

ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



**PROJETO DE RESERVATÓRIOS SOB PRESSÃO
FABRICADOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

Luís Filipe Freire Fernandes

MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS

(ENGENHARIA NAVAL RAMO MECÂNICA)

2014



ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS ENGENHARIA NAVAL RAMO MECÂNICA

PROJETO DE RESERVATÓRIOS SOB PRESSÃO FABRICADOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

O Mestrando,

O Co-orientador,

O Orientador

ASPOF EN-MEC Freire

Fernandes

CFR EN-MEC (ACN) Pires da

Silva

Prof. Doutor Rui F. Martins

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao meu orientador, Professor Doutor Rui Martins, por ter aceitado ser orientador desta dissertação, pela confiança depositada no tema escolhido, que não se avizinhava fácil, por todo o esforço e disponibilidade que demonstrou pela concretização desta dissertação, por ter fornecido os extensómetros e uma das garrafas modelo, fundamentais para a componente prática desta dissertação, pela realização, em conjunto com o autor da presente dissertação, de todos os ensaios no ICEMS – Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies, por todo o conhecimento e todas as bases que me deu, garantindo a coerência de todo este estudo.

Ao meu Co-orientador CFR EN-MEC Pires da Silva, por todos os contributos dados tanto a nível de conhecimento e informação, como a nível de contatos, que tanto facilitaram e contribuíram na realização desta dissertação.

Ao Arsenal do Alfeite, S.A., por ter possibilitado o acompanhamento de todas as inspeções realizadas aos reservatórios sob pressão da Marinha Portuguesa, contributo este que forneceu bases importantes à realização desta dissertação, e em particular ao Engenheiro Mário Figueiredo pela sua disponibilidade e contributos de experiências anteriores relativas aos Materiais Compósitos.

À ETNA-DLA por ter fornecido um reservatório metálico obsoleto, contribuindo também para componente prática desta dissertação.

À oficina de mecânica da Escola Naval, por todo o apoio prestado na conceção dos provetes, e por toda a disponibilidade demonstrada.

Ao DMS (Destacamento de Mergulhadores Sapadores), em particular ao 2TEN STU Sousa, pelo empréstimo da garrafa de mergulho, equipamento fundamental para a realização do ensaio de pressão interna presente nesta dissertação.

A toda a guarnição do NRP D. Carlos I, navio onde estagiei, em especial a todos os oficiais, que contribuíram de forma muito positiva para a minha formação e sempre se mostraram disponíveis e compreensivos quanto à realização desta dissertação.

A toda a minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram na realização desta dissertação.

A todos os meus amigos e todos os camaradas de curso pelas sugestões e contributos dados, bem como pelos momentos de lazer e distração que me deram forças para o término deste trabalho.



DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, que sempre foram o meu pilar de apoio tanto na realização desta dissertação como ao longo de toda a minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Martins, pela paciência, esforço e dedicação com que me auxiliou na realização deste estudo.

RESUMO

O projeto de um reservatório sob pressão engloba não só o seu dimensionamento para resistir às cargas atuantes, mas também uma seleção adequada de materiais, dos processos de fabrico, assim como a especificação dos restantes detalhes construtivos, dos parâmetros de teste hidrostático, entre outros.

Com a elaboração desta dissertação, pretendeu-se verificar a viabilidade e vantagens do uso de materiais compósitos em determinados reservatórios submetidos a pressão interna, relativamente a outros materiais usados atualmente.

Para tal, com o recurso a métodos avançados de cálculo por elementos finitos, a soluções analíticas e às normas de engenharia que se adequavam ao caso, analisou-se estruturalmente e dimensionaram-se dois reservatórios construídos atualmente em material metálico. Posteriormente, efetuou-se o projeto de reservatórios em material compósito, de forma a definir os principais parâmetros de fabrico e fazer o dimensionamento dos mesmos relativamente ao carregamento pretendido. Fazendo uso dos dados de projecto, e com o auxílio de métodos avançados de cálculo por elementos finitos, efetuaram-se diversas simulações numéricas de reservatórios em material compósito, a fim de verificar se os mesmos cumpriam com os requisitos e normalização vigentes (critérios necessários ao seu fabrico) e analisar as vantagens da sua utilização por comparação com reservatórios semelhantes construídos com materiais metálicos.

De modo a validar as simulações numéricas realizadas, verificar alguns parâmetros estruturais e conhecer mais criteriosamente o comportamento dos materiais compósitos, foram efetuados ensaios de pressão interna e ensaios de tração, com recurso a extensometria e cálculo analítico.

Palavras-chave: Reservatórios sob pressão; Material Compósito; Enrolamento filamentar; Extensometria; Elementos Finitos.

ABSTRACT

The design of pressure vessels comprehends not only its dimensioning, in order to resist to in-service loads, but also the correct selection of materials and manufacturing processes, as well as the specification of remaining construction details.

This thesis aims to verify the advantages of using composite materials in certain pressure vessel's applications, in comparison to the usage of conventional metallic materials.

In order to achieve that purpose, advanced numerical simulations of pressure vessels manufactured either on metallic or on composites materials were carried out, as well as calculations based on analytical formulations and on engineer formulas defined on appropriate standards.

To validate the numerical simulations and to get a more in-depth understanding of the mechanical behaviour of composite materials, a pressure vessel submitted to internal pressure extensometry easy and uniaxial tensile tests of specimens made of composite material were carried out. Strain-gauges were applied both on the pressure vessel and on the specimens.

Key-Words: Pressure Vessels; Composite Materials; Filament Winding; Strain-Gauges; Finite Element Method.



LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

ARA	Aparelho de Respiração Autónoma
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BW	<i>Band Width</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFR	Capitão-de-Fragata
CLT	<i>Classical laminate theory</i> - Teoria Clássica dos Laminados
CRM	<i>Continuous Random Mat</i>
CSM	<i>Chopped Standard Mat</i>
CTE	Coeficiente de Expansão Térmica
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
EN	Norma Europeia
EP	<i>Epoxy</i>
FVF	Fração Volúmica de Fibra
HDT	<i>Heat deflection temperature</i>
HM	<i>High-Modulus</i>
HS	<i>High-Strength</i>
IM	<i>Intermediate-Modulus</i>
LM	<i>Low-Modulus</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
PA	Poliamidas
PAN	Poliacrilonitrilo
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-cetena
PF	Fenólica
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinilo
UE	Vilinéster
UHM	<i>Ultra-High-Modulus</i>
UP	Poliéster insaturado

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Protótipo Aston Martin Vanquish V12, composto na sua maioria por fibra de carbono	36
Figura 3-1: Representação esquemática da técnica de fabrico de fibra de vidro (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).....	42
Figura 3-2: Moldação por centrifugação (Pereira, 2007)	55
Figura 3-3: Fabrico de cilindros por enrolamento filamental helicoidal, adaptado de (Pereira, 2007)	55
Figura 3-4: Enrolamento de fibras sob o mandril (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).....	56
Figura 3-5: Produtos obtidos por enrolamento filamental (Pereira, 2007).....	56
Figura 3-6: Enrolamento filamental geodésico (Peters, 2011).....	57
Figura 3-7: Padrões de enrolamento filamental (Lobo, 2012)	58
Figura 3-8: Orientações consideradas numa camada de fibra/matriz, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	62
Figura 3-9: Variação do módulo de elasticidade de acordo com a direção das fibras (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	63
Figura 3-10: Relação curva de carregamento de material metálico e curva de carregamento de material compósito unidirecional adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	64
Figura 3-11: Representação das tensões e respetivas direções num laminado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).....	65
Figura 4-1: Modelo 3D em <i>SolidWorks</i> : Dimensões e geometrias de reservatório utilizado nos ARA (Dimensões em metros)	69
Figura 4-2: Garrafa 1, de Aparelho de Respiração Autónomo (ARA).....	70
Figura 4-3: Dimensões e geometria da Garrafa 2 - "Stako" (Dimensões em metros)....	70
Figura 4-4: Garrafa 2, Stako	71
Figura 4-5: Processo de discretização espacial de um domínio por elementos finitos...	72
Figura 4-6: Algumas formas geométricas possíveis para elementos finitos. Unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, respetivamente	73
Figura 4-7: Representação esquemática de topos (Engineers, 2004)	74

Figura 4-8: Distribuição de tensões em reservatórios de parede fina sob pressão (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013)	76
Figura 4-9: Tensões principais (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013).....	76
Figura 4-10: Diagrama de corpo livre do reservatório (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013).....	79
Figura 4-11: Representação da malha de elementos finitos utilizados na garrafa 2 Stako (à esq.) e garrafa 1 ARA (à dir.) em <i>SolidWorks</i> , respetivamente	82
Figura 4-12: Representação de carregamento das garrafas 2 e 1 em <i>SolidWorks</i> , respetivamente, com pressão interna de 30MPa.....	82
Figura 4-13: Representação da 1ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 2 - "Stako" em <i>SolidWorks</i> e <i>ANSYS</i> , respetivamente	83
Figura 4-14: Representação da 1ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 1 - "ARA" em <i>SolidWorks</i> e <i>ANSYS</i> , respetivamente.....	83
Figura 4-15: Representação da 2ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 2 - "Stako" em <i>Solidworks</i> e <i>ANSYS</i> , respetivamente	83
Figura 4-16: Representação da 2ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 1 - "ARA" em <i>Solidworks</i> e <i>ANSYS</i> , respetivamente.....	84
Figura 4-17: Representação esquemática de enrolamento polar (Peters, 2011).....	86
Figura 4-18: Representação esquemática de enrolamento helicoidal geodésico (Peters, 2011).....	87
Figura 4-19: Representação esquemática de enrolamento helicoidal geodésico modificado (Peters, 2011).....	87
Figura 4-20: Diagrama do corpo livre para um reservatório sob pressão fabricado por enrolamento filamentar (Peters, 2011)	89
Figura 4-21: Representação de reservatório considerado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).....	91
Figura 4-22: Caso de carregamento isotrópico (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).....	91
Figura 4-23: Padrão tipo de enrolamento (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).	91
Figura 4-24: Padrão tipo de enrolamento para o reservatório a considerar, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	92
Figura 4-25: Representação de tensões axiais pela ação de uma pressão interna (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).....	93
Figura 4-26: Representação de tensões circunferenciais pela ação de uma pressão interna (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	93

Figura 4-27: Circulo de Mohr representativo das tensões aplicadas no reservatório, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	94
Figura 4-28: Resultados obtidos através da tabela 3	97
Figura 5-1: Máquina servo-hidráulica DARTEC	102
Figura 5-2: Colocação de provete nas amarras.....	102
Figura 5-3: Provete a ser ensaiado com transdutor	103
Figura 5-4: Provete a ser ensaiado com extensómetro colado	103
Figura 5-5: Condicionador, Neutralizador e Cola utilizada, respetivamente	103
Figura 5-6: Extensómetro de rosetas	104
Figura 5-7: Representação das extensões principais (Tech Note TN-515, 2010)	104
Figura 5-8: Circulo de Mohr representativo das extensões medidas pela roseta de extensómetro (Tech Note TN-515, 2010).....	105
Figura 5-9: Gráfico Tensão-Deformação do ensaio 5 (com extensómetro)	106
Figura 5-10: Círculo de Mohr representativo do ultimo carregamento do ensaio 5	107
Figura 5-11: Provete retirado do liner após ensaio.....	108
Figura 5-12: Garrafa de mergulho 200 bar.....	109
Figura 5-13: Adaptador "Fill-Station"	109
Figura 5-14: Extensómetro em corpo cilíndrico principal e extensómetro em fundo copado toriesférico, respetivamente	109
Figura 5-15: Ponte de extensometria utilizada	110
Figura 5-16: Aparato de carregamento de botija Stako por transvase de botija de mergulho	110
Figura 5-17: Gráfico Deformação-Pressão de ensaio de pressão interna.....	111
Figura 6-1: Representação de ϵ_P em provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN	114
Figura 6-2: Representação de ϵ_Q em provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN	115
Figura 6-3: Representação do alongamento do provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN.....	115
Figura 6-4: Representação da garrafa Stako modelada em SolidWorks, fabricada por enrolamento filamentar, submetida a 110 bar de pressão interna	116
Figura 6-5: Representação de ϵ_P em garrafa stako simulado em SolidWorks sujeito a uma pressão interna de 110 bar	117

Figura 6-6: Representação de ϵ_Q em garrafa stako simulado em SolidWorks sujeito a uma pressão interna de 110 bar	117
Figura 6-7: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 4,7mm de espessura carregamento de 300 bar.....	119
Figura 6-8: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 8 mm de espessura e carregamento de 300 bar.....	120
Figura 6-9: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 12 mm de espessura e carregamento de 300 bar.....	121
Figura 6-10: Singularidade de tensões elevadas no fundo copado semi-elíptico	121
Figura 6-11: Estudo particular de tensões principais máximas da garrafa ARA, 12mm espessura, considerando o caso de singularidade no fundo copado	122
Figura 6-12: Existência de reforço metálico no fundo copado da garrafa Stako	123
Figura 6-13: Estudo particular de tensões principais máximas da garrafa ARA, 14mm espessura, considerando o caso de singularidade no fundo copado	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Propriedades dos reforços (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	42
Tabela 3-2: Propriedade de alguns tipos de fibra de vidro (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011)	44
Tabela 3-3 – Propriedades típicas de alguns termoplásticos (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011)	52
Tabela 3-4 – Propriedades importantes de algumas matrizes (Chawla, 1998).....	54
Tabela 3-5: Fração volúmica de fibra mais comum para cada processo de fabrico (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)	61
Tabela 3-6: Algumas propriedades de reforço/matriz epoxy (Gay, Hoa, & Tsai, 2003) 61	
Tabela 4-1: Parâmetros de ambas as geometrias de reservatórios considerados.....	71
Tabela 4-2: Parâmetros dos topos e corpo das garrafas a dimensionar (r em mm e ϕ em graus)	77
Tabela 4-3: Parâmetros calculados para o carregamento da garrafa 2 - "Stako" a 300 Bar de Pressão interna	84
Tabela 4-4: Parâmetros calculados para o carregamento da garrafa 1 - "ARA" a 300 Bar de pressão interna	85
Tabela 4-5 - Otimização da composição de um laminado Carbono/Epoxy (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).....	92
Tabela 5-1: Resultados obtidos através dos ensaios	106
Tabela 5-2: Comparação de resultados obtidos pelo extensómetro e pelo círculo de mohr	107
Tabela 6-1: Comparação de resultados obtidos	114



ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
DEDICATÓRIA	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
ÍNDICE.....	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 Enquadramento	27
1.2 Pertinência do tema.....	27
1.3 Âmbito da investigação	28
1.4 Objetivo da Investigação	28
2 ESTADO DA ARTE	31
2.1 Reservatórios Sob Pressão	31
2.2 Perspetiva global dos Compósitos e a sua aplicação	33
2.3 Indústria Aeroespacial e Aeronáutica	34
2.4 Indústria Automóvel	35
2.5 Indústria Elétrica e Eletrónica.....	37
2.6 Indústria Naval.....	37
2.7 Desvantagens e barreiras no Mercado dos compósitos.....	37
3 MATERIAIS COMPÓSITOS	41
3.1 Reforços	41
3.1.1 Fibras de Vidro	42
3.1.2 Fibras de Carbono.....	44

3.1.3	Fibras Aramídicas.....	46
3.1.4	Fibras de Boro	47
3.1.5	Formas que podem apresentar os Reforços	47
3.2	Matrizes	49
3.2.1	Matrizes termoplásticas	49
3.2.2	Matrizes Termoendurecíveis	52
3.3	Tecnologias de fabrico de reservatórios em material compósito.....	54
3.4	Comportamento mecânico dos compósitos	59
3.4.1	Características do conjunto Reforço/Matriz	59
3.4.2	Propriedades elásticas.....	61
3.4.3	Tensão de rutura de uma camada	64
3.4.4	Crítérios de falha em materiais compósitos.....	65
4	Projeto de RSP.....	69
4.1	Geometria dos Reservatórios Analisados	69
4.2	Método dos elementos finitos	71
4.3	RSP fabricados em material metálico	74
4.3.1	Modelo de cálculo ASME Sec. VIII Div.1.....	74
4.3.2	Equações de equilíbrio para reservatórios de parede fina	76
4.3.3	Dimensionamento pelo MEF	81
4.3.4	Comparação de resultados obtidos	84
4.4	RSP fabricados em materiais compósitos.....	86
4.4.1	Projeto de reservatórios Isotensóides (1ª Metodologia)	86
4.4.2	Projeto de reservatórios Isotensóides (2ª Metodologia)	90
4.4.3	Aplicação do projeto de materiais compósitos ao dimensionamento de reservatório sob pressão tipo “ARA”	95
5	Métodos Experimentais	101
5.1	Ensaio de tração	101



5.2	Ensaio de Pressão interna.....	108
6	Simulações Numéricas	113
6.1	Simulação de Provete submetido a tração	113
6.2	Simulação Garrafa <i>Stako</i> submetida a pressão interna	116
6.3	Simulação de Garrafa tipo “ARA” em materiais compósitos.....	118
7	Conclusões.....	125
7.1	Análise Sumária de Resultados Obtidos e respetivas Conclusões.....	125
7.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	127
	Referências Bibliográficas.....	131
	ANEXO A – Detalhes dos reservatórios simulados	134
	ANEXO B – Ensaios: Dados e Representações	139
	ANEXO C – Detalhes das Simulações Numéricas	173

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Pertinência do tema
- 1.3 Âmbito da Investigação
- 1.4 Objetivo de Investigação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente, com a evolução da ciência e da tecnologia, há cada vez mais necessidade de se encontrarem combinações de propriedades dos materiais que possam ser consideradas mais eficientes sob o ponto de vista estrutural, rentáveis sob o ponto de vista económico e mais úteis sob o ponto de vista funcional. Tal acontece especialmente no caso de materiais requeridos para fins aeroespaciais, aeronáuticos, navais e em outras aplicações similares.

Materiais compósitos são genericamente materiais compostos por mais do que um tipo de material, com propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas, complementares e compatíveis quimicamente.

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados em aplicações estruturais, devido ao valor elevado das relações (*ratios*) de rigidez/peso (rigidez específica) e resistência/peso (resistência específica) que conferem ao sistema/equipamento por eles composto. Além do referido, podem trazer outras vantagens adicionais relativas ao peso, custo, resistência estrutural, resistência à corrosão, facilidade de manutenção, acabamentos mais estéticos, entre outras vantagens.

1.2 Pertinência do tema

Na Marinha Portuguesa, é imprescindível a utilização de reservatórios sujeitos a grandes pressões, como é o caso dos reservatórios de oxigénio utilizados no caso dos mergulhadores, os Aparelhos de Respiração Autónoma (ARA) utilizados em todas as unidades navais, assim como os reservatórios dos compressores de ar presentes na maioria das oficinas, apenas para dar alguns exemplos de aplicação de reservatórios sob pressão em contexto naval. O facto de estes poderem vir a ser fabricados em materiais compósitos poderia trazer vantagens significativas relativamente ao material metálico que é normalmente utilizado, principalmente ao nível do peso, resistência estrutural, resistência à corrosão, processos de fabrico, entre outras vantagens.

1.3 Âmbito da investigação

Este tema encontra-se inserido na área da Construção Naval, abrangendo diversas áreas do plano curricular do mestrado em Ciências Militares Navais, Engenharia Naval – Ramo Mecânica. Nesta linha de investigação encontram-se englobadas áreas como as Ciências dos Materiais, Mecânica de Sólidos, Desenho de Máquinas, Tecnologia Mecânica, entre outras. Toda a análise teórica e prática a efetuar, assim como toda a fundamentação da dissertação serão baseadas nestas áreas científicas.

1.4 Objetivo da Investigação

Com esta dissertação pretende-se verificar a viabilidade e vantagens do uso de materiais compósitos em determinados reservatórios submetidos a pressão, relativamente a outros materiais usados atualmente. Para tal desiderato, pretende-se efetuar o seu dimensionamento e análise numérica (utilizando o Método dos Elementos Finitos), através de simulação em *SolidWorks/Simulation* e/ou ANSYS¹, com validação dos resultados, na extensão possível, por métodos analíticos e experimentais.

Por fim, pretende-se utilizar dois modelos já existentes de reservatórios em material compósito, instrumentá-los com extensómetros e submetê-los aos carregamentos simulados numericamente, de modo a fazer a validação/comparação de resultados.

¹ Programas de simulação numérica

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

- 2.1 Reservatórios sob Pressão (RSP)
- 2.2 Perspetiva global dos compósitos e a sua aplicação
- 2.3 Indústria Aeroespacial e Aeronáutica
- 2.4 Indústria Automóvel
- 2.5 Indústria Elétrica e Eletrónica
- 2.6 Indústria Naval
- 2.7 Desvantagens e barreiras no mercado dos Materiais Compósitos

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Reservatórios Sob Pressão

Reservatório ou depósito sob pressão (RSP) trata-se de qualquer recipiente fechado capaz de armazenar em condições de total estanqueidade, qualquer fluido sujeito a uma pressão superior ou inferior à que se encontra aplicada sobre a superfície exterior da sua parede (Pereira, 2007). Existem também os denominados “depósitos”, “reservatórios”, ou simplesmente “tanques”, que se diferenciam dos reservatórios sob pressão pelo facto de serem totalmente ou parcialmente abertos na parte superior, situação esta que permite a manutenção da superfície livre do fluido armazenado, habitualmente no estado líquido, em contacto com a atmosfera exterior.

No segundo caso, a parede do reservatório é apenas sujeita a uma pressão relativa máxima resultante do próprio peso do fluido, enquanto que no primeiro caso, além dessa mesma pressão, ainda temos adicionada a pressão a que se encontra submetido o fluido armazenado (que normalmente é de ordem de grandeza bastante superior).

Os reservatórios sob pressão são hoje em dia um dos equipamentos mais frequentes em qualquer instalação industrial. De forma geral, servem como sistemas de armazenamento de energia (Rules for Construction of Pressure Vessels, 2004).

Foi no Séc. XVIII, com o desenvolver da revolução industrial, que se deu o início da utilização massiva dos recipientes que funcionam sob pressão interna. Nessa altura, o único processo disponível que possibilitava o armazenamento de energia pelo efeito referido (pressão interna) era recorrendo a um cilindro, construído em ferro fundido, com uma tampa plana fixa no topo através de rebites. Este novo conceito de energia era, nem mais nem menos, do que vapor de água pressurizado e confinado em reservatórios metálicos.

Os esforços bastante elevados aplicados nos reservatórios sob pressão, conjugados com os danos humanos e materiais, extremamente graves, a que a sua falha está associada, determinam o emprego de cuidados especiais e um muito maior rigor no seu projeto. Mais especificamente, no caso dos fluidos compressíveis (gases), que são caracterizados por expansões rápidas e repentinas, a rotura da parede do reservatório é acompanhada de uma explosão normalmente de gravidade elevada.

Com o elevado e, eventualmente descontrolado, desenvolvimento da máquina a vapor de água como fonte de energia, a 10 de março de 1905 em Brockton (estado de Massachussets, Estados Unidos da América), ocorreu um grave acidente provocado por uma caldeira de uma fábrica de calçado. Com este acidente faleceram 58 pessoas e 117 ficaram feridas. Foi assim, com esse trágico acidente que surgiu a ideia de conceber uma legislação específica de forma a controlar a construção de caldeiras e outros reservatórios sob pressão, numa tentativa de solucionar os problemas que originavam os acidentes. Assim surgiram vários códigos de construção e regulamentação para a construção e utilização de qualquer tipo de reservatório submetido a pressão.

No sentido de se uniformizar toda esta regulamentação, em 1911, os construtores metalúrgicos/metalomecânicos apelaram à *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) a criação de uma legislação universal. Desde então, a ASME tem vindo a elaborar normas de projeto, desenvolvimento, construção e inspeção de reservatórios sob pressão, sofrendo sucessivas atualizações que visam, acima de tudo, o bom desempenho dos equipamentos, e a segurança das pessoas e dos bens envolventes. Além do código ASME, de forma a garantir o projecto e a qualidade adequadas dos reservatórios sob pressão existem também outras normas e legislação que devem seguir. São exemplos disso a Diretiva Europeia para Equipamentos Sob Pressão (PED) 97/23/EC, Decreto-Lei nº. 211/99 de 14 de Junho, Decreto-Lei 97/2000 de 25 de Maio, Portaria nº.1125/92 de 8 de Dezembro, Portaria nº770/92 de 7 de Agosto, Decreto-Lei nº131/92 de 6 de Julho, Decreto-Lei nº. 103/92 de 30 de Maio, Decreto-Lei nº. 82/90 de 14 de Março, Decreto-Lei nº. 102/74 de 14 de Março (a nível de legislação Portuguesa) e outras normas mais específicas como a EN 13923:2005 e EN 12245:2002 referentes a reservatórios construídos em materiais compósitos.

Estas exigências e a forte concorrência que atualmente caracteriza a indústria exigem, não só uma importante experiência das tecnologias e regras básicas a utilizar no fabrico, como um rigoroso conhecimento dos esforços exercidos na parede dos reservatórios e do comportamento mecânico do material utilizado (Marques, 2007).

Um dos principais fatores para o bom projeto de um reservatório é a escolha da sua geometria. Como se poderá observar mais detalhadamente no subcapítulo 4.1, são várias as geometrias passíveis de serem escolhidas para reservatórios sob pressão, sendo mais comum optar-se por formas de revolução utilizando alterações suaves dos raios de concordância.

Os reservatórios são normalmente constituídos por um corpo central cilíndrico de paredes finas e por dois fundos copados, também de paredes finas, que são frequentemente fabricados separadamente e são depois ligados ao corpo central cilíndrico por um processo tecnológico específico. As zonas de ligação dos fundos copados ao corpo cilíndrico são, do ponto de vista da integridade estrutural, pontos críticos onde actuam, para além das tensões de membrana, tensões secundárias locais induzidas por momento flector e esforço transversal, sendo necessário garantir a resistência do reservatório nas suas condições de serviço e de projeto. Sendo os fundos zonas críticas do reservatório, existem várias geometrias, modos de execução, modelos de cálculo e ensaios de comprovação a utilizar, sendo que alguns destes parâmetros serão explorados no decorrer deste trabalho.

2.2 Perspetiva global dos Compósitos e a sua aplicação

Define-se materiais compósitos como a resultante da combinação de dois ou mais materiais distintos. Como exemplo clássico, têm-se os compósitos fibrosos resultantes da dispersão de fibras num material “matriz” ou “aglomerante”. O uso de compósitos fibrosos é muito antigo, remonta ao antigo Egipto, onde eram utilizados tijolos de argila reforçados com fibras de palha. Além disso, também a natureza se encontra cheia de exemplos em que a ideia dos materiais compósitos é aplicada. Por exemplo, a casca do côco é semelhante a um reservatório onde se aplica o conceito de reforço através de fibras. Também os ossos podem ser considerados compósitos naturais, pois são uma combinação de fibras de colagénio cobertas por uma matriz mineral denominada de apatite. Hoje em dia, mais desenvolvidos, os compósitos apresentam uma vasta gama de utilização, desde o vulgar betão armado até compósitos de elevado desempenho, feitos à base de resinas de epóxido reforçadas com fibras contínuas de carbono (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Griffith, em 1920, demonstrou que as fibras apresentam propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na sua forma maciça. Surgiu então a primeira evidência das excelentes propriedades dos compósitos. Griffith verificou que o vidro, na sua forma maciça, possuía tensões de rotura na ordem dos 170 MPa, enquanto que, na sua forma fibrosa, com apenas 20 μm de diâmetro, conseguia alcançar tensões de rotura de 3500 MPa (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Os materiais compósitos podem classificar-se de acordo com vários critérios, sendo normalmente classificados de acordo com o tipo de matriz, sendo esta a responsável pelas funções de dar forma estável ao compósito e de assegurar a distribuição eficiente das cargas pelas fibras, protegendo a sua superfície (Chawla, 1998). Os materiais compósitos podem assim ser subdivididos em diversas categorias, dependendo da sua matriz e do seu reforço. O fácil processamento e a baixa densidade dos polímeros tornam os compósitos de matriz polimérica os mais amplamente aplicados no mercado, sendo também estes os que serão estudados e desenvolvidos ao longo deste trabalho.

As fibras mais conhecidas a nível de matrizes poliméricas são as fibras de carbono, de vidro, e de aramida, e a nível de matrizes têm-se os termoplásticos, como o polipropileno (PP), poliamida (PA) e o poli-éter-éter-ceteno (PEEK), bem como resinas termoendurecíveis de poliéster (PET) ou epóxidos (EP) conforme se verá no subcapítulo 3.2. As fibras e a matriz são combinadas de forma a resultar semi-produtos que, após serem processados, permitem a obtenção da peça compósito final mediante variadas técnicas de processamento e de fabrico (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Como é evidente, os materiais compósitos alargam substancialmente o leque de opções de seleção de materiais que se colocam ao dispôr de projetistas e engenheiros, sendo que se encontram disseminados por diferentes áreas de atividade que incluem as mais diversas indústrias.

2.3 Indústria Aeroespacial e Aeronáutica

A utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, uma vez que os elevados custos de fabrico podem ser compensados por menores custos operacionais.

Com o objetivo de obter estruturas de elevada resistência específica e de grande leveza, utilizam-se compósitos de elevado desempenho mecânico, fundamentalmente à base de fibras de carbono, aramidas, e por vezes até fibras de boro, em aplicações mais específicas. Tabela 3-1(Capítulo 3) mostra exemplos que ilustram estes princípios. São de realçar as aplicações em aeronaves militares, no caso da cobertura dos estabilizadores horizontais dos F-14A e, posteriormente, nos estabilizadores verticais e leme dos F-15 e F-16, e, finalmente, na asa completa, estabilizadores e parte da fuselagem exterior do AV-8B. Também na aviação comercial a utilização em larga escala de materiais compósitos nas estruturas contribui não só para um aumento de resistência estrutural mas também

para uma redução significativa de peso, permitindo deste modo um aumento da lotação dos aparelhos e, conseqüentemente, uma maior rentabilidade. A estrutura típica de um avião pode ocupar até cerca de 30% do seu peso total, tomando em conta que no exemplo de um Boeing 757, graças ao uso de materiais compósitos a estrutura do avião apenas assume 6% do seu peso, podemos compreender facilmente que o campo de progressão neste domínio é enorme (Chawla, 1998).

Já na indústria aeroespacial, os compósitos têm uma aplicação estrutural de enorme impacto e relevância sendo evidentes as suas grandes potencialidades. O custo em combustível para a colocação em órbita de qualquer estrutura é elevadíssimo, pelo que qualquer ganho em peso, por muito pequeno que seja, será sempre um fator decisivo na escolha. Além disso, dada a existência de uma grande variação de temperatura no espaço (-160 até +93 °C) e a necessidade do bom funcionamento de todo o sistema de sensores e antenas face à exposição dos raios solares, torna-se muito importante ter em conta a estabilidade dimensional. Compósitos compostos por grafite e/ou Kevlar possuem uma expansão térmica (CTE – *Coefficient of thermal expansion*) muito baixa, o que os torna materiais muito interessantes para aplicações aeroespaciais (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

2.4 Indústria Automóvel

Foi nos anos 30 do sec. XX que Ford iniciou a aplicação de materiais compósitos nos seus modelos, embora o maior sucesso conhecido nesta área tenha sido a realização de uma estrutura em fibra de vidro para o Chevrolet Corvette em 1953. Ano após ano observou-se um progresso substancial, tornando cada vez mais próximo o objetivo de produzir automóveis em materiais compósitos ao mesmo preço dos que são produzidos com materiais metálicos. Exemplo disso é o modelo atual “Vanquish V12” da Aston Martin, em que grande parte dos componentes estruturais são de fibra de carbono (Figura 2-1).



Figura 2-1: Protótipo Aston Martin Vanquish V12, composto na sua maioria por fibra de carbono

Num sector mais restrito da indústria automóvel como é o da competição, em que o fator preponderante deixa de ser o preço e passa a ser as características que otimizam o movimento do veículo, a aplicação de materiais compósitos foi também uma solução que desde cedo se introduziu. Estes materiais, além de serem uma solução técnica e economicamente interessante, também se adaptavam com facilidade à produção de peças com geometria complexa. Surgiram então alguns modelos com grande percentagem de composição em materiais compósitos, entre eles o modelo da McLaren “MP4-1” de 1991 que já continha cerca de 75% do seu peso em materiais compósitos. Atualmente conseguem-se atingir percentagens ainda mais elevadas.

Além dos fatores já referidos, o uso de compósitos de matriz cerâmica para as secções do automóvel que estão mais expostas a altas temperaturas (nomeadamente o motor do automóvel) permitem uma maior eficiência termodinâmica. Pelos mesmos motivos referidos no caso da indústria aeroespacial, estes materiais nas zonas de propulsão do motor proporcionam uma menor condutividade tanto térmica como elétrica e têm um menor coeficiente de expansão térmica, o que também será uma grande vantagem na indústria automóvel. Entretanto, apesar do sucesso que a aplicação dos compósitos teve na indústria automóvel de competição, a adesão a esta nova forma de conceção na indústria automóvel de utilização corrente ficou aquém das expectativas iniciais.

2.5 Indústria Elétrica e Eletrônica

A indústria de componentes elétricos e eletrônicos representa atualmente cerca de 15% do mercado de materiais compósitos a nível mundial (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Com efeito, a nova geração de compósitos cerâmicos pode permitir uma combinação única de propriedades elétricas, óticas, mecânicas e químicas que os torna insubstituíveis em algumas aplicações de engenharia. Normalmente, exigências ao nível da segurança de operação e isolamento elétrico justificam o uso de materiais compósitos em vários componentes, como blindagens, circuitos impressos ou baterias.

2.6 Indústria Naval

A indústria naval foi uma área que acolheu muito bem o uso de materiais compósitos nas suas diversas vertentes. Dadas as altas pressões a que são submetidas algumas unidades navais, nomeadamente os submarinos, vários destes têm as suas estruturas construídas à base de materiais compósitos, especificamente os seus periscópios, a proa interior, o leme e em alguns até mesmo os tanques lastro (Greene, Eric, 1999). Outra situação bastante peculiar é a dos propulsores dos torpedos MK46, que sendo fabricados com resina de poliéster e reforçados em fibra de vidro, além de se tornarem mais leves, têm melhores propriedades acústicas e reduzem a utilização de componentes metálicos, o que reduz a detetabilidade (fator que tem grande importância para o seu cariz operacional).

No que se refere a navios de superfície, o principal interesse na aplicação de materiais compósitos incide na redução do peso da estrutura do navio, otimização da manutenção e ciclo-de-vida, e melhoria da assinatura do navio (Greene, Eric, 1999). A este nível têm-se alguns casos conhecidos sendo o mais recente a classe de corvetas Suecas “Visby” concebidas pela “ThyssenKrupp Marine System Technologies”.

2.7 Desvantagens e barreiras no Mercado dos compósitos

O uso de materiais compósitos na indústria requer um grande investimento inicial, sendo essa a principal barreira ao seu uso em comparação com outros materiais tradicionais. O preço de produção de compósitos é elevado, especialmente no processo manual. Por comparação com outros tipos de materiais, em que o custo de matéria-prima

representa grande parte do custo total de um produto acabado, neste caso é o processo de produção que envolve grande parte dos custos (Pereira, 2007). Simultaneamente, e considerando a composição dos materiais compósitos, tem sido também um desafio desenvolver um processo que torne a reciclagem destes materiais uma proposta rentável, uma vez que é difícil separar os diferentes materiais que constituem um compósito, dado seu processo de concepção.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS COMPÓSITOS

3.1 Reforços

3.2 Matrizes

3.3 Tecnologias de Fabrico de Reservatórios em Material Compósito

3.4 Comportamento Mecânico dos Compósitos

3 MATERIAIS COMPÓSITOS

3.1 Reforços

Os reforços num material compósito têm o objetivo de suportar a maioria das cargas a que este está sujeito, sendo normalmente o constituinte que promoverá a rigidez e a resistência da peça. Normalmente na área dos compósitos, os reforços apresentam-se sob a forma de fibras pois é nessa forma, comparando com as restantes, que os materiais possuem uma maior rigidez e resistência.

Existem quatro fatores que contribuem de forma crucial para o papel das fibras nas características mecânicas do material (Guide to Composites - Gurit, 2013):

- As propriedades mecânicas das fibras em si (Tabela 3-1);
- A área de contacto entre as fibras e a resina (“interface”);
- A quantidade de fibra no compósito (“FVF - Fibre Volume Fraction”);
- A orientação das fibras no compósito.

A superfície de interação da fibra com a resina irá depender muito do grau de adesão entre ambas e a quantidade de fibra a utilizar irá depender do processo de manufatura e da finalidade do material em questão. No entanto, reforçar com tecidos contendo fibras justapostas dará uma maior FVF (“*Fiber Volume Fraction*” – Fração volúmica de fibra) do que o reforço em que as fibras têm algumas lacunas entre si.

O diâmetro da fibra também é um fator muito importante. Apesar de serem mais caras, as fibras mais finas proporcionam uma maior área de contacto fibra/matriz, ficando assim as cargas mais dispersas pela superfície. De forma geral, a rigidez e resistência de um material compósito irá aumentar proporcionalmente à quantidade de fibra presente; no entanto, acima de uma FVF de 70%-80% a resistência do material compósito irá diminuir devido à falta de resina que será insuficiente para unir as fibras de forma apropriada.

Uma vez que as fibras de reforço são projetadas para serem carregadas na sua direção longitudinal (i.e. segundo a direção do alinhamento das fibras) e não segundo a direção transversal, a orientação das fibras induz características direcionais específicas no compósito, pelo que este parâmetro pode ser manipulado favorecendo as características do compósito final. Deste modo, colocando as fibras no sentido do carregamento principal pode-se aumentar a resistência do material para aquele carregamento específico (Chawla, 1998).

Tabela 3-1: Propriedades dos reforços (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Reinforcements	Fiber Diameter $d(\mu\text{m})$	Density $\rho(\text{kg/m}^3)$	Modulus of Elasticity $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{\text{ult}}(\text{Mpa})$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W/M}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $c(\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$	Price 1993 (\$/kg)
"R" glass, high performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	14
"E" glass, common applications	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1400		70
"HT" graphite, high strength	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	70
"HM" graphite, high modulus	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	140
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	0.4×10^{-5}			500	500
Aluminum	20	3700	380,000			1400	0.4		50 (20°C) 7 (800°C)	900	>1000	
Aluminum silicate	10	2600	200,000			3000	1.5					
Silicon carbide	14	2550	200,000			2800	1.3	0.5×10^{-5}			1300	600
Polyethylene		960	100,000			3000					150	

3.1.1 Fibras de Vidro

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado por apresentarem uma razão desempenho/custo muito mais competitiva do que as fibras de carbono. Existem variadas formas de fibra de vidro, em que a base é Silica ($\sim 60\% \text{SiO}_2$) podendo depois conter uma série de outros óxidos – de cálcio, boro, sódio, alumínio e ferro, por exemplo, que fazem baixar o seu ponto de fusão (Chawla, 1998). Contudo as propriedades físicas e mecânicas da fibra dependem muito do modo como esta é produzida. A técnica mais utilizada para se obter fibras de vidro é o estiramento do vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas conforme ilustra a Figura 3-1 (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

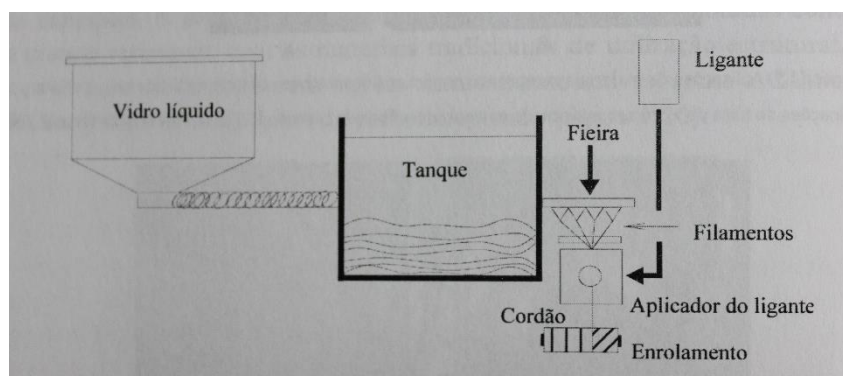


Figura 3-1: Representação esquemática da técnica de fabrico de fibra de vidro (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011)

A Figura 3-1 demonstra esquematicamente o fabrico convencional de fibra de vidro (especificamente a fibra de vidro de tipo E). Inicialmente as matérias-primas são derretidas num forno específico e encaminhadas através de um funil para uma fieira em platina. O vidro derretido escoar lentamente pelos pequenos orifícios existentes na fieira, formando assim filamentos, que são unidos posteriormente por um ligante, e enrolados na forma de filamentos de fibra de vidro (Chawla, 1998).

No caso das fibras de vidro, o teor alcalino trata-se de um fator que muito influencia a resistência ao envelhecimento. Fibras com teores alcalinos inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas em contacto com agentes atmosféricos ou químicos particularmente desfavoráveis (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Assim, as fibras do tipo A, fortemente alcalinas, foram sendo substituídas progressivamente pelas fibras do tipo E, um vidro borosilicato com baixo teor alcalino, apresentando boas propriedades mecânicas e químicas. Atualmente existem pelo menos três tipos de fibras que são apresentadas sob a forma de fio, casos dos tipos E, S e R. No que se refere às duas últimas, são obtidas a partir de vidros de alta resistência, sendo muito aplicadas na indústria aeronáutica. Na Tabela 3-2 salientam-se as propriedades das principais fibras de vidro (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Fazendo uma breve análise dessas propriedades, é de notar que a massa volúmica tem valores baixos, mas a tensão de rutura já apresenta valores elevados. Pode-se considerar que a razão tensão de rutura/ massa volúmica, para a fibra de vidro, tem valores elevados; no entanto a razão Módulo de Young/ Massa Volúmica já se pode considerar com valores abaixo do desejado. É esta razão que obriga ao nível da indústria aeroespacial a escolha de outro tipo de fibras (como as fibras de carbono ou de boro).

As fibras de vidro atualmente produzidas são caracterizadas por permitirem uma boa aderência às matrizes, boas propriedades dielétricas e uma excelente relação desempenho mecânico/custo, o que faz delas as fibras mais utilizadas como reforço (Pereira, 2007).

Tabela 3-2: Propriedade de alguns tipos de fibra de vidro (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011)

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
<i>Massa volúmica (g/cm³)</i>	2,6	2,49	2,55
<i>Módulo de Young (GPa)</i>	73,0	85,5	86,0
<i>Tensão de Rutura (MPa)</i>	3400	4580	4400
<i>Extensão na rotura (%)</i>	4,4	5,3	5,2
<i>Coef. Expansão Térmica (10⁻⁶/°C)</i>	5,0	2,9	4,0

3.1.2 Fibras de Carbono

O carbono é um elemento muito leve na sua forma elementar, possuindo uma massa volúmica de apenas 2,268 g.cm⁻³. As fibras de carbono, embora bastante menos utilizadas do que as fibras de vidro, por serem muito mais caras (cerca de dez a quinze vezes mais), apresentam um módulo de elasticidade muito mais elevado (três a sete vezes mais) e um peso específico mais baixo (1,2 a 1,6 vezes menos) o que leva a que sejam normalmente utilizadas em compósitos para componentes estruturais exigindo uma rigidez muito elevada e, simultaneamente, baixo peso (elevado módulo específico) (Pereira, 2007). Existem dois tipos de fibras agrupáveis no que diz respeito a fibras de carbono: as fibras de carbono propriamente ditas, que possuem percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite, onde a percentagem de carbono pode chegar aos 99%. Estas são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico, em áreas como a aeronáutica e a indústria aeroespacial (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

A tecnologia mais recente para a produção de fibras de carbono centra-se na decomposição térmica de 3 precursores orgânicos:

- **Celulose:** A celulose é um polímero natural, que é normalmente encontrado sob a forma de fibras. A fibra do algodão, que é celulósica, foi das primeiras a ser carbonizada quando Thomas Edison necessitou de obter filamentos de carbono para a lâmpada incandescente. Mais tarde surgiram as “rayon fibers”, que são feitas de pasta da madeira, uma matéria-prima relativamente barata. O processo de conversão das “rayon fibers” em fibras de carbono envolve vários processos: - *obtenção da fibra*; - *estabilização* numa atmosfera reativa (ar ou oxigénio, <400 °C) de forma a inibir a formação de alcatrão e melhorar a

resistência; - *carbonização* ($<1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) que envolve um aquecimento a cerca de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ em nitrogénio e *grafitização* ($>2500\text{ }^{\circ}\text{C}$), que é efetuada a cerca de $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre determinada pressão (Chawla, 1998).

- **Poliacrilonitrilo (PAN):** é atualmente o precursor mais utilizado por ter maior resistência mecânica e maior fiabilidade, sendo que o seu processo comporta as seguintes etapas: - *Oxidação*, em que as fibras são aquecidas até $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ numa atmosfera rica em oxigénio, conduzindo à criação de uma estrutura reticular da cadeia molecular, suprimindo assim o ponto de fusão das fibras; - *Carbonização*, em que a cadeia molecular é aquecida progressivamente até aos $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ num forno de atmosfera neutra, permitindo que apenas átomos de carbono permaneçam no final, fazendo com que as fibras obtidas apresentem boas propriedades mecânicas podendo mesmo ser utilizadas para posterior tratamento superficial; - *Grafitização*, que é um processo necessário quando o objetivo é obter fibras de elevado módulo de elasticidade, sendo efetuado em atmosfera neutra uma pirólise das fibras obtendo-se assim um elevado grau de orientação da estrutura e por fim um *Tratamento superficial*, em que numa atmosfera de ácido nítrico ou ácido sulfúrico as superfícies são modificadas de forma a atingirem elevados níveis de adesão entre as fibras e os vários sistemas de resina empregues como matriz (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).
- **Alcatrão (Pitch):** São várias as fontes matéria-prima para estas fibras, mas as mais frequentes são o cloreto de polivinilo (PVC), petróleo e carvão. Este tipo de fibras de carbono são muito atrativas pelo baixo custo das suas fontes, e pelo seu alto módulo de elasticidade (Argdwal & Broutman, 1990). A mesma sequência de oxidação, carbonização e grafitização que é descrita nas fibras PAN é também necessária para a obtenção destas fibras. O processo de fiação por fusão do conjunto de fibras envolve o esforço de corte e alongamento na direção do eixo das fibras, conseguindo-se assim uma fácil orientação preferencial das mesmas. Esta orientação pode ser ainda desenvolvida durante o processo de conversão para fibra de carbono (Chawla, 1998).

