	0,0343	15,617	24,858	-1,3%	-0,6%
Conector Pequeno c/termo	0,0703	0,0344	15,676	25,325	-1,4%	-0,3%

Tabela 17 – Tabela Total - Medida da presença do conector nas tensões de Von Mises.

	Conector Grande	Conector Grande c/ Termo	Conector Pequeno	Conector Pequeno c/ Termo	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector grande	Porcentagem em relação a presença do termoretrátil no conector pequeno
<b>Flexão Vertical</b>						
Medida Placa 10 (mm)	7,093	7,14	1,997	2,831	1%	29,46%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	-	-	-	-
<b>Compressão</b>						
Medida Placa 10 (mm)	-	-	-	-	-	-
Medida Placa 20 (mm)	-	-	-	-	-	-
<b>Flexão Horizontal</b>						
Medida Placa 10 (mm)	11,1	11,209	6,978	6,967	1%	0%
Medida Placa 20 (mm)	12,106	12,003	8,174	8,21	-1%	0%
<b>Torção</b>						
Medida Placa 10 (mm)	5	5	5,1	5,375	0%	5%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	7,826	8,054	-	3%
<b>Tração</b>						
Medida Placa 10 (mm)	11,141	11,246	6,047	5,938	1%	-2%
Medida Placa 20 (mm)	-	-	-	-	-	-

Por essas tabelas (Tab. 16 e 17) pode-se concluir que, ao utilizar o conector grande, gera-se maior interferência na placa em comparação ao conector pequeno. A respeito de utilizar o termo-retrátil nos conectores, pode-se afirmar que a mudança é insignificante, o que valida sua utilização.



## 5 Conclusão

O projeto de otimização de um conector inovador para incorporação de sensores FBG em materiais compósitos para aplicações aeroespaciais deve-se à importância do monitoramento da saúde estrutural (SHM). Os conectores desenvolvidos atualmente possuem alguns problemas (extravasamento da resina, falta de alinhamento das ferulas, flexibilidade da *Sleeve*, dentre outras). Dessa maneira, o presente trabalho teve por objetivo quantificar e qualificar esses problemas, bem como propor soluções para estes. Além disso, por meio do MEF (utilizando o software CatiaV5®R19), foi analisada e verificada a proposta escolhida.

A solução do problema desse conector é de uma relevância para a sociedade, devido à importância de se controlar a saúde estrutural dos materiais aeroespaciais.

Os resultados apresentados foram satisfatórios. A solução apresentada de envolver o conector com o termo-retrátil e reduzir o diâmetro do furo do cilindro magnético atenderam aos requisitos, i.e, suportar o processo de fabricação em autoclave, solucionar o problema na questão da entrada de resina na parte interior do conector e da flexibilidade da *Sleeve*.

Obtiveram-se bons resultados por meio do MEF. Pois a interferência do conector com termo-retrátil na placa não foi muito diferente em relação ao conector sem o termo-retrátil nas análises. Ou seja, a diferença dos valores apresentados são desprezíveis. Portanto, pode-se utilizar o termo-retrátil sem medo de que este prejudique a placa à qual o conector esteja incorporado.

Uma futura evolução da pesquisa sobre este trabalho consistirá na execução do mesmo experimentalmente. Também sugere-se que seja realizada uma análise dinâmica sobre o comportamento do conector com termo-retrátil em comparação a um sem termo-retrátil.



# Referências

- 1 LENG, J.; ASUNDI, A. Structural health monitoring of smart composite materials by using efpi and fbg sensor. v. 103, n. 3, p. 330–340, 2003. Citado na página 19.
- 2 HALL, S. R.; CONQUEST, T. J. The total data integrity initiative—structural health monitoring, the next generation. In: *Proceedings of the USAF ASIP*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2. Citado na página 19.
- 3 JAIN, P. *FBGS (Fiber Bragg Grating Sensors)*. 2017. <<https://www.engineersgarage.com/articles/fbgs-fiber-bragg-grating-sensors>>. Accessed: 2017-06-04. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.
- 4 CANTWELL, W.; MORTON, J. Detection of impact damage in cfrp laminates. *Composite Structures*, Elsevier, v. 3, n. 3-4, p. 241–257, 1985. Citado na página 20.
- 5 SOUZA, C. S. R. de et al. Estudo do comportamento térmico de laminados carbono/epóxi submetidos a múltiplos ciclos térmicos study of the thermal behavior of carbon/epoxy laminates exposed to multiple thermal cycles. *SciELO Brasil*. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 44.
- 6 SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado na página 23.
- 7 LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 57–79, 2003. Citado na página 23.
- 8 PINTO, J. Torres de M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. Potencialidades da análise de fluxo de materiais no processo produtivo de fibras ópticas poliméricas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, SciELO Brasil, v. 24, n. 3, 2014. Citado na página 23.
- 9 BATES, R. J. *Optical switching and networking handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 2001. Citado na página 24.
- 10 TYNDALL, J. Total reflexion. *Notes about Light*, 1870. Citado na página 24.
- 11 HILL, K. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied physics letters*, AIP, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978. Citado na página 24.
- 12 MELTZ, G.; MOREY, W.; GLENN, W. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 14, n. 15, p. 823–825, 1989. Citado na página 24.
- 13 BARBOSA, C. L. et al. Fabricação e caracterização de grades de bragg através do uso da técnica da máscara de fase. *Telecomunicações*, v. 3, n. 02, p. 22–26, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- 14 INSTRUMENTS, N. *Fundamentos de detecção óptica*. 2017. <<http://www.ni.com/white-paper/11821/pt/>>. Accessed: 2017-05-04. Citado na página 25.

- 15 OTHONOS, A.; KALLI, K. Fundamental and applications in telecommunications and sensing. p. 95–99, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- 16 ALENCAR, F. J. C. de. *Lei de Snell-Descartes*. 2005. <<https://www.infoescola.com/fisica/lei-de-snell-descartes/>>. Accessed: 2017-05-04. Citado na página 26.
- 17 HBM. *FBG-Sensores*. 2017. <<https://www.hbm.com/pt/5096/sensores-oticos-tecnologia-fbg/>>. Accessed: 2017-10-03. Citado na página 27.
- 18 MIELOSZYK, M. et al. *Study of strain-transfer of FBG sensors embedded in unidirectional composites*. 2011. Citado na página 27.
- 19 PEREIRA, G. et al. Study of strain-transfer of fbg sensors embedded in unidirectional composites. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 32, n. 6, p. 1006–1010, 2013. Citado na página 28.
- 20 INSTRUMENTS, N. *FBG Optical Sensing: A New Alternative for Challenging Strain Measurements*. 2016. <<http://www.ni.com/white-paper/12338/en/>>. Accessed: 2017-09-20. Citado na página 28.
- 21 INDUSTRIAIS, C. R. *FBG strain sensors for volcano monitoring*. 2018. <<http://med-suv.eu/spip.php?article97>>. Accessed: 2018-06-30. Citado na página 29.
- 22 REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- 23 COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. Estabelecimento de ciclo de cura de pré-impregnados aeronáuticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros, v. 15, n. 3, 2005. Citado na página 31.
- 24 GALLI, C. A. *Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz de Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Citado na página 31.
- 25 ENGEENERINGDATA, A. 18.1 user’s guide. *Ansys Inc*, 2017. Citado na página 32.
- 26 COSTA, D. I. G. et al. Análise numérica de falhas em materiais compósitos laminados usando um critério baseado em fenômenos físicos. [sn], 2011. Citado na página 32.
- 27 PARIS, C.; VENDITTOZZI, C.; BASAGLIA, A. Experimentation of fiber optic fbg sensors in a cfrp aerospace component. In: *XXII AIDAA Conference, Naples (Italy)*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- 28 KAHANDAWA, G. C. et al. Use of fbg sensors for shm in aerospace structures. *Photonic Sensors*, Springer, v. 2, n. 3, p. 203–214, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- 29 ZHOU, Z. et al. Techniques of advanced fbg sensors: Fabrication, demodulation, encapsulation, and their application in the structural health monitoring of bridges. *Pacific Science Review*, v. 5, n. 1, p. 116–121, 2003. Citado na página 34.