Normalmente as fibras de carbono são classificadas de acordo com a sua resistência mecânica, e são comercializadas segundo as seguintes designações (Donnet & Bansal, 1990):

- **UHM** (*Ultra high modulus*) para fibras com módulos superiores a 500 GPa ;

- **HM** (*High modulus*) para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio de resistência mecânica/módulo de tração inferior a 1%;
- **IM** (*Intermediate modulus*) para fibras com módulos até 300 GPa e rácio de resistência mecânica/módulo de tração aproximado de 1%;
- **LM** (*Low modulus*) para fibras de baixo módulo com valores inferiores a 100 GPa;
- **HS** (*High strenght*) para fibras de resistência à tração superiores a 3 GPa e rácio de resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02.

As fibras de carbono apresentam uma particularidade muito importante, que por vezes pode ser prejudicial: no sentido longitudinal têm um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo, o que pode provocar, caso as fibras de carbono estejam associados a materiais com coeficiente de dilatação positivo, tensões prejudiciais na interface. Pelo contrário, conseguindo uma conjugação criteriosa entre a fibra e a matriz, pode-se criar materiais compósitos com coeficiente de dilatação nulo, o que é útil para aplicações no domínio da metrologia, da ótica e aeroespacial (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

O coeficiente de dilatação térmica negativo e a boa condutividade elétrica e térmica que as fibras de carbono apresentam, faz com que elas sejam também muitas vezes usadas em compósitos que se pretenda uma elevada estabilidade dimensional e/ou que exijam condução de eletricidade e/ou de calor. As fibras de carbono apresentam como principais desvantagens o elevado preço, uma significativa sensibilidade ao choque e a possibilidade de sofrerem corrosão galvânica quando em contato com metais (Pereira, 2007).

3.1.3 Fibras Aramídicas

As fibras aramídicas são o termo genérico de uma classe de fibras orgânicas chamadas poliamidas aromáticas. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre -50 °C e -80 °C), sendo depois extrudida a uma temperatura de aproximadamente 200 °C. Por este método, a cadeia molecular é alinhada conseguindo-se uma melhoria das propriedades mecânicas (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

O primeiro comerciante de fibras aramídicas foi a empresa “Dupont”, em 1972. Atualmente existem dois tipos de produtos: - as fibras standard, tipo Kevlar[®]29, Twaron[®] ou HM.50[®] (referência utilizada pela empresa “Tejin”) com aplicações correntes em cabos, materiais diversos de baixo coeficiente de atrito e objetos de proteção pessoal e – as fibras de elevado módulo, tipo Kevlar[®]49 da “Dupont”, ou Twaron HM[®] da empresa

“Enke”, com inúmeras aplicações em cascos de navios, estruturas de aviões, capacetes, coletes de proteção balística e automóveis de competição (Teknea, 1989).

Estas fibras apresentam excelente resistência química, mecânica, ótima relação rigidez/peso, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boas características dielétricas, elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. O seu coeficiente de dilatação tem características idênticas ao das fibras de carbono, como anteriormente se referiu (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). As suas principais desvantagens são sobretudo o elevado preço, a baixa resistência à compressão, à flexão e aos raios ultravioleta, elevada sensibilidade às tensões de corte interlaminares dada a fraca ligação interfacial que apresentam às matrizes poliméricas.

3.1.4 Fibras de Boro

As fibras de boro são produzidas por deposição do boro em fase de vapor (CVD – *Chemical vapor deposition*) sobre um fio de tungsténio ou carbono, que atua como substrato (Chawla, 1998). O diâmetro deste é cerca de 12 μm , sendo que o resultado, após a deposição do boro, é uma fibra que pode chegar aos 200 μm . As fibras de boro apresentam um módulo de elasticidade cinco vezes superior ao da fibra de vidro apesar de serem ligeiramente mais pesadas do que estas. Utilizam-se normalmente sob a forma de fitas pré-impregnadas numa resina de epóxico. Pelo seu elevado preço, apenas na indústria aeronáutica se justifica a utilização de fibras de boro. As fibras de boro também podem ser integradas no seio de matrizes metálicas para produzir materiais de utilização a temperaturas muito elevadas; no entanto, o boro tem a característica de reagir em contato com a matriz metálica, destruindo-se (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). De modo a ultrapassar essa situação pode-se efetuar uma deposição final de carboneto de boro ou de carboneto de silício, que atua como barreira ao mecanismo de difusão, resultando daí uma fibra designada de “Borosic”.

3.1.5 Formas que podem apresentar os Reforços

Os reforços podem-se apresentar sob várias formas de acordo com o fim a que se destinam, das propriedades pretendidas das fibras e da maneira como se apresentam.

O “Roving” é uma forma muito usada quando se pretende produzir fibras curtas (por exemplo para moldação por projeção), para tecidos, produção de mantas, entrelaçados e malhas, e é basicamente um cordão de filamentos (normalmente de 9 ou 13 μm de diâmetro) contínuos enrolado helicoidalmente em bobines.

Existem também os reforços já sob a forma de “Mantas” em que as fibras são distribuídas e agregadas com um ligante especial, em emulsão ou em pó, que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Dentro dos reforços denominados de mantas existem as mantas de filamentos cortados CSM (*Chopped Strand Mat*), em que as fibras apresentam comprimentos inferiores a 50 mm e as propriedades mecânicas são baixas, e as mantas de filamentos contínuos CRM (*Continuous Random Mat*), mantas leves (20 a 30 g/m^2) constituídas por fibras curtas pré-impregnadas com resina, nas quais se evita o afloramento de fibras à superfície.

Um tecido pode ser do tipo 2D ou 3D tratando-se da confecção de feixes de fibras longas de carbono, aramida, vidro, ou a combinação destas para aplicações que exigem elevadas propriedades mecânicas. Os tecidos 3D além de terem fibras orientadas no plano, também possuem fibras orientadas na direção da espessura, o que lhes confere uma melhor resistência interlaminar. No entanto, a necessidade de garantir a boa impregnação pela resina, limita o teor das fibras orientadas no plano, diminuindo as propriedades mecânicas em relação aos tecidos 2D (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

As denominadas “malhas” (*Knitted Fabrics*) são produzidas pela ligação sucessiva de fibras alinhadas. As diferentes camadas são envelhecidas através da submissão de temperatura, em conjunto, facilitando a distribuição de carga pelas fibras, permitindo assim obter elevados módulos em tração. Por fim, têm-se os reforços do tipo “entrelaçados” (*Braids*), geralmente os reforços mais caros dado o seu processo de confecção. Encontram-se normalmente tanto em configuração tubular, como plana, apresentando uma resistência específica mais elevada do que os restantes reforços, e uma boa conformidade, podendo ser utilizados no fabrico de produtos diversos como raquetes de ténis, sticks de hóquei ou pás de hélices de avião.

3.2 Matrizes

A classificação dos materiais compósitos pode-se realizar também segundo o tipo de matriz. Neste pressuposto, ter-se-iam três origens: matriz metálica, polimérica ou cerâmica.

Sendo a principal função da matriz a de transferir as tensões aplicadas ao reforço, esta funciona também como barreira química a ambientes menos propícios, de modo a proteger a superfície das fibras, mas também de modo a absorver tensões tangenciais interlaminares e manter o posicionamento das fibras (Lobo, 2012).

No que se refere ao enrolamento filamentar, a matriz usada é polimérica devido à sua boa relação peso/resistência. Dado este fato, e visto a esmagadora maioria das matrizes ser de origem polimérica, este estudo apenas englobará este tipo.

Os polímeros normalmente são classificados em termoendurecíveis ou termoplásticos.

3.2.1 Matrizes termoplásticas

As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos denominados plásticos técnicos², que são formados a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Estas moléculas são mantidas nas suas posições através de ligações secundárias (forças intermoleculares tais como ligações de hidrogénio). Com a subida de temperatura, estas ligações são quebradas temporariamente, permitindo que haja mobilidade molecular e a consequente adaptação da forma. Posteriormente, com um arrefecimento, as moléculas ficam estáticas nas posições entretanto alcançadas, reestabelecendo-se assim as ligações químicas acima referidas (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). De forma sucinta, os termoplásticos podem-se fundir por aumento de temperatura, tornando-se parcialmente num líquido viscoso que se pode fazer escoar sob ação de uma determinada pressão, assumindo a forma e as posições desejadas, e com o arrefecimento volta às suas características e formas iniciais. Algumas vantagens que resultam da substituição das matrizes termoendurecíveis pelas matrizes termoplásticas são: maior tenacidade, e, portanto, tolerância ao dano, maior resistência ao impacto e a vibrações, maiores valores de deformações na rotura e ductilidade, ciclos de fabrico mais curtos e maior facilidade de

² Os plásticos técnicos são moléculas sintéticas, vulgarmente designadas por polímeros e produzidas artificialmente com origem orgânica

reciclagem, reparação e reprocessamento (Pereira, 2007). No entanto, o aumento da utilização dos polímeros termoplásticos sempre foi condicionado pela maior dificuldade em impregnar totalmente os reforços a eles associados. Atualmente representam cerca de 35% do mercado mundial de materiais compósitos (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Para aplicações não estruturais e semiestruturais, os polímeros que podemos encontrar mais frequentemente como matriz são prolipropilenos (PP), poliamidas (PA) e policarbonatos (PC).

- O **Prolipropileno (PP)** é um polímero do grupo das poliolefinas, tratando-se de um termoplástico branco e opaco com cristalinidade de cerca de 65%. A nível das suas propriedades, apresenta uma boa resistência ao impacto e rigidez, resistência ao ataque químico por ácidos, sais ou outras substâncias corrosivas, boa resistência a altas temperaturas e boa resistência à distorção. A temperatura típica de processamento ronda os 200°C, o que o torna num dos mais acessíveis ao processamento por técnicas tradicionais (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).
- As **Poliamidas (PA)** mais vulgarmente designadas por “Nylons” são fortemente higroscópicas³, apresentam baixos coeficientes de atrito, grande resistência ao desgaste, boa resistência térmica e uma boa resistência mecânica. Como apresentam habitualmente pesos moleculares inferiores aos dos plásticos convencionais, a sua viscosidade é menor, o que determina a necessidade de precauções especiais no processamento (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).
- O **Policarbonato (PC)** é um termoplástico amorfo que resulta da reação de compostos de dihidróxido aromático com ácido carbónico (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). É das matrizes termoplásticas com maior resistência ao impacto, apresenta uma boa resistência térmica, química, à exposição aos agentes ambientais, e, além disso, trata-se de um polímero retardador de chama, ópticamente transparente e pouco higroscópico. O processamento por técnicas tradicionais é também possível visto a sua temperatura de processamento rondar os 200°C (Chawla, 1998).

³ Com grande capacidade de absorção de água

- A **Poli-éter-éter-cetona (PEEK)** é um polímero semicristalino, termoendurecível, utilizado normalmente na indústria aeronáutica (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). Em comparação com as restantes resinas epóxido/epoxídicas, apresenta maior tenacidade⁴ e é pouco higroscópica. No entanto, tem um difícil processamento dada a sua cristalinidade variável, tem um custo elevado, e para garantir uma boa impregnação são necessárias temperaturas e pressões bastante elevadas.
- As **Poliimidas termoplásticas** caracterizam-se genericamente pela boa resistência a altas temperaturas, que lhes permitem suportar temperaturas de serviço até aos 260°C. Ao contrário das poliimidas termoendurecíveis, podem ser reprocessadas por aplicação de calor e pressão. Apresentam elevada resistência mecânica e rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional e boas propriedades elétricas. Além disso são também retardadores de chama e resistem bem a agentes químicos (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

A Tabela 3-3 e a Tabela 3-4 apresentam algumas propriedades das matrizes termoplásticas ou termoendurecíveis acima referidas, onde se denotam as diferenças significativas entre os reforços e os materiais da matriz no que diz respeito à resistência e à rigidez. Associado a cada polímero pode-se consultar o tipo (Amorfo –A, ou semi-cristalino - C), a temperatura de transição vítrea (T_g), a temperatura de fusão (T_m), a temperatura de deflexão sob carga (HDT – Heat deflection temperature), o módulo de elasticidade (E), a tensão de rotura (σ_u) e a deformação à rotura (ϵ_u). Dentro de cada uma das propriedades considera-se o caso de termoplástico reforçado com 30% em peso de fibra curta de vidro (R) e não reforçado (NR).

⁴ Quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar

Tabela 3-3 – Propriedades típicas de alguns termoplásticos (de Magalhães, de Morais, & Moura, 2011)

Polímero	Tipo	T _g (°C)	T _m (°C)	HDT (°C)		E (GPa)		σ _u (MPa)		ε _u (%)	
				NR	R	NR	R	NR	R	NR	R
PC	A	150		132	149	2,4	9,0	65	131	125	2,5
PP	C	-10	165	53	151	1,4	5,9	34	83	400	2,3
PA	C	50	265	90	252	2,9	9,0	83	172	200	4
PEI	A	220		204	210		9,0		200		
PEEK	C	150	310	148	286		9,0	98	190		

3.2.2 Matrizes Termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas, mas, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados pois uma vez aquecidos assumem uma forma permanente (de Magalhães, de Morais, & Moura, 2011).

As matrizes termoendurecíveis são normalmente processadas sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Com a mistura destes três componentes na proporção adequada constitui-se a estrutura tridimensional num processo químico denominado de “cura”. A principal vantagem das resinas termoendurecíveis em comparação com as termoplásticas é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos (de Magalhães, de Morais, & Moura, 2011).

Os termoendurecíveis mais utilizados na produção de materiais compósitos são as resinas de poliéster insaturado (UP), viniléster (VE), epóxicas (EP) e fenólicas (PF).

- As **resinas de poliéster** insaturado são das mais usadas no fabrico de materiais compósitos por apresentarem menor custo, maior facilidade de processamento e boa resistência à corrosão (Pereira, 2007). O seu processamento desenvolve-se em duas etapas: a primeira onde a resina líquida se transforma num material gelatinoso (fase designada por “ponto de gel”) e a segunda fase onde se efetua

um endurecimento final através de um processo exotérmico⁵ (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

- As **resinas de vinilester** são produzidas pela reação de uma resina de vinilester insaturada com uma resina de epóxido. Apresentam um processo de cura rápido, uma excelente resistência química, elevada tensão de rotura e baixa viscosidade (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). No entanto, apresentam uma elevada contração volumétrica, que pode atingir os 10% após o processo de cura. Dadas as suas características, foram resinas especialmente concebidas para aplicações em ambientes corrosivos, sendo por isso frequente a sua utilização na indústria química.
- Resultado da reação de fenol com formaldeído em condições ácidas ou alcalinas, as **resinas fenólicas**, por terem um ótimo comportamento em contacto com o fogo, têm vindo a substituir em muito as resinas de poliéster em compósitos de fibras longas. Estas resinas decompõem-se com libertação de água (H₂O), dióxido e monóxido de carbono (CO₂ e CO, respetivamente), que se constituem como substâncias impedoras da propagação de chama. Os restantes termoendurecíveis apenas se podem tornar auto-extinguíveis pela mistura de aditivos que apresentam preços bastante elevados. Apesar das vantagens que trazem e das boas características de isolamento elétrico que apresentam, as resinas fenólicas têm ciclos de processamento muito mais difíceis que as resinas de poliéster, baixa resistência química e são mais frágeis (Pereira, 2007).
- As **resinas de epóxido** caracterizam-se por apresentarem longas cadeias de moléculas semelhantes às das resinas de vinilester, constituídos por dois átomos de carbono ligados a um átomo de oxigénio (Pereira, 2007). O esquema de cura destas resinas passa pela adição de um agente endurecedor apropriado, como amidas alifáticas, aromáticas ou algumas poliamidas, e por isso são das resinas com o custo mais elevado. Como vantagens principais citam-se a elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química, boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, grande estabilidade dimensional em resultado da sua baixa contração, baixa

⁵ Processo com libertação de calor

absorção de água, e boa processabilidade (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Tabela 3-4 – Propriedades importantes de algumas matrizes (Chawla, 1998)

<i>Matriz</i>	<i>Densidade, ρ (g.cm⁻³)</i>	<i>Tensão de rotura, σ_u (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade , E (GPa)</i>	<i>Coefficiente de Poisson, ν</i>	<i>Contração na cura (%)</i>	<i>Temperatura de funcionamento (°C)</i>
<i>Poliéster</i>	1,1-1,4	30-100	2-4	0,2-0,33	5-12	80
<i>Epóxido</i>	1,2-1,3	50-125	2,5-4	0,2-0,33	1-5	150

3.3 Tecnologias de fabrico de reservatórios em material compósito

A moldação por centrifugação e o enrolamento filamentar são as principais tecnologias utilizadas no processamento de peças de revolução, em que se inserem os reservatórios sob pressão.

No que diz respeito à moldação por centrifugação, trata-se de um processo adequado à produção de peças ocas, como é o caso de tubos ou depósitos. Inicia-se com um molde metálico de forma cilíndrica que é mantido em rotação. No decorrer, é introduzida uma resina, de poliéster ou epóxido, e o reforço sob a forma de *roving*, tecido, manta, ou outras formas de materiais mais complexos (Figura 3-2). Por efeito da força centrífuga desenvolvida, a resina impregna o reforço e forma, depois da polimerização⁶, uma estrutura cilíndrica (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). A velocidade de moldação irá depender de alguns fatores, tais como a quantidade de natureza do reforço, a espessura e diâmetro da peça a produzir, e a viscosidade da resina empregue.

Este método de fabrico, que pela sua simplicidade e elevado grau de automatização se apresenta bastante interessante, tem associadas outras vantagens, tais como, por exemplo, boa reprodutibilidade e controlo do compósito durante o fabrico, o fato de ser utilizada a ação da força centrífuga permite a aplicação de manutenção *in situ* do reforço, permite a repartição uniforme da resina e a remoção de bolhas de ar. No entanto, este método tem como limitações, o grande investimento na instalação, a limitação na forma das peças, a exigência de grande precisão no balanceamento/equilíbrio dinâmico do molde, e como principal limitação, o fato de não se conseguir a obtenção de teores elevados de fibras de

⁶Consiste num processo de união de moléculas de um dado composto (monómero) para formar um novo composto designado por polímero.

reforço (teores máximos de fibra rondam os 30%), o que se reflete fortemente nas menores propriedades mecânicas que caracterizam os cilindros centrifugados face aos fabricados por enrolamento filamental (Pereira, 2007).

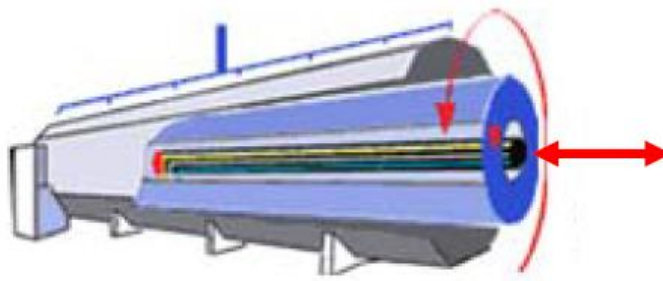


Figura 3-2: Moldação por centrifugação (Pereira, 2007)

No enrolamento filamental os cilindros são, pelo contrário, produzidos por deposição de filamentos contínuos de fibras (Rovings), previamente impregnadas na passagem através de um banho de resina, em torno de um mandril cilíndrico que se encontra em rotação (Figura 3-3) (Pereira, 2007). As fibras contínuas impregnadas podem ser assim enroladas helicoidalmente em torno do mandril, e durante essa fase de enrolamento, as fibras são orientadas em função das solicitações a que a peça estará sujeita em serviço, bastando para tal controlar os movimentos de translação do carro e rotação do mandril (Figura 3-4). A espessura final do cilindro em compósito será obtida através da sobreposição de um número pré-determinado de camadas sobre o mandril.

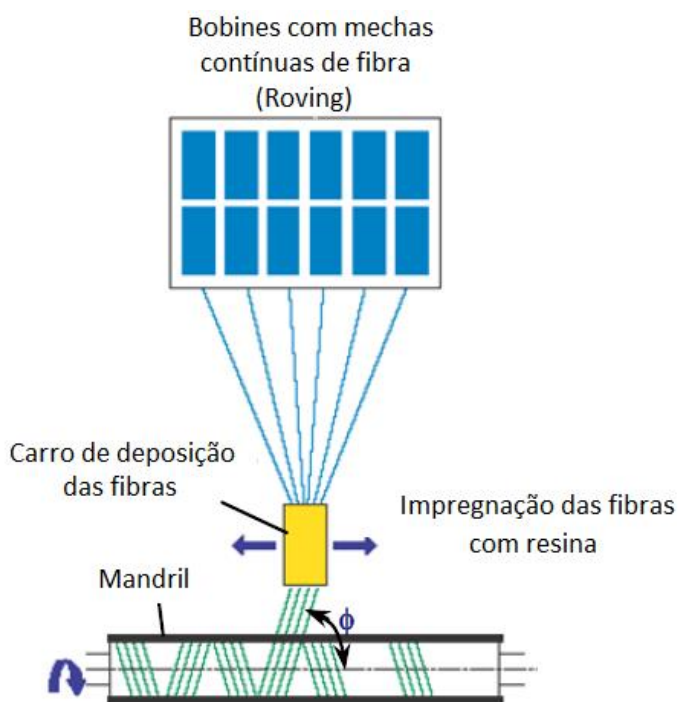


Figura 3-3: Fabrico de cilindros por enrolamento filamental helicoidal, adaptado de (Pereira, 2007)

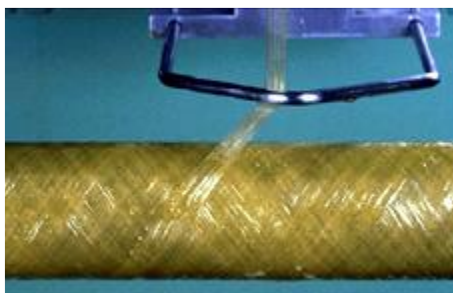


Figura 3-4: Enrolamento de fibras sob o mandril (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011)

O uso de uma tensão controlada na fase de enrolamento permite dar união às fibras e boas características mecânicas às peças obtidas. Após o enrolamento, procede-se à polimerização em forno ou através de luzes infravermelhas (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

O enrolamento filamentar pode também ser realizado com resinas termoplásticas. Recorre-se a uma fita termoplástica pré-impregnada que é enrolada enquanto se aplica calor e pressão no ponto de contato com o mandril para promover a fusão e consolidação do termoplástico. Normalmente utilizam-se combinações reforço/matriz à base de carbono/PEEK ou carbono/EP (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

Através do processo de enrolamento filamentar podem ser produzidas peças como reservatórios de pressão, peças esféricas ou cilíndrico-esféricas, tubos cilíndricos, entre outros, com taxas de reforço de 60 a 75% de fibras em peso (Figura 3-5).



Figura 3-5: Produtos obtidos por enrolamento filamentar (Pereira, 2007)

Com o desenvolvimento desta tecnologia, surgiram também novos mecanismos de enrolamento bastante sofisticados. Assim, existem atualmente dois tipos de equipamentos de enrolamento filamentar:

- Máquinas de enrolamento filamentar helicoidal automático (Figura 3-3): Sendo as primeiras máquinas a aparecer, apenas permitem a execução de tubos e corpos cilíndricos de reservatórios. Apresentando-se apenas com um eixo de

rotação (eixo longitudinal do mandril), estas máquinas não permitem a execução de reservatórios integrais com as calotes incorporadas no corpo cilíndrico principal. Assim, as calotes têm de ser fabricadas em separado (por moldação por contato, vácuo ou compressão) sendo posteriormente ligadas ao corpo cilíndrico principal por meio de um estratificado (Pereira, 2007).

- Máquinas de enrolamento filamentar polar e geodésico (Figura 3-6): Os equipamentos são bastante mais sofisticados que os anteriores, permitindo a deposição das mechas de fibra com os ângulos desejados sobre as superfícies de revolução mais complexas. São constituídas por pelo menos 6 eixos de rotação permitindo assim a execução integral de reservatórios constituídos por um corpo cilíndrico e respetivos fundos copados.



Figura 3-6: Enrolamento filamentar geodésico (Peters, 2011)

Algumas orientações típicas das mechas de fibra de reforço são consideradas com as respetivas designações (Figura 3-7):

- a) *Enrolamento helicoidal*: deposição de camadas em que as fibras contínuas formam um ângulo inferior a 90° (entre os 15° e os 80°) com a direção do eixo longitudinal do mandril. O ângulo de enrolamento é normalmente escolhido em função da relação entre propriedades mecânicas que se pretende ter nas direções circunferencial e longitudinal da peça cilíndrica em compósito que está a ser produzida (Pereira, 2007). O revestimento completo do mandril é

fruto de um conjunto de circuitos alternados em orientações positivas e negativas.

- b) *Enrolamento circunferencial*: Trata-se de um caso particular do enrolamento helicoidal sendo que existe deposição de camadas em que as fibras contínuas formam um ângulo muito próximo dos 90° com a direção do eixo longitudinal do mandril. Neste enrolamento o avanço do carro por rotação do mandril é exatamente igual à largura da banda de fibras de reforço que está a ser enrolada. Neste caso específico de enrolamento obtém-se propriedades mecânicas máximas na direção circunferencial do cilindro (Pereira, 2007).
- c) *Enrolamento Polar*: a deposição das fibras contínuas possibilita a obtenção de extremidades esféricas por dupla rotação do mandril em torno dos dois eixos. O ângulo de enrolamento pode variar entre os 0° e os 90° . Normalmente este padrão de enrolamento é conciliado com o enrolamento circunferencial permitindo uma tensão circunferencial e longitudinal requerida.

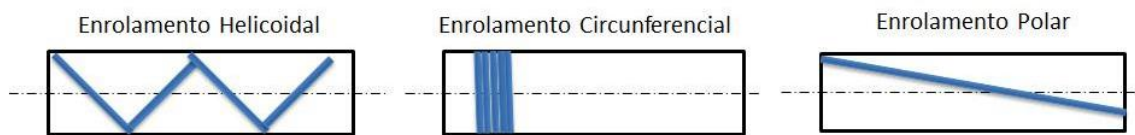


Figura 3-7: Padrões de enrolamento filamental (Lobo, 2012)

Em suma, as principais vantagens do método de fabrico por enrolamento filamental são as seguintes: simplicidade do processo, automatização possível, volume de fibras elevado e consequentemente peças com boas características mecânicas, possibilidade de orientação do reforço segundo as solicitações previstas e possibilidade de obtenção de peças em grande dimensão e de algum grau de complexidade. Porém, como desvantagens tem-se algumas limitações na forma das peças, sobretudo no que diz respeito a concavidades, necessidade de maquinagem ou acabamentos posteriores, requer a presença permanente de um operador especializado para fazer a mudança de bobinas ou verificar quaisquer deslizamentos que possam ter ocorrido, e dificuldade na obtenção de ângulos baixos (entre 0° e 15°) na orientação das fibras em relação ao eixo do mandril (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011).

3.4 Comportamento mecânico dos compósitos

Sendo que, como já foi referido, um material compósito resulta da combinação de diferentes materiais, é evidente que estes apresentam assim características heterogéneas⁷ e anisotrópicas⁸, não permitindo assim aplicar ao estudo do seu comportamento mecânico as teorias já bem conhecidas para materiais homogéneos e isotrópicos convencionais.

Para isso, existe a necessidade de se efetuar estudos em que tanto as fibras como a matriz são normalmente individualizados e tratados como materiais homogéneos, capazes de se organizarem numa lâmina heterogénea constituinte de um material compósito segundo determinados arranjos padrão com teor de volume específico. Surge assim o conceito de fração volúmica de fibra ou fração volúmica de matriz (conceitos já abordados no subcapítulo 3.1), que permite prever e determinar as propriedades mecânicas e elásticas nas direções principais da lâmina dos materiais compósitos a partir das propriedades dos seus constituintes (Pereira, 2007).

Por outro lado pode ser efetuada uma análise à escala macromecânica, em que cada lâmina de um material compósito é analisada como um todo homogéneo. Tal como acontece para a análise micromecânica, pode-se utilizar métodos analíticos, como acontece no caso da “Teoria Clássica dos Laminados (CLT)” ou métodos numéricos avançados, como é o caso do MEF.

3.4.1 Características do conjunto Reforço/Matriz

Como já foi referido anteriormente, um compósito é definido pelo conjunto reforço/matriz na sua forma conjunta. Para o conhecimento de alguns parâmetros estruturais, tem de se ter em conta características como a fração volúmica de fibra/matriz, a fração de massa e a densidade do conjunto fibra/matriz.

A fração de massa de fibra, M_f , pode ser definida por:

$$M_f = \frac{\text{massa da fibra}}{\text{Total da massa}}$$

Equação 3-1

E, consequentemente, a fração de massa de matriz, M_m :

⁷ Apresentam características diferentes ao longo da sua zona

⁸ As propriedades variam com a sua orientação/direção

$$M_m = \frac{\text{massa da matriz}}{\text{Total da massa}}$$

Equação 3-2

Da Equação 3-1 e da Equação 3-2 resulta assim a expressão:

$$M_m = 1 - M_f$$

Equação 3-3

No que diz respeito à fração volúmica de fibra, V_f , esta pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_f = \frac{\text{Volume de fibra}}{\text{Volume total}}$$

Equação 3-4

Sendo que, consequentemente, a fração volúmica da matriz, V_m , é dada por:

$$V_m = \frac{\text{Volume de matriz}}{\text{Volume total}}$$

Equação 3-5

Resultando:

$$V_m = 1 - V_f$$

Equação 3-6

Considerando que ρ_f e ρ_m , são respetivamente, a massa volúmica da fibra e a massa volúmica da matriz, ter-se-ão as seguintes expressões:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}$$

Equação 3-7

e

$$M_f = \frac{V_f \times \rho_f}{V_f \times \rho_f + V_m \times \rho_m}$$

Equação 3-8

Como representado na Tabela 3-5, de acordo com cada processo de fabrico, são utilizadas diversas frações de fibra.

Tabela 3-5: Fração volúmica de fibra mais comum para cada processo de fabrico (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

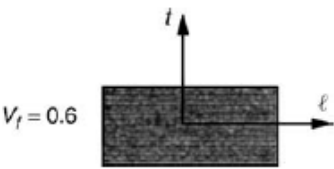
<i>Molding Process</i>	<i>Fiber Volume Fraction</i>
Contact Molding	30%
Compression Molding	40%
Filament Winding	60%–85%
Vacuum Molding	50%–80%

Para o cálculo da massa volúmica do conjunto fibra/matriz, entra-se em conta com a fração volúmica que interfere com a massa volúmica individual de cada material (Equação 3-9):

$$\rho = \rho_f \times V_f + \rho_m \times V_m$$

Equação 3-9

Tabela 3-6: Algumas propriedades de reforço/matriz epoxy (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

	<i>Glass</i>	<i>Kevlar</i>	<i>Carbon</i>
Specific mass (kg/m ³)	2080	1350	1530
Longitudinal tensile fracture strength (MPa)	1250	1410	1270
Longitudinal compressive fracture strength (MPa)	600	280	1130
Transverse tensile fracture strength (MPa)	35	28	42
Transverse compressive fracture strength (MPa)	141	141	141
In plane shear strength (MPa)	63	45	63
Interlaminar shear strength (MPa)	80	60	90
Longitudinal elastic modulus E_l (MPa)	45,000	85,000	134,000
Transverse elastic modulus E_t (MPa)	12,000	5600	7000
Shear modulus G_{lt} (MPa)	4500	2100	4200
Poisson ratio ν_{lt}	0.3	0.34	0.25
Longitudinal coefficient of thermal expansion at 20°C α_l (°C ⁻¹)	$0.4 \text{ to } 0.7 \times 10^{-5}$	-0.4×10^{-5}	-0.12×10^{-5}
Transverse coefficient of thermal expansion at 20°C α_t (°C ⁻¹)	$1.6 \text{ to } 2 \times 10^{-5}$	5.8×10^{-5}	3.4×10^{-5}

3.4.2 Propriedades elásticas

As propriedades mecânicas do conjunto fibra/matriz, podem ser obtidas com base nas características dos seus constituintes individualmente, tendo em conta a fração volúmica de cada um dos constituintes. No entanto, este método apenas permite o cálculo de valores

aproximados, existindo alguns casos em que os valores calculados não coincidem exactamente com valores obtidos experimentalmente.

O módulo de elasticidade na direcção principal das fibras de reforço de uma lâmina unidireccional (*ply*) pode ser calculado da seguinte forma:

$$E_l = E_f \times V_f + E_m \times V_m$$

Equação 3-10

ou

$$E_l = E_f \times V_f + E_m \times (1 - V_f)$$

Equação 3-11

em que, normalmente, o módulo de elasticidade da lâmina depende essencialmente do módulo de elasticidade da fibra, visto este ser de valor muito superior ao do da matriz.

No caso do módulo de elasticidade, mas na direcção transversal à do eixo das fibras, E_t , ter-se-á (Equação 3-12):

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{ft}} V_f} \right]$$

Equação 3-12

No caso do módulo ao corte G_{lt} pode ser obtido fazendo uso da seguinte expressão, em que G_m e G_{flt} representam o módulo ao corte do material da matriz e da fibra, respectivamente :

$$G_{lt} = G_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_{flt}} V_f} \right]$$

Equação 3-13

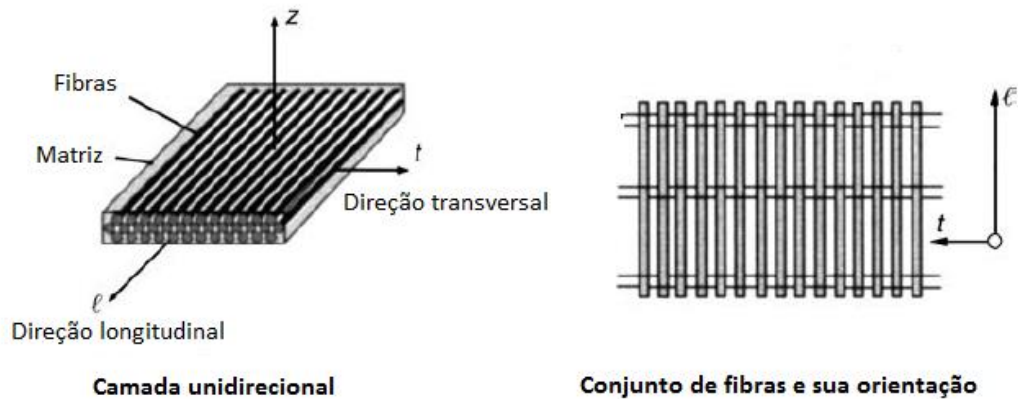


Figura 3-8: Orientações consideradas numa camada de fibra/matriz, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Torna-se assim importante também o cálculo do coeficiente de poisson, ν , que representa a contração do conjunto de material na direção “t”, quando a camada é sujeita a tensões longitudinais na direção de orientação das fibras (Figura 3-8):

$$\nu_{lt} = \nu_f \times V_f + \nu_m \times V_m$$

Equação 3-14

Além do módulo de elasticidade poder ser calculado nas direções que já foram referidas anteriormente, se existir outras direções que se considerem pertinentes, no cálculo do módulo, pode-se usar a seguinte expressão com as seguintes considerações (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$\begin{cases} c = \cos \theta \\ s = \sin \theta \end{cases}$$

$$E_x = \frac{1}{\frac{c^4}{E_l} + \frac{s^4}{E_t} + 2c^2s^2 \left(\frac{1}{2G_{lt}} - \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)}$$

Equação 3-15

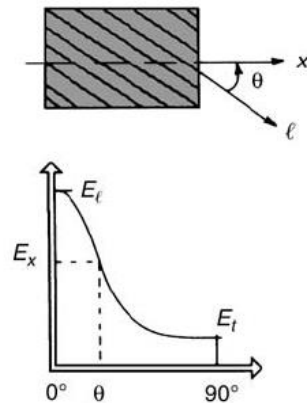


Figura 3-9: Variação do módulo de elasticidade de acordo com a direção das fibras (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

3.4.3 Tensão de rutura de uma camada

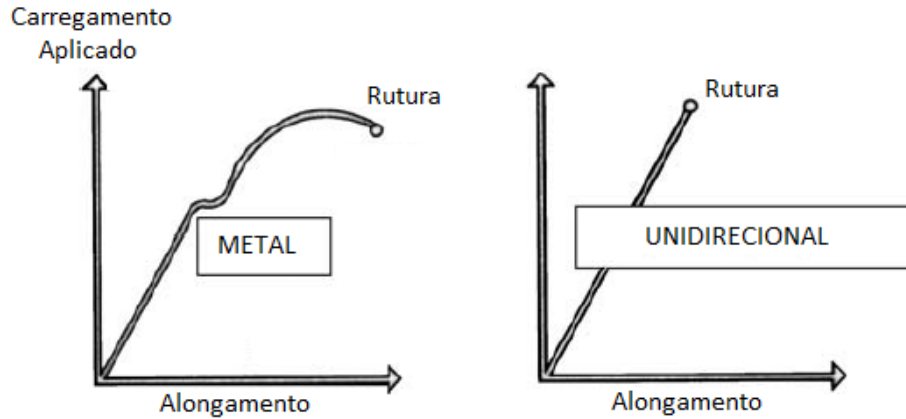


Figura 3-10: Relação curva de carregamento de material metálico e curva de carregamento de material compósito unidirecional adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Através da Figura 3-10 pode-se verificar a diferença de comportamento mecânico entre um material compósito de fibras unidirecionais e um material metálico convencional. Pela análise da figura, pode-se tirar algumas conclusões: - não existe deformação plástica no caso de material compósito unidirecional, o que se pode tornar uma desvantagem; - No entanto, a tensão de rutura do material compósito de fibras unidirecionais é superior à do material metálico; - A deformação no material compósito de fibras unidirecionais é fundamentalmente elástica até à rutura.

Aproximadamente a tensão de rutura, $\sigma_{lrutura}$, do material compósito pode ser dada pela expressão 3-16:

$$\sigma_{lrutura} = \sigma_{frutura} \times V_f$$

Equação 3-16

No entanto, trata-se de uma aproximação pois considera apenas o efeito de resistência das fibras, isto é, que a rutura ocorre apenas na direcção das fibras.

De uma forma análoga ao que foi referido para o módulo de elasticidade (Equação 3-15), para obter a tensão de rutura ao longo de qualquer direcção, $\sigma_{xrutura}$, pode-se fazer uso da seguinte expressão:

$$\sigma_{xrutura} = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^4}{\sigma_{lrutura}^2} + \frac{s^4}{\sigma_{trutura}^2} + \left(\frac{1}{\tau_{lt}^2} - \frac{1}{\sigma_{lrutura}^2} \right) c^2 s^2}}$$

Equação 3-17

Onde:

$$\begin{cases} c = \cos \theta \\ s = \sin \theta \end{cases}$$

$\sigma_{lrutura}$: Tensão de rutura na direção das fibras;

$\sigma_{trutura}$: Tensão de rutura na direção transversal à direção das fibras;

$\tau_{ltrutura}$: Tensão de corte na direção do plano (l,t) da camada.

3.4.4 Critérios de falha em materiais compósitos

Os critérios de rutura mais importantes são quadráticos, isto é, exprimem-se em função das tensões sob a forma de polinómios do 2º grau. Um dos mais utilizados é o denominado critério de Tsai-Hill, que deriva do critério de Hill de cedência plástica dos metais. Este critério de falha em materiais compósitos pode ser aplicado individualmente a cada camada do laminado, e em cada uma das orientações consideradas. Como já foi mencionado anteriormente, os eixos das fibras unidireccionais podem ser denominados como l (para a direção ao longo das fibras), e por t (para a direção transversal da direção das fibras). As tensões na direção da fibra são representadas por σ_l , enquanto que as na direção transversal à direção das fibras por σ_t , sendo a tensão de corte representada por τ_{lt} (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

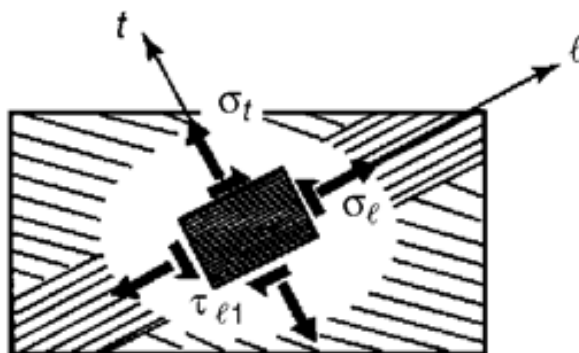


Figura 3-11: Representação das tensões e respetivas direções num laminado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

O fator/número de Hill-Tsai, α , pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_{lrutura}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{trutura}} \right)^2 - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{lrutura}^2} + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{ltrutura}} \right)^2$$

Equação 3-18

- Se $\alpha < 1$: Não ocorre rutura na camada;

- Se $\alpha \geq 1$: Ocorre rutura na camada considerada para o cálculo. Normalmente esta situação é quando ocorre rutura da matriz. Apenas no caso de rutura das fibras se pode considerar significativa a rutura.

Contudo, para se obter uma melhor convergência dos dados experimentais com os obtidos teoricamente, Tsai e Wu, propuseram o aumento do número de termos no critério de Hill. Este novo critério tem demonstrado uma boa correlação entre os dados teóricos e experimentais. Pode então traduzir-se pela seguinte expressão:

$$\sigma_{lt_{rutura}} \sigma_l \sigma_t + \sigma_{lt_{rutura}} \sigma_l \geq 1$$

Equação 3-19

Onde, σ_{lt} , representam as tensões a que o material se encontra sujeito, e $\sigma_{lt_{rutura}}$ são as resistências mecânicas do material às várias solicitações possíveis obtidas experimentalmente (Pereira, 2007).

CAPÍTULO 4

PROJETO RSP

- 4.1 Geometria de RSP utilizados
- 4.2 Método dos Elementos Finitos
- 4.3 RSP em material metálico
- 4.4 RSP fabricados em Materiais Compósitos

4 Projeto de RSP

4.1 Geometria dos Reservatórios Analisados

Esta abordagem do projeto de reservatórios sob pressão, descrita no presente capítulo, baseia-se essencialmente em duas geometrias distintas de dois reservatórios.

Uma primeira geometria considerada foi a geometria dos reservatórios convencionais utilizados nos Aparelhos de Respiração Autónoma (ARA) a bordo das unidades navais, e também das unidades terrestres da Marinha Portuguesa (geometria denominada de: *Garrafa 1* – “ARA”). Tornou-se pertinente a consideração desta geometria, pois são os reservatórios que são usados mais frequentemente, sendo assim considerados como referência. Fabricado em aço forjado, trata-se de um reservatório com uma geometria de corpo principal cilíndrico, com dois fundos copados, um semielíptico e outro hemisférico, cuja forma e dimensões se encontram especificadas na Figura 4-1.

Através da transposição para o programa de simulação computacional *SolidWorks*⁹, de uma fotografia, tirada em verdadeira grandeza (escala 1:1) a uma ARA, foi possível obter a geometria e as dimensões dos fundos copados.

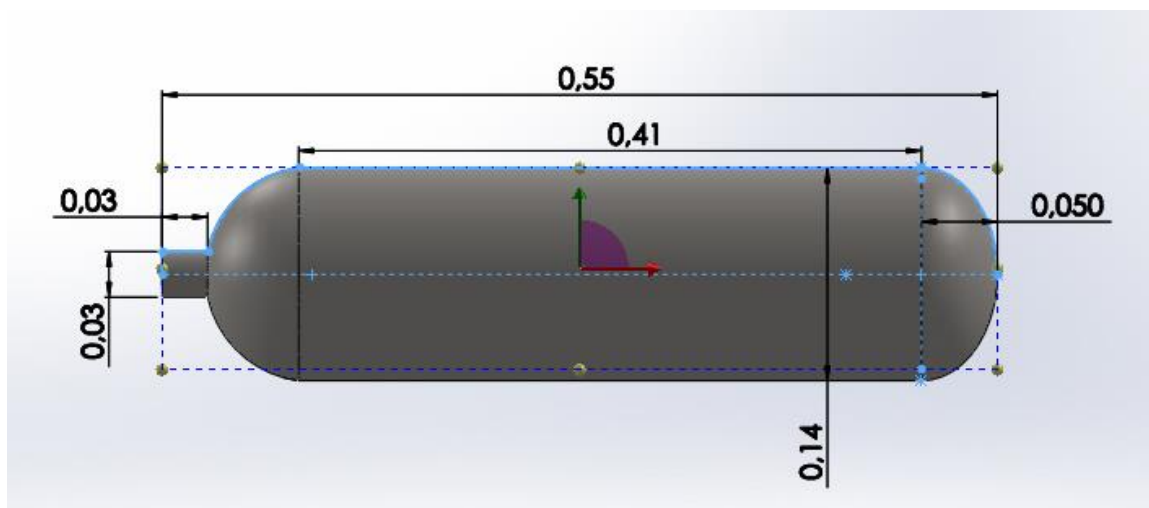


Figura 4-1: Modelo 3D em *SolidWorks*: Dimensões e geometrias de reservatório utilizado nos ARA (Dimensões em metros)

⁹ Programa informático de desenho assistido por computador utilizado na modelação 3D dos reservatórios e na simulação computacional



Figura 4-2: Garrafa 1, de Aparelho de Respiração Autônomo (ARA)

A segunda geometria considerada para estudo foi a geometria de um reservatório normalmente usado para atividades desportivas (nomeadamente *paintball* e *airsoft*).

A consideração desta segunda geometria deveu-se ao fato de ser necessário um modelo para servir como referência, onde já se fizesse uso de materiais compósitos,, passível de ser testado e ensaiado pertinentemente, como irá ser descrito nos capítulos seguintes. Esta geometria, denominada de *Garrafa 2 – “Stako”*, de forma cilíndrica no seu corpo principal e dois fundos copados, um hemisférico e outro toriesférico, tem as dimensões e geometrias representadas pela Figura 4-3.

Da mesma forma descrita na primeira geometria considerada, também os fundos copados desta foram confirmados através de uma fotografia tirada em verdadeira grandeza e com auxílio do programa de modelação tridimensional Figura 4-4.