- 30 BASILE, E. Análise numérica estrutural e verificações experimentais de materiais compostos tradicionais e com sensorística em fibra óptica incorporada. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 39.
- 31 CONDUFIBRA. *REVESTIMENTO EM PTFE*. 2018. <<https://www.condufibra.com.br/diferenca-entre-fibra-otica-monomodo-e-multimodo/>>. Accessed: 2018-06-25. Citado na página 35.
- 32 THORLABS. *Conector FC/PC*. 2018. <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1380](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1380)>. Accessed: 2018-06-11. Citado na página 36.
- 33 THORLABS. *Conector FC/APC*. 2018. <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6246](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6246)>. Accessed: 2018-06-11. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- 34 THORLABS. *Conector ST/PC*. 2018. <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1381](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1381)>. Accessed: 2018-06-11. Citado na página 37.
- 35 THORLABS. *Conector LC/PC*. 2018. <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=325](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=325)>. Accessed: 2018-06-11. Citado na página 38.
- 36 THORLABS. *Conector SC/PC*. 2018. <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1382](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1382)>. Accessed: 2018-06-11. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- 37 MAGNETSUK. *Characteristics of NdFeB Magnets*. 2018. <[https://e-magnetsuk.com/neodymium\\_magnets/characteristics.aspx](https://e-magnetsuk.com/neodymium_magnets/characteristics.aspx)>. Accessed: 2018-06-20. Citado na página 43.
- 38 TERMOTUBOS. *O que é um Termo retrátil?* 2018. <<https://termotubos.wordpress.com/2017/04/17/o-que-e-um-termo-retratil/>>. Accessed: 2018-06-22. Citado na página 43.
- 39 TERMOTUBOS. *T2E - 3,2 mm Preto - Até 200°C (Viton) (2:1)*. 2018. <<https://termotubos.com.br/t2e-3-2-mm-preto-ate-200-c-viton-2-1/p>>. Accessed: 2018-06-22. Citado na página 44.
- 40 INDUSTRIAIS, C. R. *REVESTIMENTO EM PTFE*. 2018. <<http://www.caflon.com.br/produtos.html>>. Accessed: 2018-06-25. Citado na página 44.
- 41 BASILE, E. et al. New magnetic connector for embedding of optical sensors in composite materials. In: IEEE. *Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 521–526. Citado na página 45.
- 42 TICKOO, S. *CATIA V5R19 for Designers*. [S.l.]: Cadcim Technologies, 2009. Citado na página 49.
- 43 CURY, A. A. *Critérios de falha*. 2018. <<http://www.ufjf.br/mac003/files/2015/01/criterios.pdf>>. Accessed: 2018-06-30. Citado na página 49.
- 44 KYOCERA. *Standard Ferrule Product List*. 2018. <[https://global.kyocera.com/prdct/semicon/semi/std\\_pkg/pdf/kyocera-ferrule-e.pdf](https://global.kyocera.com/prdct/semicon/semi/std_pkg/pdf/kyocera-ferrule-e.pdf)>. Accessed: 2018-06-30. Citado na página 102.