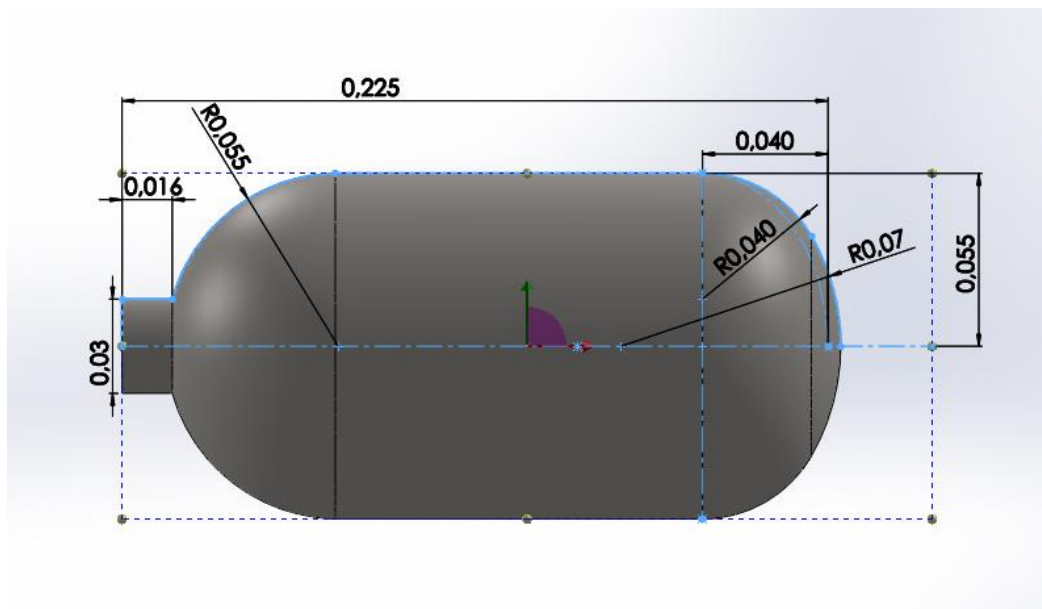


Figura 4-3: Dimensões e geometria da Garrafa 2 - "Stako" (Dimensões em metros)



Figura 4-4: Garrafa 2, Stako

De uma forma generalizada, pode-se verificar os parâmetros considerados de ambas as geometrias na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Parâmetros de ambas as geometrias de reservatórios considerados

	<i>Topo Superior (bocal)</i>	<i>Topo Inferior</i>	<i>Diâmetro, D (mm)</i>	<i>Comprimento semi-eixo menor, h (mm)</i>	<i>Raio maior, L (mm)</i>	<i>Raio menor, r (mm)</i>
<i>Garrafa 2 – Stako</i>	Hemisférico	Toriférico	110	NA	70	40
<i>Garrafa 1 – ARA</i>	Hemisférico	Semielíptico	140	50	NA	NA

4.2 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) trata-se de um poderoso método matemático de análise e resolução de problemas científicos e de engenharia. Este método numérico tem origem em trabalhos e desenvolvimentos realizados por matemáticos, físicos e engenheiros (Dias, da Cruz, Valente, & de Sousa, 2007). De uma forma geral, o MEF é utilizado na busca de soluções de problemas complexos de diversas áreas do conhecimento, para os quais não se conhece uma solução exata que possa ser expressa de forma analítica. Assim, o MEF não se pode considerar um método analítico, mas sim um método numérico.

As abordagens numéricas (isto é, aproximadas) a problemas de engenharia são necessárias na medida em que os métodos analíticos não conseguem dar respostas a problemas reais complexos. Por exemplo, é completamente possível efetuar o cálculo analítico da deformação de uma viga sujeita a esforços de flexão, utilizando a teoria

matemática da elasticidade. No entanto, se se pretender efetuar o mesmo cálculo mas para o sistema de suspensão de um automóvel, o cálculo analítico recorrendo àquela teoria já se torna insuficiente e inadequado.

A aplicação do MEF a problemas realistas de engenharia, muitas vezes complexos, exige a disponibilidade de meios computacionais muito sofisticados. Nesse sentido, percebe-se que o desenvolvimento deste método tenha vindo a acontecer de acordo com o aumento da disponibilidade tecnológica e da capacidade de cálculo destes mesmos meios digitais.

Como ferramenta auxiliar de projeto em problemas de engenharia, o MEF pode ser encarado de duas perspetivas completamente distintas: - O ponto de vista do utilizador, que recorre ao uso de um programa comercial de simulação numérica baseado no MEF para resolver problemas de engenharia; - O ponto de vista do programador que desenvolve o programa propriamente dito (Dias, da Cruz, Valente, & de Sousa, 2007).

O MEF é essencialmente uma metodologia estratificada, podendo ser aplicado à resolução de problemas unidimensionais, mas, na maioria dos casos, pretende-se determinar a solução numa área ou volume tridimensional genérico. Em qualquer um destes casos, torna-se necessário representar o domínio do sistema a analisar, para depois, posteriormente, esse domínio poder ser dividido num número finito de segmentos, áreas ou volumes mais pequenos, designados por elementos finitos. Esta tarefa designa-se por discretização (Figura 4-5).

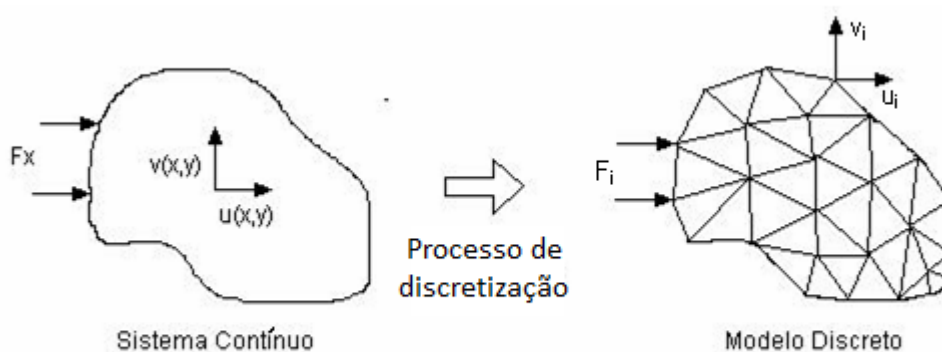


Figura 4-5: Processo de discretização espacial de um domínio por elementos finitos

Os elementos finitos podem assumir formas geométricas diversas, tais como as representadas (Figura 4-6).

Incidindo o foco numa análise linear elástica aplicada a problemas clássicos de engenharia, a primeira variável a determinar numa análise pelo MEF, é frequentemente o

campo de deslocamentos de um número finito de pontos no sistema. Estes pontos designam-se por nós da malha de elementos finitos (Dias, da Cruz, Valente, & de Sousa, 2007). Através da análise numérica efetuada, calculam-se, numa primeira fase, os deslocamentos nos nós para um carregamento particular aplicado ao domínio que se pretende analisar. Subsequentemente, o deslocamento de cada ponto do elemento finito pode ser determinado em função dos deslocamentos nodais, restringindo assim o problema a um número finito de pontos.

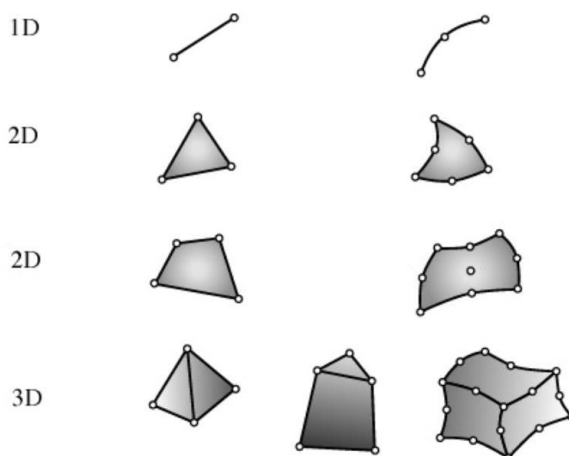


Figura 4-6: Algumas formas geométricas possíveis para elementos finitos. Unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, respetivamente

O deslocamento de cada nó pode ser decomposto em graus de liberdade. Por exemplo, num modelo bidimensional teremos duas componentes mutuamente perpendiculares, uma componente paralela ao eixo de referência Ox e outra paralela ao eixo Oy , e neste caso, cada nó terá dois graus de liberdade. Assim de forma análoga, para o caso de um elemento finito tridimensional, cada nó tem três graus de liberdade relacionados com os deslocamentos desse ponto segundo 3 direções espaciais ortogonais.

Se um determinado problema for discretizado de modo a ter n nós, então o número total de graus de liberdade a determinar é, em todo o modelo, $N_{gl}=n \times n_{gl}$, em que n_{gl} designa o número de graus de liberdade por nó (Dias, da Cruz, Valente, & de Sousa, 2007). Comparando com o sistema real, que apresenta um número infinito de graus de liberdade, este número de incógnitas será sempre razoável.

Uma vez determinados os deslocamentos nodais, o programa de simulação numérica pelo método dos elementos finitos passa à tarefa de calcular as deformações correspondentes e, a partir destas, tendo em consideração o modelo do material, o estado de tensão.

4.3 RSP fabricados em material metálico

4.3.1 Modelo de cálculo ASME Sec. VIII Div.1

De acordo com o modelo de cálculo ASME Sec. VIII Div.1 pode-se considerar diversas formas de fundos copados que são definidos através dos parâmetros expostos na Figura 4-7

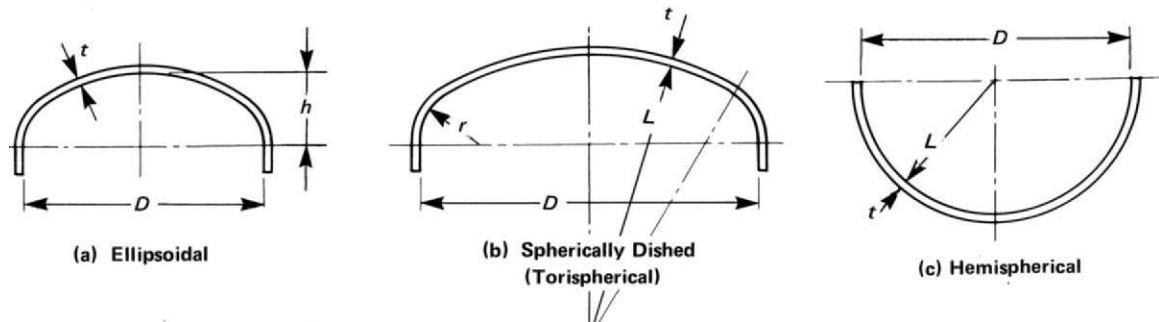


Figura 4-7: Representação esquemática de topos (Engineers, 2004)

Considerando o carregamento pretendido de 300 bar (30 MPa) para uma garrafa de aço forjado convencional, torna-se importante o cálculo das espessuras necessárias a esse mesmo reservatório. Todas as equações infra, pertencentes ao capítulo 4.2.1, provêm da norma ASME Sec. VIII Div.1.

No que diz respeito à garrafa 2 – Stako, a espessura mínima do fundo copado hemisférico, será a seguinte:

$$t_{hemis} = \frac{P \times R}{2 \times S \times E + 0,8 \times P} = \frac{30 \times 55}{2 \times 96,5 \times 1 + 0,8 \times 30} = 7,603 \text{ mm}$$

Equação 4-1

Sendo:

P – Pressão de serviço (MPa)

R – Raio da garrafa (mm)

S – Tensão admissível do material (em MPa), de acordo com tabela de materiais em (Norma ASME Sec. VIII div.1, 2004)

E – Coeficiente de eficiência das soldaduras (considerado igual a 1, i.e., sem cordões de soldadura)

Considerando o fundo copado torisférico:

$$t_{toris} = \frac{P \times L \times M}{2 \times S \times E - 0,2 \times P}$$

Equação 4-2

Onde o fator de proporção de topo torisférico, M, é:

$$M = \frac{1}{4} \times \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right) = \frac{1}{4} \times \left(3 + \sqrt{\frac{0,7}{0,4}} \right) = 1,08$$

Equação 4-3

Pelo que, fazendo uso da Equação 4-2:

$$t_{toris} = \frac{30 \times 70 \times 1,08}{2 \times 96,5 \times 1 - 0,2 \times 30} = 12,128 \text{ mm}$$

Sendo:

L – Raio maior do fundo copado torisférico (mm)

r – Raio menor do fundo copado torisférico (mm)

M – Fator de proporção do topo torisférico

No que diz respeito à espessura mínima para o corpo principal cilíndrico:

$$t_{corpo} = \frac{D \times P}{2 \times (S \times E + 0,4 \times P)} = \frac{110 \times 30}{2 \times (96,5 \times 1 + 0,4 \times 30)} = 15,207 \text{ mm}$$

Equação 4-4

No que diz respeito à Garrafa 1 – ARA, a espessura mínima do fundo copado de geometria hemisférica será igual a:

$$t_{hemis} = \frac{P \times R}{2 \times S \times E + 0,8 \times P} = \frac{30 \times 70}{2 \times 96,5 \times 1 + 0,8 \times 30} = 9,677 \text{ mm}$$

Equação 4-5

Passando para fundo copado semielíptico, a espessura mínima será calculada da seguinte forma:

$$t_{semieli} = \frac{P \times D \times K}{2 \times S \times E - 0,2 \times P}$$

Equação 4-6

Onde o fator de proporção de topo semielíptico, K, é:

$$K = \frac{1}{6} \times \left(2 + \frac{D}{2 \times h} \right) = \frac{1}{6} \times \left(2 + \frac{140}{2 \times 50} \right) = 0,5667$$

Equação 4-7

Pelo que fazendo uso da Equação 4-6:

$$t_{semieli} = \frac{30 \times 140 \times 0,5667}{2 \times 96,5 \times 1 - 0,2 \times 30} = 12,728 \text{ mm}$$

Sendo:

K – Fator de proporção do topo semielíptico

Visto as espessuras de ambos os topos estarem calculadas, calculou-se a espessura mínima para o corpo principal cilíndrico fazendo uso da Equação 4-4:

$$t_{corpo} = \frac{D \times P}{2 \times (S \times E + 0,4 \times P)} = \frac{140 \times 30}{2 \times (96,5 \times 1 + 0,4 \times 30)} = 19,355 \text{ mm}$$

4.3.2 Equações de equilíbrio para reservatórios de parede fina

Os reservatórios sob pressão de parede fina (envólucros delgados) constituem uma importante aplicação da análise de estados planos de tensão. Atendendo que as paredes têm uma rigidez de flexão desprezável, pode assumir-se que as forças internas exercidas sobre um elemento da parede são tangentes à superfície do reservatório (Figura 4-8) (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013).

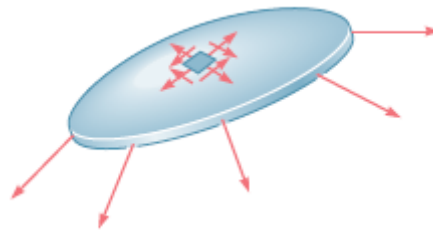


Figura 4-8: Distribuição de tensões em reservatórios de parede fina sob pressão (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013)

Considerando um reservatório cilíndrico de raio r , e espessura t , contendo um fluido sob pressão interna, p , tem-se como tensões principais as tensões normais σ_1 (conhecida por *tensão circunferencial*) e a tensão σ_2 (denominada de *tensão longitudinal*) (Figura 4-9).

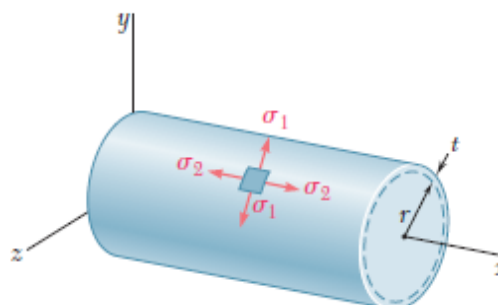


Figura 4-9: Tensões principais (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013)

As duas equações de equilíbrio estático aplicáveis a cascas finas são as indicadas na equação 4-8:

$$\begin{cases} \frac{N_{\varphi}}{r_1} + \frac{N_{\theta}}{r_2} = -P \\ N_{\varphi} = -\frac{F}{2\pi \times r_0 \times \sin \varphi} \end{cases}$$

Equação 4-8

Onde N_{φ} representa a força de membrana por unidade de comprimento na direção axial, e N_{θ} a força de membrana por unidade de comprimento na direção circunferencial (N/mm). φ representa o ângulo formado entre o raio de curvatura tangencial (r_2) e o eixo de revolução.

Tendo em consideração as duas garrafas estudadas, apresenta-se a informação pertinente, necessária para fazer o cálculo das espessuras através das equações teóricas, na Tabela 4-2:

Tabela 4-2: Parâmetros dos topos e corpo das garrafas a dimensionar (r em mm e φ em graus)

Hemisférico		Cilíndrico		Torisférico	
<i>Stako</i>	<i>ARA</i>	<i>Stako</i>	<i>ARA</i>	<i>Stako</i>	
				<i>Calote Esf.</i>	<i>Conc. Toroidal</i>
$r_0 = 55. \sin \varphi$	$r_0 = 70. \sin \varphi$	$r_0 = 55$	$r_0 = 70$	$r_0 = 70. \sin \varphi$	$r_0 = - -$
$r_1 = 55$	$r_1 = 70$	$r_1 = \infty$	$r_1 = \infty$	$r_1 = 70$	$r_1 = 40$
$r_2 = 55$	$r_2 = 70$	$r_2 = 55$	$r_2 = 70$	$r_2 = 70$	$r_2 = - -$
$0 \leq \varphi \leq 90$	$0 \leq \varphi \leq 90$	$\varphi = 90$	$\varphi = 90$	$0 \leq \varphi \leq 30$	$30 \leq \varphi \leq 90$

Fazendo uso das equações referenciadas pela Equação 4-8, efetuou-se o cálculo da espessuras nas diferentes zonas dos reservatórios, tendo em consideração uma pressão de serviço igual a 30 MPa (300 bar).

Para o topo hemisférico da garrafa 2 - “Stako”:

$$\frac{N_{\varphi}}{r_1} + \frac{N_{\theta}}{r_2} = -P \leftrightarrow \frac{N_{\varphi} + N_{\theta}}{55} = -(-30)$$

Sendo que para o caso particular de geometria hemisférica:

$$N_{\varphi} = N_{\theta}$$

Tem-se assim:

$$N_{\varphi} + N_{\theta} = 30 \times 55 \therefore \begin{cases} N_{\varphi} = \frac{P \times r}{2} = \frac{30 \times 55}{2} = 825 \text{ N/mm} \\ N_{\theta} = \frac{P \times r}{2} = \frac{30 \times 55}{2} = 825 \text{ N/mm} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N_{\theta}}{t} \\ \sigma_2 = \frac{N_{\varphi}}{t} \end{cases} \text{ sendo } N_{\varphi} = N_{\theta} \therefore \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{825}{t}$$

Desta forma, a fim de determinar a espessura necessária no topo hemisférico:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm}$$

Para o caso estudado, σ_3 , sendo a tensão de corte, é igual a zero, uma vez que as tensões principais σ_1 e σ_2 são diferentes de zero:

$$\sigma_1 = \sigma_{adm}$$

$$\sigma_1 = 96,5 \text{ MPa} \leftrightarrow 96,5 = \frac{825}{t} \leftrightarrow t = 8,55 \text{ mm}$$

Efetando os mesmos cálculos, mas referentes à garrafa 1 - “ARA” obtiveram-se os seguintes resultados:

$$N_{\varphi} = N_{\theta} = 1050 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 96,5 \text{ MPa}$$

$$t = 10,88 \text{ mm}$$

No que diz respeito à geometria cilíndrica - garrafa 2 - “Stako”:

$$\begin{cases} \frac{N_\varphi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -P \\ N_\varphi = -\frac{F}{2\pi \times r_0 \times \sin \varphi} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{N_\varphi}{\infty} + \frac{N_\theta}{55} = -(-30) \\ N_\varphi = \frac{P \times \pi \times r_0^2}{2\pi \times r_0 \times \sin \varphi} \end{cases}$$

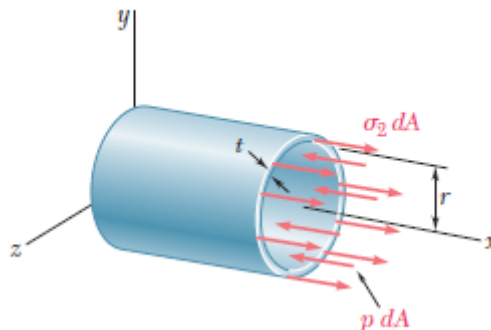


Figura 4-10: Diagrama de corpo livre do reservatório (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2013)

Sendo que:

$$\sin \varphi = \frac{r_0}{r_2} \Leftrightarrow r_0 = r_2 \times \sin \varphi$$

Teremos:

$$\begin{cases} \frac{N_\theta}{55} = 30 \\ N_\varphi = \frac{P \times r_0}{2 \times \sin \varphi} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} N_\theta = 55 \times 30 \\ N_\varphi = \frac{P \times r_2}{2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} N_\theta = 1650 \text{ N/mm} \\ N_\varphi = 825 \text{ N/mm} \end{cases}$$

Sabendo que:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm}$$

e $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_1 = 96,5 \text{ MPa} \Leftrightarrow 96,5 = \frac{1650}{t} \Leftrightarrow t = 17,10 \text{ mm}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_\varphi}{t} = \frac{825}{17,1} = 48,25 \text{ MPa}$$

Efetuada os mesmos cálculos mas referentes à garrafa 2 - “ARA” obtiveram-se os seguintes resultados:

$$N_\varphi = 1050 \text{ N/mm}$$

$$N_\theta = 2100 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_1 = 96,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 48,25 \text{ MPa}$$

$$t = 21,76 \text{ mm}$$

No caso do topo torisférico (caso específico apenas da geometria da garrafa 2 – “Stako”), é necessário efetuar dois cálculos: um para a zona da calote esférica, e outro para a zona da concordância toroidal.

O cálculo da zona da calote esférica é idêntico ao cálculo efetuado para um topo hemisférico:

$$\frac{N_{\varphi}}{r_1} + \frac{N_{\theta}}{r_2} = -P \leftrightarrow \frac{N_{\varphi} + N_{\theta}}{70} = -(-30)$$

Sendo que para o caso particular de geometria esférica:

$$N_{\varphi} = N_{\theta}$$

Logo:

$$N_{\varphi} + N_{\theta} = 30 \times 70 \therefore \begin{cases} N_{\varphi} = \frac{P \times r}{2} = \frac{30 \times 70}{2} = 1050 \text{ N/mm} \\ N_{\theta} = \frac{P \times r}{2} = \frac{30 \times 70}{2} = 1050 \text{ N/mm} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N_{\theta}}{t} \\ \sigma_2 = \frac{N_{\varphi}}{t} \end{cases} \text{ sendo } N_{\varphi} = N_{\theta} \therefore \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{1050}{t}$$

Desta forma, a fim de determinar a espessura necessária à garrafa no topo hemisférico:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm}$$

Sendo que $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_1 = 96,5 \text{ MPa} \leftrightarrow 96,5 = \frac{1050}{t} \leftrightarrow t = 10,88 \text{ mm}$$

Sabendo a espessura da calote esférica pertencente ao fundo toriesférico, é pertinente passar ao cálculo da espessura na zona da concordância toroidal. Para isso efectuou-se o cálculo do raio de curvatura do paralelo, r_0 , e do raio de curvatura tangencial, r_2 :

$$\begin{cases} r_0 = \frac{D - 2r_1}{2} + r_1 \times \sin \varphi \\ r_2 = \frac{D - 2r_1}{2 \sin \varphi} + r_1 \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} r_0 = \frac{110 - 2 \times 40}{2} + 40 \times \sin \varphi \\ r_2 = \frac{110 - 2 \times 40}{2 \sin \varphi} + 40 \end{cases} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \begin{cases} r_0 = 15 + 40 \sin \varphi \\ r_2 = \frac{15}{\sin \varphi} + 40 \end{cases}$$

Substituindo as expressões relativas aos raios de curvatura r_0 e r_2 nas equações de equilíbrio, obtiveram-se as fórmulas de cálculo dos esforços aplicados na zona da concordância toroidal:

$$\begin{cases} \frac{N_\varphi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -P \\ N_\varphi = \frac{P \times r_2}{2} \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} \frac{N_\varphi}{40} + \frac{N_\theta}{\frac{15}{\sin \varphi} + 40} = 30 \\ N_\varphi = \frac{30}{2} \times \left(\frac{15}{\sin \varphi} + 40 \right) \end{cases}$$

Considerando $\varphi=30^\circ$ (ponto de transição da calote esférica para a zona da concordância toroidal):

$$\begin{cases} N_\theta = 262,5 \text{ N/mm} \\ N_\varphi = 1050 \text{ N/mm} \end{cases}$$

sendo que $\sigma_3 = 0$, $\sigma_2 = \sigma_\theta = 262,5/t$ e $\sigma_1 = \sigma_\varphi = 1050/t$

A fim de determinar a espessura necessária à garrafa na concordância toroidal:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm}$$

sendo que $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_1 = 96,5 \text{ MPa} \leftrightarrow 96,5 = \frac{1050}{t} \leftrightarrow t = 10,88 \text{ mm}$$

Relativamente ao cálculo de σ_2 :

$$\sigma_2 = \frac{N_\theta}{t} = \frac{262,5}{10,88} = 24,127 \text{ MPa}$$

E desta forma foram obtidos todos os valores de espessuras através de cálculo teórico pelas equações de equilíbrio para cascas finas, relativamente aos dois reservatórios em estudo, caso ambos fossem fabricados em material metálico (aço forjado com uma tensão admissível de 96,5 MPa).

4.3.3 Dimensionamento pelo MEF

De forma a existir mais um meio de verificação e ficando-se com uma melhor perspetiva dos carregamentos e esforços exercidos em reservatórios metálicos de parede fina, optou-se pela utilização do método dos elementos finitos com auxílio de dois programas informáticos de simulação computacional numérica, *ANSYS* e *SolidWorks Simulation*¹⁰.

As dimensões dos reservatórios para a análise numérica foram especificadas conforme as dimensões dos reservatórios reais, estando dispostas em 4.1. Inicialmente foi necessário criar uma malha de elementos finitos com um refinamento adequado (Figura

¹⁰ Programas de simulação numérica computacional (MEF)

4-11), para ambos os reservatórios, definindo-se igualmente o material constituinte (aço forjado convencional normalmente utilizado) e as espessuras a utilizar em cada zona do reservatório (conforme calculado nos subcapítulos anteriores: 4.3.1 e 4.3.2). Os bocais dos reservatórios foram considerados encastrados, ou seja, infinitamente rígidos em relação ao reservatório de forma a não influenciar nas simulações. Foram efetuadas simulações de carregamento para ambas as geometrias de garrafas com os 300 bar de pressão interna (pressão pretendida para os reservatórios a dimensionar).

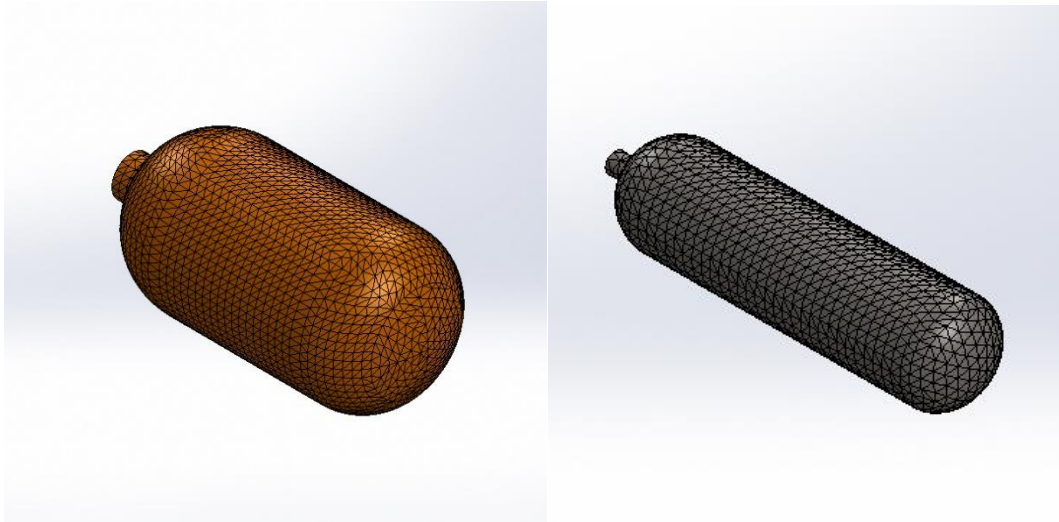


Figura 4-11: Representação da malha de elementos finitos utilizados na garrafa 2 Stako (à esq.) e garrafa 1 ARA (à dir.) em *SolidWorks*, respetivamente

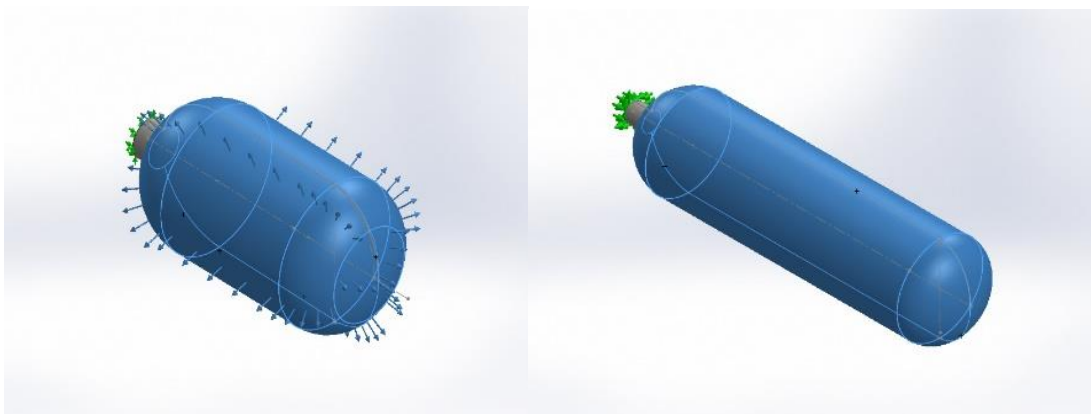


Figura 4-12: Representação de carregamento das garrafas 2 e 1 em *SolidWorks*, respetivamente, com pressão interna de 30MPa

Considerados todos os parâmetros necessários para as simulações numéricas, determinaram-se as tensões principais induzidas em cada reservatório (σ_1 e σ_2).

Relativamente à 1ª tensão principal σ_1 os resultados obtidos foram os seguintes:

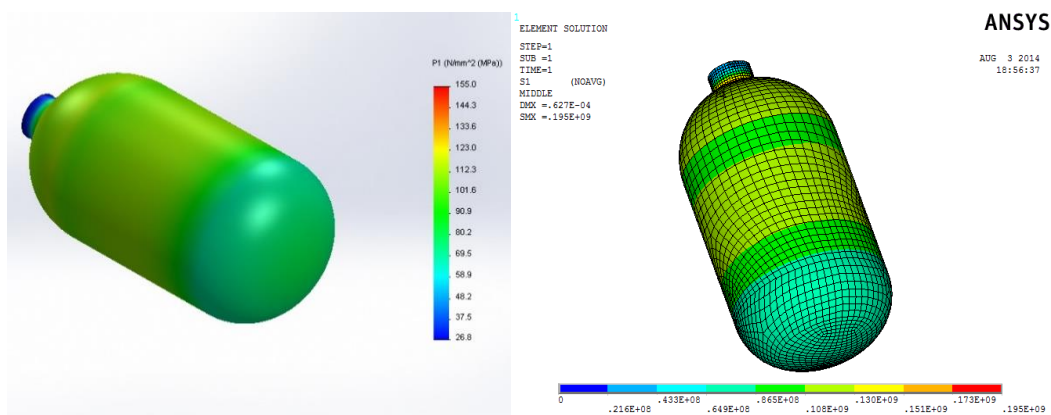


Figura 4-13: Representação da 1ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 2 - "Stako" em SolidWorks e ANSYS, respetivamente

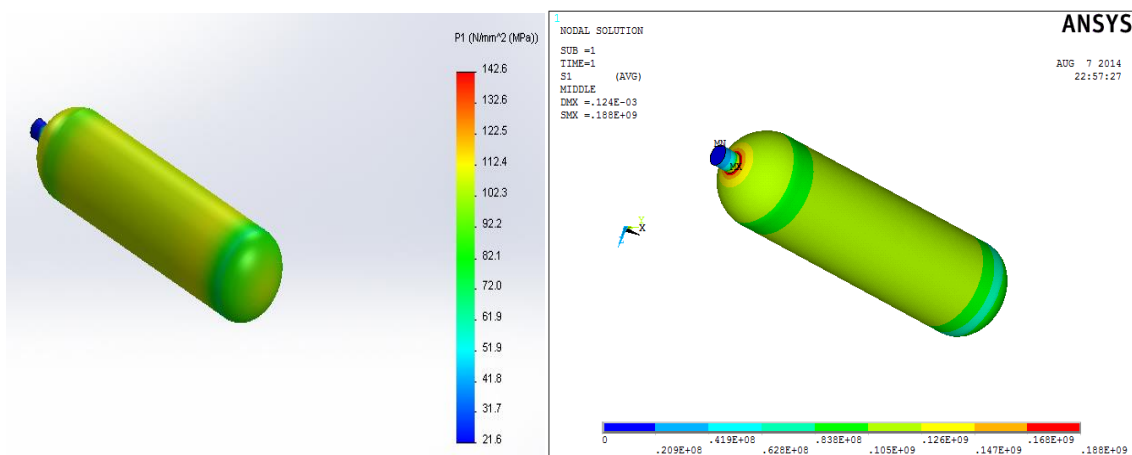


Figura 4-14: Representação da 1ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 1 - "ARA" em SolidWorks e ANSYS, respetivamente

Para a 2ª tensão principal máxima σ_2 , os resultados obtidos foram os seguintes:

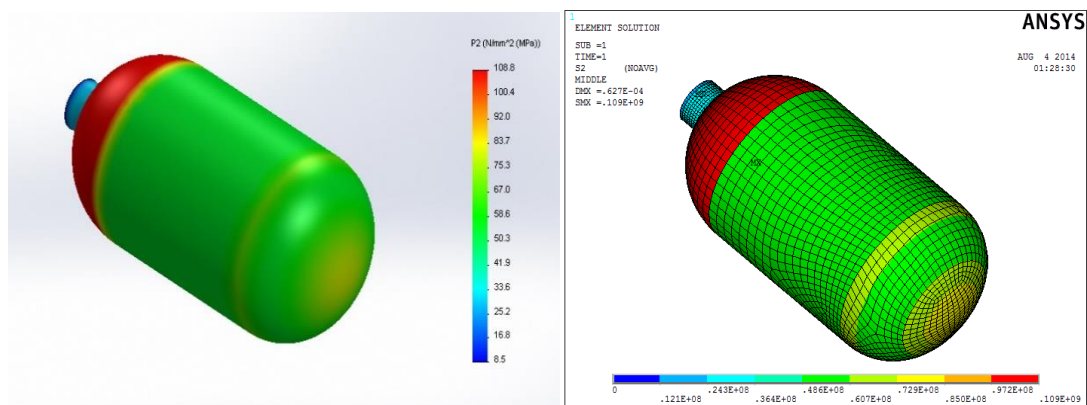


Figura 4-15: Representação da 2ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 2 - "Stako" em Solidworks e ANSYS, respetivamente

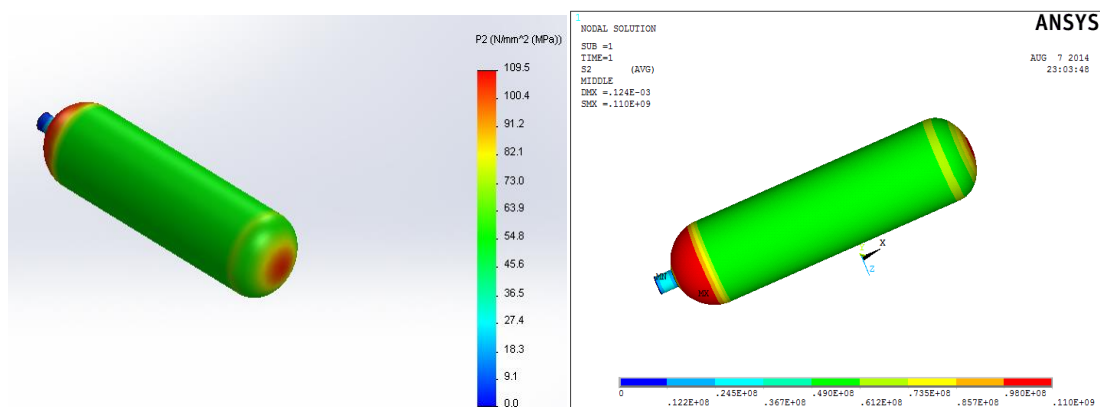


Figura 4-16: Representação da 2ª tensão principal perante o efeito do carregamento da garrafa 1 - "ARA" em Solidworks e ANSYS, respetivamente

4.3.4 Comparação de resultados obtidos

Os resultados dos estudos efetuados para reservatórios submetidos a pressão interna fabricados em material metálico encontram-se resumidos nas tabelas 4-3 e 4-4:

Tabela 4-3: Parâmetros calculados para o carregamento da garrafa 2 - "Stako" a 300 Bar de Pressão interna

	Teórico				Numérico								Norma		
	CIL	HEM	TOR		CIL	HEM	HEM	HEM	TOR				CIL	HEM	TOR
			Cal. Esférica	Conc. Toroidal					Cal. Esférica	Conc. Toroidal	Conc. Toroidal	Conc. Toroidal			
N_{ϕ} (N/mm)	825	825	825	1050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_{θ} (N/mm)	1650	825	825	262,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ_1 (MPa)	96,5	96,5	96,5	96,5	109,27	97,4	111,51	98,7	79,8	89,6	69,4	80,5	-	-	-
σ_2 (MPa)	48,3	96,5	96,5	24,127	54,3	48,2	108,27	96,4	77,8	88,7	59,8	60,04	-	-	-
σ_3 (MPa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t (mm)	17,1	8,55	10,88	10,88	15,2	17,1	7,6	8,55	12,13	10,88	12,13	10,88	15,2	7,6	12,13

Tabela 4-4: Parâmetros calculados para o carregamento da garrafa 1 - "ARA" a 300 Bar de pressão interna

	Teórico			Numérico					Norma		
	CIL	HEM	ELIPT	CIL		HEM		ELIPT	CIL	HEM	ELIPT
N_{ϕ}	1050	1050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_{θ}	2100	1050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ_1	96,5	96,5	-	108,4	96,1	108,6	96,5	94,1	-	-	-
σ_2	48,3	96,5	-	54,3	48,3	102,1	91,87	72,23	-	-	-
σ_3	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
t	21,76	10,88	-	19,35	21,76	9,68	10,88	12,72	19,35	9,68	12,72

De uma forma breve, a Tabela 4-3 e Tabela 4-4 representam todos os resultados obtidos pelas várias metodologias utilizadas. Relativamente aos valores obtidos pelo MEF (ou seja valores numéricos), são valores obtidos através de simulação em *SolidWorks Simulation* (como representado no Anexo A), valores esses posteriormente confirmados em *ANSYS*. A coluna azul representa os valores das simulações efetuadas com as espessuras calculadas pela metodologia teórica, e a coluna cinzenta representa os valores das simulações efetuadas tendo em conta a espessura calculada pela metodologia da norma.

Como também se pode comprovar através da semelhança de resultados obtidos numericamente e teoricamente, tem-se erros inferiores a 5% entre ambas as metodologias, o que garante uma credibilidade bastante razoável.

4.4 RSP fabricados em materiais compósitos

4.4.1 Projeto de reservatórios Isotensóides (1ª Metodologia)

De forma geral existem dois tipos de enrolamento filamentar longitudinal: enrolamento polar (Figura 4-17) e enrolamento helicoidal (Figura 4-18). Ambos os métodos são controlados de acordo com a geometria do reservatório, o enrolamento polar é geometricamente limitado pelas aberturas (necessárias ao apoio do enrolamento e à colocação do bocal) e o comprimento do corpo principal, enquanto o enrolamento helicoidal é bastante mais versátil e pode ser adaptado aos mais variados pormenores da geometria do reservatório (Peters, 2011). No entanto, o enrolamento helicoidal implica equipamentos de enrolamento muito mais sofisticados e dispendiosos.

Normalmente os ângulos de enrolamento são estimados por métodos empíricos e, assim, dependendo dos apoios de enrolamento pode-se calcular qual o melhor ângulo aproximado de enrolamento de acordo com o tipo de enrolamento filamentar pretendido (Peters, 2011):

- **Enrolamento Polar**

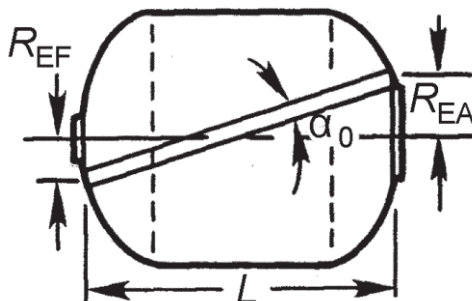


Figura 4-17: Representação esquemática de enrolamento polar (Peters, 2011)

Onde o ângulo de enrolamento pode ser calculado através da seguinte expressão (Peters, 2011):

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(\frac{R_{EF} + R_{EA}}{L} \right)$$

Equação 4-9

Sendo:

α_0 – Ângulo de enrolamento

R_{EF} – Distância desde o centro do bocal menor até ao centro da fita de enrolamento (Raio do bocal menor + Raio de fita de enrolamento);

R_{EA} - Distância desde o centro do bocal maior até ao centro da fita de enrolamento (Raio do bocal maior + Raio de fita de enrolamento);

L – Comprimento do reservatório;

Trata-se de um enrolamento muito simples de se efetuar.

- **Enrolamento helicoidal (geodésico)**

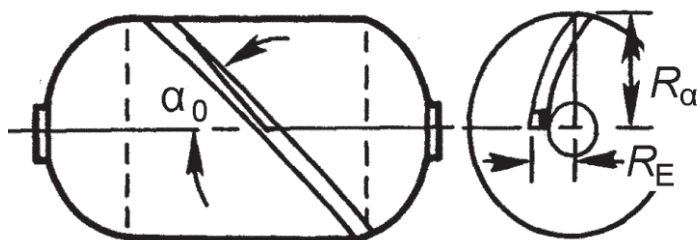


Figura 4-18: Representação esquemática de enrolamento helicoidal geodésico (Peters, 2011)

Onde o ângulo de enrolamento pode ser calculado através da seguinte expressão (Peters, 2011):

$$\alpha_0 = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_\alpha} \right)$$

Equação 4-10

Sendo:

α_0 – Ângulo de enrolamento

R_E - Distância desde o centro do bocal até ao centro da fita de enrolamento (Raio do bocal R_b + Raio de fita de enrolamento $\frac{1}{2} BW$);

R_α - Raio da secção transversal;

BW – Largura da fita de enrolamento

No entanto este caso está limitado ao fato do reservatório ter ambas as aberturas com o mesmo raio.

- **Enrolamento helicoidal (geodésico modificado)**

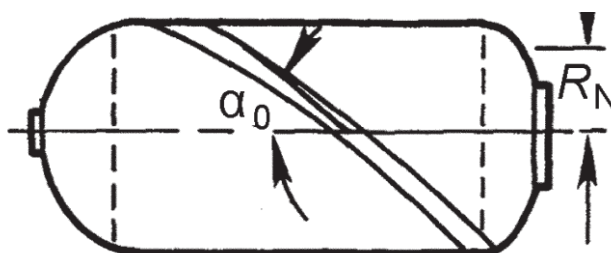


Figura 4-19: Representação esquemática de enrolamento helicoidal geodésico modificado (Peters, 2011)

Neste caso o ângulo de enrolamento ao longo do corpo cilíndrico é arbitrário. No entanto pode-se calcular um ângulo α_1 , função dos raios das aberturas (Peters, 2011):

$$\alpha'_0 = \sin^{-1} \left(\frac{R_E (1 - C \left(\frac{R_N - R_E}{R - R_E} \right))}{R_N} \right)$$

Equação 4-11

Sendo:

α'_0 – Ângulo de enrolamento

R_E - Distância desde o centro do bocal menor até ao centro da fita de enrolamento (Raio do bocal menor R_m + Raio de fita de enrolamento $\frac{1}{2} BW$);

R_N - Raio do bocal maior R_b + largura da fita de enrolamento BW);

BW – Largura da fita de enrolamento

R - Raio do corpo cilíndrico

Onde o fator de correção C pode ser calculado da seguinte forma (Peters, 2011):

$$C = \alpha_{CYL} - \alpha_{AFT \text{ ou } FWT}$$

$$\alpha_{CYL} = \frac{\alpha_{AFT} + \alpha_{FWT}}{2}, e: \begin{cases} \alpha_{AFT} = \sin^{-1} \left(\frac{D_A + BW}{D_{CYL}} \right) \\ \alpha_{FWT} = \sin^{-1} \left(\frac{D_F + BW}{D_{CYL}} \right) \end{cases}$$

Equação 4-12

Em que:

D_A – Diâmetro da abertura maior

D_F – Diâmetro da abertura menor

D_{CYL} – Diâmetro do corpo cilíndrico principal

A denominada “netting analysis” assume que as tensões aplicadas em estruturas fabricadas através de enrolamento filamentar são induzidas exclusivamente pelos filamentos. Além do esforço desempenhado pela resina ser desprezado, também assume que os filamentos não sofrem flexão e apenas suportam carregamento axial (Peters, 2011). Este pressuposto permite o rápido dimensionamento da espessura de um reservatório sob pressão fabricado por enrolamento filamentar. Num reservatório sob pressão, os filamentos helicoidais suportam todo o carregamento longitudinal (Figura 4-20).