# Anexos





# ANEXO A – Desenhos técnicos

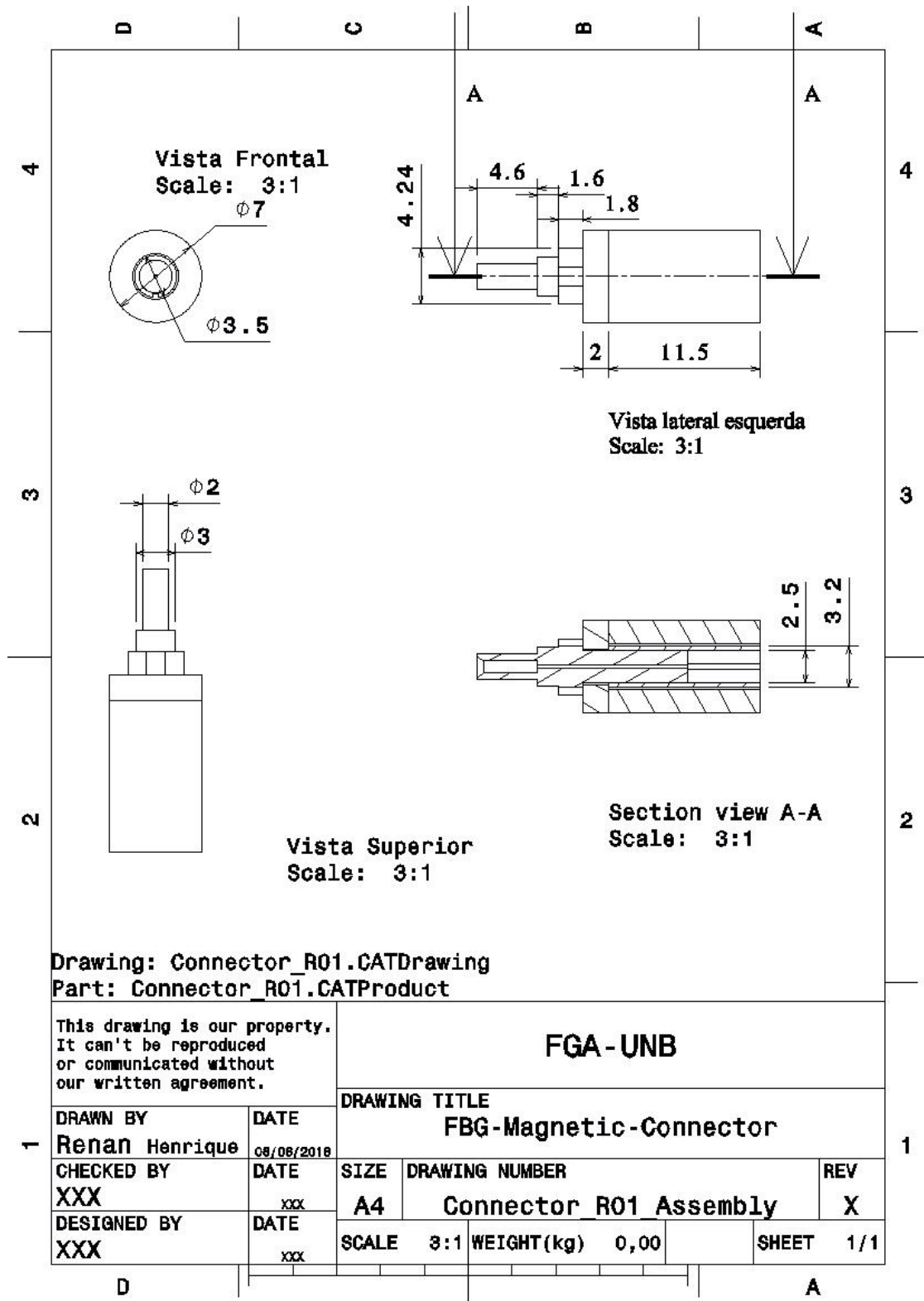


Figura 98 – Conector real R01.