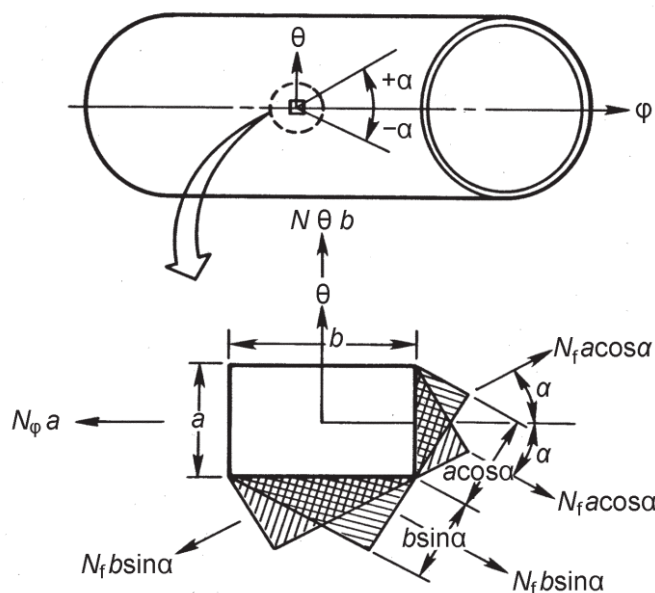


Figura 4-20: Diagrama do corpo livre para um reservatório sob pressão fabricado por enrolamento filamental (Peters, 2011)

Assim, seguindo os pressupostos descritos anteriormente, pode-se calcular a espessura de cada camada, T , pela seguinte expressão (Peters, 2011):

$$T = \frac{T_{REF} \times CSA}{CSA_{REF}}$$

Equação 4-13

Onde:

T – Espessura da camada (mm)

T_{REF} – Espessura de referência de 0,142 mm

CSA – Área da secção transversal da fibra

CSA_{REF} – Área da secção transversal de referência de 0,246 mm²

O projetista normalmente através da sua experiencia anterior tem um valor de referência para a espessura de cada camada. Para os casos seguintes irá pressupor-se uma espessura de camada de aproximadamente 0,01 in. (0,254 mm) como sugerido por (Peters, 2011).

Para um reservatório sob pressão fabricado pela técnica de enrolamento filamental, os esforços aplicados axialmente, N_ϕ , podem ser definidos em função da pressão interna, P , e do raio da secção transversal do corpo cilíndrico principal, R_C (Peters, 2011).

$$N_\phi = FS \times \frac{P \cdot R_C}{2} \times (1 + \varepsilon_{HOOP})$$

Equação 4-14

Pode-se retirar a fração volúmica de fibra da seguinte expressão (Peters, 2011):

$$VF_{heli} = \frac{1}{(1 + \left(\frac{W_R}{1 - W_R}\right) \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_R}\right))}$$

Equação 4-15

Onde:

W_R – Fator de massa da resina (pbw, parts by weight)

ρ_F – Densidade da fibra (g/cm³)

ρ_R – Densidade da resina (g/cm³)

Por outro lado, os esforços circunferenciais do reservatório podem ser dados pela expressão (Peters, 2011):

$$N_\theta = FS \times P \cdot R_c \times (1 + \varepsilon_{HOOP})$$

Equação 4-16

Sendo:

N_θ - Esforço circunferencial

P – Pressão interna

R_c – Raio da secção transversal

A espessura de enrolamento na zona cilíndrica, depende da tensão circunferencial, da tensão longitudinal, da fração volúmica de fibra e da tensão admissível da fibra na zona de enrolamento circunferencial (Peters, 2011).

$$T_{hoop} = \frac{N_\theta - N_\varphi \cdot \tan^2(\alpha_{CYL})}{\frac{VF_{hoop}}{\sigma_{hoop}}}$$

Equação 4-17

4.4.2 Projeto de reservatórios Isotensóides (2ª Metodologia)

Considerando um reservatório composto por uma casca fina sob a forma de revolução, fabricado por enrolamento filamentar. Na zona circunferencial a espessura, e_0 , é muito pequena comparada com o seu raio, R (Figura 4-21). Este reservatório é carregado com a pressão considerada P_0 (Figura 4-21) (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Assume-se neste caso de projeto que a resina não suporta qualquer tipo de carregamento. Na zona cilíndrica do reservatório o enrolamento consiste em ângulos de $\pm\alpha$ em relação ao eixo x de referência (Figura 4-21), e a tensão ao longo da direção l assume um valor uniforme (tratando-se assim de um caso isotensóide).

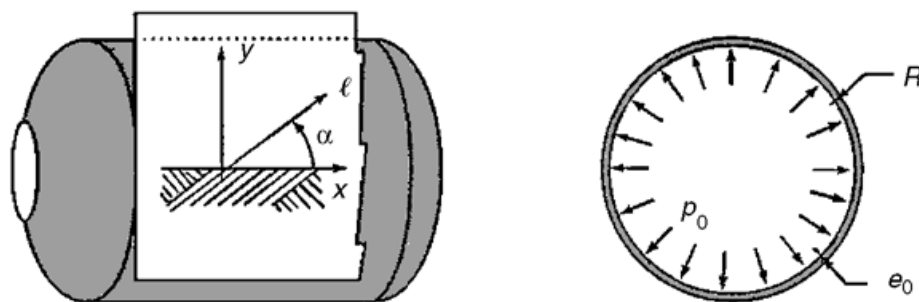


Figura 4-21: Representação de reservatório considerado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

O fato do ângulo de enrolamento ser efetuado apenas em duas direções, α e $-\alpha$ pode se justificar pelo fato de se pretender uma distribuição uniforme de carregamento.

$$N_x = N_y$$

E assim:

$$\overline{N_x} = \overline{N_y} = 0,5$$

Trata-se de um caso típico de carregamento isotrópico em que o Círculo de Mohr é apenas reduzido a um ponto (Figura 4-22).

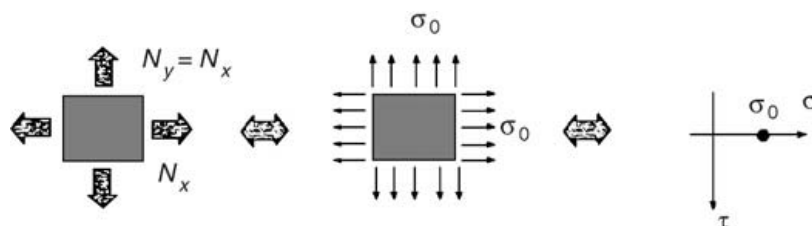


Figura 4-22: Caso de carregamento isotrópico (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Para o caso da concepção do reservatório em questão pode-se considerar a Tabela 4-5, e sendo que pretende uma distribuição mais uniforme possível de carregamentos ter-se-ia:

$$N_x = N_y$$

E assim:

$$\overline{N_x} = \overline{N_y} = 0,5$$

Deste modo surge assim um padrão de enrolamento do tipo (Tabela 4-5):

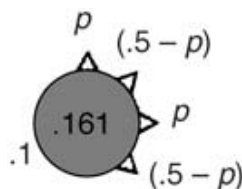


Figura 4-23: Padrão tipo de enrolamento (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Onde a variável “ p ” pode assumir valores inferiores ou iguais a 0,5.

Considerando $p=0$, ter-se-ia um padrão de enrolamento de dois ângulos simétricos (50% das fibras orientadas no sentido α , e restantes 50% orientadas no sentido $-\alpha$), caso que também se verifica no caso específico da garrafa padrão (garrafa 2 – “Stako”) utilizada durante esta dissertação para estudo.

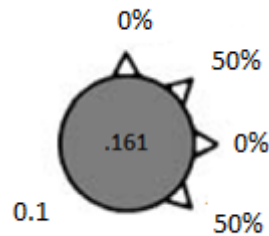
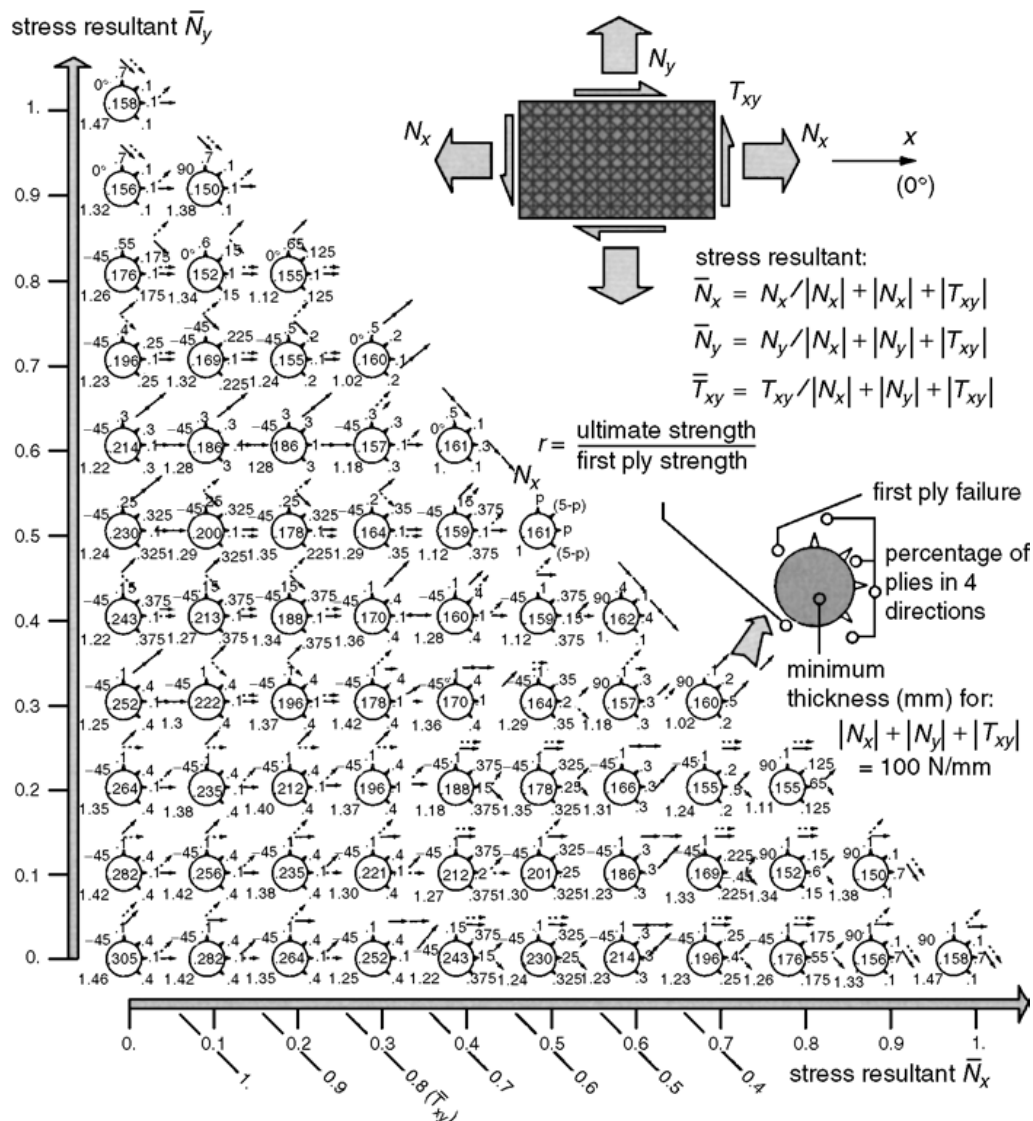


Figura 4-24: Padrão tipo de enrolamento para o reservatório a considerar, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Tabela 4-5 - Otimização da composição de um laminado Carbono/Epoxy (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)



Através das equações de equilíbrio para cascas finas na direção axial da casca com geometria cilíndrica, pode-se concluir que (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$P_0 \times \pi R^2 = 2\pi R e \sigma_{ox} \leftrightarrow \sigma_{ox} = \frac{P_0 R}{2e}$$

Equação 4-18

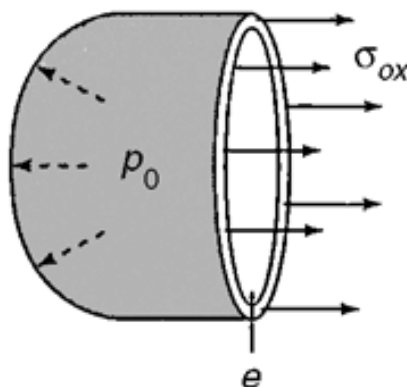


Figura 4-25: Representação de tensões axiais pela ação de uma pressão interna (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Considerando agora as equações de equilíbrio ao longo da direção circunferencial (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$P_0 \times 2R \times l = 2 \times e \times l \times \sigma_{oy} \leftrightarrow \sigma_{oy} = \frac{P_0 R}{e}$$

Equação 4-19

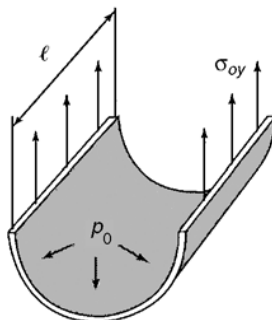


Figura 4-26: Representação de tensões circunferenciais pela ação de uma pressão interna (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

Pretende-se assim calcular a tensão exercida ao longo da direção das fibras, σ_1 . Para tal, pode-se considerar o Círculo de Mohr exemplificado na Figura 4-27, representativo das tensões aplicadas no reservatório, e através dele fazer as deduções de forma a chegar à expressão de σ_1 .

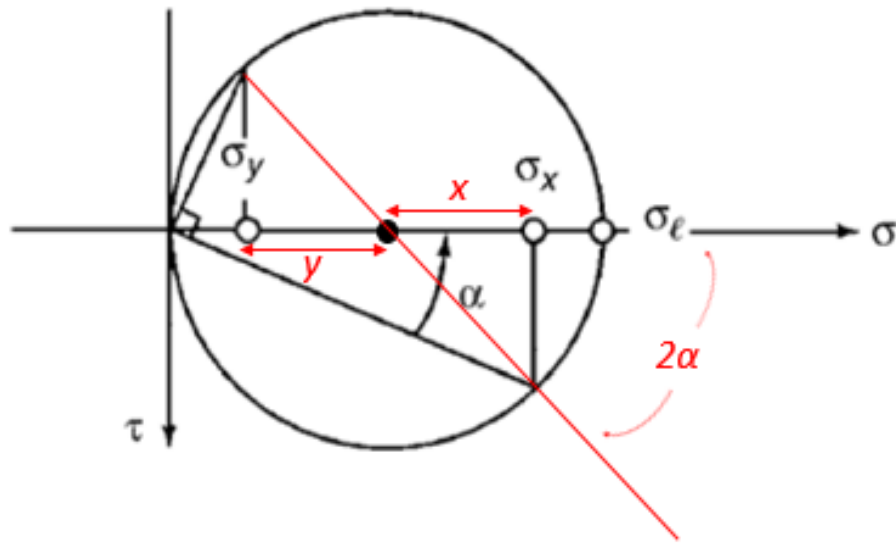


Figura 4-27: Círculo de Mohr representativo das tensões aplicadas no reservatório, adaptado de (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)

De acordo com a Figura 4-27 tem-se:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma_l}{2} + x \\ \cos 2\alpha = \frac{x}{\frac{\sigma_l}{2}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma_l}{2} + \frac{\sigma_l}{2} \times \cos 2\alpha \\ x = \frac{\sigma_l}{2} \times \cos 2\alpha \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma_l}{2} (1 + \cos 2\alpha) \\ \text{—} \end{cases}$$

$$\sigma_x = \sigma_l \cos^2 \alpha$$

Equação 4-20

$$\begin{cases} \sigma_y = \frac{\sigma_l}{2} - y \\ \cos 2\alpha = \frac{y}{\frac{\sigma_l}{2}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_y = \frac{\sigma_l}{2} - \frac{\sigma_l}{2} \times \cos 2\alpha \\ y = \frac{\sigma_l}{2} \times \cos 2\alpha \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_y = \frac{\sigma_l}{2} (1 - \cos 2\alpha) \\ \text{—} \end{cases}$$

$$\sigma_y = \sigma_l \sin^2 \alpha = \sigma_l \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)$$

Equação 4-21

Pode-se concluir assim que:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{P_0 R}{2e} \\ \sigma_y = \frac{P_0 R}{e} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_l \cos^2 \alpha = \frac{P_0 R}{2e} \\ \sigma_l \sin^2 \alpha = \frac{P_0 R}{e} \end{cases}$$

Equação 4-22

Assim efetuando-se a divisão de um termo pelo outro ter-se-ia:

$$\frac{\sigma_l \cos^2 \alpha}{\sigma_l \sin^2 \alpha} = \frac{\frac{P_0 R}{2e}}{\frac{P_0 R}{e}} \leftrightarrow \tan^2 \alpha = 2$$

Equação 4-23

Surgindo assim que:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \leftrightarrow \alpha = 54,7^\circ$$

Assim, a tensão ao longo das fibras poderá ser calculada pela seguinte expressão final:

$$\sigma_l \sin^2 \alpha = \frac{P_0 R}{e} \leftrightarrow \sigma_l \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2 = \frac{P_0 R}{e} \leftrightarrow$$

$$\sigma_l = \frac{3}{2} P_0 \frac{R}{e}$$

Equação 4-24

Por fim, com a expressão desta tensão ao longo das fibras, pode-se ainda proceder ao cálculo da espessura mínima de projeto do reservatório:

$$e = \frac{3}{2} \frac{P_0 R}{\sigma_{l_{ruptura}}}$$

Equação 4-25

4.4.3 Aplicação do projeto de materiais compósitos ao dimensionamento de reservatório sob pressão tipo “ARA”

Considerando a análise estrutural para um reservatório sob pressão com os parâmetros da garrafa 1 – “ARA” referidos no parágrafo 4.1, e considerando como material constituinte do projeto:

- **Reforço:** PAN Carbon (densidade $\rho=1,7 \text{ g/cm}^3$; módulo de elasticidade $E=294 \text{ GPa}$)
- **Matriz:** Epoxy (densidade $\rho=1,2 \text{ g/cm}^3$; módulo de elasticidade $E=4500 \text{ MPa}$)

É assim pertinente efetuar o cálculo da espessura de cada camada de acordo com a Equação 4-13 (Peters, 2011):

$$T_{PLY} = \frac{T_{REF} \times CSA}{CSA_{REF}} = 0,142 \times \frac{0,4393}{0,246} = \mathbf{0,254mm}$$

De forma a efetuar os cálculos dos respetivos carregamentos, é necessário calcular o fator ε_{HOOP} :

$$\varepsilon_{HOOP} = \frac{\sigma_{HOOP}}{E_{FIBER}}$$

Sendo que o módulo de elasticidade da fibra é conhecido e que o valor da tensão admissível da fibra é de 5123 MPa (Peters, 2011):

$$\varepsilon_{HOOP} = \frac{5123}{294\,000} = \mathbf{0,0174}$$

Considerando um fator de segurança de 1,25 (Peters, 2011, p. 119), e considerando uma pressão interna de 300bar (30 MPa) e raio de 0,7m, procede-se assim ao cálculo do carregamento axial do reservatório de acordo com a Equação 4-14:

$$\begin{aligned} N_{\varphi} &= FS \times P \times Rc \times \frac{(1 + \varepsilon_{HOOP})}{2} = 1,25 \times 30 \times 0,7 \times \frac{1 + 0,0174}{2} = \\ &= \mathbf{1334,8\,N/mm} \end{aligned}$$

Sendo o fator “ $1 + \varepsilon_{HOOP}$ ” uma correção á utilização do raio interior incluindo a extensão circunferencial.

Passando agora pelo enrolamento polar, o carregamento polar/circunferencial do reservatório pode ser obtido pela Equação 4-16:

$$\begin{aligned} N_{\theta} &= FS \times P \times Rc \times (1 + \varepsilon_{HOOP}) = 1,25 \times 30 \times 0,7 \times (1 + 0,0174) = \\ &= \mathbf{2669,6\,N/mm} \end{aligned}$$

Para calcular a fração volúmica de fibra e/ou resina, faz-se uso da Equação 4-15 (Peters, 2011):

$$V_F = \frac{1}{1 + \frac{W_R}{1 - W_R} \times \frac{\rho_f}{\rho_r}} = \frac{1}{1 + \frac{0,32}{1 - 0,32} \times \frac{1,73}{1,202}} = \mathbf{0,596 \approx 60\%}$$

Com o auxílio da Tabela 4-5 poder-se-á calcular valores de referência para a otimização do uso de uma fibra de carbono com uma matriz epoxídica.

Esta tabela encontra-se formulada para um valor de $V_F=60\%$, com um mínimo de 10% de fibras em cada direção (0° , 90° , $+45^\circ$, -45°) (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Com os carregamentos resultantes dos cálculos anteriores: $N_\varphi = 1334,8 \text{ N/mm}$; $N_\theta = 2669,6 \text{ N/mm}$; E sendo que se considera não existir tensões de corte ($\tau_{xy} = 0$),

Pode-se calcular os fatores:

- $\overline{N}_\varphi = \frac{N_\varphi}{N_\varphi + N_\theta + \tau_{xy}} = \frac{1334,8}{1334,8 + 2669,6 + 0} = 0,33(3)$
- $\overline{N}_\theta = \frac{N_\theta}{N_\varphi + N_\theta + \tau_{xy}} = \frac{2669,6}{1334,8 + 2669,6 + 0} = 0,66(6)$
- $T_{xy} = 0$

Entrando com os fatores calculados, através do carregamento considerado, na Tabela 4-5 obtém-se:

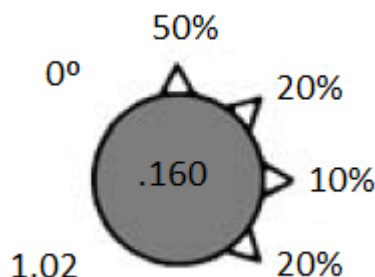


Figura 4-28: Resultados obtidos através da tabela 3

Que pode ser traduzido da seguinte forma (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

- Otimização da composição do laminado:
 - 50% de fibras com 90° ;
 - 20% de fibras com $+45^\circ$;
 - 10% de fibras com 0° ;
 - 20% de fibras com -45° ;
- Espessura critica do laminado de 0,160 mm quando a soma aritmética das três tensões (N_φ , N_θ , T_{xy}) são de 100 N/mm;
- Para estas condições, a primeira falha ocorre nas camadas que se encontram a 0° ;
- Considerando o fator $r=1.02$, pode-se obter a tensão de rutura do laminado:
 - $N_{\varphi r} = 1,02 \times 1334,8 = 1361,5 \text{ N/mm}$
 - $N_{\theta r} = 1,02 \times 2669,6 = 2722,99 \text{ N/mm}$
 - $T_{xyr} = 0 \text{ N/mm}$

- Sendo a soma dos carregamentos: $N_\varphi + N_\theta + T_{xy} = 1334,8 + 2669,6 + 0 = 4004,4 \text{ N/mm}$; A espessura espectável do laminado poderá ser obtido da seguinte forma:

$$t = \frac{0,16 \times 4004,4}{100} = 6,407 \text{ mm}$$

Espessura essa que mantendo um fator de segurança como considerado já anteriormente de 1,25, poderá chegar aos 8 mm.

Seguindo outra via de cálculo de espessura espectável, mas para um ângulo de enrolamento, α_{CYL} , de $26,5^\circ$ sugerido como ângulo de enrolamento de referência e com uma tensão admissível, σ_{ADM} , de 5123 MPa (ou seja, condições ótimas) como já foi considerado anteriormente teremos:

- De acordo com Equação 4-17 (Peters, 2011):

$$t_{HOOP} = \frac{\frac{N_\theta - N_\varphi \times \tan^2(\alpha)}{V_F}}{\sigma_{ADM}} = \frac{\frac{2669,6 - 1334,8 \times \tan^2(26,5)}{0,6}}{5123} = 0,76 \text{ mm}$$

- De acordo com Equação 4-25 (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$t = \frac{3}{2} \times \frac{P \times R}{\sigma_{ADM}} = \frac{3}{2} \times \frac{30 \times 70}{5123} = 0,615 \text{ mm}$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, mas fazendo uso dos dados de tensão de rutura obtidos dos ensaios efetuados aos provetes de material compósito, conforme detalhado no capítulo 5.1 ($\sigma_R=323 \text{ MPa}$, aplicando um fator de segurança de 1,05 teremos $\sigma_{ADM}=308 \text{ MPa}$) teremos como espessuras esperadas de laminado:

- De acordo com (Peters, 2011):

$$t_{HOOP} = \frac{\frac{N_\theta - N_\varphi \times \tan^2(\alpha)}{V_F}}{\sigma_{ADM}} = \frac{\frac{2669,6 - 1334,8 \times \tan^2(26,5)}{0,6}}{308} = 12,6 \text{ mm}$$

- De acordo com (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$t = \frac{3}{2} \times \frac{P \times R}{\sigma_{ADM}} = \frac{3}{2} \times \frac{30 \times 70}{308} = 10,2 \text{ mm}$$

Com os valores de espessura espectáveis calculados, torna-se importante também saber a largura da fita de enrolamento (BW), e o número de enrolamentos que será necessário fazer em cada zona do reservatório (N_{TOWS}).

A largura da fita de enrolamento encontra-se compreendida entre os seguintes valores (Peters, 2011):

$$D \times 0,02 \leq BW \leq D \times 0,04 \leftrightarrow 140 \times 0,02 \leq BW \leq 140 \times 0,04$$

Ou seja:

$$2,8 \text{ mm} \leq BW \leq 5,6 \text{ mm}$$

Sendo:

$$N_{TOWS} = \frac{BW \times T_{PLY}}{CSA} \begin{cases} \frac{2,8 \times 0,254}{0,4393} = 1,62 \\ \frac{5,6 \times 0,254}{0,4393} = 3,24 \end{cases}$$

De ambos os valores escolhe-se o maior arredondado à unidade, sendo que o número de enrolamentos em cada zona será de 3 enrolamentos. Dado que o número de enrolamentos já é conhecido, e assume o valor de 3 enrolamentos, pode-se então calcular o valor correto da largura da fita de enrolamento.

Para isso é necessário calcular o número de enrolamentos existente por unidade de medida:

$$TPI = \frac{T_{PLY}}{CSA} = \frac{0,254}{0,4393} = 0,578 \text{ tow/mm}$$

Equação 4-26

Sendo assim, visto o número de enrolamentos em cada zona ser 3, tendo 0,578 enrolamentos por cada milímetro, a largura da fita enrolamento será:

$$BW = \frac{N_{TOWS}}{TPI} = \frac{3}{0,578} = 5,19 \text{ mm}$$

Equação 4-27

CAPÍTULO 5

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

5.1 Ensaaios de Tração

5.2 Ensaaios de Pressão Interna

5 Métodos Experimentais

5.1 Ensaaios de tração

As propriedades mecânicas em tração são de grande importância de estudo, dada a grande semelhança ao tipo de esforços que lhes é exigido que suportem em condições de serviço. Desta forma é possível também retirar valores de propriedades mecânicas de grande importância tais como o módulo de elasticidade (E) e a sua resistência – Tensão de rutura (σ_{rut}).

As resistências mecânicas em tração e flexão são obtidos através de curvas tensão/deformação obtidas nos ensaios realizados. Durante estes ensaios são aplicados esforços ao material, sob condições de velocidade de deformação controlada, até que se verifique a rotura do material ou que se atinja um valor máximo pré-estabelecido de deformação (Pereira, 2007).

Todos os provetes para os ensaios de tração foram extraídos de uma garrafa semelhante à Garrafa 2 – Stako, *Proвете de fibra de carbono (Especificação do material desconhecida), fabricado por “STAKO Sp.j. Poland”, referência “H1071.100000P4CA”, número de série “922/859”, prazo de certificação até Maio de 2014*, extraídos com as dimensões e geometrias concordantes com o indicado na norma (ASTM D3039/D 3039M, 2002). Os provetes, de forma retangular, possuíam uma largura de 25mm (tal como indicado na norma), no entanto, dada a geometria e dimensões da garrafa de onde foram extraídos os provetes, apenas foi possível possuírem um comprimento de 15mm (menos 10mm do que é indicado na norma). Os ensaios foram realizados numa máquina servo-hidráulica DARTEC de 100kN de capacidade máxima (Figura 5-1), com aquisição de dados por computador.

Antes de se aplicar qualquer carga, foi sempre medida a espessura e largura dos provetes em 3 zonas distintas da sua área, tal como sugerido pela norma.

A velocidade de aplicação de carga ao provete deve ser escolhida dentro de um intervalo de valores fornecidos pelas normas técnicas, de acordo com o comportamento do polímero e da geometria do provete ensaiado.

Os provetes com as dimensões já mencionadas, foram ensaiados a uma temperatura aproximada de 23°C, com uma velocidade de carregamento entre 0,1 e 0,2 kN/s, que se encontrava completamente de acordo com os parâmetros sugeridos pela norma.

Para se proceder ao ensaio, colocou-se cada provete nas amarras de fixação com uma superfície abrasiva entre o provete e a amarra (Figura 5-2), tal como sugerido na Norma (ASTM D3039/D 3039M, 2002), e através de controlo computacional, exerceu-se carga nos provetes até estes atingirem a rutura.



Figura 5-1: Máquina servo-hidráulica DARTEC

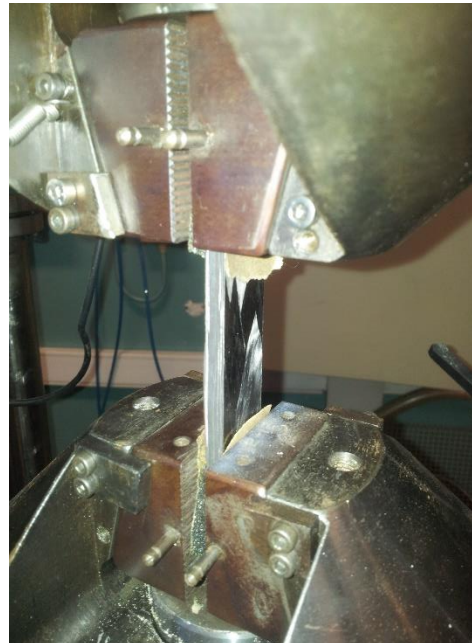


Figura 5-2: Colocação de provete nas amarras

É importante referir que o equipamento de ensaio à tração teve algumas falhas de arranque na fase de aquecimento. No decorrer dos ensaios ocorreu mais uma situação anormal de funcionamento em que o equipamento começou a trabalhar em alguns momentos à compressão e só após alguns momentos de compressão iniciou o processo de tração pretendido. Apesar de terem sido recolhidos dados relativos a essa situação, o provete foi considerado inválido para questões de cálculo.

Foram realizados ao todo 8 ensaios, no entanto, dado o fato de se ter verificado que em 3 dos ensaios, a fratura se deu numa zona afastada de onde se encontrava aplicada a carga (possivelmente por falha de operação da máquina) apenas 5 ensaios foram considerados válidos e considerados para os cálculos.

Em 4 dos ensaios foi utilizado extensómetros de pinças ou transdutores (Figura 5-3), que têm a vantagem da sua fácil aplicação, e de serem reutilizáveis. Todavia, são suscetíveis de escorregamento, pelo que se optou pela utilização de um extensómetro colado de roseta (Figura 5-3) associado a uma ponte extensométrica num último provete, de forma a confirmar a validade de todos os resultados obtidos nos ensaios anteriores.



Figura 5-3: Provete a ser ensaiado com transdutor

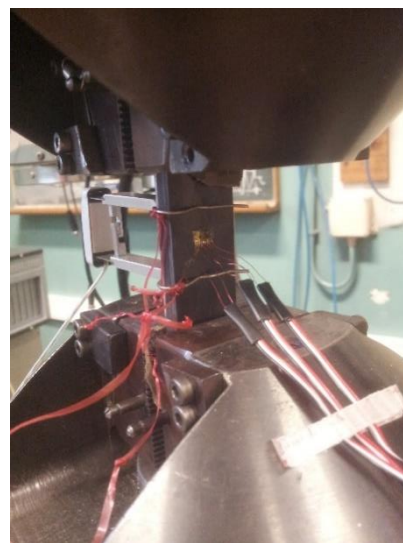


Figura 5-4: Provete a ser ensaiado com extensómetro colado

Antes da colocação do extensómetro, efetuou-se uma limpeza bastante meticulosa à zona de colocação do mesmo de forma a evitar a existência de quaisquer fatores que influenciassem as leituras. Inicialmente efetuou-se limpeza com uma compressa devidamente esterilizada, após isso efetuou-se uma limpeza com um neutralizador, e posteriormente colocou-se condicionador na zona de aplicação do extensómetro. Após verificados todos os parâmetros de limpeza, foi colocado o extensómetro, com uma cola universal de cianoacrilato, ficando protegido com fita-cola, e a secar durante pelo menos 48 horas.



Figura 5-5: Condicionador, Neutralizador e Cola utilizada, respetivamente

Os extensómetros de rosetas utilizados, de marca “Vishay Micro-Measurements, com um “gage factor” a 24°C de $120.0\Omega \pm 0.6\%$ (Figura 5-6).

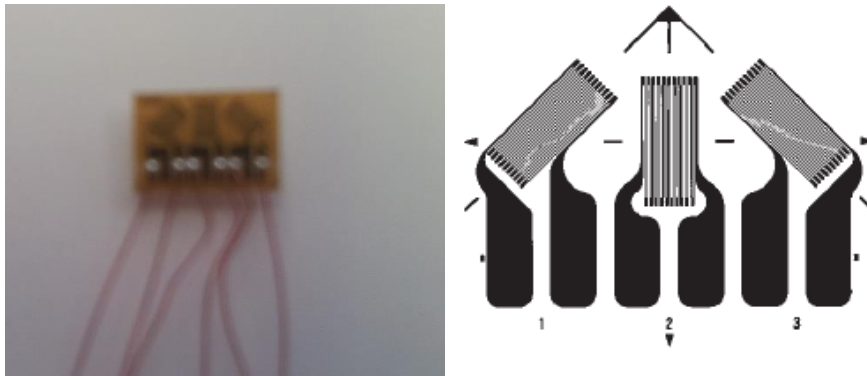


Figura 5-6: Extensómetro de rosetas

Visto um extensómetro de rosetas possuir 3 canais de medição em 3 direções distintas (ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3) torna-se pertinente efetuar o cálculo das extensões nas direções principais (Figura 5-7).

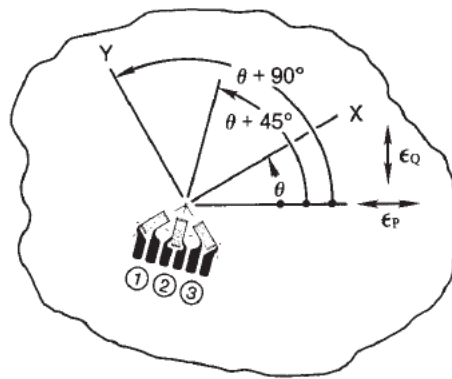


Figura 5-7: Representação das extensões principais (Tech Note TN-515, 2010)

Pode-se obter as extensões principais e o ângulo principal de alongamento através do seguinte cálculo (Tech Note TN-515, 2010):

$$\epsilon_P = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$$

Equação 5-1

$$\epsilon_Q = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$$

Equação 5-2

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right)$$

Equação 5-3

Além destas expressões, podemos chegar às extensões principais também através do círculo de Mohr representativo para o caso (Figura 5-8).

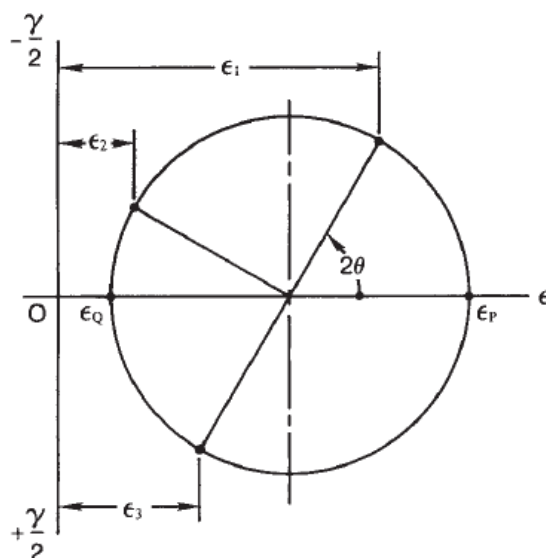


Figura 5-8: Círculo de Mohr representativo das extensões medidas pela roseta de extensômetro (Tech Note TN-515, 2010)

À medida que o provete é colocado sob carga é possível calcular a tensão nominal (σ) pela razão entre a força de tração aplicada ao provete (F), e a área da secção transversal inicial do provete (A_0) (ASTM D3039/D 3039M, 2002):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Equação 5-4

A resistência à tração nominal é a tensão sob a tração nominal máxima suportada pelo provete durante o ensaio de tração (de Magalhães, de Moraes, & Moura, 2011). O comprimento inicial do provete (L_0), irá sofrer uma variação, denominada de alongamento (ΔL), proveniente da carga que lhe é submetida (ASTM D3039/D 3039M, 2002):

$$\Delta L = L - L_0$$

Equação 5-5

Define-se a deformação em cada instante, ϵ_t , como a razão entre o alongamento (ΔL) e o comprimento original entre as mesmas marcas (L_0) (ASTM D3039/D 3039M, 2002):

$$\epsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Equação 5-6

O módulo de elasticidade em tração determina-se pelo quociente entre a variação da tensão e a deformação correspondente (ASTM D3039/D 3039M, 2002):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Equação 5-7

Através das equações e das metodologias referidas anteriormente e efetuados os ensaios, obteve-se vários gráficos Tensão-Deformação para os diferentes ensaios (Figura 5-9), que se encontram bastante semelhantes ao que a norma (ASTM D3039/D 3039M, 2002) sugere. Os restantes dados e gráficos para os restantes ensaios podem ser consultados no Anexo B. Pode-se também verificar resumidamente os resultados pretendidos, e respetivas referências estatísticas (média, $\bar{x}$, e desvio padrão, δ) na Tabela 5-1.



Figura 5-9: Gráfico Tensão-Deformação do ensaio 5 (com extensómetro)

Tabela 5-1: Resultados obtidos através dos ensaios

	<i>E (GPa)</i>	<i>Ponto de transição</i>		<i>Ponto rutura</i>	
		σ (MPa)	ε (µε)	σ (MPa)	ε (µε)
<i>Ensaio 1</i>	41,4	263	6000	308	14313
<i>Ensaio 2</i>	38	265	6959	318	17278
<i>Ensaio 3</i>	53,6	271	5429	322	17875
<i>Ensaio 4</i>	50,2	270	5373	356	17834
<i>Ensaio 5</i>	48,1	266	5759	307	11028
$\bar{x} \pm \delta$	48,1±6,1	266±3,4	5759±642	318±19	17278±2000

exercendo funções de proteção química entre o fluido armazenado e o conjunto fibra/matriz.



Figura 5-11: Provete retirado do liner após ensaio

5.2 Ensaio de Pressão interna

Além dos ensaios de tração decidiu-se também efetuar ensaios de pressão interna na garrafa modelo (Garrafa 2 – “Stako”), visto ser o ensaio que mais se assemelhava à situação prática de uso que estes reservatórios se submetem.

Para tal, foi necessário providenciar uma fonte de pressão para carregar a garrafa Stako. Por questões de segurança e facilidade de meios optou-se por efetuar o carregamento através do transvase de uma garrafa de mergulho carregada a 200 bar (Figura 5-12), com auxílio de um adaptador “Fill-Station” (Figura 5-13). Este carregamento poderia ser facilmente controlado pela válvula da garrafa e por uma válvula de purga que o adaptador possuía.



Figura 5-12: Garrafa de mergulho 200 bar



Figura 5-13: Adaptador "Fill-Station"

Usando a mesma metodologia dos ensaios de tração para o ensaio 5, colaram-se 2 extensômetros de rosetas, um no corpo cilíndrico principal da garrafa, e outro no fundo copado toriesférico, permitindo assim as leituras de deformação durante o carregamento do reservatório nas duas zonas distintas (Figura 5-14).

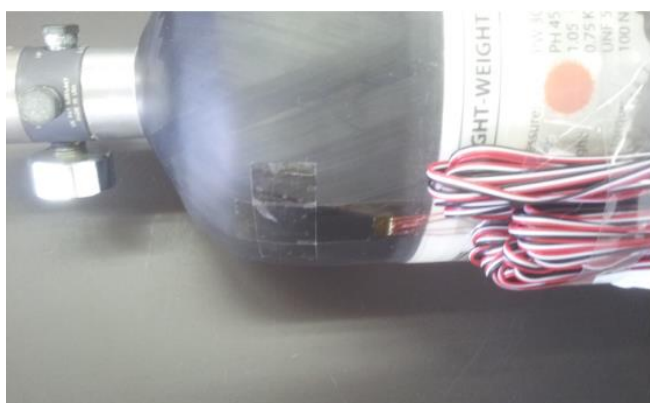


Figura 5-14: Extensômetro em corpo cilíndrico principal e extensômetro em fundo copado toriesférico, respectivamente

A garrafa modelo foi carregada de forma controlada em intervalos de 200 Psi, até um máximo de 2400 Psi (Equivalente a 165 Bar). A cada patamar de carregamento efetuavam-se as leituras dos 6 canais (3 canais de cada extensômetro) disponíveis na ponte de extensometria (Figura 5-15). O aparato de carregamento encontra-se demonstrado na Figura 5-16.

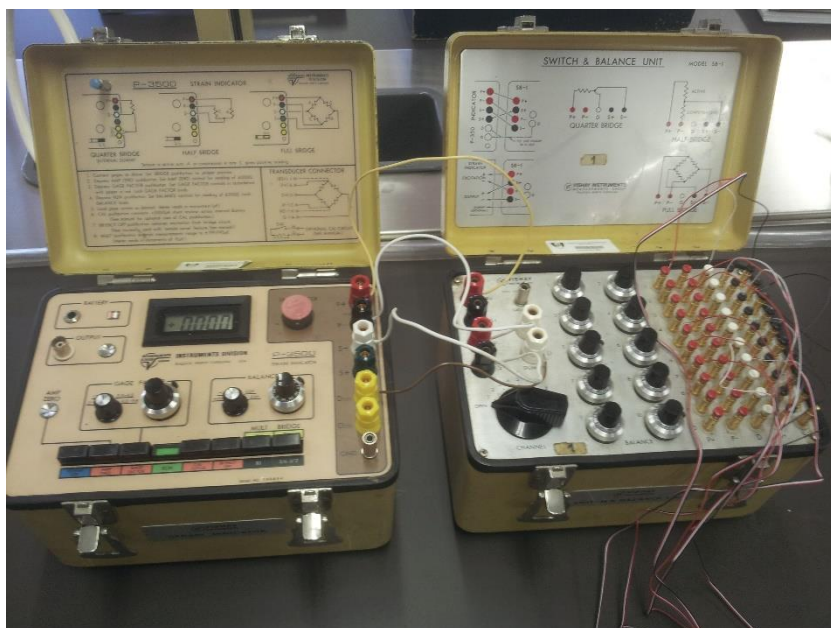


Figura 5-15: Ponte de extensometria utilizada



Figura 5-16: Aparato de carregamento de botija Stako por transvase de botija de mergulho

Foram efetuados dois ensaios de carregamento e descarregamento, respetivamente, da garrafa, sendo os resultados representados na Figura 5-17 e nas tabelas e figuras inseridas no Anexo B.

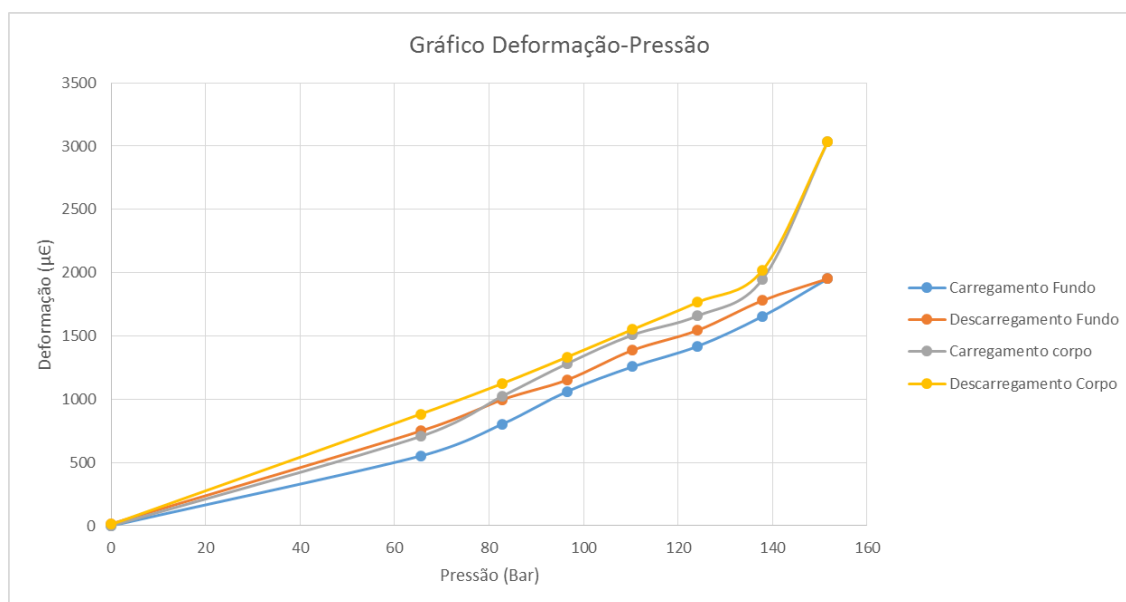


Figura 5-17: Gráfico Deformação-Pressão de ensaio de pressão interna

Durante o ensaio de pressão interno, com auxílio de uma câmara de imagem térmica (CIT), verificou-se a variação de temperatura durante o carregamento e descarregamento.

Tal como está representado nas tabelas no Anexo B referentes a este ensaio, a temperatura aumenta ao longo do carregamento, podendo chegar a temperaturas na ordem dos 40°C, mas depressa se dissipa durante o descarregamento. De acordo com as características do coeficiente de dilatação térmica da fibra de carbono, que tem valores baixos (cerca de $0,02 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Gay, Hoa, & Tsai, 2003)), conclui-se que a elevação da temperatura durante o carregamento não tem qualquer influência nas características relativas à resistência mecânica e performance do reservatório.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

6.1 Simulação de provete submetido a tração

6.2 Simulação de Garrafa *Stako* submetida a Pressão Interna

6.3 Simulação de ARA, fabricada em material compósito, submetida a pressão interna

6 Simulações Numéricas

6.1 Simulação de Provete submetido a tração

De forma a poder considerar a simulação pelo MEF para materiais compósitos, considerou-se relevante a simulação do provete, fabricado em material compósito, utilizado nos ensaios de tração, simulando a situação equivalente ao ensaio, mas utilizando o MEF para a análise.