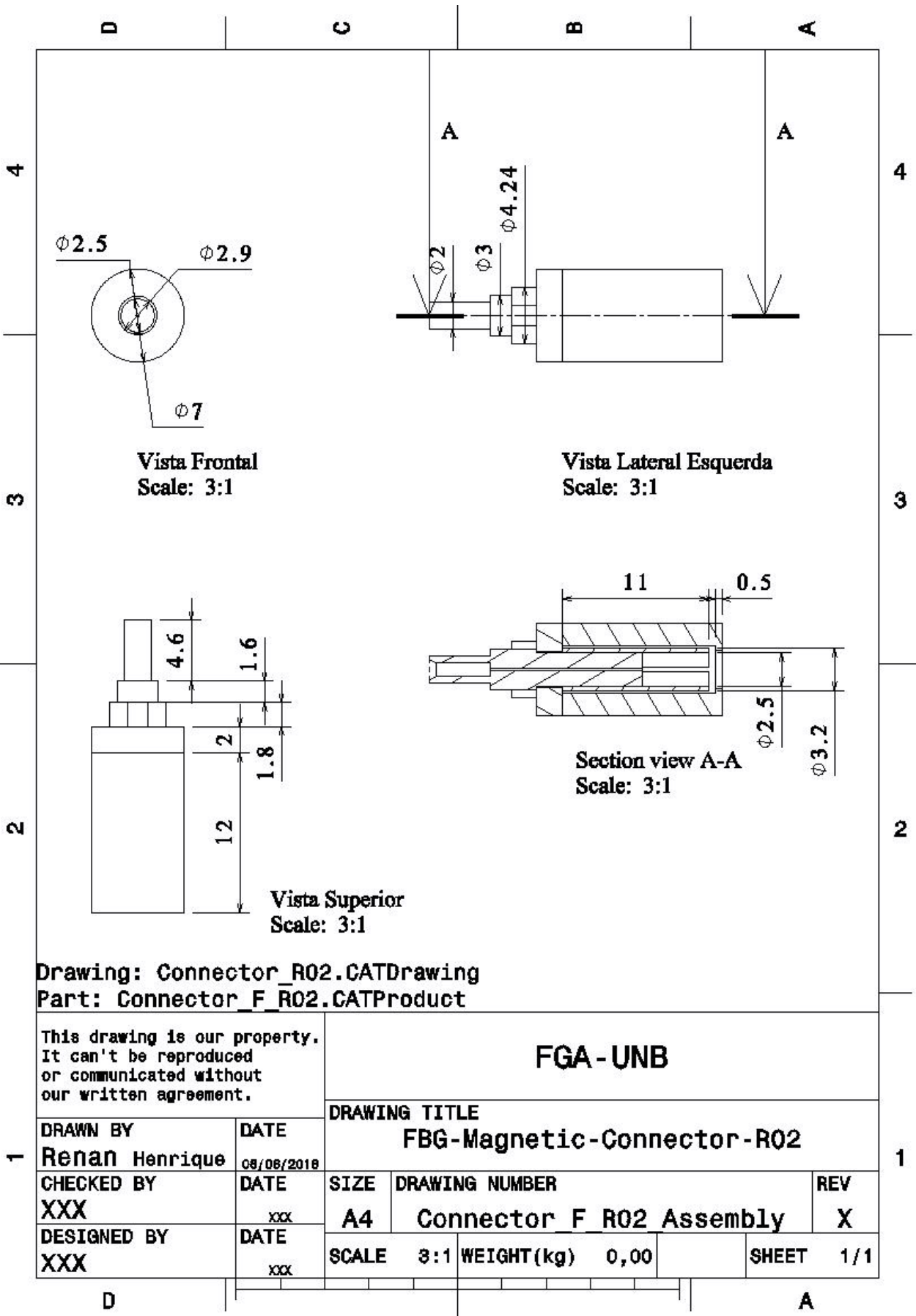


Figura 99 – Conector R02 - foi alterado apenas a questão do cilindro magnético e a Sleeve.