Para tal, efetuou-se a simulação do provete em *SolidWorks Simulation* e em *ANSYS*, com as dimensões do provete real, estabelecendo uma das arestas como estando apoiada segundo a direcção longitudinal e vertical (deslocamento nulo) e a outra das arestas sujeita a um carregamento à tração de 21 kN (Valor de referência para possibilitar a comparação com dados do ensaio) (Figura 6-1). Para além das condições de fronteira referidas, optou-se por indicar uma das superfícies do provete como apoiada segundo a direcção vertical, de modo a evitar qualquer carregamento de flexão; simultaneamente, considerou-se deslocamento transversal nulo em dois vértices do provete simulado, de modo a evitar movimento de corpo rígido segundo a direcção transversal (mas permitindo a redução de área decorrente da aplicação da força de tracção).

O provete foi modelado com 36 camadas de 0,13 mm de espessura em cada camada (visto o provete real ter uma espessura de 4,7 mm obtido pela medição efetuada numa mesa de coordenadas, e a espessura de camada ser sugerida de 0,13 mm), com um enrolamento simétrico de 26,5° e -26,5° (valores já discutidos e fundamentados em 4-Projeto de RSP). O modelo do material do provete definiu-se como ortotrópico, tendo por base os valores indicados na tabela Tabela 3-6.

Os resultados obtidos foram os seguintes: Tabela 6-1 e Figura 6-1 a 6-3. Pode-se assim, através da sua análise, efetuar uma comparação com os dados obtidos pelo ensaio 5 de tração, no qual se tinha instalado o extensómetro de roseta, concluindo-se assim que tanto para os valores de extensão principal como para os valores das tensões e alongamento resultantes da aplicação da força de 21 kN existe correspondência com os valores obtidos pelo ensaio experimental. As restantes simulações em *ANSYS* encontram-se dispostas em ANEXO C.

Tabela 6-1: Comparação de resultados obtidos

	$\varepsilon_P (\mu\epsilon)$	$\varepsilon_Q (\mu\epsilon)$
Extensometria	3195,4	-4832,4
	3268,5	-4942,5
	3268,5	-5179,9
Média, $\bar{x}$	3244,1	-4984,9
MEF	3111	-5032
	3111	-5032
	3112	-5032
Média, $\bar{x}$	3111,3	-5032
Erro (%)	4	0,9

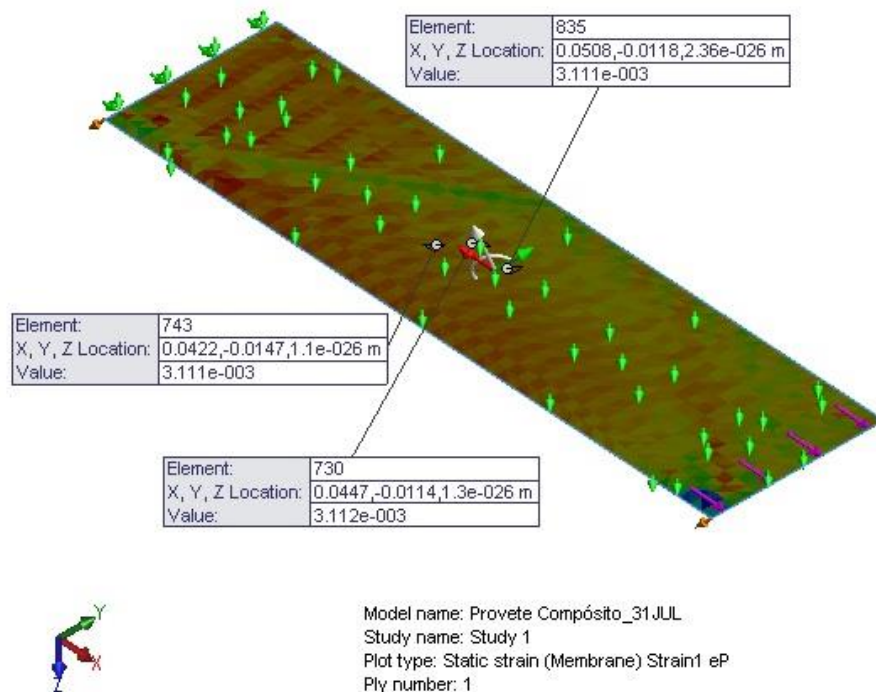


Figura 6-1: Representação de ε_P em provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN

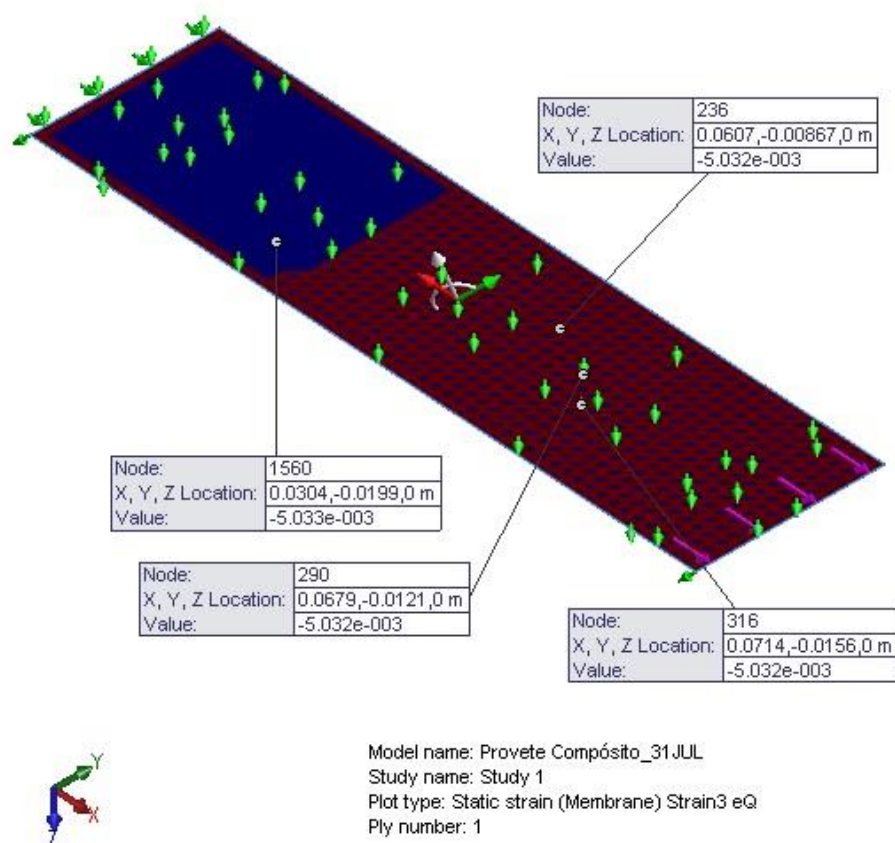


Figura 6-2: Representação de ϵ_Q em provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN

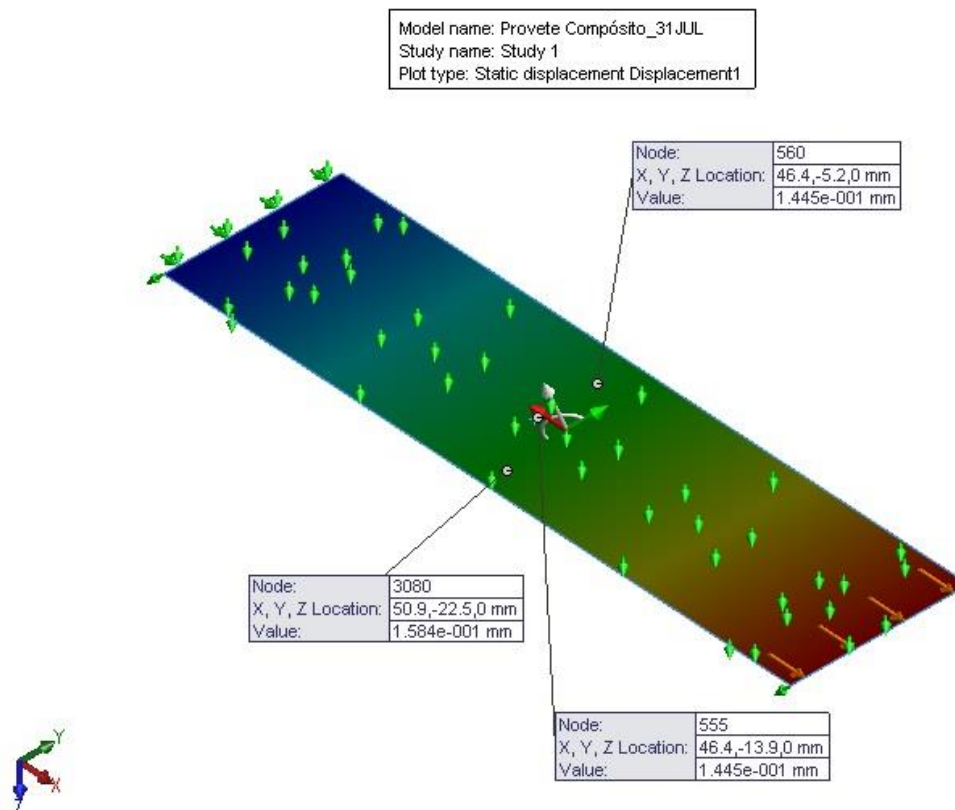


Figura 6-3: Representação do alongamento do provete simulado em SolidWorks sujeito a uma força de 21 kN

6.2 Simulação Garrafa *Stako* submetida a pressão interna

Tornou-se também pertinente a simulação de uma garrafa modelo com as mesmas características da garrafa que foi submetida a ensaios de pressão interna permitindo assim o estudo pelo MEF com uma via prática de comparação.

Assim, efetuou-se a modelação de uma garrafa com as dimensões e geometrias da garrafa 2 – *Stako*, composta por 36 camadas de 0,13 mm de espessura, de um composto de material fibra de Carbono/Epoxy (modelo de material ortotrópico), fabricada por enrolamento filamental, com ângulos de enrolamento de $26,5^\circ$ e $-26,5^\circ$. Criou-se assim uma malha refinada que permitisse a análise pelo MEF, sendo o bocal considerado na condição de encastrado, por se considerar infinitamente rígido em relação ao reservatório construído em material compósito, e submetendo o reservatório simulado a uma pressão interna de 110 bar (valor de referência para possibilitar a comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de pressão interna, no qual haviam sido coladas duas rosetas, uma no corpo cilíndrico principal e outra no fundo toriesférico) conforme descrito no capítulo 5.1.

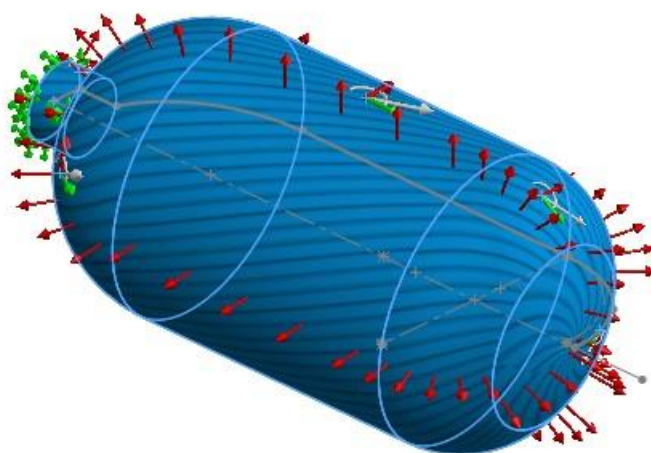


Figura 6-4: Representação da garrafa *Stako* modelada em SolidWorks, fabricada por enrolamento filamental, submetida a 110 bar de pressão interna

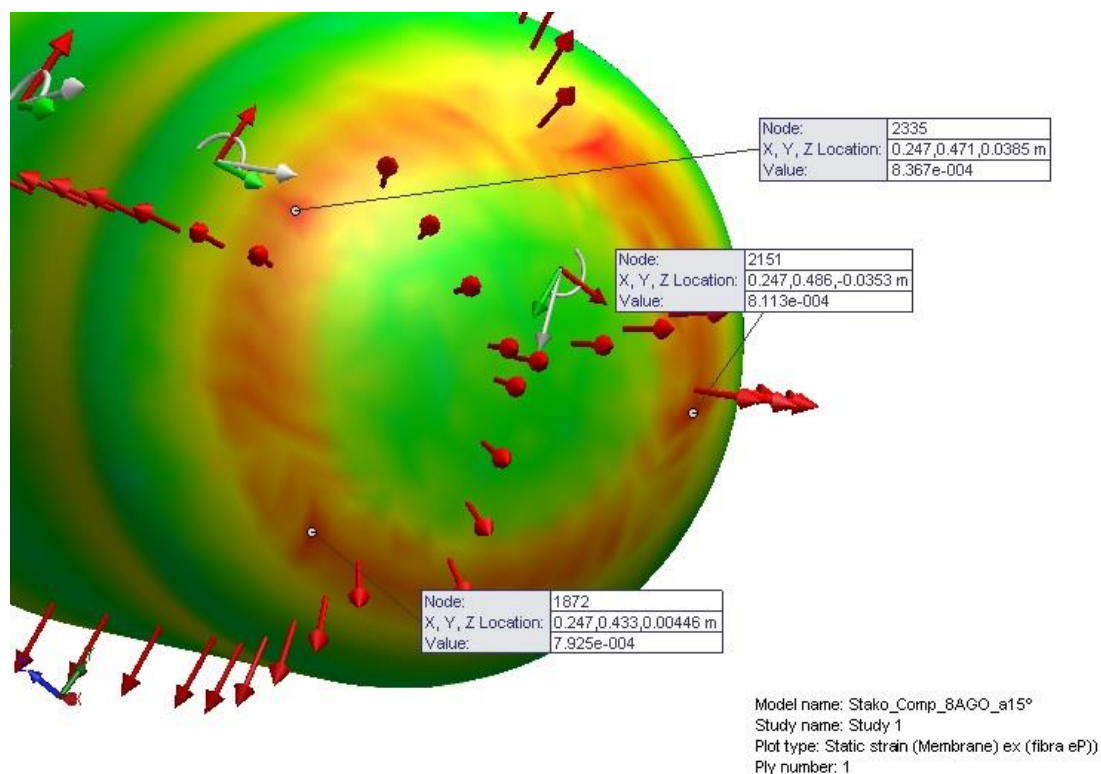


Figura 6-5: Representação de ϵ_P em garrafa stako simulado em SolidWorks sujeito a uma pressão interna de 110 bar

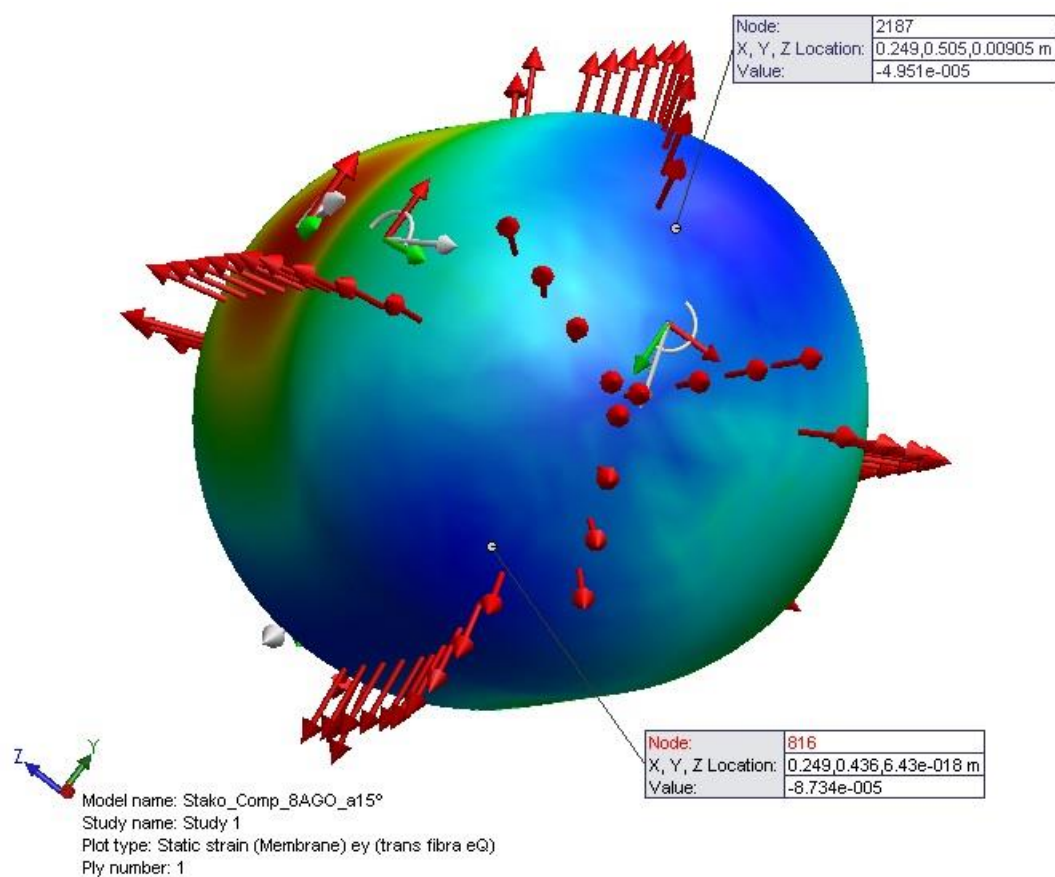


Figura 6-6: Representação de ϵ_Q em garrafa stako simulado em SolidWorks sujeito a uma pressão interna de 110 bar

No que diz respeito a esta simulação numérica, os valores resultantes pelo MEF são idênticos aos obtidos nos ensaios no que se refere ao fundo copado toriesférico, todavia, nos valores referentes ao corpo cilíndrico principal não existe uma correspondência precisa entre valores obtidos pelo MEF e pelo ensaio físico.

6.3 Simulação de Garrafa tipo “ARA” em materiais compósitos

Numa fase final, após se terem efetuado diversos estudos, é então pertinente a modelação de uma garrafa do tipo pretendido, ou seja, a modelação de uma garrafa com as mesmas características geométricas das utilizadas nos Aparelhos de respiração autónoma (ARA), mas em materiais compósitos.

Assim, utilizando a geometria da garrafa 1 ARA, geometria esta já esclarecida no parágrafo 4.1, efetuou-se uma simulação por métodos numéricos de 3 garrafas distintas, com diferenciação nas suas espessuras. Numa fase inicial simulou-se uma garrafa com 36 camadas de 0,13mm de espessura cada camada, fazendo um total de espessura de 4,7mm, submetida a uma pressão interna de 300 bar (pressão pretendida para fabrico da garrafa). Este modelo de espessura é o correspondente ao da garrafa *Stako*, que possui uma diferente geometria. O modelo do material utilizado é, à semelhança das análises efectuadas anteriormente, de tipo ortotrópico e optou-se por considerar o bocal encastrado (isto é, infinitamente rígido em relação ao reservatório).

Pode-se concluir pelos resultados (Figura 6-8), que este parâmetro de espessura (4,7 mm) não seria o aconselhável para esta geometria, uma vez que os valores de tensão principal máxima são superiores aos valores da tensão de rutura (323 MPa) obtidos nos ensaios de tracção realizados nos provetes fabricados em material compósito.

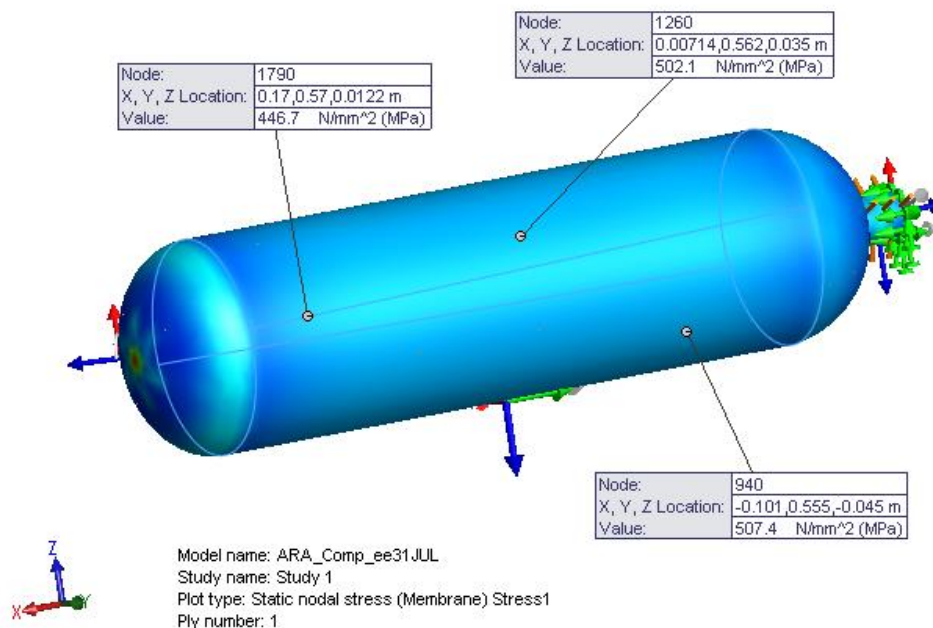


Figura 6-7: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 4,7mm de espessura carregamento de 300 bar

Posto esta situação, optou-se por seguir as espessuras aconselhadas pelo projeto efetuado no parágrafo 4.4.3, fazendo-se assim o dimensionamento de uma segunda garrafa mas com 36 camadas de 0,23 mm de espessura perfazendo uma espessura total de cerca de 8 mm, tal como sugerido pelo projeto (parágrafo 4.4.3). Na realidade, cada camada deverá continuar a ter 0,13 mm de espessura, mas devido ao facto de haver uma limitação à utilização de 50 camadas no programa de simulação numérica, optou-se por aumentar a espessura de cada camada.

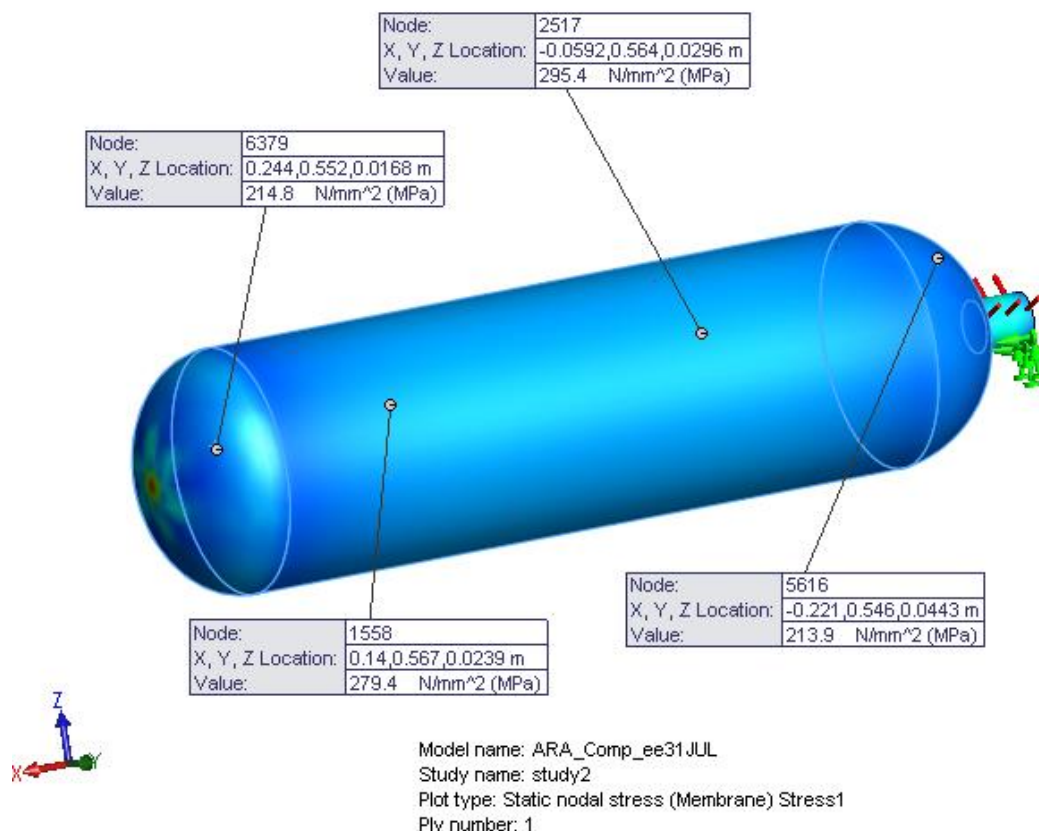


Figura 6-8: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 8 mm de espessura e carregamento de 300 bar

Havendo este incremento de espessura, pode-se observar pela Figura 6-8 que já é saliente um decremento nos valores de tensões aplicadas para valores inferiores aos da tensão de rotura obtidos nos ensaios de tracção. No entanto, à semelhança dos resultados obtidos para o modelo ARA com 4,7 mm (figura 6-7), existe, no fundo copado, uma zona de singularidade de tensões que irá ser objecto de análise posterior, uma vez que se decidiu efetuar uma simulação de um terceiro reservatório com uma espessura total de 12 mm, de forma a permitir uma melhor segurança na utilização do reservatório (figura 6-9).

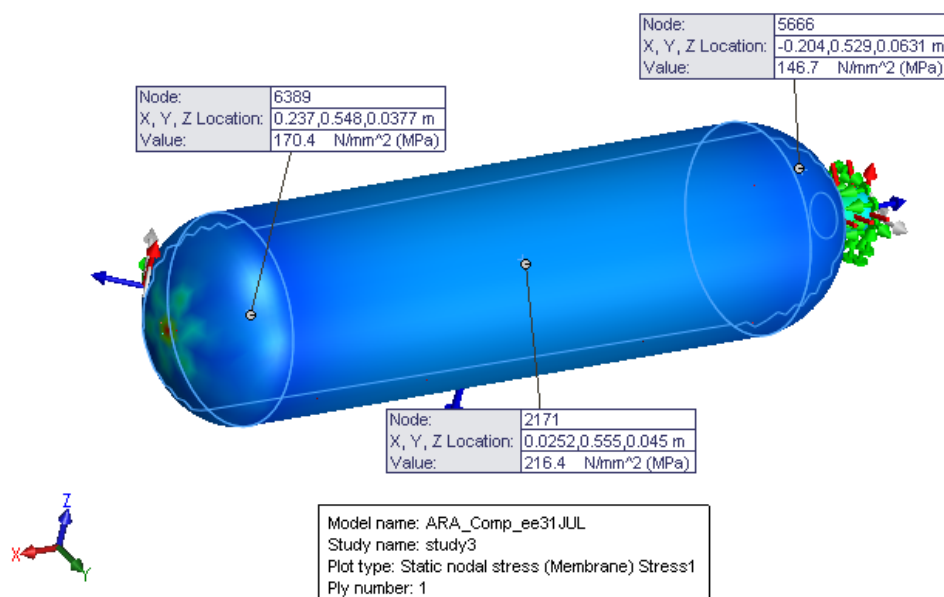


Figura 6-9: Estado de tensão principal máxima da garrafa ARA, 12 mm de espessura e carregamento de 300 bar

Neste último caso, pode-se verificar novamente um abaixamento dos níveis de tensão principal máxima aplicados, valores estes que dão uma maior segurança a todos os futuros utilizadores deste reservatório sob pressão nos seus diversos usos.

No entanto, apesar de conter uma espessura já bastante considerável, o reservatório encontra-se com uma singularidade de elevadas pressões no centro do seu fundo copado semi-elíptico (Figura 6-10).

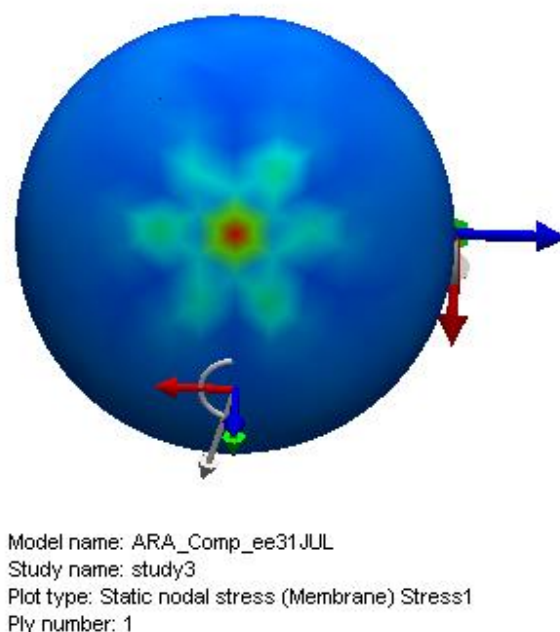


Figura 6-10: Singularidade de tensões elevadas no fundo copado semi-elíptico

Sendo esta singularidade uma zona de elevadas tensões, decidiu fazer-se o estudo da garrafa considerando que a singularidade detectada era eliminada pela furação do fundo copado e pelo seu preenchimento com um elemento metálico (também útil do ponto de vista do processo de enrolamento filamentar), e verificando o seu comportamento face ao encastramento dessa zona (Figura 6-11).

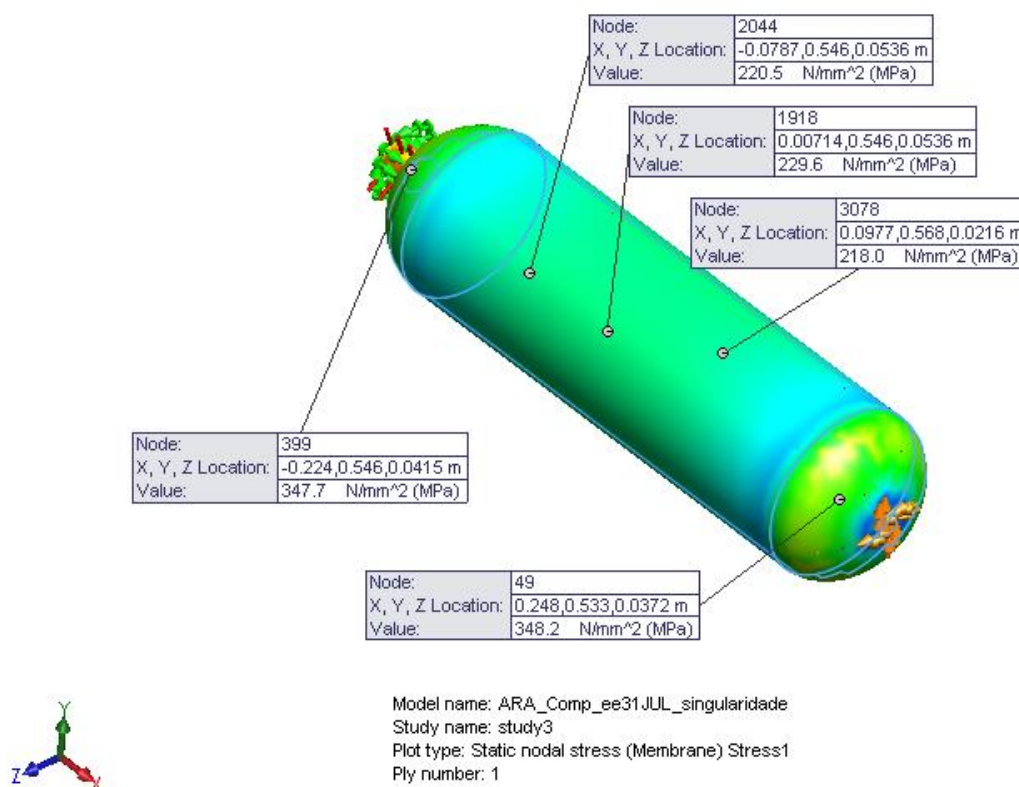


Figura 6-11: Estudo particular de tensões principais máximas da garrafa ARA, 12mm espessura, considerando o caso de singularidade no fundo copado

Pode-se verificar que ao ter em atenção a esta singularidade e ao encastrar a mesma, passa a existir um aumento de tensões não significativo na restante área do reservatório, deixando assim de haver uma singularidade de elevadas tensões que seria preocupante.

Assim a colocação de um reforço metálico na zona da singularidade, permitiria não só o reforço desta zona de singularidade de elevadas tensões, bem como a existência de um segundo apoio que iria facilitar em muito o processo de fabrico por enrolamento filamentar. Esta mesma situação do reforço metálico foi encontrada durante o corte da garrafa de material compósito que serviu para o fabrico dos provetes ensaiados conforme descrito no cap.5.1 (Figura 6-12).



Figura 6-12: Existência de reforço metálico no fundo copado da garrafa Stako

Apesar dos valores das tensões principais máximas já se considerarem aceitáveis de acordo com os valores obtidos pelos ensaios de tração no caso da garrafa de espessura de 12mm, optou-se pela simulação de uma nova garrafa com uma espessura de 14mm permitindo uma maior margem de segurança relativamente às tensões principais máximas, conforme demonstrado na Figura 6-13

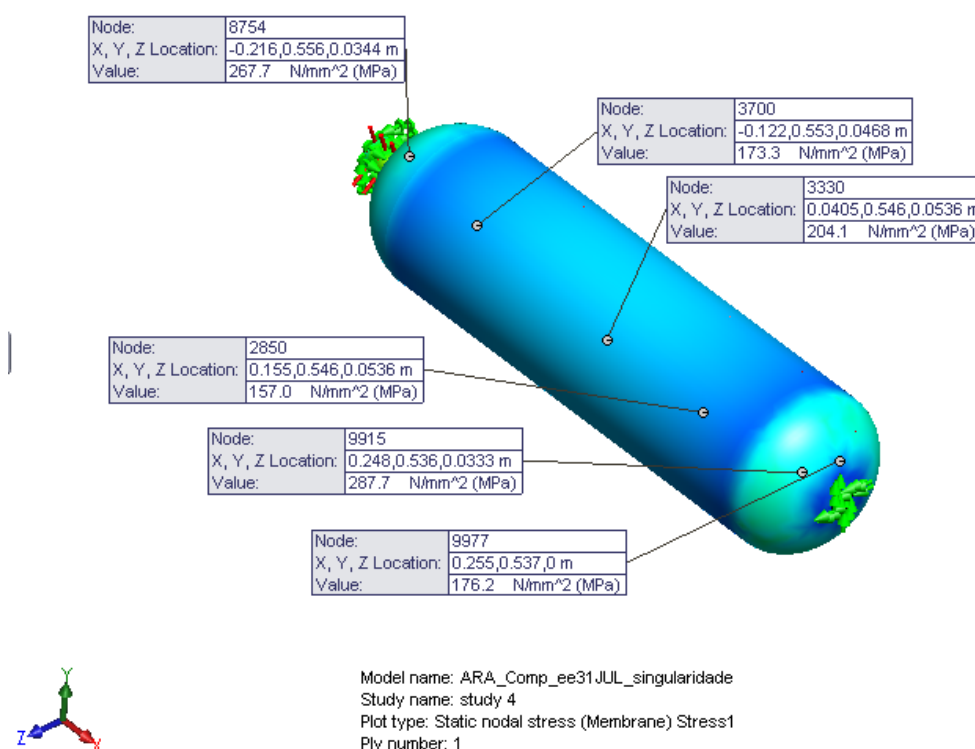


Figura 6-13: Estudo particular de tensões principais máximas da garrafa ARA, 14mm espessura, considerando o caso de singularidade no fundo copado

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7.1 Análise Sumária de resultados obtidos e respetivas Conclusões

7.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

7 Conclusões

7.1 Análise Sumária de Resultados Obtidos e respectivas Conclusões

Este trabalho teve o objetivo de não só aprofundar uma nova gama de fabrico de reservatórios sob pressão em materiais compósitos, bem como a criação de bases sólidas que garantissem que todos os padrões de segurança e de resistência mecânica seriam cumpridos.

O enrolamento filamentar tem sido a tecnologia mais apropriada para a produção de reservatórios sob pressão em materiais compósitos, por permitir obter as mais elevadas características mecânicas no reservatório, por permitir a deposição de camadas com elevado teor de reforço relativamente à matriz, por permitir um controlo de orientação pretendida para as fibras, e por se adaptar perfeitamente à produção em série exigida pelo mercado de hoje em dia.

Como se pôde observar ao longo de todo o estudo, os materiais compósitos (neste caso mais específico uma mistura fibra de carbono/ epoxy) conferem uma resistência mecânica a um reservatório sob pressão, semelhante a um material metálico, resistência essa denotável através da sua tensão de rutura, para um muito menor peso.

Um reservatório com a geometria considerada de uma garrafa de um ARA, fabricado em material metálico (Aço forjado) com as espessuras especificadas pela Norma ASME Sec. VIII Div.1 para um carregamento de 300 bar, teria uma massa equivalente de cerca de 27 kg (obtido por modelação computacional em *SolidWorks*). Por outro lado, um reservatório exatamente com a mesma geometria e carregamento, mas fabricado pela técnica de enrolamento filamentar, com uma mistura de fibra de carbono / Epoxy, teria uma massa equivalente de cerca de 3 kg para a geometria de 8 mm de espessura, 4,7 kg para a geometria de 12 mm de espessura e 5 kg para uma geometria de 14 mm de espessura (todas as massas obtidas por simulação computacional). Pode-se assim comprovar que, relativamente à massa, também será bastante mais vantajoso o fabrico de reservatórios sob pressão em materiais compósitos, principalmente os reservatórios que são suscetíveis de transporte frequente e por períodos consideráveis de tempo pelo ser humano em condições potencialmente adversas.

Conclui-se que algumas geometrias (nomeadamente a geometria considerada – ARA – para fabrico do reservatório) podem conter algumas singularidades provenientes das formas copadas que possuem. Uma possivel origem poderá ser uma desadequada distribuição de fibras nessa zona, comportando-se o material nessa singularidade como puramente polímero. Por outro lado, o fabrico por enrolamento filamentar não permite uma variação de espessura de acordo com as diferentes zonas (como acontece em fabrico com materiais metálicos), pelo que o cálculo da espessura mínima de enrolamento terá de ser efetuado de acordo a zona mais frágil do reservatório.(neste caso, considerando o fundo copado como a zona mais frágil onde existe uma maior concentração de tensões). Essas singularidades de tensões elevadas podem ser contornadas pela colocação de pequenos reforços idênticos a “rebites” ao serem de pequenas dimensões e com uma geometria que diminui ao longo da espessura do topo, não interferem nas características mecânicas do reservatório em si, e resolvem o problema de singularidade causado.

Conclui-se também que todos os valores de tensões induzidas na simulação do reservatório fabricado em material compósito pela técnica de enrolamento filamentar de geometria ARA, correspondem aos valores de projeto obtidos anteriormente, pelo que se considera a metodologia de projeto coerente.

Por fim, conclui-se que apesar de bastante inovadores e altamente sofisticados, os programas informáticos de simulação numérica são de difícil utilização no que diz respeito ao seu uso no caso de simulações em materiais compósitos. Nomeadamente, o fato do *SolidWorks Simulation* não permitir mais de 50 camadas de fibra, o fato de não existir já uma base de dados de materiais fibrosos e das respetivas matrizes com as suas propriedades (sendo que neste trabalho, as propriedades da mistura fibra/matriz foram inseridas no programa de simulação através de tabelas existentes nas referências utilizadas), e o fato de não ser clara a influência dos ângulos de enrolamento no comportamento mecânico do material compósito final.

7.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros seria vantajoso, numa fase inicial, efetuar novos ensaios de pressão interna a outro reservatório, e com auxílio a um programa informático específico do programa de simulação ANSYS, denominado de *ACP Workbench – Composite Pre-Post* efetuar um estudo e uma validação mais detalhada e específica do ensaio.

Seria também muito vantajoso o uso de um software de simulação de fabrico de reservatórios pela técnica de enrolamento filamentar, nomeadamente o *software CADWIND*, permitindo assim não só uma perceção e uma aplicação dos parâmetros de fabrico, bem como um estudo detalhado de relações de velocidade de enrolamento VS ângulo de enrolamento que iriam otimizar o fabrico e as características mecânicas do projeto destes reservatórios.

A realização de ensaios relativos a corrosão em contato com ambiente marinho (nomeadamente água salgada), e ensaios de resistência ao fogo (situação a que as garrafas eventualmente poderão estar expostas em caso de combates a incêndios) seriam também dois pontos importantes de estudo, visto a utilização base destas garrafas.

Numa fase final, após todas as simulações e cálculo de parâmetros e projeto concluída, seria importante a construção de um protótipo, de forma a validar e testar todas as considerações feitas não só ao nível do fabrico, mas também ao nível de posterior utilização e propriedades mecânicas, correlacionando a obtenção do RSP com os custos de fabrico

Seguindo a vertente deste trabalho, mas optando por outra área de estudo, seria importante também efetuar um estudo referente à qualidade do ar contido nestas novas garrafas, e quais as diferenças e/ou influências deste novo tipo de material na qualidade de ar respirável contido nas garrafas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas

- Argdwal, B. D., & Broutman, L. J. (1990). *Analysis and Performance of Fiber Composites* (2ª ed.). Jhon Wiley & Sons.
- Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design* (3ª ed.). Amesterdão: Elsevier.
- ASTM D3039/D 3039M. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. United States: ASTM International.
- Barbero, E. J. (2008). *Finite Element analysis of Composite Materials*. USA, West Virginia: CRC Press.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2013). *Mechanics of Materials* (6ª ed.). New York: McGRAW-HILL.
- Chawla, K. K. (1998). *Composite Materials - Science and Engineering* (2ª ed.). Birmingham, USA: Springer.
- de Magalhães, A. G., de Moraes, A. B., & Moura, M. F. (2011). *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico* (2ª ed.). Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- Dias, F. T., da Cruz, J. P., Valente, R. F., & de Sousa, R. A. (2007). *Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. Lisboa: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais.
- Donnet, J., & Bansal, R. (1990). *Carbon Fibers*. Marcel Dekker, INC.
- Engineers, T. A. (2004). 2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code. New York: An international code.
- Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). *Composite Materials - Design and applications*. Londres: CRC Press.
- Greene, Eric. (1999). *Marine Composites* (2ª ed.). Annapolis, Maryland: Eric Greene Associates, Inc.
- Guite to Composites - Gurit*. (15 de Novembro de 2013). Obtido de Gurit: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-composites-v5pdf.pdf>
- Lobo, R. E. (Outubro de 2012). Estudo e desenvolvimento do comando e controlo para um equipamento industrial automatizado de enrolamento filamentar. Universidade do Minho.

- Maier, G., Ranmerstorfer, F. G., & Salençon, J. (2011). *Impact Engineering of Composite Structures*. USA: Southern Illinois University.
- Marques, P. J. (2007). *Dimensionamento/Projecto de Reservatórios Sob Pressão (RSP) Segundo a Norma ASME Sec. VIII*. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro.
- Matthews, F. L., Davies, G. A., Hitchings, D., & Soutis, C. (2003). *Finite Element modelling of Composite Materials and Structures*. Boston: CRC Press.
- Norma ASME Sec. VIII div.1. (2004). EUA.
- Pereira, J. C. (2007). *Reservatórios em Material Compósito para Fluidos Sob Pressão*. Universidade do Minho.
- Peters, S. (2011). *Composite Filament Winding*. Ohio, Estados Unidos da América: ASM International.
- Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells* (2ª ed.). London: CRC Press.
- Rules for Construction of Pressure Vessels. (2004). *ASME code Section VIII*. USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- Tech Note TN-515. (2010). *Strain Gage Rosettes: Selection, Application and Data Reduction*. Micro Measurements - Vishay Precision Group.
- Teknea. (1989). *Matériaux composites, introduction à l'usage des ingénieurs et technicians*.
- Ugural, A. C. (1981). *Stresses in Plates and Shells*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2013). *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements* (3ª ed.). Amsterdão: Elsevier.

ANEXOS

A – Detalhes dos Reservatórios Simulados

B – Ensaios: Dados e Representações

C – Detalhes das Simulações Numéricas

ANEXO A – Detalhes dos reservatórios simulados

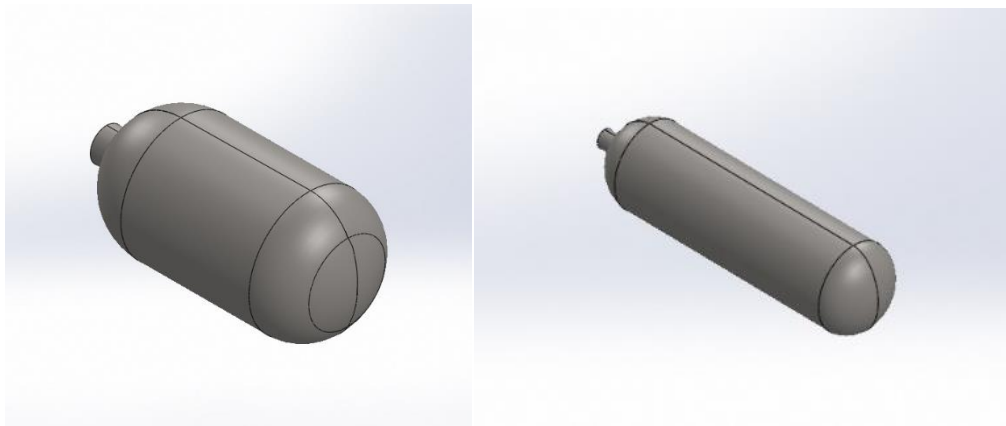


Figura A 1: Garrafa 2 - Stako e Garrafa 1 - ARA, respectivamente

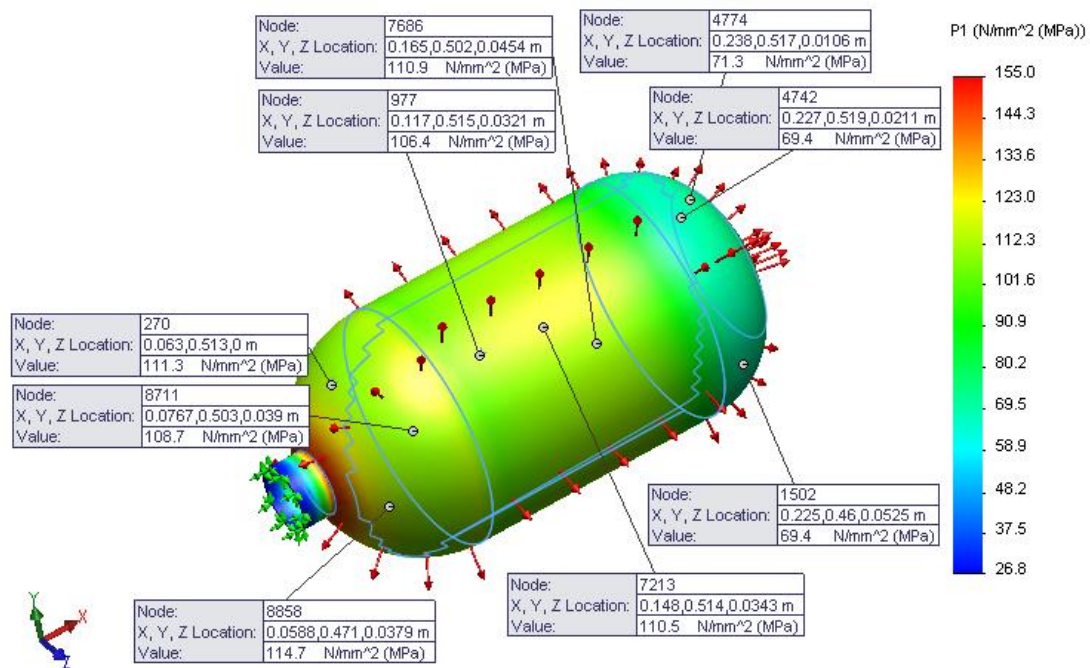


Figura A 2: Representação da 1ª Tensão principal σ_1 da garrafa 2 – “Stako”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com Norma ASME Sec. VIII

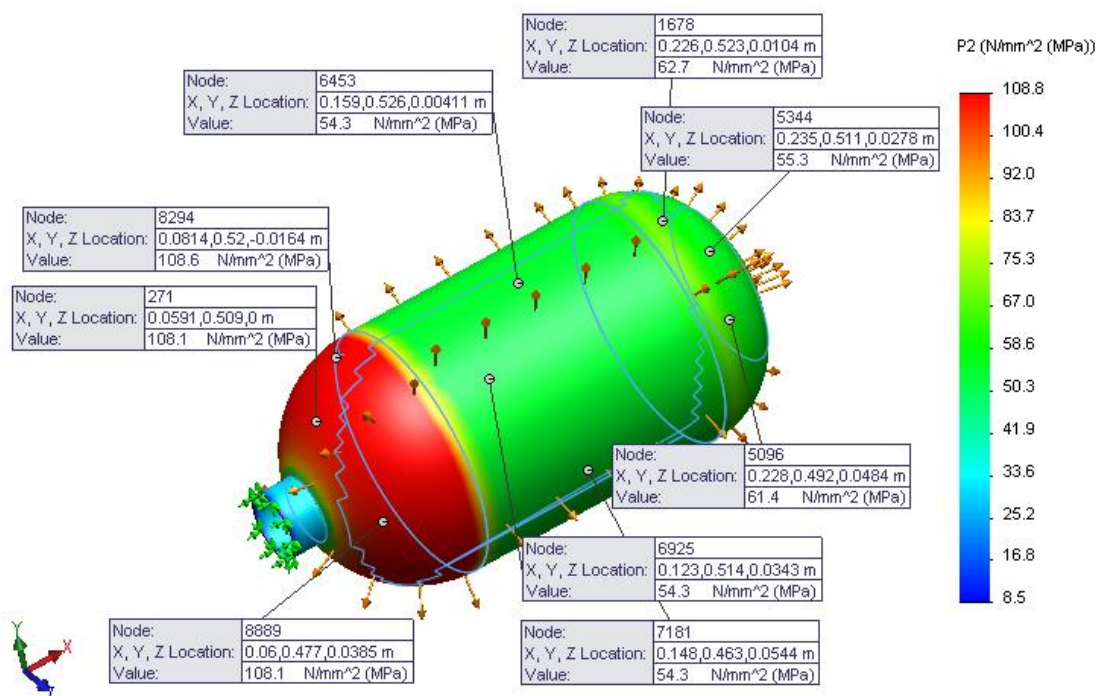


Figura A 3: Representação da 2ª Tensão principal σ_2 da garrafa 2 – “Stako”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com Norma ASME Sec. VIII

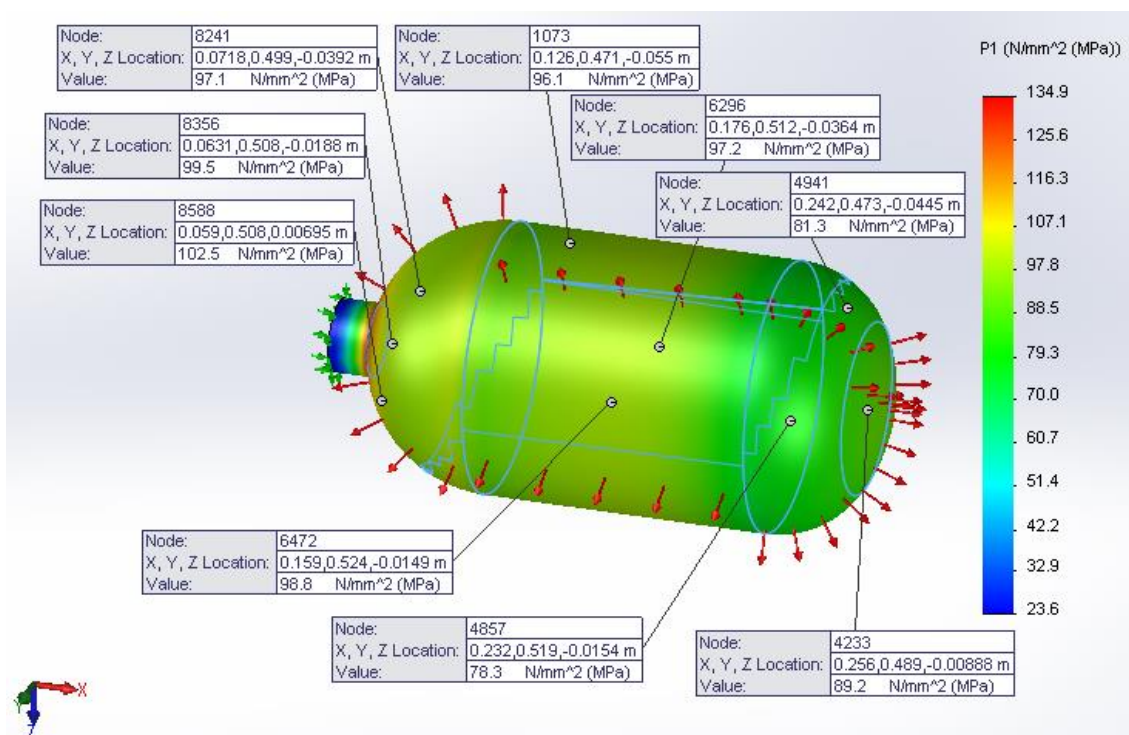


Figura A 4: Representação da 1ª Tensão principal σ_1 da garrafa 2 – “Stako”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com modelo teórico de equações de equilíbrio para cascas finas

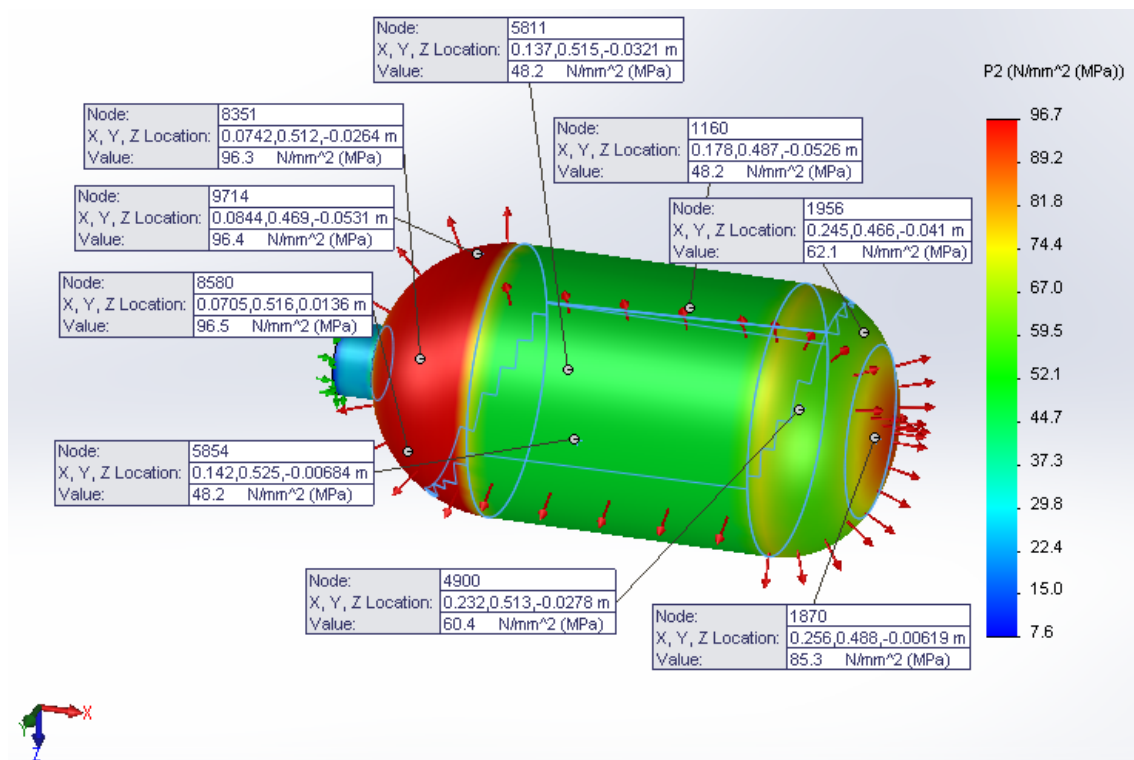


Figura A 5: Representação da 2ª Tensão principal σ_2 da garrafa 2 – “Stako”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com modelo teórico de equações de equilíbrio para cascas finas

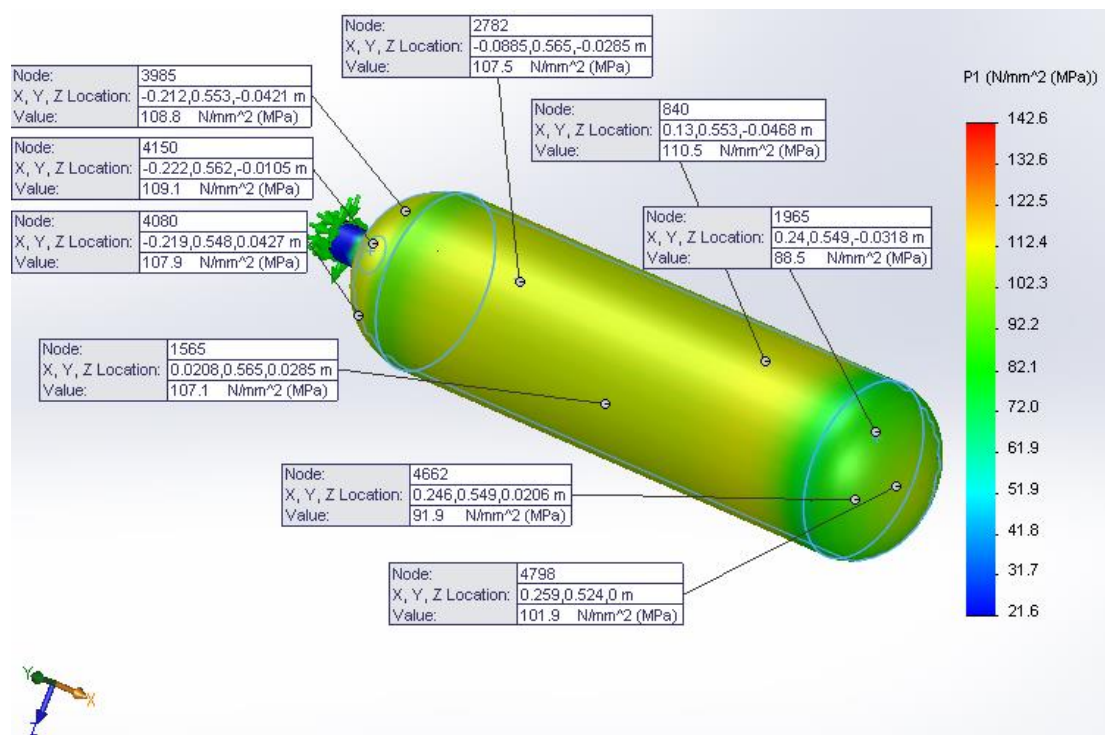


Figura A 6: Representação da 1ª Tensão principal σ_1 da garrafa 1 – “ARA”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com Norma ASME Sec. VIII

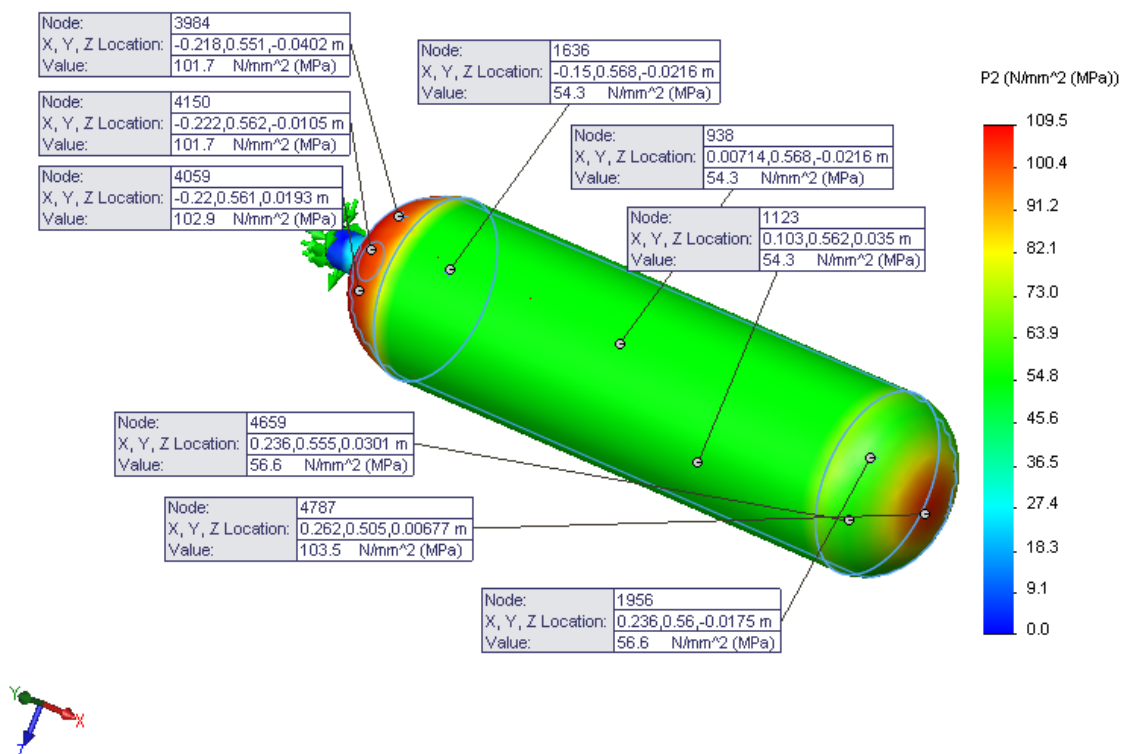


Figura A 7: Representação da 2ª Tensão principal σ_2 da garrafa 1 – “ARA”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com Norma ASME Sec. VIII

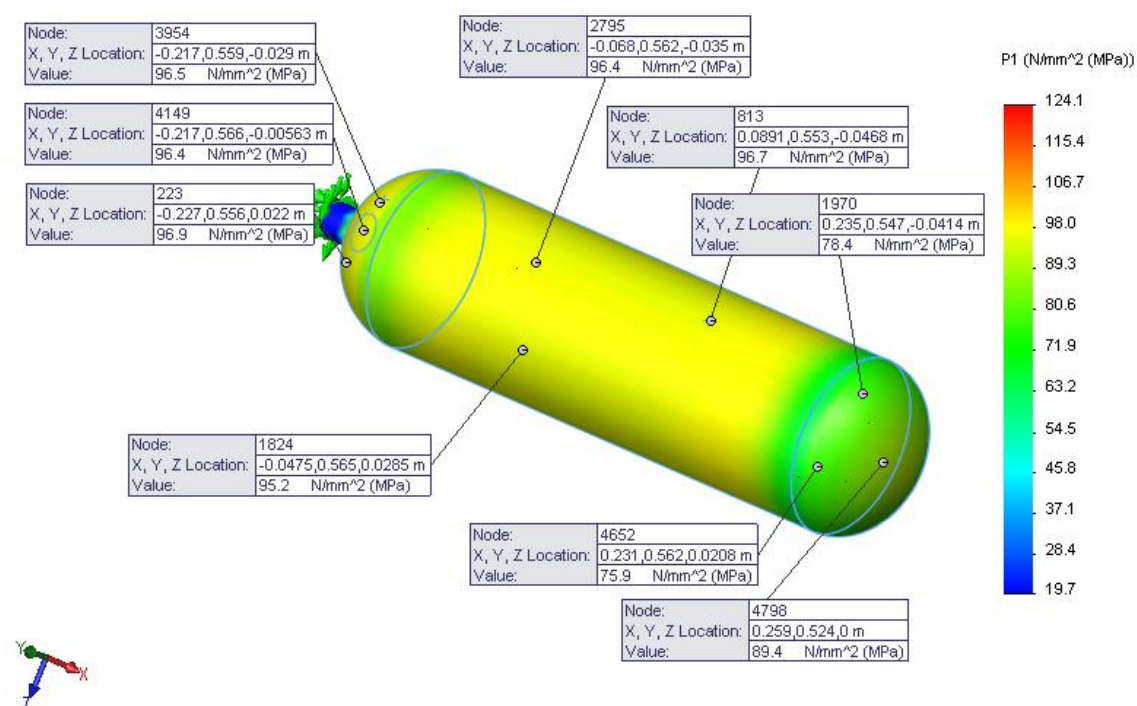


Figura A 8: Representação da 1ª Tensão principal σ_1 da garrafa 1 – “ARA”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com modelo teórico de equações de equilíbrio para cascas finas

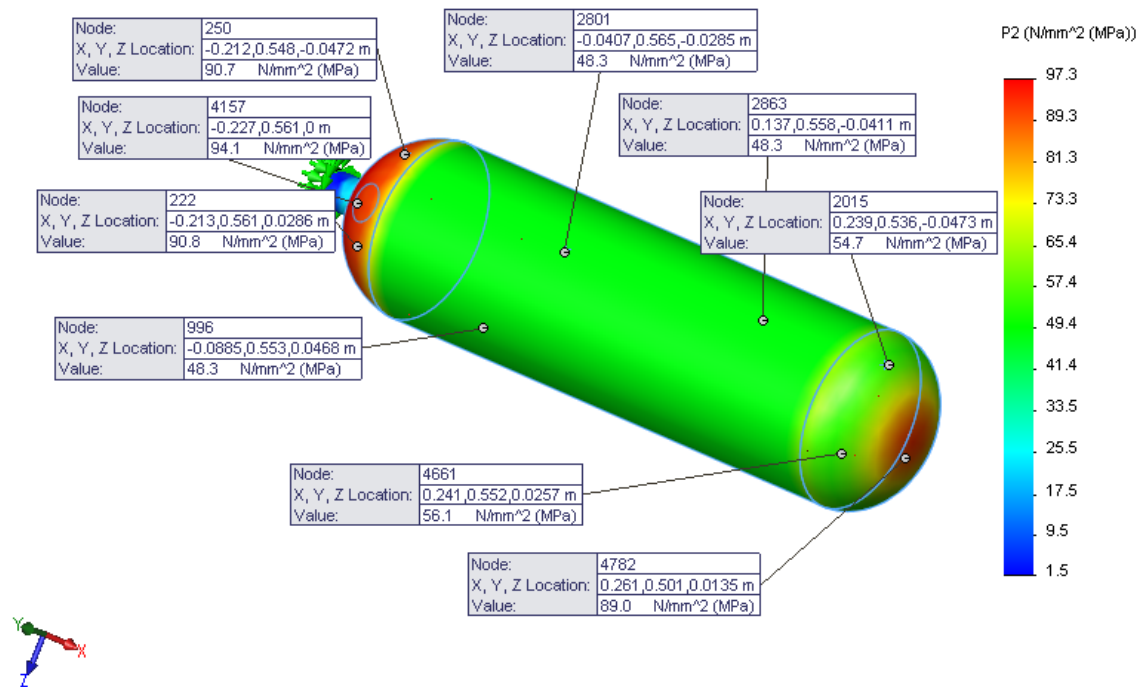


Figura A 9: Representação da 2ª Tensão principal σ_2 da garrafa 1 – “ARA”, nas 3 zonas de diferente geometria, perante o carregamento de 300 Bar, com espessuras determinadas de acordo com modelo teórico de equações de equilíbrio para cascas finas

ANEXO B – Ensaios: Dados e Representações



Figura B 1: Resultado Ensaio 1

Tabela B 1: Dados ensaio 1

Data	Hora	Força_inst	ExA25_10_inst	Extensão [mm/mm]	Extensão ($\mu\epsilon$)	Tensão [Mpa]
13/05/2014	17:02:05	0,9278	21,9437		0	0
13/05/2014	17:02:07	0,9335	21,9434	-1,36713E-05	-13,67134986	6,962520977
13/05/2014	17:02:08	0,9756	21,9438	4,55712E-06	4,557116621	7,276524333
13/05/2014	17:02:09	1,1123	21,9441	1,82285E-05	18,22846648	8,296102927
13/05/2014	17:02:10	1,4801	21,9456	8,65852E-05	86,5852158	11,03934365
13/05/2014	17:02:11	1,8721	21,9469	0,000145828	145,8277319	13,96308037
13/05/2014	17:02:13	2,1112	21,9478	0,000186842	186,8417815	15,74641059
13/05/2014	17:02:14	2,3092	21,9486	0,000223299	223,2987144	17,22319597
13/05/2014	17:02:15	2,5528	21,9495	0,000264313	264,312764	19,0400895
13/05/2014	17:02:16	2,8052	21,9505	0,000309884	309,8839302	20,92261794
13/05/2014	17:02:17	3,047	21,9512	0,000341784	341,7837466	22,72608615
13/05/2014	17:02:19	3,3572	21,9522	0,000387355	387,3549128	25,03971658
13/05/2014	17:02:20	3,685	21,9533	0,000437483	437,4831956	27,48461682
13/05/2014	17:02:21	3,9483	21,9544	0,000487611	487,6114785	29,44844304
13/05/2014	17:02:22	4,1266	21,9553	0,000528626	528,6255281	30,77829573
13/05/2014	17:02:23	4,2687	21,9557	0,000546854	546,8539945	31,83815029
13/05/2014	17:02:25	4,6594	21,9572	0,000615211	615,2107439	34,75219094
13/05/2014	17:02:26	5,0446	21,9588	0,000688125	688,1246098	37,62520977
13/05/2014	17:02:27	5,1672	21,959	0,000697239	697,238843	38,53962335
13/05/2014	17:02:28	5,2363	21,9593	0,00071091	710,9101929	39,05500653
13/05/2014	17:02:29	5,3799	21,9598	0,000733696	733,695776	40,12604885

13/05/2014	17:02:31	6,1997	21,9626	0,000861295	861,2950414	46,24053701
13/05/2014	17:02:32	6,4838	21,964	0,000925095	925,0946741	48,35950028
13/05/2014	17:02:33	6,5073	21,9638	0,00091598	915,9804409	48,53477531
13/05/2014	17:02:34	6,5093	21,9638	0,00091598	915,9804409	48,54969234
13/05/2014	17:02:35	6,5309	21,9636	0,000906866	906,8662076	48,7107962
13/05/2014	17:02:37	6,6119	21,9643	0,000938766	938,766024	49,31493567
13/05/2014	17:02:38	7,2434	21,9667	0,001048137	1048,136823	54,02498602
13/05/2014	17:02:39	8,2399	21,9701	0,001203079	1203,078788	61,45739325
13/05/2014	17:02:40	8,3479	21,9704	0,00121675	1216,750138	62,26291255
13/05/2014	17:02:41	8,3286	21,9704	0,00121675	1216,750138	62,11896327
13/05/2014	17:02:43	8,2235	21,9704	0,00121675	1216,750138	61,33507365
13/05/2014	17:02:44	8,2759	21,9703	0,001212193	1212,193021	61,72589968
13/05/2014	17:02:45	8,3345	21,9707	0,001230421	1230,421488	62,16296849
13/05/2014	17:02:46	8,4097	21,9709	0,001239536	1239,535721	62,72384859
13/05/2014	17:02:47	8,5993	21,9716	0,001271436	1271,435537	64,13798247
13/05/2014	17:02:49	10,1751	21,9773	0,001531191	1531,191185	75,89110572
13/05/2014	17:02:50	10,514	21,9783	0,001576762	1576,762351	78,41879545
13/05/2014	17:02:51	10,4778	21,9785	0,001585877	1585,876584	78,14879731
13/05/2014	17:02:52	10,421	21,9783	0,001576762	1576,762351	77,72515383
13/05/2014	17:02:53	10,3903	21,978	0,001563091	1563,091001	77,49617751
13/05/2014	17:02:55	10,3799	21,9779	0,001558534	1558,533884	77,41860899
13/05/2014	17:02:56	10,4179	21,978	0,001563091	1563,091001	77,70203244
13/05/2014	17:02:57	10,5005	21,9784	0,001581319	1581,319468	78,31810554
13/05/2014	17:02:58	10,6492	21,979	0,001608662	1608,662167	79,42718628
13/05/2014	17:02:59	11,8135	21,9832	0,001800061	1800,061065	88,11113183
13/05/2014	17:03:01	12,4409	21,9854	0,001900318	1900,317631	92,79060227
13/05/2014	17:03:02	12,5285	21,9856	0,001909432	1909,431864	93,44396793
13/05/2014	17:03:03	12,5402	21,9857	0,001913989	1913,988981	93,53123252
13/05/2014	17:03:04	12,5515	21,9854	0,001900318	1900,317631	93,61551371
13/05/2014	17:03:05	12,5827	21,9859	0,001923103	1923,103214	93,84821928
13/05/2014	17:03:07	12,6311	21,9861	0,001932217	1932,217447	94,20921126
13/05/2014	17:03:08	12,7286	21,9863	0,001941332	1941,331681	94,93641618
13/05/2014	17:03:09	13,2244	21,9883	0,002032474	2032,474013	98,63434645
13/05/2014	17:03:10	14,4897	21,9927	0,002232987	2232,987144	108,0716017
13/05/2014	17:03:11	14,6892	21,9933	0,00226033	2260,329844	109,5595749
13/05/2014	17:03:13	14,6985	21,9935	0,002269444	2269,444077	109,628939
13/05/2014	17:03:14	14,6821	21,9933	0,00226033	2260,329844	109,5066194
13/05/2014	17:03:15	14,68	21,9933	0,00226033	2260,329844	109,4909566
13/05/2014	17:03:16	14,705	21,9935	0,002269444	2269,444077	109,6774194
13/05/2014	17:03:17	14,7567	21,9935	0,002269444	2269,444077	110,0630244
13/05/2014	17:03:19	14,8435	21,9941	0,002296787	2296,786777	110,7104233
13/05/2014	17:03:20	15,0206	21,9948	0,002328687	2328,686593	112,0313258
13/05/2014	17:03:21	16,2012	21,9988	0,002510971	2510,971258	120,836845
13/05/2014	17:03:22	16,6438	22,0001	0,002570214	2570,213774	124,1379825
13/05/2014	17:03:23	16,738	22,0009	0,002606671	2606,670707	124,8405743
13/05/2014	17:03:25	16,7651	22,0007	0,002597556	2597,556474	125,0427

13/05/2014	17:03:26	16,7984	22,0006	0,002592999	2592,999357	125,2910684
13/05/2014	17:03:27	16,8454	22,0013	0,002624899	2624,899174	125,6416185
13/05/2014	17:03:28	16,921	22,0015	0,002634013	2634,013407	126,205482
13/05/2014	17:03:29	17,1015	22,0021	0,002661356	2661,356107	127,5517434
13/05/2014	17:03:31	18,537	22,0069	0,002880098	2880,097705	138,2584374
13/05/2014	17:03:32	18,9865	22,0086	0,002957569	2957,568687	141,6110386
13/05/2014	17:03:33	19,0388	22,0088	0,002966683	2966,68292	142,0011188
13/05/2014	17:03:34	19,0073	22,0089	0,00297124	2971,240037	141,7661756
13/05/2014	17:03:35	18,9763	22,009	0,002975797	2975,797154	141,5349618
13/05/2014	17:03:37	18,9697	22,0091	0,002980354	2980,35427	141,4857356
13/05/2014	17:03:38	19,0026	22,0092	0,002984911	2984,911387	141,7311206
13/05/2014	17:03:39	19,0656	22,0098	0,003012254	3012,254087	142,2010069
13/05/2014	17:03:40	19,1562	22,0097	0,003007697	3007,69697	142,8767481
13/05/2014	17:03:41	19,2783	22,0103	0,00303504	3035,03967	143,7874324
13/05/2014	17:03:43	19,6357	22,0117	0,003098839	3098,839302	146,4531046
13/05/2014	17:03:44	21,1147	22,0151	0,003253781	3253,781268	157,4842439
13/05/2014	17:03:45	21,5034	22,0164	0,003313024	3313,023784	160,3833675
13/05/2014	17:03:46	21,5671	22,017	0,003340366	3340,366483	160,8584747
13/05/2014	17:03:47	21,5694	22,0173	0,003354038	3354,037833	160,8756293
13/05/2014	17:03:49	21,5649	22,0174	0,003358595	3358,59495	160,842066
13/05/2014	17:03:50	21,5781	22,0174	0,003358595	3358,59495	160,9405184
13/05/2014	17:03:51	21,6197	22,0175	0,003363152	3363,152066	161,2507925
13/05/2014	17:03:52	21,6942	22,018	0,003385938	3385,93765	161,8064516
13/05/2014	17:03:54	21,7976	22,0184	0,003404166	3404,166116	162,5776618
13/05/2014	17:03:55	21,9668	22,019	0,003431509	3431,508816	163,839642
13/05/2014	17:03:56	22,9839	22,0225	0,003591008	3591,007897	171,4256946
13/05/2014	17:03:57	23,7194	22,0252	0,00371405	3714,050046	176,9114302
13/05/2014	17:03:58	23,8688	22,0263	0,003764178	3764,178329	178,0257319
13/05/2014	17:04:00	23,9083	22,0264	0,003768735	3768,735446	178,3203431
13/05/2014	17:04:01	23,9365	22,027	0,003796078	3796,078145	178,5306731
13/05/2014	17:04:02	23,9628	22,027	0,003796078	3796,078145	178,726832
13/05/2014	17:04:03	24,0227	22,0273	0,003809749	3809,749495	179,1735969
13/05/2014	17:04:04	24,0972	22,0277	0,003827978	3827,977962	179,729256
13/05/2014	17:04:06	24,2341	22,0281	0,003846206	3846,206428	180,7503263
13/05/2014	17:04:07	25,1247	22,0315	0,004001148	4001,148393	187,3928771
13/05/2014	17:04:08	25,8722	22,0344	0,004133305	4133,304775	192,9681149
13/05/2014	17:04:09	26,0385	22,035	0,004160647	4160,647475	194,2084654
13/05/2014	17:04:10	26,0854	22,0353	0,004174319	4174,318825	194,5582696
13/05/2014	17:04:12	26,1248	22,0357	0,004192547	4192,547291	194,852135
13/05/2014	17:04:13	26,1643	22,0361	0,004210776	4210,775758	195,1467462
13/05/2014	17:04:14	26,2279	22,0364	0,004224447	4224,447108	195,6211076
13/05/2014	17:04:15	26,302	22,0366	0,004233561	4233,561341	196,1737833
13/05/2014	17:04:16	26,4209	22,0371	0,004256347	4256,346924	197,0606004
13/05/2014	17:04:18	26,9058	22,039	0,004342932	4342,93214	200,6772329
13/05/2014	17:04:19	28,0569	22,0434	0,004543445	4543,445271	209,2627261
13/05/2014	17:04:20	28,3492	22,0446	0,004598131	4598,130671	211,4428492

13/05/2014	17:04:21	28,3976	22,0452	0,004625473	4625,47337	211,8038411
13/05/2014	17:04:22	28,4226	22,0452	0,004625473	4625,47337	211,9903039
13/05/2014	17:04:24	28,4438	22,0454	0,004634588	4634,587604	212,1484244
13/05/2014	17:04:25	28,4988	22,0459	0,004657373	4657,373187	212,5586426
13/05/2014	17:04:26	28,5611	22,0462	0,004671045	4671,044537	213,0233079
13/05/2014	17:04:27	28,6444	22,0467	0,00469383	4693,83012	213,6446019
13/05/2014	17:04:28	28,769	22,047	0,004707501	4707,50147	214,5739325
13/05/2014	17:04:30	29,2666	22,0488	0,00478953	4789,529569	218,2852881
13/05/2014	17:04:31	30,3491	22,0529	0,004976371	4976,37135	226,3591274
13/05/2014	17:04:32	30,6427	22,0547	0,005058399	5058,39945	228,5489465
13/05/2014	17:04:33	30,7204	22,0554	0,005090299	5090,299266	229,1284729
13/05/2014	17:04:34	30,7616	22,056	0,005117642	5117,641966	229,4357636
13/05/2014	17:04:36	30,8158	22,0562	0,005126756	5126,756199	229,8400149
13/05/2014	17:04:37	30,8779	22,0567	0,005149542	5149,541782	230,3031885
13/05/2014	17:04:38	30,9617	22,0574	0,005181442	5181,441598	230,9282118
13/05/2014	17:04:39	31,0674	22,058	0,005208784	5208,784298	231,7165765
13/05/2014	17:04:40	31,2686	22,0588	0,005245241	5245,241231	233,2172292
13/05/2014	17:04:42	32,2839	22,0627	0,005422969	5422,968779	240,7898564
13/05/2014	17:04:43	32,8175	22,065	0,005527782	5527,782461	244,7697184
13/05/2014	17:04:44	32,9794	22,0662	0,005582468	5582,467861	245,9772515
13/05/2014	17:04:45	33,0396	22,068	0,005664496	5664,49596	246,426254
13/05/2014	17:04:46	33,1113	22,0687	0,005696396	5696,395776	246,9610293
13/05/2014	17:04:48	33,1818	22,0692	0,005719181	5719,18136	247,4868544
13/05/2014	17:04:49	33,2534	22,0698	0,005746524	5746,524059	248,0208838
13/05/2014	17:04:50	33,3461	22,0706	0,005782981	5782,980992	248,7122879
13/05/2014	17:04:51	33,4712	22,0713	0,005814881	5814,880809	249,6453478
13/05/2014	17:04:52	33,6613	22,0722	0,005855895	5855,894858	251,0632109
13/05/2014	17:04:54	34,561	22,0766	0,006056408	6056,40799	257,7736342
13/05/2014	17:04:55	35,3018	22,0802	0,006220464	6220,464188	263,2988999
13/05/2014	17:04:56	35,5094	22,0806	0,006238693	6238,692654	264,847287
13/05/2014	17:04:57	35,5652	22,0831	0,006352621	6352,62057	265,2634719
13/05/2014	17:04:58	35,4802	22,0856	0,006466548	6466,548485	264,6294984
13/05/2014	17:05:00	35,594	22,0867	0,006516677	6516,676768	265,4782771
13/05/2014	17:05:01	35,7016	22,0884	0,006594148	6594,147751	266,280813
13/05/2014	17:05:02	35,8224	22,0897	0,00665339	6653,390267	267,1818012
13/05/2014	17:05:03	35,9401	22,0909	0,006708076	6708,075666	268,0596681
13/05/2014	17:05:04	36,0958	22,0922	0,006767318	6767,318182	269,2209584
13/05/2014	17:05:06	36,3216	22,0939	0,006844789	6844,789165	270,9050904
13/05/2014	17:05:07	37,2584	22,0989	0,007072645	7072,644996	277,8922245
13/05/2014	17:05:08	37,842	22,1059	0,007391643	7391,64316	282,2450121
13/05/2014	17:05:09	38,101	22,115	0,007806341	7806,340772	284,1767667
13/05/2014	17:05:10	38,2796	22,1186	0,007970397	7970,39697	285,508857
13/05/2014	17:05:12	38,4064	22,1212	0,008088882	8088,882003	286,4545963
13/05/2014	17:05:13	38,43	22,1214	0,008097996	8097,996236	286,6306172
13/05/2014	17:05:14	38,4285	22,1331	0,008631179	8631,17888	286,6194294
13/05/2014	17:05:15	38,6298	22,1311	0,008540037	8540,036548	288,1208279

13/05/2014	17:05:16	38,7851	22,1331	0,008631179	8631,17888	289,2791348
13/05/2014	17:05:18	38,8903	22,1334	0,00864485	8644,85023	290,0637703
13/05/2014	17:05:19	39,0472	22,1355	0,00874055	8740,549679	291,2340108
13/05/2014	17:05:20	39,2314	22,1375	0,008831692	8831,692012	292,6078687
13/05/2014	17:05:21	39,4291	22,1385	0,008877263	8877,263178	294,0824166
13/05/2014	17:05:22	40,036	22,1391	0,008904606	8904,605878	298,6089875
13/05/2014	17:05:24	40,827	22,1293	0,008458008	8458,008449	304,5086705
13/05/2014	17:05:25	40,8485	22,112	0,007669627	7669,627273	304,6690285
13/05/2014	17:05:26	40,5341	22,1086	0,007514685	7514,685308	302,3240723
13/05/2014	17:05:27	41,1685	22,1155	0,007829126	7829,126355	307,0557524
13/05/2014	17:05:28	41,3783	22,2578	0,014313903	14313,90331	308,6205482
13/05/2014	17:05:30	-0,2939	29,5057	0,344609159		

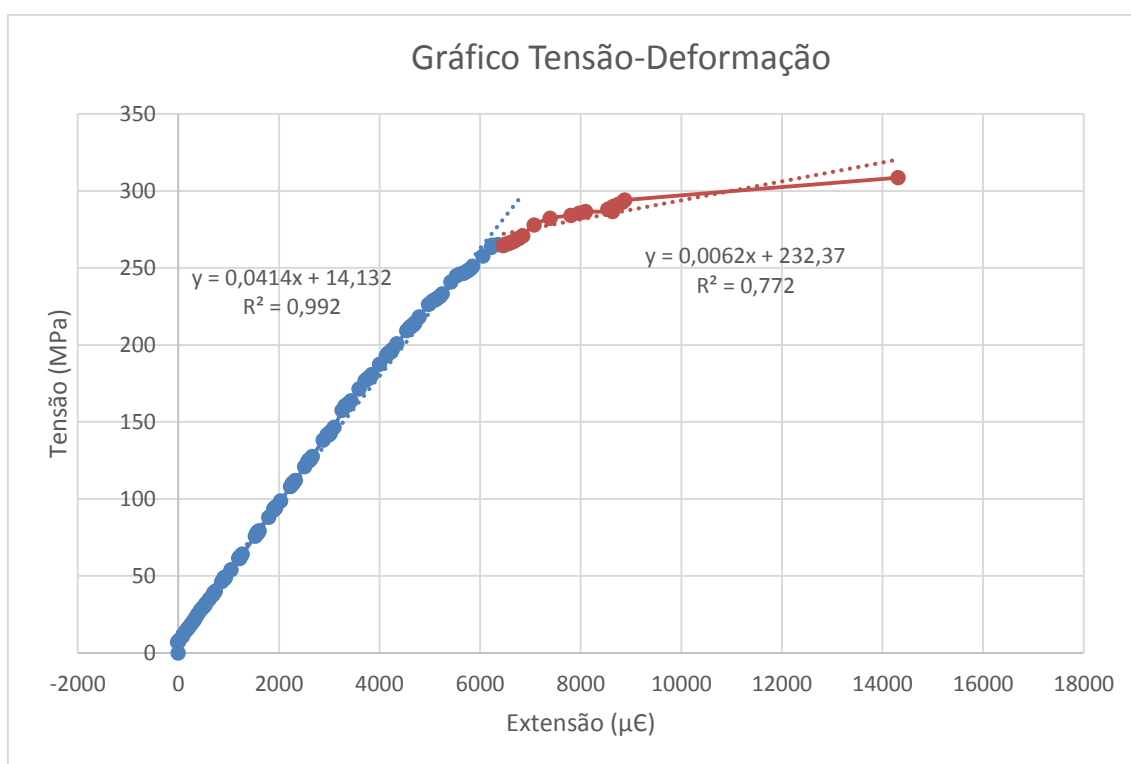


Figura B 2: Gráfico Tensão-Deformação Ensaio 1



Figura B 3: Resultado Ensaio 2

Tabela B 2: Dados Ensaio 2

Data	Hora	Força_inst	ExA25_10_inst	Extensão [mm/mm]	Extensão (με)	Tensão [Mpa]
13/05/2014	18:24:24	0,8998	20,146		0	6,711169122
13/05/2014	18:24:26	0,9861	20,1463	1,48913E-05	14,89129356	7,35483871
13/05/2014	18:24:27	1,2367	20,1471	5,46014E-05	54,60140971	9,223941824
13/05/2014	18:24:28	1,477	20,1479	9,43115E-05	94,31152586	11,01622226
13/05/2014	18:24:29	1,7281	20,1488	0,000138985	138,9854065	12,88905463
13/05/2014	18:24:30	1,9825	20,1499	0,000193587	193,5868162	14,78650009
13/05/2014	18:24:32	2,2391	20,1505	0,000223369	223,3694034	16,70035428
13/05/2014	18:24:33	2,4243	20,1515	0,000273007	273,0070485	18,08167071
13/05/2014	18:24:34	2,6905	20,1521	0,00030279	302,7896357	20,06712661
13/05/2014	18:24:35	2,9438	20,153	0,000347464	347,4635163	21,9563677
13/05/2014	18:24:36	3,1509	20,1537	0,00038221	382,209868	23,50102555
13/05/2014	18:24:38	3,4143	20,1549	0,000441775	441,7750422	25,46559761
13/05/2014	18:24:39	3,6263	20,1553	0,00046163	461,6301003	27,04680216
13/05/2014	18:24:40	3,8883	20,1566	0,000526159	526,159039	29,00093231
13/05/2014	18:24:41	4,1538	20,1574	0,000565869	565,8691552	30,98116726
13/05/2014	18:24:42	4,3809	20,1581	0,000600616	600,6155068	32,67499534
13/05/2014	18:24:44	4,6122	20,1585	0,000620471	620,4705649	34,40014917
13/05/2014	18:24:45	4,8121	20,1596	0,000675072	675,0719746	35,89110572
13/05/2014	18:24:46	5,1035	20,1609	0,000739601	739,6009133	38,06451613
13/05/2014	18:24:47	5,3504	20,1617	0,000779311	779,3110295	39,90602275
13/05/2014	18:24:48	5,5862	20,1624	0,000814057	814,0573811	41,66473988
13/05/2014	18:24:50	5,8033	20,1629	0,000838876	838,8762037	43,28398285
13/05/2014	18:24:51	6,0422	20,1636	0,000873623	873,6225553	45,06582137
13/05/2014	18:24:52	6,3062	20,1652	0,000953043	953,0427877	47,03486854
13/05/2014	18:24:53	6,528	20,1657	0,000977862	977,8616102	48,68916651
13/05/2014	18:24:54	6,7337	20,1665	0,001017572	1017,571726	50,22338244

13/05/2014	18:24:56	7,0126	20,1674	0,001062246	1062,245607	52,30356144
13/05/2014	18:24:57	7,2614	20,1683	0,001106919	1106,919488	54,15923923
13/05/2014	18:24:58	7,517	20,1692	0,001151593	1151,593368	56,06563491
13/05/2014	18:24:59	7,7342	20,17	0,001191303	1191,303485	57,68562372
13/05/2014	18:25:00	7,9937	20,1711	0,001245905	1245,904894	59,62110759
13/05/2014	18:25:02	8,1944	20,1717	0,001275687	1275,687481	61,11803095
13/05/2014	18:25:03	8,5222	20,1733	0,001355108	1355,107714	63,5629312
13/05/2014	18:25:04	8,6677	20,1733	0,001355108	1355,107714	64,6481447
13/05/2014	18:25:05	8,9545	20,1747	0,0014246	1424,600417	66,78724594
13/05/2014	18:25:06	9,2528	20,1752	0,001449419	1449,41924	69,01212008
13/05/2014	18:25:08	9,3877	20,1756	0,001469274	1469,274298	70,01827335
13/05/2014	18:25:09	9,652	20,1766	0,001518912	1518,911943	71,98955808
13/05/2014	18:25:10	9,8632	20,1774	0,001558622	1558,622059	73,56479582
13/05/2014	18:25:11	10,0918	20,1781	0,001593368	1593,368411	75,26981167
13/05/2014	18:25:12	10,3115	20,1789	0,001633079	1633,078527	76,90844676
13/05/2014	18:25:14	10,6941	20,18	0,00168768	1687,679936	79,76207347
13/05/2014	18:25:15	10,8201	20,1806	0,001717463	1717,462524	80,70184598
13/05/2014	18:25:16	11,0442	20,1814	0,001757173	1757,17264	82,37329853
13/05/2014	18:25:17	11,3013	20,1826	0,001816738	1816,737814	84,29088197
13/05/2014	18:25:18	11,5419	20,1827	0,001821702	1821,701578	86,08539996
13/05/2014	18:25:20	11,7994	20,1839	0,001881267	1881,266753	88,00596681
13/05/2014	18:25:21	12,0495	20,1848	0,001925941	1925,940633	89,87134067
13/05/2014	18:25:22	12,2693	20,1855	0,001960687	1960,686985	91,51072161
13/05/2014	18:25:23	12,5652	20,1865	0,002010325	2010,32463	93,71769532
13/05/2014	18:25:24	12,7762	20,1873	0,002050035	2050,034746	95,29144136
13/05/2014	18:25:26	13,0464	20,188	0,002084781	2084,781098	97,30673131
13/05/2014	18:25:27	13,2224	20,1886	0,002114564	2114,563685	98,61942942
13/05/2014	18:25:28	13,5025	20,1899	0,002179093	2179,092624	100,7085586
13/05/2014	18:25:29	13,7328	20,1907	0,002218803	2218,80274	102,426254
13/05/2014	18:25:30	13,9542	20,1912	0,002243622	2243,621563	104,0775685
13/05/2014	18:25:32	14,1767	20,1918	0,002273404	2273,40415	105,7370875
13/05/2014	18:25:33	14,496	20,193	0,002332969	2332,969324	108,1185903
13/05/2014	18:25:34	14,6875	20,1938	0,002372679	2372,67944	109,5468954
13/05/2014	18:25:35	14,9773	20,1949	0,002427281	2427,28085	111,7083722
13/05/2014	18:25:36	15,182	20,1952	0,002442172	2442,172143	113,2351296
13/05/2014	18:25:38	15,3543	20,1956	0,002462027	2462,027201	114,5202312
13/05/2014	18:25:39	15,4181	20,1959	0,002476918	2476,918495	114,9960843
13/05/2014	18:25:40	15,8909	20,1971	0,002536484	2536,483669	118,5224688
13/05/2014	18:25:41	16,1921	20,1983	0,002596049	2596,048843	120,7689726
13/05/2014	18:25:42	16,3312	20,1989	0,002625831	2625,831431	121,8064516
13/05/2014	18:25:44	16,55	20,1996	0,002660578	2660,577782	123,438374
13/05/2014	18:25:45	16,8882	20,2005	0,002705252	2705,251663	125,9608428
13/05/2014	18:25:46	17,0504	20,2011	0,002735034	2735,03425	127,1706135
13/05/2014	18:25:47	17,3323	20,2023	0,002794599	2794,599424	129,273168
13/05/2014	18:25:48	17,521	20,2026	0,002809491	2809,490718	130,6805892
13/05/2014	18:25:50	17,8233	20,2036	0,002859128	2859,128363	132,9352974