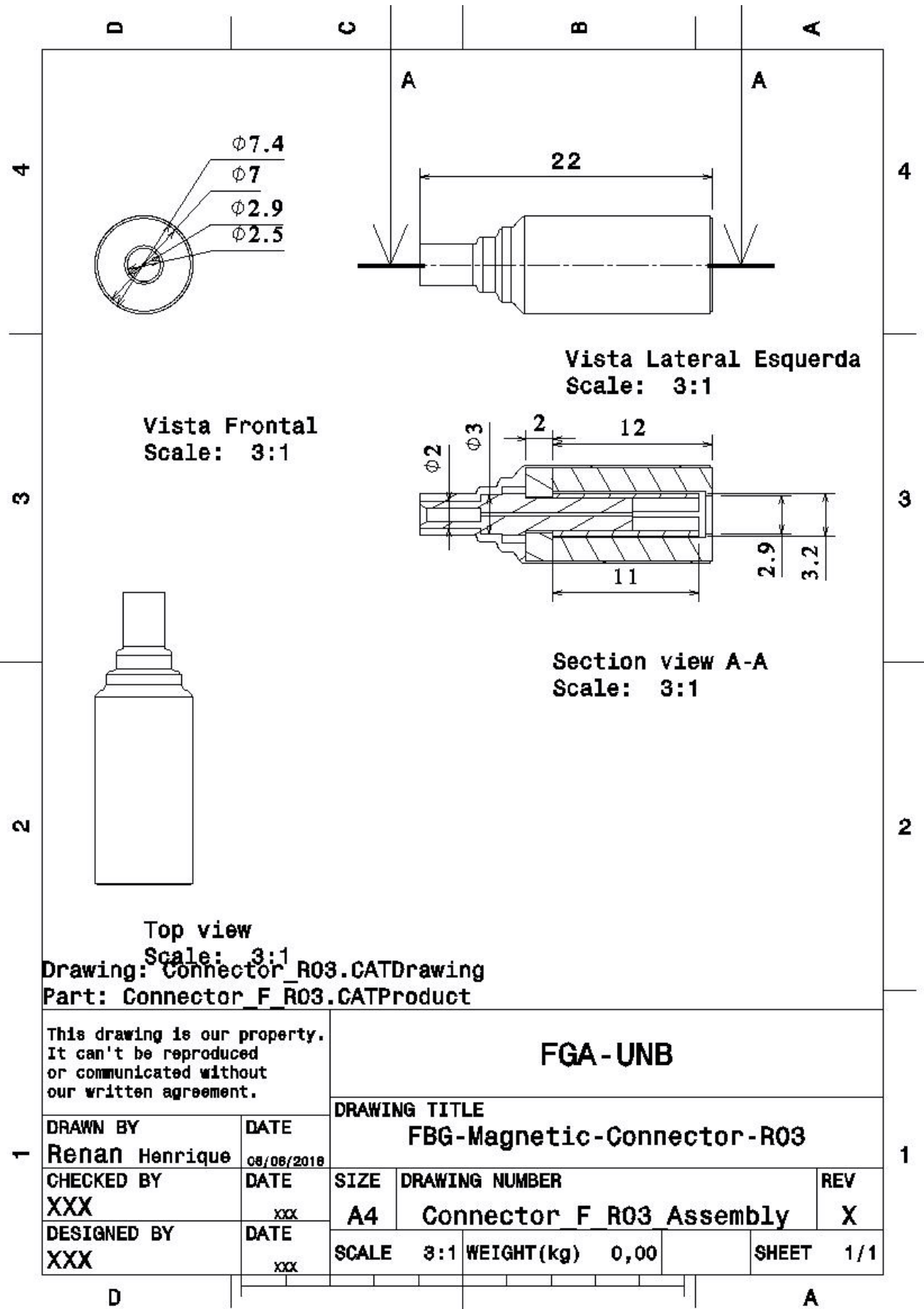


Figura 100 – Conector R03 - foi alterado a questão do cilindro magnético, Sleeve e colocado o termoretrátil