13/05/2014	18:25:51	18,0528	20,2045	0,002903802	2903,802244	134,6470259
13/05/2014	18:25:52	18,3389	20,2054	0,002948476	2948,476124	136,7809062
13/05/2014	18:25:53	18,5366	20,2063	0,00299315	2993,150005	138,255454
13/05/2014	18:25:54	18,7936	20,2072	0,003037824	3037,823886	140,1722916
13/05/2014	18:25:56	19,045	20,2079	0,00307257	3072,570237	142,0473616
13/05/2014	18:25:57	19,1766	20,2086	0,003107317	3107,316589	143,0289017
13/05/2014	18:25:58	19,4837	20,2095	0,00315199	3151,99047	145,3194108
13/05/2014	18:25:59	19,7233	20,2103	0,003191701	3191,700586	147,1064703
13/05/2014	18:26:00	20,0271	20,211	0,003226447	3226,446937	149,3723662
13/05/2014	18:26:02	20,1891	20,2115	0,003251266	3251,26576	150,5806452
13/05/2014	18:26:03	20,3828	20,2123	0,003290976	3290,975876	152,0253589
13/05/2014	18:26:04	20,7822	20,2135	0,003350541	3350,54105	155,0042886
13/05/2014	18:26:05	20,9015	20,2141	0,003380324	3380,323637	155,8940891
13/05/2014	18:26:06	21,1083	20,2148	0,00341507	3415,069989	157,4365094
13/05/2014	18:26:08	21,5036	20,2159	0,003469671	3469,671399	160,3848592
13/05/2014	18:26:09	21,6639	20,2168	0,003514345	3514,345279	161,5804587
13/05/2014	18:26:10	21,8431	20,2174	0,003544128	3544,127867	162,9170241
13/05/2014	18:26:11	22,1224	20,2187	0,003608657	3608,656805	165,0001865
13/05/2014	18:26:12	22,3704	20,2193	0,003638439	3638,439392	166,8498974
13/05/2014	18:26:14	22,5887	20,2201	0,00367815	3678,149509	168,4780906
13/05/2014	18:26:15	22,9968	20,2214	0,003742678	3742,678447	171,5219094
13/05/2014	18:26:16	23,0969	20,2218	0,003762534	3762,533505	172,2685064
13/05/2014	18:26:17	23,2405	20,2225	0,00379728	3797,279857	173,3395488
13/05/2014	18:26:18	23,6897	20,2243	0,003886628	3886,627618	176,6899124
13/05/2014	18:26:20	23,8747	20,2246	0,003901519	3901,518912	178,0697371
13/05/2014	18:26:21	24,0017	20,2252	0,003931301	3931,301499	179,0169681
13/05/2014	18:26:22	24,1593	20,226	0,003971012	3971,011615	180,1924296
13/05/2014	18:26:23	24,5895	20,2274	0,004040504	4040,504318	183,4010815
13/05/2014	18:26:24	24,7866	20,2284	0,004090142	4090,141964	184,8711542
13/05/2014	18:26:26	24,9235	20,2287	0,004105033	4105,033257	185,8922245
13/05/2014	18:26:27	25,3802	20,2306	0,004199345	4199,344783	189,2985269
13/05/2014	18:26:28	25,5539	20,2315	0,004244019	4244,018664	190,5940705
13/05/2014	18:26:29	25,6371	20,2315	0,004244019	4244,018664	191,2146187
13/05/2014	18:26:30	25,8893	20,2324	0,004288693	4288,692544	193,0956554
13/05/2014	18:26:32	26,2917	20,2343	0,004383004	4383,00407	196,0969607
13/05/2014	18:26:33	26,4296	20,2346	0,004397895	4397,895364	197,1254895
13/05/2014	18:26:34	26,6228	20,2355	0,004442569	4442,569245	198,566474
13/05/2014	18:26:35	27,013	20,2368	0,004507098	4507,098183	201,4767854
13/05/2014	18:26:36	27,1502	20,2374	0,004536881	4536,88077	202,5000932
13/05/2014	18:26:38	27,3774	20,2384	0,004586518	4586,518416	204,1946672
13/05/2014	18:26:39	27,5726	20,2389	0,004611337	4611,337238	205,6505687
13/05/2014	18:26:40	28,0291	20,2405	0,004690757	4690,75747	209,0553795
13/05/2014	18:26:41	28,1619	20,2414	0,004735431	4735,431351	210,0458698
13/05/2014	18:26:42	28,2316	20,2418	0,004755286	4755,286409	210,5657281
13/05/2014	18:26:44	28,609	20,2433	0,004829743	4829,742877	213,3805706
13/05/2014	18:26:45	28,9143	20,2451	0,004919091	4919,090638	215,6576543

13/05/2014	18:26:46	29,0216	20,2452	0,004924054	4924,054403	216,4579526
13/05/2014	18:26:47	29,2604	20,2464	0,00498362	4983,619577	218,2390453
13/05/2014	18:26:48	29,7548	20,2482	0,005072967	5072,967338	221,9265337
13/05/2014	18:26:50	29,9229	20,2495	0,005137496	5137,496277	223,1803095
13/05/2014	18:26:51	29,9817	20,2501	0,005167279	5167,278864	223,61887
13/05/2014	18:26:52	30,1195	20,251	0,005211953	5211,952745	224,646653
13/05/2014	18:26:53	30,6041	20,2527	0,005296337	5296,336742	228,2610479
13/05/2014	18:26:54	30,765	20,2539	0,005355902	5355,901916	229,4611225
13/05/2014	18:26:56	30,8543	20,255	0,005410503	5410,503326	230,1271676
13/05/2014	18:26:57	31,2704	20,257	0,005509779	5509,778616	233,2306545
13/05/2014	18:26:58	31,6196	20,2591	0,005614018	5614,017671	235,8351669
13/05/2014	18:26:59	31,7918	20,2605	0,00568351	5683,510374	237,1195227
13/05/2014	18:27:00	31,8612	20,2616	0,005738112	5738,111784	237,6371434
13/05/2014	18:27:02	31,9866	20,2627	0,005792713	5792,713194	238,5724408
13/05/2014	18:27:03	32,6454	20,2658	0,00594659	5946,589894	243,4861085
13/05/2014	18:27:04	32,7976	20,2674	0,00602601	6026,010126	244,6212941
13/05/2014	18:27:05	32,8595	20,2685	0,006080612	6080,611536	245,0829759
13/05/2014	18:27:06	32,9732	20,2697	0,006140177	6140,17671	245,9310088
13/05/2014	18:27:08	33,5447	20,2725	0,006279162	6279,162117	250,1935484
13/05/2014	18:27:09	34,0131	20,2751	0,00640822	6408,219994	253,6871154
13/05/2014	18:27:10	34,078	20,276	0,006452894	6452,893875	254,1711729
13/05/2014	18:27:11	34,1178	20,2773	0,006517423	6517,422813	254,4680216
13/05/2014	18:27:12	34,1646	20,2779	0,006547205	6547,205401	254,81708
13/05/2014	18:27:14	34,2458	20,2793	0,006616698	6616,698104	255,4227112
13/05/2014	18:27:15	34,7567	20,2821	0,006755684	6755,68351	259,233265
13/05/2014	18:27:16	35,5613	20,2862	0,006959198	6959,197856	265,2343837
13/05/2014	18:27:17	35,6563	20,2878	0,007038618	7038,618088	265,9429424
13/05/2014	18:27:18	35,6782	20,289	0,007098183	7098,183262	266,1062838
13/05/2014	18:27:20	35,6994	20,2907	0,007182567	7182,567259	266,2644043
13/05/2014	18:27:21	35,7486	20,2925	0,007271915	7271,91502	266,631363
13/05/2014	18:27:22	35,8243	20,2948	0,007386082	7386,081604	267,1959724
13/05/2014	18:27:23	36,4483	20,2993	0,007609451	7609,451008	271,8500839
13/05/2014	18:27:24	37,2384	20,3089	0,008085972	8085,972401	277,7430543
13/05/2014	18:27:26	37,2694	20,3496	0,010106225	10106,22456	277,9742681
13/05/2014	18:27:27	37,3548	20,3579	0,010518217	10518,21702	278,6112251
13/05/2014	18:27:28	37,4057	20,3631	0,010776333	10776,33277	278,9908633
13/05/2014	18:27:29	37,4441	20,367	0,01096992	10969,91959	279,2772702
13/05/2014	18:27:30	37,5089	20,3704	0,011138688	11138,68758	279,7605818
13/05/2014	18:27:32	37,9634	20,3751	0,011371985	11371,98451	283,1504755
13/05/2014	18:27:33	39,3638	20,3889	0,012056984	12056,98402	293,5953757
13/05/2014	18:27:34	39,4592	20,3965	0,01243423	12434,23012	294,3069178
13/05/2014	18:27:35	39,2587	20,4094	0,013074556	13074,55574	292,8114861
13/05/2014	18:27:36	39,0202	20,4941	0,017278864	17278,86429	291,032631
13/05/2014	18:27:38	39,1691	20,4841	0,016782488	16782,48784	292,1432034
13/05/2014	18:27:39	39,2127	20,4813	0,016643502	16643,50243	292,4683946
13/05/2014	18:27:40	39,2888	20,4804	0,016598829	16598,82855	293,0359873

13/05/2014	18:27:41	39,4531	20,479	0,016529336	16529,33585	294,2614208
13/05/2014	18:27:42	40,6644	20,4749	0,016325822	16325,8215	303,2959165
13/05/2014	18:27:44	40,905	20,3932	0,012270426	12270,42589	305,0904345
13/05/2014	18:27:45	40,828	20,3935	0,012285317	12285,31718	304,516129
13/05/2014	18:27:46	40,7544	20,3916	0,012191006	12191,00566	303,9671825
13/05/2014	18:27:47	40,9064	20,3888	0,01205202	12052,02025	305,1008764
13/05/2014	18:27:48	41,9805	20,3874	0,011982528	11982,52755	313,1120641
13/05/2014	18:27:50	42,0218	20,3789	0,011560608	11560,60756	313,4201007
13/05/2014	18:27:51	41,9162	20,3766	0,011446441	11446,44098	312,6324818
13/05/2014	18:27:52	41,8513	20,3677	0,011004666	11004,66594	312,1484244
13/05/2014	18:27:53	42,6414	20,368	0,011019557	11019,55723	318,0413947

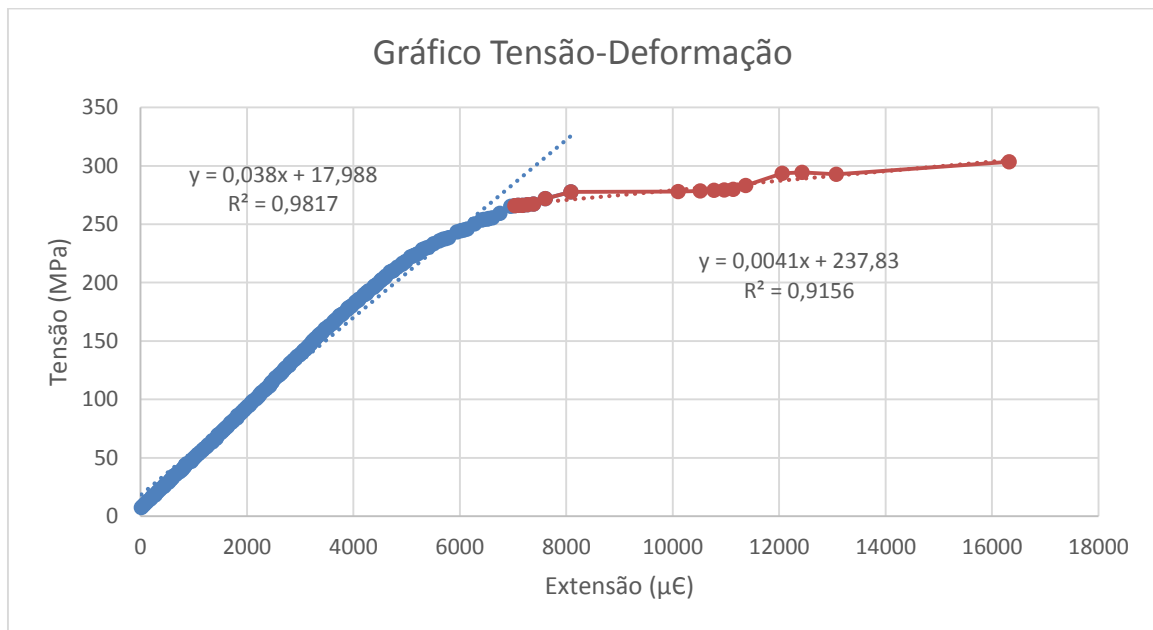


Figura B 4: Gráfico Tensão-Deformação Ensaio 2



Figura B 5: Resultado Ensaio 3

Tabela B 3: Dados ensaio 3

Data	Hora	Força_inst	ExA25_10_inst	Extensão [mm/mm]	Extensão (µε)	Tensão
11/06/2014	12:17:20	0,1743	20,369	0		
11/06/2014	12:17:22	0,2152	20,369	0	0	1,8218
11/06/2014	12:17:23	0,3154	20,3693	1,47283E-05	14,72826354	2,67
11/06/2014	12:17:24	0,5068	20,3695	2,45471E-05	24,5471059	4,2903
11/06/2014	12:17:25	0,6105	20,3701	5,40036E-05	54,00363297	5,1682
11/06/2014	12:17:26	0,6617	20,3705	7,36413E-05	73,64131769	5,6016
11/06/2014	12:17:28	0,8308	20,371	9,81884E-05	98,18842358	7,0331
11/06/2014	12:17:29	0,9589	20,3713	0,000112917	112,9166871	8,1175
11/06/2014	12:17:30	1,0859	20,3718	0,000137464	137,463793	9,1926
11/06/2014	12:17:31	1,1747	20,372	0,000147283	147,2826354	9,9444
11/06/2014	12:17:32	1,3659	20,3726	0,000176739	176,7391625	11,563
11/06/2014	12:17:34	1,4322	20,373	0,000196377	196,3768472	12,124
11/06/2014	12:17:35	1,5417	20,3735	0,000220924	220,9239531	13,051
11/06/2014	12:17:36	1,6815	20,3737	0,000230743	230,7427954	14,235
11/06/2014	12:17:37	1,7398	20,374	0,000245471	245,471059	14,728
11/06/2014	12:17:38	1,9068	20,3744	0,000265109	265,1087437	16,142
11/06/2014	12:17:40	2,0319	20,3748	0,000284746	284,7464284	17,201
11/06/2014	12:17:41	2,1466	20,3752	0,000304384	304,3841131	18,172
11/06/2014	12:17:42	2,2882	20,3756	0,000324022	324,0217978	19,371
11/06/2014	12:17:43	2,3872	20,3758	0,000333841	333,8406402	20,209
11/06/2014	12:17:44	2,5045	20,3767	0,000378025	378,0254308	21,202
11/06/2014	12:17:46	2,6223	20,3767	0,000378025	378,0254308	22,199
11/06/2014	12:17:47	2,7352	20,3771	0,000397663	397,6631155	23,155
11/06/2014	12:17:48	2,8549	20,3776	0,00042221	422,2102214	24,168

11/06/2014	12:17:49	2,9688	20,378	0,000441848	441,8479061	25,132
11/06/2014	12:17:50	3,0936	20,3786	0,000471304	471,3044332	26,189
11/06/2014	12:17:52	3,2142	20,3789	0,000486033	486,0326967	27,21
11/06/2014	12:17:53	3,3604	20,3793	0,00050567	505,6703815	28,447
11/06/2014	12:17:54	3,4649	20,3796	0,000520399	520,398645	29,332
11/06/2014	12:17:55	3,5914	20,3793	0,00050567	505,6703815	30,403
11/06/2014	12:17:56	3,731	20,3799	0,000535127	535,1269085	31,585
11/06/2014	12:17:58	3,8175	20,3801	0,000544946	544,9457509	32,317
11/06/2014	12:17:59	3,931	20,3807	0,000574402	574,402278	33,278
11/06/2014	12:18:00	4,0585	20,381	0,000589131	589,1305415	34,357
11/06/2014	12:18:01	4,1757	20,3816	0,000618587	618,5870686	35,349
11/06/2014	12:18:02	4,2836	20,3818	0,000628406	628,4059109	36,263
11/06/2014	12:18:04	4,4196	20,3822	0,000648044	648,0435957	37,414
11/06/2014	12:18:05	4,5406	20,3825	0,000662772	662,7718592	38,438
11/06/2014	12:18:06	4,6843	20,3829	0,00068241	682,4095439	39,655
11/06/2014	12:18:07	4,7658	20,3831	0,000692228	692,2283863	40,345
11/06/2014	12:18:08	4,9066	20,3836	0,000716775	716,7754922	41,537
11/06/2014	12:18:10	5,0126	20,3842	0,000746232	746,2320192	42,434
11/06/2014	12:18:11	5,1433	20,3842	0,000746232	746,2320192	43,54
11/06/2014	12:18:12	5,2656	20,3848	0,000775689	775,6885463	44,576
11/06/2014	12:18:13	5,3966	20,3853	0,000800236	800,2356522	45,685
11/06/2014	12:18:14	5,5108	20,3857	0,000819873	819,8733369	46,651
11/06/2014	12:18:16	5,6193	20,386	0,000834602	834,6016005	47,57
11/06/2014	12:18:17	5,744	20,3865	0,000859149	859,1487064	48,626
11/06/2014	12:18:18	5,8559	20,3869	0,000878786	878,7863911	49,573
11/06/2014	12:18:19	5,9665	20,3871	0,000888605	888,6052334	50,509
11/06/2014	12:18:20	6,103	20,3879	0,000927881	927,8806029	51,665
11/06/2014	12:18:22	6,2207	20,3881	0,000937699	937,6994452	52,661
11/06/2014	12:18:23	6,3267	20,3885	0,000957337	957,33713	53,558
11/06/2014	12:18:24	6,4581	20,3889	0,000976975	976,9748147	54,671
11/06/2014	12:18:25	6,5841	20,3892	0,000991703	991,7030782	55,737
11/06/2014	12:18:26	6,7146	20,3896	0,001011341	1011,340763	56,842
11/06/2014	12:18:28	6,8195	20,3901	0,001035888	1035,887869	57,73
11/06/2014	12:18:29	6,9428	20,3903	0,001045707	1045,706711	58,774
11/06/2014	12:18:30	7,0208	20,3908	0,001070254	1070,253817	59,434
11/06/2014	12:18:31	7,1557	20,391	0,001080073	1080,072659	60,576
11/06/2014	12:18:32	7,311	20,3916	0,001109529	1109,529187	61,891
11/06/2014	12:18:34	7,4208	20,3919	0,001124257	1124,25745	62,821
11/06/2014	12:18:35	7,5355	20,3923	0,001143895	1143,895135	63,792
11/06/2014	12:18:36	7,6696	20,3928	0,001168442	1168,442241	64,927
11/06/2014	12:18:37	7,7611	20,3926	0,001158623	1158,623398	65,701
11/06/2014	12:18:38	7,9033	20,3927	0,001163533	1163,532819	66,905
11/06/2014	12:18:40	8,0085	20,3933	0,001192989	1192,989347	67,796
11/06/2014	12:18:41	8,1209	20,3933	0,001192989	1192,989347	68,747
11/06/2014	12:18:42	8,2707	20,3938	0,001217536	1217,536452	70,015
11/06/2014	12:18:43	8,3899	20,3942	0,001237174	1237,174137	71,024

11/06/2014	12:18:45	8,5166	20,3946	0,001256812	1256,811822	72,097
11/06/2014	12:18:46	8,5997	20,395	0,00127645	1276,449507	72,8
11/06/2014	12:18:47	8,7466	20,3952	0,001286268	1286,268349	74,044
11/06/2014	12:18:48	8,8727	20,3957	0,001310815	1310,815455	75,112
11/06/2014	12:18:49	8,9905	20,3959	0,001320634	1320,634297	76,109
11/06/2014	12:18:51	9,1116	20,3964	0,001345181	1345,181403	77,134
11/06/2014	12:18:52	9,2336	20,3966	0,001355	1355,000245	78,167
11/06/2014	12:18:53	9,3578	20,397	0,001374638	1374,63793	79,218
11/06/2014	12:18:54	9,4571	20,3974	0,001394276	1394,275615	80,059
11/06/2014	12:18:55	9,5634	20,3977	0,001409004	1409,003878	80,959
11/06/2014	12:18:57	9,7269	20,3981	0,001428642	1428,641563	82,343
11/06/2014	12:18:58	9,7782	20,398	0,001423732	1423,732142	82,777
11/06/2014	12:18:59	9,9678	20,3988	0,001463008	1463,007511	84,382
11/06/2014	12:19:00	10,061	20,399	0,001472826	1472,826354	85,171
11/06/2014	12:19:01	10,1743	20,3996	0,001502283	1502,282881	86,13
11/06/2014	12:19:03	10,3105	20,3997	0,001507192	1507,192302	87,283
11/06/2014	12:19:04	10,4349	20,4002	0,001531739	1531,739408	88,336
11/06/2014	12:19:05	10,3809	20,4001	0,00152683	1526,829987	87,879
11/06/2014	12:19:06	10,4301	20,4005	0,001546468	1546,467671	88,296
11/06/2014	12:19:07	10,6386	20,4008	0,001561196	1561,195935	90,061
11/06/2014	12:19:09	10,8865	20,4017	0,001605381	1605,380726	92,159
11/06/2014	12:19:10	11,081	20,4024	0,001639747	1639,746674	93,806
11/06/2014	12:19:11	11,0956	20,4022	0,001629928	1629,927832	93,929
11/06/2014	12:19:12	11,2572	20,403	0,001669203	1669,203201	95,297
11/06/2014	12:19:13	11,466	20,4036	0,00169866	1698,659728	97,065
11/06/2014	12:19:15	11,4839	20,4033	0,001683931	1683,931464	97,217
11/06/2014	12:19:16	11,5847	20,4043	0,001733026	1733,025676	98,07
11/06/2014	12:19:17	11,7137	20,4044	0,001737935	1737,935097	99,162
11/06/2014	12:19:18	11,851	20,4046	0,001747754	1747,75394	100,32
11/06/2014	12:19:19	12,0489	20,4054	0,001787029	1787,029309	102
11/06/2014	12:19:21	12,1095	20,406	0,001816486	1816,485836	102,51
11/06/2014	12:19:22	12,1816	20,4058	0,001806667	1806,666994	103,12
11/06/2014	12:19:23	12,3295	20,4063	0,001831214	1831,2141	104,37
11/06/2014	12:19:24	12,4268	20,406	0,001816486	1816,485836	105,2
11/06/2014	12:19:25	12,5484	20,4065	0,001841033	1841,032942	106,23
11/06/2014	12:19:27	12,7373	20,407	0,00186558	1865,580048	107,83
11/06/2014	12:19:28	12,7892	20,4074	0,001885218	1885,217733	108,27
11/06/2014	12:19:29	12,8907	20,4076	0,001895037	1895,036575	109,13
11/06/2014	12:19:30	13,0779	20,408	0,001914674	1914,67426	110,71
11/06/2014	12:19:31	13,2045	20,4087	0,00194904	1949,040208	111,78
11/06/2014	12:19:33	13,3051	20,4088	0,00195395	1953,949629	112,63
11/06/2014	12:19:34	13,3598	20,4091	0,001968678	1968,677893	113,1
11/06/2014	12:19:35	13,4644	20,4094	0,001983406	1983,406156	113,98
11/06/2014	12:19:36	13,7108	20,4098	0,002003044	2003,043841	116,07
11/06/2014	12:19:37	13,8432	20,4108	0,002052138	2052,138053	117,19
11/06/2014	12:19:39	13,8999	20,4107	0,002047229	2047,228632	117,67

11/06/2014	12:19:40	13,9462	20,4108	0,002052138	2052,138053	118,06
11/06/2014	12:19:41	14,0252	20,4111	0,002066866	2066,866316	118,73
11/06/2014	12:19:42	14,2172	20,4118	0,002101232	2101,232265	120,36
11/06/2014	12:19:43	14,5471	20,4127	0,002145417	2145,417055	123,15
11/06/2014	12:19:45	14,5364	20,4127	0,002145417	2145,417055	123,06
11/06/2014	12:19:46	14,5735	20,413	0,002160145	2160,145319	123,37
11/06/2014	12:19:47	14,6094	20,4127	0,002145417	2145,417055	123,68
11/06/2014	12:19:48	14,7258	20,4131	0,002165055	2165,05474	124,66
11/06/2014	12:19:49	14,925	20,414	0,00220924	2209,239531	126,35
11/06/2014	12:19:51	15,2232	20,4149	0,002253424	2253,424321	128,87
11/06/2014	12:19:52	15,2829	20,4149	0,002253424	2253,424321	129,38
11/06/2014	12:19:53	15,2925	20,4153	0,002273062	2273,062006	129,46
11/06/2014	12:19:54	15,3255	20,4154	0,002277971	2277,971427	129,74
11/06/2014	12:19:55	15,3902	20,4154	0,002277971	2277,971427	130,29
11/06/2014	12:19:57	15,8218	20,4168	0,002346703	2346,703324	133,94
11/06/2014	12:19:58	15,9266	20,4164	0,002327066	2327,065639	134,83
11/06/2014	12:19:59	15,9268	20,4166	0,002336884	2336,884481	134,83
11/06/2014	12:20:00	15,9437	20,4164	0,002327066	2327,065639	134,97
11/06/2014	12:20:01	16,0011	20,4167	0,002341794	2341,793902	135,46
11/06/2014	12:20:03	16,1088	20,4172	0,002366341	2366,341008	136,37
11/06/2014	12:20:04	16,5758	20,4185	0,002430163	2430,163484	140,32
11/06/2014	12:20:05	16,6656	20,4189	0,002449801	2449,801168	141,08
11/06/2014	12:20:06	16,6648	20,4188	0,002444892	2444,891747	141,08
11/06/2014	12:20:07	16,674	20,4188	0,002444892	2444,891747	141,15
11/06/2014	12:20:09	16,7025	20,419	0,002454711	2454,71059	141,39
11/06/2014	12:20:10	16,7897	20,4191	0,00245962	2459,620011	142,13
11/06/2014	12:20:11	17,3421	20,4204	0,002523442	2523,442486	146,81
11/06/2014	12:20:12	17,5604	20,4214	0,002572537	2572,536698	148,66
11/06/2014	12:20:13	17,5442	20,4213	0,002567627	2567,627277	148,52
11/06/2014	12:20:15	17,5266	20,4215	0,002577446	2577,446119	148,37
11/06/2014	12:20:16	17,5259	20,4212	0,002562718	2562,717856	148,36
11/06/2014	12:20:17	17,5415	20,4214	0,002572537	2572,536698	148,5
11/06/2014	12:20:18	17,5794	20,4213	0,002567627	2567,627277	148,82
11/06/2014	12:20:19	17,6528	20,4216	0,002582356	2582,35554	149,44
11/06/2014	12:20:21	18,7101	20,4248	0,002739457	2739,457018	158,39
11/06/2014	12:20:22	19,0678	20,426	0,00279837	2798,370072	161,42
11/06/2014	12:20:23	18,9784	20,4259	0,002793461	2793,460651	160,66
11/06/2014	12:20:24	18,8714	20,4258	0,002788551	2788,55123	159,76
11/06/2014	12:20:25	18,7789	20,4251	0,002754185	2754,185282	158,97
11/06/2014	12:20:27	18,7237	20,4252	0,002759095	2759,094703	158,5
11/06/2014	12:20:28	18,6816	20,4249	0,002744366	2744,366439	158,15
11/06/2014	12:20:29	18,652	20,4249	0,002744366	2744,366439	157,9
11/06/2014	12:20:30	18,6544	20,4249	0,002744366	2744,366439	157,92
11/06/2014	12:20:31	18,7368	20,425	0,002749276	2749,27586	158,62
11/06/2014	12:20:33	18,8451	20,4255	0,002773823	2773,822966	159,53
11/06/2014	12:20:34	18,9818	20,426	0,00279837	2798,370072	160,69

11/06/2014	12:20:35	19,3634	20,4272	0,002857283	2857,283126	163,92
11/06/2014	12:20:36	19,7263	20,4284	0,002916196	2916,19618	166,99
11/06/2014	12:20:37	19,8386	20,4288	0,002935834	2935,833865	167,94
11/06/2014	12:20:39	19,8785	20,4289	0,002940743	2940,743286	168,28
11/06/2014	12:20:40	19,9016	20,429	0,002945653	2945,652708	168,48
11/06/2014	12:20:41	19,9306	20,429	0,002945653	2945,652708	168,72
11/06/2014	12:20:42	20,2578	20,4304	0,003014385	3014,384604	171,49
11/06/2014	12:20:43	20,8968	20,4322	0,003102754	3102,754185	176,9
11/06/2014	12:20:45	20,9223	20,4322	0,003102754	3102,754185	177,12
11/06/2014	12:20:46	20,8785	20,4324	0,003112573	3112,573028	176,75
11/06/2014	12:20:47	20,8414	20,4322	0,003102754	3102,754185	176,43
11/06/2014	12:20:48	20,8248	20,4325	0,003117482	3117,482449	176,29
11/06/2014	12:20:49	20,8211	20,4324	0,003112573	3112,573028	176,26
11/06/2014	12:20:51	20,8221	20,4323	0,003107664	3107,663606	176,27
11/06/2014	12:20:52	20,8445	20,4326	0,003122392	3122,39187	176,46
11/06/2014	12:20:53	20,8892	20,4328	0,003132211	3132,210712	176,84
11/06/2014	12:20:54	21,1153	20,4335	0,003166577	3166,576661	178,75
11/06/2014	12:20:55	22,4673	20,4374	0,003358044	3358,044087	190,2
11/06/2014	12:20:57	22,5406	20,437	0,003338406	3338,406402	190,82
11/06/2014	12:20:58	22,4528	20,4371	0,003343316	3343,315823	190,07
11/06/2014	12:20:59	22,3577	20,4369	0,003333497	3333,496981	189,27
11/06/2014	12:21:00	22,2799	20,4367	0,003323678	3323,678138	188,61
11/06/2014	12:21:01	22,2205	20,4368	0,003328588	3328,58756	188,11
11/06/2014	12:21:03	22,1911	20,4366	0,003318769	3318,768717	187,86
11/06/2014	12:21:04	22,2013	20,4368	0,003328588	3328,58756	187,94
11/06/2014	12:21:05	22,2155	20,4368	0,003328588	3328,58756	188,06
11/06/2014	12:21:06	22,2511	20,4369	0,003333497	3333,496981	188,37
11/06/2014	12:21:07	22,2895	20,4369	0,003333497	3333,496981	188,69
11/06/2014	12:21:09	22,3494	20,4373	0,003353135	3353,134665	189,2
11/06/2014	12:21:10	22,4622	20,4375	0,003362954	3362,953508	190,15
11/06/2014	12:21:11	23,2415	20,4402	0,003495508	3495,50788	196,75
11/06/2014	12:21:12	24,2577	20,443	0,003632972	3632,971673	205,35
11/06/2014	12:21:13	24,2176	20,4432	0,003642791	3642,790515	205,01
11/06/2014	12:21:15	24,115	20,4429	0,003628062	3628,062251	204,14
11/06/2014	12:21:16	24,0122	20,4429	0,003628062	3628,062251	203,27
11/06/2014	12:21:17	23,9241	20,4426	0,003613334	3613,333988	202,53
11/06/2014	12:21:18	23,8578	20,4424	0,003603515	3603,515146	201,97
11/06/2014	12:21:19	23,8319	20,4426	0,003613334	3613,333988	201,75
11/06/2014	12:21:21	23,8376	20,4421	0,003588787	3588,786882	201,8
11/06/2014	12:21:22	23,8651	20,4426	0,003613334	3613,333988	202,03
11/06/2014	12:21:23	23,8966	20,4426	0,003613334	3613,333988	202,3
11/06/2014	12:21:24	23,9434	20,4428	0,003623153	3623,15283	202,69
11/06/2014	12:21:25	24,014	20,443	0,003632972	3632,971673	203,29
11/06/2014	12:21:27	24,1312	20,4435	0,003657519	3657,518779	204,28
11/06/2014	12:21:28	24,4017	20,4443	0,003696794	3696,794148	206,57
11/06/2014	12:21:29	25,6842	20,4475	0,003853896	3853,895626	217,43

11/06/2014	12:21:30	25,8901	20,4483	0,003893171	3893,170995	219,17
11/06/2014	12:21:31	25,8257	20,4484	0,00389808	3898,080416	218,63
11/06/2014	12:21:33	25,7443	20,4481	0,003883352	3883,352153	217,94
11/06/2014	12:21:34	25,6816	20,448	0,003878443	3878,442732	217,41
11/06/2014	12:21:35	25,6388	20,4482	0,003888262	3888,261574	217,04
11/06/2014	12:21:36	25,6158	20,448	0,003878443	3878,442732	216,85
11/06/2014	12:21:37	25,6117	20,4481	0,003883352	3883,352153	216,81
11/06/2014	12:21:39	25,6146	20,4483	0,003893171	3893,170995	216,84
11/06/2014	12:21:40	25,6314	20,4485	0,00390299	3902,989837	216,98
11/06/2014	12:21:41	25,6545	20,4485	0,00390299	3902,989837	217,18
11/06/2014	12:21:42	25,6916	20,4489	0,003922628	3922,627522	217,49
11/06/2014	12:21:43	25,7881	20,4491	0,003932446	3932,446365	218,31
11/06/2014	12:21:45	26,0197	20,4501	0,003981541	3981,540576	220,27
11/06/2014	12:21:46	27,0774	20,4536	0,00415337	4153,370318	229,22
11/06/2014	12:21:47	27,4422	20,4549	0,004217193	4217,192793	232,31
11/06/2014	12:21:48	27,4022	20,4551	0,004227012	4227,011635	231,97
11/06/2014	12:21:49	27,3444	20,4551	0,004227012	4227,011635	231,48
11/06/2014	12:21:51	27,2969	20,4552	0,004231921	4231,921057	231,08
11/06/2014	12:21:52	27,2677	20,4552	0,004231921	4231,921057	230,83
11/06/2014	12:21:53	27,2482	20,4554	0,00424174	4241,739899	230,67
11/06/2014	12:21:54	27,2438	20,4551	0,004227012	4227,011635	230,63
11/06/2014	12:21:55	27,2582	20,4553	0,00423683	4236,830478	230,75
11/06/2014	12:21:57	27,2922	20,4555	0,004246649	4246,64932	231,04
11/06/2014	12:21:58	27,3331	20,4557	0,004256468	4256,468162	231,39
11/06/2014	12:21:59	27,4365	20,4559	0,004266287	4266,287005	232,26
11/06/2014	12:22:00	27,6026	20,4567	0,004305562	4305,562374	233,67
11/06/2014	12:22:01	28,3973	20,4581	0,004374294	4374,294271	240,4
11/06/2014	12:22:03	28,7033	20,4586	0,004398841	4398,841377	242,99
11/06/2014	12:22:04	28,7064	20,459	0,004418479	4418,479061	243,01
11/06/2014	12:22:05	28,6765	20,4588	0,00440866	4408,660219	242,76
11/06/2014	12:22:06	28,6455	20,4589	0,00441357	4413,56964	242,5
11/06/2014	12:22:07	28,6254	20,4588	0,00440866	4408,660219	242,33
11/06/2014	12:22:09	28,6191	20,4588	0,00440866	4408,660219	242,27
11/06/2014	12:22:10	28,6308	20,4589	0,00441357	4413,56964	242,37
11/06/2014	12:22:11	28,7591	20,4595	0,004443026	4443,026167	243,46
11/06/2014	12:22:12	29,7324	20,4625	0,004590309	4590,308803	251,7
11/06/2014	12:22:13	30,0901	20,4636	0,004644312	4644,312436	254,73
11/06/2014	12:22:15	30,0403	20,4636	0,004644312	4644,312436	254,31
11/06/2014	12:22:16	29,9794	20,4635	0,004639403	4639,403014	253,79
11/06/2014	12:22:17	29,9241	20,4635	0,004639403	4639,403014	253,32
11/06/2014	12:22:18	29,8846	20,4635	0,004639403	4639,403014	252,99
11/06/2014	12:22:19	29,8574	20,4633	0,004629584	4629,584172	252,76
11/06/2014	12:22:21	29,8385	20,4633	0,004629584	4629,584172	252,6
11/06/2014	12:22:22	29,8398	20,4633	0,004629584	4629,584172	252,61
11/06/2014	12:22:23	29,8379	20,4636	0,004644312	4644,312436	252,59
11/06/2014	12:22:24	29,9195	20,4639	0,004659041	4659,040699	253,28

11/06/2014	12:22:25	30,0554	20,464	0,00466395	4663,95012	254,43
11/06/2014	12:22:27	31,0567	20,4663	0,004776867	4776,866807	262,91
11/06/2014	12:22:28	31,501	20,4678	0,004850508	4850,508125	266,67
11/06/2014	12:22:29	31,4526	20,4681	0,004865236	4865,236389	266,26
11/06/2014	12:22:30	31,4051	20,4681	0,004865236	4865,236389	265,86
11/06/2014	12:22:31	31,3522	20,4681	0,004865236	4865,236389	265,41
11/06/2014	12:22:33	31,2983	20,4678	0,004850508	4850,508125	264,95
11/06/2014	12:22:34	31,2664	20,4681	0,004865236	4865,236389	264,68
11/06/2014	12:22:35	31,237	20,4679	0,004855418	4855,417546	264,44
11/06/2014	12:22:36	31,2151	20,4682	0,004870146	4870,14581	264,25
11/06/2014	12:22:37	31,191	20,4679	0,004855418	4855,417546	264,05
11/06/2014	12:22:39	31,2681	20,4684	0,004879965	4879,964652	264,7
11/06/2014	12:22:40	32,0683	20,4725	0,005081251	5081,250921	271,47
11/06/2014	12:22:41	32,8316	20,4751	0,005208896	5208,895871	277,93
11/06/2014	12:22:42	32,7725	20,4761	0,00525799	5257,990083	277,43
11/06/2014	12:22:43	32,6949	20,4771	0,005307084	5307,084295	276,78
11/06/2014	12:22:45	32,6296	20,4777	0,005336541	5336,540822	276,22
11/06/2014	12:22:46	32,5725	20,4782	0,005361088	5361,087928	275,74
11/06/2014	12:22:47	32,5245	20,4788	0,005390544	5390,544455	275,34
11/06/2014	12:22:48	32,4878	20,4794	0,005420001	5420,000982	275,02
11/06/2014	12:22:49	32,4584	20,48	0,005449458	5449,457509	274,78
11/06/2014	12:22:51	32,526	20,4813	0,00551328	5513,279984	275,35
11/06/2014	12:22:52	32,807	20,4827	0,005582012	5582,011881	277,73
11/06/2014	12:22:53	34,2906	20,4901	0,005945309	5945,309048	290,29
11/06/2014	12:22:54	34,2302	20,4913	0,006004222	6004,222102	289,77
11/06/2014	12:22:55	34,0538	20,4926	0,006068045	6068,044578	288,28
11/06/2014	12:22:57	33,9312	20,4945	0,006161324	6161,32358	287,24
11/06/2014	12:22:58	33,8426	20,496	0,006234965	6234,964898	286,49
11/06/2014	12:22:59	33,7262	20,4995	0,006406795	6406,794639	285,51
11/06/2014	12:23:00	33,6424	20,5026	0,006558987	6558,986695	284,8
11/06/2014	12:23:02	33,5784	20,5047	0,006662085	6662,08454	284,26
11/06/2014	12:23:03	33,5525	20,5063	0,006740635	6740,635279	284,04
11/06/2014	12:23:04	33,7551	20,5088	0,006863371	6863,370809	285,75
11/06/2014	12:23:05	35,3729	20,5172	0,007275762	7275,762188	299,45
11/06/2014	12:23:06	35,2766	20,5181	0,007319947	7319,946978	298,63
11/06/2014	12:23:08	35,1443	20,5181	0,007319947	7319,946978	297,51
11/06/2014	12:23:09	35,0343	20,5188	0,007354313	7354,312927	296,58
11/06/2014	12:23:10	34,9429	20,519	0,007364132	7364,131769	295,81
11/06/2014	12:23:11	34,8754	20,5195	0,007388679	7388,678875	295,24
11/06/2014	12:23:12	34,8147	20,5277	0,007791251	7791,251411	294,72
11/06/2014	12:23:14	34,779	20,5285	0,007830527	7830,526781	294,42
11/06/2014	12:23:15	34,8387	20,5297	0,00788944	7889,439835	294,93
11/06/2014	12:23:16	35,8208	20,5328	0,008041632	8041,631892	303,24
11/06/2014	12:23:17	35,9788	20,5356	0,008179096	8179,095685	304,58
11/06/2014	12:23:18	35,838	20,5381	0,008301831	8301,831214	303,39
11/06/2014	12:23:20	35,7459	20,5392	0,008355835	8355,834847	302,61

11/06/2014	12:23:21	35,7336	20,5208	0,007452501	7452,50135	302,5
11/06/2014	12:23:22	36,2515	20,534	0,008100545	8100,544946	306,89
11/06/2014	12:23:23	36,4656	20,5454	0,008660219	8660,21896	308,7
11/06/2014	12:23:24	36,4337	20,5456	0,008670038	8670,037803	308,43
11/06/2014	12:23:26	36,3943	20,544	0,008591487	8591,487064	308,09
11/06/2014	12:23:27	36,4778	20,5446	0,008620944	8620,943591	308,8
11/06/2014	12:23:28	37,0095	20,5469	0,008733386	8733,860278	313,3
11/06/2014	12:23:29	37,0793	20,5495	0,008861505	8861,505229	313,89
11/06/2014	12:23:30	37,0247	20,5518	0,008974422	8974,421916	313,43
11/06/2014	12:23:32	36,9617	20,5526	0,009013697	9013,697285	312,9
11/06/2014	12:23:33	37,0761	20,5537	0,009067701	9067,700918	313,87
11/06/2014	12:23:34	37,4921	20,564	0,009573371	9573,3713	317,39
11/06/2014	12:23:35	37,5702	20,5642	0,00958319	9583,190142	318,05
11/06/2014	12:23:36	37,5561	20,5646	0,009602828	9602,827827	317,93
11/06/2014	12:23:38	37,5788	20,5652	0,009632284	9632,284354	318,12
11/06/2014	12:23:39	37,8409	20,5664	0,009691197	9691,197408	320,34
11/06/2014	12:23:40	38,0413	20,5685	0,009794295	9794,295253	322,04
11/06/2014	12:23:41	38,5223	20,6832	0,015425401	15425,40135	326,11
11/06/2014	12:23:42	38,0775	20,7331	0,017875203	17875,20251	322,34



Figura B 6: Gráfico Tensão-Deformação Ensaio 3



Figura B 7: Resultado Ensaio 4

Tabela B 4: Dados ensaio 4

Data	Hora	Força_inst	ExA25_10_inst	Extensão [mm/mm]	Extensão ($\mu\epsilon$)	Tensão (MPa)
11/06/2014	12:40:33	0,3471	19,504	0	0	3,000051859
11/06/2014	12:40:34	0,3677	19,504	0	0	3,178101609
11/06/2014	12:40:35	0,4762	19,5044	2,05086E-05	20,50861362	4,115887915
11/06/2014	12:40:36	0,6064	19,5048	4,10172E-05	41,01722724	5,241231482
11/06/2014	12:40:37	0,7206	19,5054	7,17801E-05	71,78014766	6,228283981
11/06/2014	12:40:39	0,8379	19,5055	7,69073E-05	76,90730107	7,242130374
11/06/2014	12:40:40	0,9877	19,5064	0,000123052	123,0516817	8,536880499
11/06/2014	12:40:41	1,0929	19,5066	0,000133306	133,3059885	9,446144272
11/06/2014	12:40:42	1,2182	19,5072	0,000164069	164,0689089	10,5291362
11/06/2014	12:40:43	1,3194	19,5074	0,000174323	174,3232158	11,40382721
11/06/2014	12:40:45	1,4454	19,5078	0,000194832	194,8318294	12,49286937
11/06/2014	12:40:46	1,5829	19,5083	0,000220468	220,4675964	13,68130823
11/06/2014	12:40:47	1,678	19,5086	0,000235849	235,8490566	14,50327577
11/06/2014	12:40:48	1,8051	19,5092	0,000266612	266,611977	15,60182544
11/06/2014	12:40:49	1,9286	19,5095	0,000281993	281,9934372	16,66925962
11/06/2014	12:40:51	2,0692	19,5101	0,000312756	312,7563577	17,88449239
11/06/2014	12:40:52	2,175	19,5104	0,000328138	328,1378179	18,79894207
11/06/2014	12:40:53	2,3049	19,511	0,000358901	358,9007383	19,92169268
11/06/2014	12:40:54	2,4029	19,5111	0,000364028	364,0278917	20,76872547
11/06/2014	12:40:55	2,5082	19,5115	0,000384537	384,5365053	21,67885357
11/06/2014	12:40:57	2,6407	19,5118	0,000399918	399,9179655	22,82407647
11/06/2014	12:40:58	2,7816	19,5123	0,000425554	425,5537326	24,04190219

11/06/2014	12:40:59	2,8993	19,5128	0,000451189	451,1894996	25,05920586
11/06/2014	12:41:00	3,0155	19,5132	0,000471698	471,6981132	26,06354475
11/06/2014	12:41:01	3,163	19,5136	0,000492207	492,2067268	27,33841553
11/06/2014	12:41:03	3,253	19,5141	0,000517842	517,8424938	28,11630279
11/06/2014	12:41:04	3,3606	19,5144	0,000533224	533,2239541	29,04631022
11/06/2014	12:41:05	3,5104	19,5146	0,000543478	543,4782609	30,34106035
11/06/2014	12:41:06	3,6177	19,515	0,000563987	563,9868745	31,26847482
11/06/2014	12:41:07	3,7384	19,5154	0,000584495	584,4954881	32,31170807
11/06/2014	12:41:09	3,8496	19,5161	0,000620386	620,3855619	33,27283099
11/06/2014	12:41:10	3,9639	19,5162	0,000625513	625,5127153	34,26074781
11/06/2014	12:41:11	4,0959	19,5166	0,000646021	646,021329	35,40164912
11/06/2014	12:41:12	4,1975	19,5171	0,000671657	671,657096	36,2797974
11/06/2014	12:41:13	4,3357	19,5176	0,000697293	697,292863	37,4742865
11/06/2014	12:41:15	4,4613	19,5179	0,000712674	712,6743232	38,55987139
11/06/2014	12:41:16	4,5774	19,5184	0,00073831	738,3100902	39,56334595
11/06/2014	12:41:17	4,7047	19,5185	0,000743437	743,4372436	40,66362426
11/06/2014	12:41:18	4,7998	19,5189	0,000763946	763,9458573	41,4855918
11/06/2014	12:41:19	4,9426	19,5194	0,000789582	789,5816243	42,71983958
11/06/2014	12:41:21	5,0557	19,5197	0,000804963	804,9630845	43,69738457
11/06/2014	12:41:22	5,1804	19,5203	0,000835726	835,7260049	44,77519058
11/06/2014	12:41:23	5,2733	19,5204	0,000840853	840,8531583	45,5781431
11/06/2014	12:41:24	5,4167	19,521	0,000871616	871,6160788	46,81757679
11/06/2014	12:41:25	5,5175	19,5213	0,000886998	886,997539	47,68881052
11/06/2014	12:41:27	5,6734	19,5218	0,000912633	912,633306	49,03628412
11/06/2014	12:41:28	5,7793	19,5223	0,000938269	938,269073	49,95159813
11/06/2014	12:41:29	5,9067	19,5226	0,000953651	953,6505332	51,05274076
11/06/2014	12:41:30	6,0003	19,5231	0,000979286	979,2863002	51,8617435
11/06/2014	12:41:31	6,1424	19,5234	0,000994668	994,6677605	53,08994105
11/06/2014	12:41:33	6,2726	19,5239	0,001020304	1020,303527	54,21528462
11/06/2014	12:41:34	6,3801	19,5242	0,001035685	1035,684988	55,14442773
11/06/2014	12:41:35	6,4796	19,5245	0,001051066	1051,066448	56,00442531
11/06/2014	12:41:36	6,6082	19,5248	0,001066448	1066,447908	57,11593977
11/06/2014	12:41:37	6,7618	19,5252	0,001086957	1086,956522	58,44353403
11/06/2014	12:41:39	6,8433	19,5254	0,001097211	1097,210829	59,14795416
11/06/2014	12:41:40	6,9831	19,5262	0,001138228	1138,228056	60,35627236
11/06/2014	12:41:41	7,1298	19,5265	0,00115361	1153,609516	61,6242286
11/06/2014	12:41:42	7,2204	19,5269	0,001174118	1174,11813	62,40730177
11/06/2014	12:41:43	7,3471	19,5274	0,001199754	1199,753897	63,50239416
11/06/2014	12:41:45	7,4501	19,5276	0,001210008	1210,008203	64,39264292
11/06/2014	12:41:46	7,5725	19,528	0,001230517	1230,516817	65,45056959
11/06/2014	12:41:47	7,6946	19,5285	0,001256153	1256,152584	66,5059033
11/06/2014	12:41:48	7,8212	19,5286	0,00126128	1261,279737	67,60013138
11/06/2014	12:41:49	7,9468	19,5292	0,001292043	1292,042658	68,68571626
11/06/2014	12:41:51	8,0707	19,5298	0,001322806	1322,805578	69,75660772
11/06/2014	12:41:52	8,1819	19,5301	0,001338187	1338,187039	70,71773064
11/06/2014	12:41:53	8,2952	19,5303	0,001348441	1348,441345	71,69700427

11/06/2014	12:41:54	8,409	19,5309	0,001379204	1379,204266	72,68059949
11/06/2014	12:41:55	8,5457	19,5312	0,001394586	1394,585726	73,86212381
11/06/2014	12:41:57	8,664	19,5317	0,001420221	1420,221493	74,88461339
11/06/2014	12:41:58	8,7721	19,5319	0,001430476	1430,4758	75,81894242
11/06/2014	12:41:59	8,8968	19,5324	0,001456112	1456,111567	76,89674843
11/06/2014	12:42:00	9,0197	19,5326	0,001466366	1466,365874	77,9589967
11/06/2014	12:42:01	9,1383	19,5333	0,001502256	1502,255947	78,98407924
11/06/2014	12:42:03	9,2502	19,5332	0,001497129	1497,128794	79,9512524
11/06/2014	12:42:04	9,378	19,5339	0,001533019	1533,018868	81,05585231
11/06/2014	12:42:05	9,4964	19,5341	0,001543273	1543,273175	82,07920621
11/06/2014	12:42:06	9,6299	19,5347	0,001574036	1574,036095	83,23307231
11/06/2014	12:42:07	9,7341	19,5349	0,00158429	1584,290402	84,13369289
11/06/2014	12:42:09	9,8693	19,5352	0,001599672	1599,671862	85,30225242
11/06/2014	12:42:10	9,9793	19,5356	0,00162018	1620,180476	86,25300351
11/06/2014	12:42:11	10,0842	19,5361	0,001645816	1645,816243	87,15967432
11/06/2014	12:42:12	10,2165	19,5364	0,001661198	1661,197703	88,30316859
11/06/2014	12:42:13	10,3366	19,5367	0,001676579	1676,579163	89,34121592
11/06/2014	12:42:15	10,4575	19,5372	0,001702215	1702,21493	90,38617781
11/06/2014	12:42:16	10,5858	19,5377	0,001727851	1727,850697	91,49509931
11/06/2014	12:42:17	10,7284	19,5384	0,001763741	1763,740771	92,72761845
11/06/2014	12:42:18	10,8191	19,5385	0,001768868	1768,867925	93,51155595
11/06/2014	12:42:19	10,9618	19,539	0,001794504	1794,503692	94,74493941
11/06/2014	12:42:21	11,0598	19,539	0,001794504	1794,503692	95,5919722
11/06/2014	12:42:22	11,1709	19,5397	0,001830394	1830,393765	96,55223081
11/06/2014	12:42:23	11,3251	19,5403	0,001861157	1861,156686	97,88501098
11/06/2014	12:42:24	11,4393	19,5404	0,001866284	1866,283839	98,87206348
11/06/2014	12:42:25	11,542	19,5408	0,001886792	1886,792453	99,75971927
11/06/2014	12:42:27	11,6471	19,541	0,001897047	1897,04676	100,6681187
11/06/2014	12:42:28	11,7713	19,5415	0,001922683	1922,682527	101,7416031
11/06/2014	12:42:29	11,9075	19,5419	0,001943191	1943,19114	102,9188059
11/06/2014	12:42:30	12,0252	19,5421	0,001953445	1953,445447	103,9361095
11/06/2014	12:42:31	12,1488	19,5424	0,001968827	1968,826907	105,004408
11/06/2014	12:42:33	12,2604	19,5427	0,001984208	1984,208368	105,9689882
11/06/2014	12:42:34	12,3911	19,5434	0,002020098	2020,098441	107,0986534
11/06/2014	12:42:35	12,5013	19,5439	0,002045734	2045,734208	108,0511331
11/06/2014	12:42:36	12,6221	19,5442	0,002061116	2061,115669	109,0952307
11/06/2014	12:42:37	12,7481	19,5447	0,002086751	2086,751436	110,1842728
11/06/2014	12:42:39	12,8415	19,5451	0,00210726	2107,260049	110,991547
11/06/2014	12:42:40	12,9856	19,5456	0,002132896	2132,895816	112,2370309
11/06/2014	12:42:41	13,0939	19,5459	0,002148277	2148,277276	113,1730886
11/06/2014	12:42:42	13,2196	19,5463	0,002168786	2168,78589	114,2595378
11/06/2014	12:42:43	13,332	19,5465	0,00217904	2179,040197	115,2310325
11/06/2014	12:42:45	13,4738	19,5471	0,002209803	2209,803117	116,4566371
11/06/2014	12:42:46	13,58	19,5473	0,002220057	2220,057424	117,3745441
11/06/2014	12:42:47	13,7068	19,548	0,002255947	2255,947498	118,4705008
11/06/2014	12:42:48	13,819	19,5482	0,002266202	2266,201805	119,4402669

11/06/2014	12:42:50	13,9422	19,5489	0,002302092	2302,091879	120,5051081
11/06/2014	12:42:51	14,0531	19,5491	0,002312346	2312,346185	121,4636381
11/06/2014	12:42:52	14,1845	19,5499	0,002353363	2353,363413	122,5993535
11/06/2014	12:42:53	14,2876	19,55	0,002358491	2358,490566	123,4904666
11/06/2014	12:42:54	14,4121	19,5505	0,002384126	2384,126333	124,5665439
11/06/2014	12:42:56	14,5424	19,551	0,002409762	2409,7621	125,6927518
11/06/2014	12:42:57	14,652	19,5511	0,002414889	2414,889253	126,6400456
11/06/2014	12:42:58	14,7734	19,5516	0,002440525	2440,525021	127,6893291
11/06/2014	12:42:59	14,9197	19,5521	0,002466161	2466,160788	128,9538281
11/06/2014	12:43:00	15,0113	19,5522	0,002471288	2471,287941	129,7455444
11/06/2014	12:43:02	15,1404	19,5527	0,002496924	2496,923708	130,8613805
11/06/2014	12:43:03	15,2711	19,5531	0,002517432	2517,432322	131,9910457
11/06/2014	12:43:04	15,3751	19,5534	0,002532814	2532,813782	132,8899376
11/06/2014	12:43:05	15,4839	19,5538	0,002553322	2553,322395	133,8303169
11/06/2014	12:43:06	15,6028	19,5543	0,002578958	2578,958162	134,8579924
11/06/2014	12:43:08	15,737	19,5547	0,002599467	2599,466776	136,0179087
11/06/2014	12:43:09	15,8878	19,5552	0,002625103	2625,102543	137,321302
11/06/2014	12:43:10	15,9829	19,5556	0,002645611	2645,611157	138,1432695
11/06/2014	12:43:11	16,0986	19,556	0,00266612	2666,11977	139,1432868
11/06/2014	12:43:12	16,2117	19,5562	0,002676374	2676,374077	140,1208318
11/06/2014	12:43:14	16,3317	19,5568	0,002707137	2707,136998	141,1580148
11/06/2014	12:43:15	16,4557	19,5572	0,002727646	2727,645611	142,2297706
11/06/2014	12:43:16	16,583	19,5576	0,002748154	2748,154225	143,3300489
11/06/2014	12:43:17	16,7029	19,558	0,002768663	2768,662838	144,3663676
11/06/2014	12:43:18	16,7999	19,5585	0,002794299	2794,298605	145,2047572
11/06/2014	12:43:20	16,9269	19,5589	0,002814807	2814,807219	146,3024426
11/06/2014	12:43:21	17,0686	19,5593	0,002835316	2835,315833	147,5271828
11/06/2014	12:43:22	17,2033	19,5599	0,002866079	2866,078753	148,6914208
11/06/2014	12:43:23	17,2938	19,5603	0,002886587	2886,587367	149,4736296
11/06/2014	12:43:24	17,4498	19,561	0,002922477	2922,477441	150,8219675
11/06/2014	12:43:26	17,5516	19,561	0,002922477	2922,477441	151,7018445
11/06/2014	12:43:27	17,6538	19,5611	0,002927605	2927,604594	152,5851787
11/06/2014	12:43:28	17,7716	19,5618	0,002963495	2963,494668	153,6033466
11/06/2014	12:43:29	17,9003	19,5623	0,00298913	2989,130435	154,7157254
11/06/2014	12:43:30	18,0332	19,5629	0,003019893	3019,893355	155,8644056
11/06/2014	12:43:32	18,1345	19,5632	0,003035275	3035,274815	156,7399609
11/06/2014	12:43:33	18,2464	19,5635	0,003050656	3050,656276	157,7071341
11/06/2014	12:43:34	18,3859	19,564	0,003076292	3076,292043	158,9128593
11/06/2014	12:43:35	18,4891	19,5642	0,003086546	3086,546349	159,8048367
11/06/2014	12:43:36	18,612	19,565	0,003127564	3127,563577	160,867085
11/06/2014	12:43:38	18,7171	19,5653	0,003142945	3142,945037	161,7754845
11/06/2014	12:43:39	18,8722	19,5659	0,003173708	3173,707957	163,1160435
11/06/2014	12:43:40	18,9935	19,5664	0,003199344	3199,343724	164,1644627
11/06/2014	12:43:41	19,0906	19,5666	0,003209598	3209,598031	165,0037166
11/06/2014	12:43:42	19,2021	19,567	0,003230107	3230,106645	165,9674325
11/06/2014	12:43:44	19,3384	19,5676	0,00326087	3260,869565	167,1454995

11/06/2014	12:43:45	19,4542	19,5677	0,003265997	3265,996719	168,1463811
11/06/2014	12:43:46	19,5538	19,5679	0,003276251	3276,251025	169,007243
11/06/2014	12:43:47	19,7008	19,5686	0,003312141	3312,141099	170,2777922
11/06/2014	12:43:48	19,8203	19,5688	0,003322395	3322,395406	171,3106536
11/06/2014	12:43:50	19,9343	19,563	0,003025021	3025,020509	172,2959775
11/06/2014	12:43:51	20,0592	19,564	0,003076292	3076,292043	173,3755121
11/06/2014	12:43:52	20,1669	19,5642	0,003086546	3086,546349	174,3063839
11/06/2014	12:43:53	20,3353	19,565	0,003127564	3127,563577	175,7618974
11/06/2014	12:43:54	20,4362	19,5654	0,003148072	3148,07219	176,6339954
11/06/2014	12:43:56	20,5565	19,5659	0,003173708	3173,707957	177,6737714
11/06/2014	12:43:57	20,6435	19,5662	0,003189089	3189,089418	178,4257291
11/06/2014	12:43:58	20,7969	19,567	0,003230107	3230,106645	179,7515947
11/06/2014	12:43:59	20,929	19,5674	0,003250615	3250,615258	180,8933603
11/06/2014	12:44:00	21,0615	19,5681	0,003286505	3286,505332	182,0385832
11/06/2014	12:44:02	21,1303	19,5683	0,00329676	3296,759639	182,6332348
11/06/2014	12:44:03	21,2979	19,5689	0,003327523	3327,522559	184,0818337
11/06/2014	12:44:04	21,3826	19,5697	0,00336854	3368,539787	184,8139121
11/06/2014	12:44:05	21,5216	19,5701	0,003389048	3389,0484	186,0153157
11/06/2014	12:44:06	21,6183	19,5704	0,00340443	3404,429861	186,8511124
11/06/2014	12:44:08	21,7398	19,5707	0,003419811	3419,811321	187,9012602
11/06/2014	12:44:09	21,8637	19,5714	0,003455701	3455,701395	188,9721516
11/06/2014	12:44:10	21,9819	19,5716	0,003465956	3465,955701	189,9937769
11/06/2014	12:44:11	22,1266	19,5723	0,003501846	3501,845775	191,2444467
11/06/2014	12:44:12	22,2211	19,5727	0,003522354	3522,354389	192,0612284
11/06/2014	12:44:14	22,3652	19,5735	0,003563372	3563,371616	193,3067123
11/06/2014	12:44:15	22,4748	19,5735	0,003563372	3563,371616	194,2540061
11/06/2014	12:44:16	22,5805	19,5739	0,00358388	3583,88023	195,1675915
11/06/2014	12:44:17	22,71	19,5743	0,003604389	3604,388843	196,2868848
11/06/2014	12:44:18	22,833	19,5746	0,00361977	3619,770304	197,3499974
11/06/2014	12:44:20	22,9394	19,5753	0,00365566	3655,660377	198,269633
11/06/2014	12:44:21	23,0604	19,5755	0,003665915	3665,914684	199,3154592
11/06/2014	12:44:22	23,1905	19,5765	0,003717186	3717,186218	200,4399385
11/06/2014	12:44:23	23,2995	19,5768	0,003732568	3732,567678	201,3820464
11/06/2014	12:44:24	23,4286	19,5773	0,003758203	3758,203445	202,4978824
11/06/2014	12:44:26	23,5658	19,5779	0,003788966	3788,966366	203,6837283
11/06/2014	12:44:27	23,6525	19,5781	0,003799221	3799,220673	204,4330931
11/06/2014	12:44:28	23,7878	19,5787	0,003829984	3829,983593	205,6025169
11/06/2014	12:44:29	23,9131	19,5792	0,003855619	3855,61936	206,6855088
11/06/2014	12:44:30	24,0221	19,5791	0,003850492	3850,492207	207,6276167
11/06/2014	12:44:32	24,1681	19,58	0,003896637	3896,636587	208,8895227
11/06/2014	12:44:33	24,277	19,5805	0,003922272	3922,272354	209,8307663
11/06/2014	12:44:34	24,3854	19,581	0,003947908	3947,908121	210,7676883
11/06/2014	12:44:35	24,5041	19,5812	0,003958162	3958,162428	211,7936352
11/06/2014	12:44:36	24,6545	19,5817	0,003983798	3983,798195	213,0935712
11/06/2014	12:44:38	24,7526	19,5821	0,004004307	4004,306809	213,9414683
11/06/2014	12:44:39	25,0414	19,5829	0,004045324	4045,324036	216,4376221

11/06/2014	12:44:40	25,0196	19,5829	0,004045324	4045,324036	216,2492005
11/06/2014	12:44:41	24,966	19,5832	0,004060705	4060,705496	215,7859254
11/06/2014	12:44:42	25,1526	19,5837	0,004086341	4086,341263	217,398745
11/06/2014	12:44:44	25,3909	19,5844	0,004122231	4122,231337	219,4584176
11/06/2014	12:44:45	25,4294	19,5849	0,004147867	4147,867104	219,7911805
11/06/2014	12:44:46	25,5439	19,5848	0,00414274	4142,739951	220,7808259
11/06/2014	12:44:47	25,6555	19,5854	0,004173503	4173,502871	221,7454061
11/06/2014	12:44:48	25,8739	19,5861	0,004209393	4209,392945	223,6330792
11/06/2014	12:44:50	25,9511	19,5863	0,004219647	4219,647252	224,3003336
11/06/2014	12:44:51	26,0304	19,5865	0,004229902	4229,901559	224,9857387
11/06/2014	12:44:52	26,2124	19,5873	0,004270919	4270,918786	226,5587996
11/06/2014	12:44:53	26,3341	19,5878	0,004296555	4296,554553	227,6106761
11/06/2014	12:44:54	26,3938	19,5881	0,004311936	4311,936013	228,1266746
11/06/2014	12:44:56	26,5425	19,5885	0,004332445	4332,444627	229,4119172
11/06/2014	12:44:57	26,6778	19,5888	0,004347826	4347,826087	230,5813411
11/06/2014	12:44:58	26,8287	19,5897	0,00439397	4393,970468	231,8855987
11/06/2014	12:44:59	26,8791	19,5899	0,004404225	4404,224774	232,3212156
11/06/2014	12:45:00	26,9576	19,5903	0,004424733	4424,733388	232,9997061
11/06/2014	12:45:02	27,0636	19,5903	0,004424733	4424,733388	233,9158845
11/06/2014	12:45:03	27,3563	19,5915	0,004486259	4486,259229	236,4457467
11/06/2014	12:45:04	27,4268	19,5917	0,004496514	4496,513536	237,0550917
11/06/2014	12:45:05	27,4543	19,592	0,004511895	4511,894996	237,2927795
11/06/2014	12:45:06	27,5447	19,5924	0,004532404	4532,40361	238,074124
11/06/2014	12:45:08	27,6418	19,5926	0,004542658	4542,657916	238,9133779
11/06/2014	12:45:09	27,9016	19,5938	0,004604184	4604,183757	241,1588792
11/06/2014	12:45:10	28,0468	19,5942	0,004624692	4624,692371	242,4138706
11/06/2014	12:45:11	28,1002	19,5943	0,00462982	4629,819524	242,875417
11/06/2014	12:45:12	28,152	19,5947	0,004650328	4650,328138	243,3231344
11/06/2014	12:45:14	28,2396	19,595	0,00466571	4665,709598	244,080278
11/06/2014	12:45:15	28,4997	19,5961	0,004722108	4722,108285	246,3283721
11/06/2014	12:45:16	28,6618	19,5966	0,004747744	4747,744053	247,7294335
11/06/2014	12:45:17	28,7049	19,5969	0,004763126	4763,125513	248,1019551
11/06/2014	12:45:18	28,7659	19,597	0,004768253	4768,252666	248,6291898
11/06/2014	12:45:20	28,8669	19,5979	0,004814397	4814,397047	249,5021522
11/06/2014	12:45:21	29,0838	19,5985	0,00484516	4845,159967	251,3768604
11/06/2014	12:45:22	29,2079	19,5991	0,004875923	4875,922888	252,4494805
11/06/2014	12:45:23	29,2515	19,5993	0,004886177	4886,177194	252,8263237
11/06/2014	12:45:24	29,3474	19,5994	0,004891304	4891,304348	253,6552058
11/06/2014	12:45:26	29,5347	19,6004	0,004942576	4942,575882	255,2740756
11/06/2014	12:45:27	29,7033	19,6011	0,004978466	4978,465956	256,7313177
11/06/2014	12:45:28	29,7912	19,6015	0,004998975	4998,974569	257,4910543
11/06/2014	12:45:29	29,8871	19,6021	0,005029737	5029,73749	258,3199364
11/06/2014	12:45:31	29,9413	19,6024	0,005045119	5045,11895	258,7883974
11/06/2014	12:45:32	30,0551	19,6026	0,005055373	5055,373257	259,7719926
11/06/2014	12:45:33	30,3042	19,6036	0,005106645	5106,644791	261,9250117
11/06/2014	12:45:34	30,359	19,6039	0,005122026	5122,026251	262,3986586

11/06/2014	12:45:35	30,4129	19,6046	0,005157916	5157,916325	262,8645266
11/06/2014	12:45:37	30,7505	19,6057	0,005214315	5214,315012	265,7824681
11/06/2014	12:45:38	30,8651	19,6061	0,005234824	5234,823626	266,7729779
11/06/2014	12:45:39	30,8831	19,6067	0,005265587	5265,586546	266,9285554
11/06/2014	12:45:40	30,9116	19,6066	0,005260459	5260,459393	267,1748863
11/06/2014	12:45:41	30,9511	19,6069	0,005275841	5275,840853	267,5162924
11/06/2014	12:45:43	31,1141	19,6075	0,005306604	5306,603774	268,9251327
11/06/2014	12:45:44	31,3534	19,6083	0,005347621	5347,621001	270,9934485
11/06/2014	12:45:45	31,4621	19,6088	0,005373257	5373,256768	271,9329634
11/06/2014	12:45:46	31,5242	19,6092	0,005393765	5393,765381	272,4697056
11/06/2014	12:45:47	31,6562	19,6101	0,00543991	5439,909762	273,6106069
11/06/2014	12:45:49	31,7696	19,6106	0,005465546	5465,545529	274,5907449
11/06/2014	12:45:50	31,8223	19,6108	0,0054758	5475,799836	275,0462411
11/06/2014	12:45:51	31,941	19,6113	0,005501436	5501,435603	276,0721879
11/06/2014	12:45:52	32,4285	19,613	0,005588597	5588,597211	280,2857439
11/06/2014	12:45:53	32,5738	19,6137	0,005624487	5624,487285	281,5415997
11/06/2014	12:45:55	32,585	19,614	0,005639869	5639,868745	281,6384034
11/06/2014	12:45:56	32,5846	19,614	0,005639869	5639,868745	281,6349462
11/06/2014	12:45:57	32,6025	19,614	0,005639869	5639,868745	281,7896593
11/06/2014	12:45:58	32,6252	19,6143	0,00565525	5655,250205	281,9858597
11/06/2014	12:45:59	32,6693	19,6147	0,005675759	5675,758819	282,3670245
11/06/2014	12:46:01	32,7254	19,6149	0,005686013	5686,013126	282,8519076
11/06/2014	12:46:02	32,8379	19,6153	0,005706522	5706,521739	283,8242666
11/06/2014	12:46:03	34,0406	19,6192	0,005906481	5906,480722	294,2194334
11/06/2014	12:46:04	34,1688	19,6195	0,005921862	5921,862182	295,3274905
11/06/2014	12:46:05	34,0932	19,6191	0,005901354	5901,353568	294,6740652
11/06/2014	12:46:07	34,0196	19,6189	0,005891099	5891,099262	294,0379263
11/06/2014	12:46:08	33,9625	19,6186	0,005875718	5875,717801	293,5444001
11/06/2014	12:46:09	33,9442	19,6187	0,005880845	5880,844955	293,3862297
11/06/2014	12:46:10	33,949	19,6188	0,005885972	5885,972108	293,427717
11/06/2014	12:46:11	33,9788	19,6191	0,005901354	5901,353568	293,6852841
11/06/2014	12:46:13	34,0057	19,6193	0,005911608	5911,607875	293,917786
11/06/2014	12:46:14	34,0444	19,6194	0,005916735	5916,735029	294,2522775
11/06/2014	12:46:15	34,0896	19,6197	0,005932116	5932,116489	294,6429497
11/06/2014	12:46:16	34,1537	19,62	0,005947498	5947,497949	295,1969783
11/06/2014	12:46:17	34,2402	19,6203	0,005962879	5962,879409	295,9446144
11/06/2014	12:46:19	34,3408	19,6208	0,005988515	5988,515176	296,8141195
11/06/2014	12:46:20	34,4653	19,6213	0,006014151	6014,150943	297,8901969
11/06/2014	12:46:21	34,8108	19,6225	0,006075677	6075,676784	300,8764196
11/06/2014	12:46:22	36,507	19,6281	0,006362797	6362,797375	315,5370015
11/06/2014	12:46:23	36,602	19,6186	0,005875718	5875,717801	316,3581047
11/06/2014	12:46:25	36,2899	19,6207	0,005983388	5983,388023	313,6605646
11/06/2014	12:46:26	35,8637	19,6203	0,005962879	5962,879409	309,9768362
11/06/2014	12:46:27	35,4585	19,6197	0,005932116	5932,116489	306,4746149
11/06/2014	12:46:28	35,3074	19,6194	0,005916735	5916,735029	305,1686287
11/06/2014	12:46:29	35,1934	19,6192	0,005906481	5906,480722	304,1833048

11/06/2014	12:46:31	35,1496	19,6192	0,005906481	5906,480722	303,804733
11/06/2014	12:46:32	36,2942	19,6226	0,006080804	6080,803938	313,6977303
11/06/2014	12:46:33	36,4897	19,623	0,006101313	6101,312551	315,3874743
11/06/2014	12:46:34	36,5394	19,6231	0,00610644	6106,439705	315,8170409
11/06/2014	12:46:35	36,5669	19,6234	0,006121821	6121,821165	316,0547287
11/06/2014	12:46:37	36,6108	19,6234	0,006121821	6121,821165	316,4341648
11/06/2014	12:46:38	36,6481	19,6234	0,006121821	6121,821165	316,7565559
11/06/2014	12:46:39	36,6963	19,6223	0,006065422	6065,422477	317,1731577
11/06/2014	12:46:40	36,7542	19,6214	0,006019278	6019,278097	317,6735985
11/06/2014	12:46:41	36,822	19,6199	0,005942371	5942,370796	318,2596069
11/06/2014	12:46:43	36,8992	19,6192	0,005906481	5906,480722	318,9268613
11/06/2014	12:46:44	37,017	19,6198	0,005937244	5937,243642	319,9450293
11/06/2014	12:46:45	37,2116	19,6202	0,005957752	5957,752256	321,6269944
11/06/2014	12:46:46	37,7411	19,621	0,005998769	5998,769483	326,2035645
11/06/2014	12:46:47	37,9207	19,6211	0,006003897	6003,896637	327,7558817
11/06/2014	12:46:49	37,9614	19,6221	0,006055168	6055,168171	328,1076596
11/06/2014	12:46:50	37,9721	19,623	0,006101313	6101,312551	328,2001417
11/06/2014	12:46:51	37,9985	19,6247	0,006188474	6188,474159	328,428322
11/06/2014	12:46:52	38,0311	19,6257	0,006239746	6239,745693	328,7100901
11/06/2014	12:46:53	38,0735	19,6264	0,006275636	6275,635767	329,0765614
11/06/2014	12:46:55	38,1141	19,6262	0,006265381	6265,38146	329,427475
11/06/2014	12:46:56	38,7024	19,6323	0,006578138	6578,137818	334,5122647
11/06/2014	12:46:57	39,9109	19,6386	0,006901148	6901,148482	344,9575619
11/06/2014	12:46:58	39,9278	19,6429	0,007121616	7121,616079	345,1036319
11/06/2014	12:46:59	39,7297	19,6245	0,00617822	6178,219852	343,3914156
11/06/2014	12:47:01	39,4825	19,6328	0,006603774	6603,773585	341,2548186
11/06/2014	12:47:02	39,3281	19,6365	0,006793478	6793,478261	339,9203098
11/06/2014	12:47:03	39,2344	19,6388	0,006911403	6911,402789	339,1104427
11/06/2014	12:47:04	39,1707	19,64	0,006972929	6972,92863	338,5598714
11/06/2014	12:47:05	39,0866	19,6447	0,007213905	7213,90484	337,832979
11/06/2014	12:47:07	39,1592	19,6462	0,007290812	7290,812141	338,4604747
11/06/2014	12:47:08	39,3012	19,6485	0,007408737	7408,736669	339,6878079
11/06/2014	12:47:09	39,432	19,6509	0,007531788	7531,788351	340,8183374
11/06/2014	12:47:10	39,6455	19,6332	0,006624282	6624,282199	342,6636588
11/06/2014	12:47:11	39,8254	19,6351	0,006721698	6721,698113	344,218569
11/06/2014	12:47:13	39,9379	19,6379	0,006865258	6865,258409	345,1909281
11/06/2014	12:47:14	40,2314	19,6411	0,007029327	7029,327317	347,7277049
11/06/2014	12:47:15	40,5016	19,6443	0,007193396	7193,396226	350,0630953
11/06/2014	12:47:16	40,6117	19,6465	0,007306194	7306,193601	351,0147107
11/06/2014	12:47:17	40,6802	19,649	0,007434372	7434,372436	351,6067693
11/06/2014	12:47:19	40,7408	19,6496	0,007465135	7465,135357	352,1305468
11/06/2014	12:47:20	40,7928	19,6514	0,007557424	7557,424118	352,5799927
11/06/2014	12:47:21	41,0955	19,6533	0,00765484	7654,840033	355,1962869
11/06/2014	12:47:22	41,2982	19,6568	0,00783429	7834,290402	356,9482619

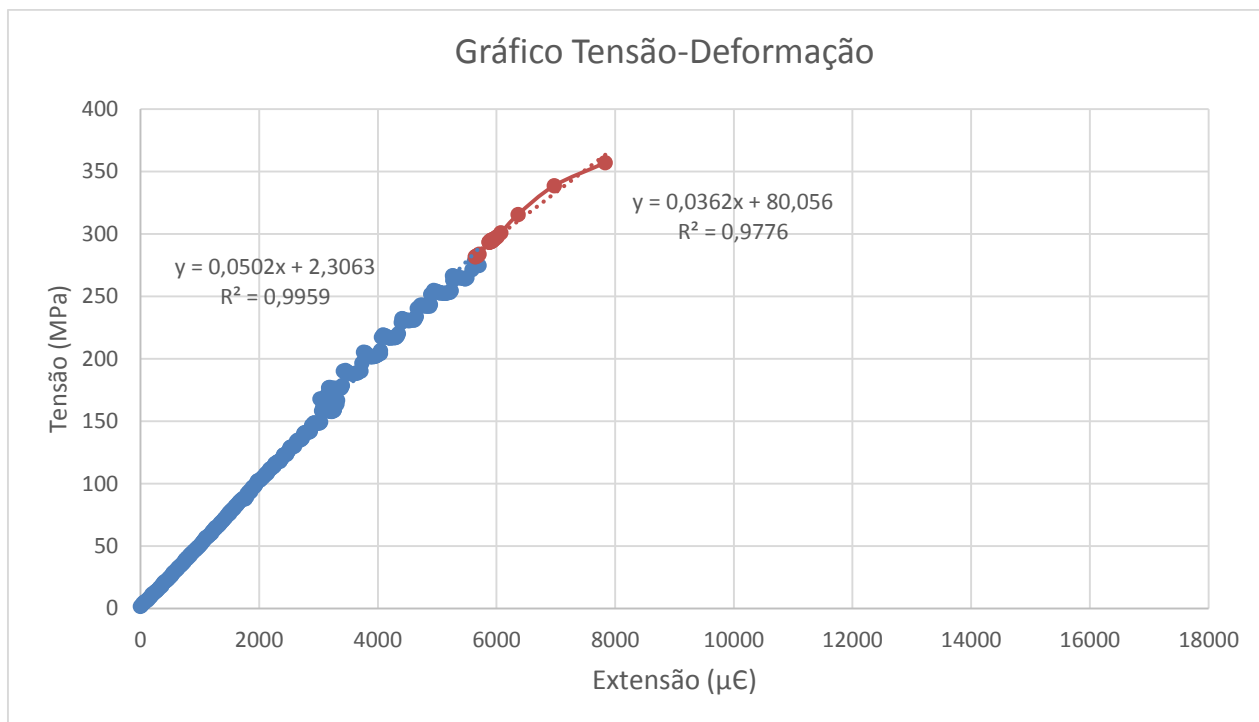


Figura B 8: Gráfico Tensão-Deformação Ensaio 4



Figura B 9: Resultado Ensaio 5 (com Extensómetro)

Tabela B 5: Dados ensaio 5 (Com extensômetro)

F (kN)	Canal 1	canal 1 (ε)	Canal 2	canal 2 (ε)	Canal 3	canal 3 (ε)	εP	εQ	coef poisson
0,26	696	0	1091	0	894	0	0	0	
0,5	695	-0,000001	1120	0,000029	855	-0,00003	3,25547E-05	-7,25547E-05	0,448692068
1	694	-0,000002	1194	0,000103	838	-0,00005	0,000105733	-0,000163733	0,645764901
1,5	696	0	1262	0,000171	813	-0,00008	0,000174843	-0,000255843	0,683399276
2	697	0,000001	1339	0,000248	800	-0,00009	0,000251806	-0,000344806	0,730283156
2,5	702	0,000006	1404	0,000313	777	-0,00011	0,000318097	-0,000429097	0,741317055
3	703	0,000007	1478	0,000387	763	-0,00013	0,000392271	-0,000516271	0,759815993
3,5	704	0,000008	1546	0,000455	738	-0,00015	0,000461318	-0,000609318	0,757105351
4	703	0,000007	1614	0,000523	725	-0,00016	0,000529377	-0,000691377	0,76568498
4,5	704	0,000008	1691	0,0006	698	-0,00019	0,000607456	-0,000795456	0,763657465
5	702	0,000006	1764	0,000673	682	-0,00021	0,000680618	-0,000886618	0,767656392
5,5	700	0,000004	1837	0,000746	649	-0,00024	0,000754898	-0,000995898	0,758007463
6	700	0,000004	1915	0,000824	634	-0,00026	0,000833108	-0,001089108	0,764945192
6,5	697	0,000001	1983	0,000892	601	-0,00029	0,000902357	-0,001194357	0,755517044
7	695	-0,000001	2067	0,000976	580	-0,00031	0,000986753	-0,001301753	0,758018576
7,5	697	0,000001	2137	0,001046	546	-0,00034	0,001058421	-0,001405421	0,753098975
8	694	-0,000002	2222	0,001131	514	-0,00038	0,001144442	-0,001526442	0,749744811
8,5	690	-0,000006	2293	0,001202	477	-0,00041	0,00121686	-0,00163986	0,742051162
9	695	-0,000001	2380	0,001289	458	-0,00043	0,001304609	-0,001741609	0,749082671
9,5	693	-0,000003	2448	0,001357	415	-0,00047	0,001374626	-0,001856626	0,740389314
10	697	0,000001	2532	0,001441	389	-0,00050	0,0014598	-0,0019638	0,743354673
10,5	699	0,000003	2609	0,001518	337	-0,00055	0,001539707	-0,002093707	0,735397574
11	702	0,000006	2692	0,001601	316	-0,00057	0,001623459	-0,002195459	0,739462205
11,5	703	0,000007	2767	0,001676	252	-0,00064	0,001702238	-0,002337238	0,72831182
12	683	-0,000013	2850	0,001759	223	-0,00067	0,001784603	-0,002468603	0,722920255
12,5	680	-0,000016	2925	0,001834	141	-0,00075	0,001864396	-0,002633396	0,707981664
13	677	-0,000019	3005	0,001914	170	-0,00072	0,001941024	-0,002684024	0,723176825
13,5	669	-0,000027	3067	0,001976	132	-0,00076	0,002004318	-0,002793318	0,717540188
14	661	-0,000035	3159	0,002068	87	-0,00080	0,002097753	-0,002939753	0,713581385
14,5	654	-0,000042	3240	0,002149	41	-0,00085	0,002180473	-0,003075473	0,708987861
15	653	-0,000043	3322	0,002231	15	-0,00087	0,002263259	-0,003185259	0,710541607
15,5	636	-0,00006	3410	0,002319	-48	-0,00094	0,002353274	-0,003355274	0,701365685
16	631	-0,000065	3487	0,002396	-82	-0,00097	0,002431356	-0,003472356	0,700203531
16,5	612	-0,000084	3573	0,002482	-136	-0,00103	0,002518589	-0,003632589	0,693331702
17	606	-0,00009	3654	0,002563	-179	-0,00107	0,00260118	-0,00376418	0,691034973
17,5	580	-0,000116	3733	0,002642	-235	-0,00112	0,002681059	-0,003926059	0,682888113
18	533	-0,000163	3908	0,002817	-364	-0,00125	0,002859236	-0,004280236	0,668008932
18,5	522	-0,000174	3918	0,002827	-374	-0,00126	0,002868918	-0,004310918	0,665500499
19	523	-0,000173	3997	0,002906	-391	-0,00128	0,002948276	-0,004406276	0,669108358
19,5	507	-0,000189	4078	0,002987	-440	-0,00133	0,003030466	-0,004553466	0,665529534
20	500	-0,000196	4162	0,003071	-461	-0,00135	0,003114408	-0,004665408	0,667553175
20,5	473	-0,000223	4242	0,003151	-520	-0,00141	0,00319542	-0,00483242	0,661246304
21	462	-0,000234	4315	0,003224	-546	-0,00144	0,003268524	-0,004942524	0,661306675
21,5	462	-0,000234	4315	0,003224	-546	-0,00144	0,003268524	-0,004942524	0,661306675

22	440	-0,000256	4460	0,003369	-615	-0,00150	0,003414913	-0,005179913	0,659260656
22,5	440	-0,000256	4460	0,003369	-615	-0,00150	0,003414913	-0,005179913	0,659260656
23	427	-0,000269	4631	0,00354	-679	-0,00157	0,003587395	-0,005429395	0,660735677
23,5	414	-0,000282	4714	0,003623	-726	-0,00162	0,003671666	-0,005573666	0,6587524
24	414	-0,000282	4714	0,003623	-726	-0,00162	0,003671666	-0,005573666	0,6587524
24,5	375	-0,000321	4888	0,003797	-821	-0,00171	0,003847186	-0,005883186	0,653929006
25	357	-0,000339	4990	0,003899	-896	-0,00179	0,003951742	-0,006080742	0,649878248
25,5	343	-0,000353	5060	0,003969	-920	-0,00181	0,004021535	-0,006188535	0,649836374
26	343	-0,000353	5060	0,003969	-920	-0,00181	0,004021535	-0,006188535	0,649836374
26,5	309	-0,000387	5243	0,004152	-1064	-0,00195	0,004209629	-0,006554629	0,642237559
27	309	-0,000387	5243	0,004152	-1064	-0,00195	0,004209629	-0,006554629	0,642237559
27,5	228	-0,000468	5456	0,004365	-1272	-0,00216	0,004428078	-0,007062078	0,627021979
28	228	-0,000468	5456	0,004374	-1272	-0,00216	0,00443698	-0,00707098	0,627491504
28,5	191	-0,000505	5651	0,00456	-1444	-0,00233	0,004629807	-0,007472807	0,619553929
29	161	-0,000535	5748	0,004657	-1518	-0,00241	0,00472842	-0,00767542	0,616047073
29,5	118	-0,000578	5928	0,004837	-1841	-0,00273	0,004925954	-0,008238954	0,597885862
30	75	-0,000621	6080	0,004989	-1992	-0,00288	0,005083448	-0,008590448	0,591755882
30,5	75	-0,000621	6080	0,004989	-1992	-0,00288	0,005083448	-0,008590448	0,591755882
31	35	-0,000661	6292	0,005201	-2278	-0,00317	0,005310884	-0,009143884	0,580812727
31,5	15	-0,000681	6421	0,00533	-2412	-0,00330	0,005446682	-0,009433682	0,577365445
32	15	-0,000681	6421	0,00533	-2412	-0,00330	0,005446682	-0,009433682	0,577365445
32,5	-106	-0,000802	6710	0,005619	-2908	-0,00380	0,005759777	-0,010363777	0,555760395
33	-106	-0,000802	6710	0,005619	-2908	-0,00380	0,005759777	-0,010363777	0,555760395
33,5	-486	-0,001182	7124	0,006033	-3452	-0,00434	0,006174117	-0,011702117	0,527606837
34	-1879	-0,002575	7890	0,006799	-6059	-0,00695	0,00700437	-0,01653237	0,423676331
34,5	-1879	-0,002575	7890	0,006799	-6059	-0,00695	0,00700437	-0,01653237	0,423676331
35	-435	-0,001131	9080	0,007989	-9000	-0,00989	0,00868214	-0,01970714	0,440558332
35,5	304	-0,000392	9609	0,008518	-10839	-0,01173	0,00958184	-0,021706846	0,441420453
36	656	-0,00004	9945	0,008854	-11964	-0,01285	0,01014187	-0,02303987	0,440187903
36,5	760	0,000064	10169	0,009078	-13077	-0,01397	0,01054662	-0,024453623	0,431290811
37	760	0,000064	10169	0,009078	-13077	-0,01397	0,01054662	-0,02445362	0,431290811
37,5	912	0,000216	10566	0,009475	-13592	-0,01448	0,01102895	-0,02529895	0,435945106

Θ (RAD)	Θ (GRAU)	εp (με)	Transdut	Alongamento	Extensão [mm/mm]	Extensão (με)	Tensão	Transd - canal 2
			22,75		0	0	2,130361752	0
-0,60044513	-34,40297176	32,55473337	22,75	0	0	0	4,096849523	-0,000029
-0,684516991	-39,2199346	105,7330694	22,752	0,002	8,79121E-05	87,91208791	8,193699045	-1,50879E-05
-0,690798652	-39,57984727	174,8427501	22,754	0,004	0,000175824	175,8241758	12,29054857	4,82418E-06
-0,705441602	-40,41882648	251,8060509	22,756	0,006	0,000263736	263,7362637	16,38739809	1,57363E-05
-0,702713814	-40,26253573	318,0967077	22,758	0,008	0,000351648	351,6483516	20,48424761	3,86484E-05
-0,709157181	-40,63171349	392,2708443	22,761	0,011	0,000483516	483,5164835	24,58109714	9,65165E-05
-0,708505398	-40,59436909	461,3176627	22,762	0,012	0,000527473	527,4725275	28,67794666	7,24725E-05
-0,713059464	-40,85529781	529,3769327	22,764	0,014	0,000615385	615,3846154	32,77479618	9,23846E-05

-0,712433518	-40,81943376	607,4556294	22,766	0,016	0,000703297	703,2967033	36,8716457	0,000103297
-0,715622707	-41,00216086	680,6178916	22,769	0,019	0,000835165	835,1648352	40,96849523	0,000162165
-0,714045759	-40,91180837	754,8984807	22,771	0,021	0,000923077	923,0769231	45,06534475	0,000177077
-0,71650966	-41,05297948	833,1076943	22,773	0,023	0,001010989	1010,989011	49,16219427	0,000186989
-0,715056677	-40,96972973	902,3572864	22,775	0,025	0,001098901	1098,901099	53,2590438	0,000206901
-0,716797907	-41,06949484	986,752813	22,777	0,027	0,001186813	1186,813187	57,35589332	0,000210813
-0,714334839	-40,92837142	1058,421467	22,779	0,029	0,001274725	1274,725275	61,45274284	0,000228725
-0,714396687	-40,93191505	1144,441874	22,781	0,031	0,001362637	1362,637363	65,54959236	0,000231637
-0,713212015	-40,86403835	1216,860074	22,783	0,033	0,001450549	1450,549451	69,64644189	0,000248549
-0,713753258	-40,89504928	1304,609484	22,785	0,035	0,001538462	1538,461538	73,74329141	0,000249462
-0,711473481	-40,76442768	1374,626194	22,787	0,037	0,001626374	1626,373626	77,84014093	0,000269374
-0,711227605	-40,75034006	1459,799638	22,79	0,04	0,001758242	1758,241758	81,93699045	0,000317242
-0,708027257	-40,56697359	1539,707186	22,792	0,042	0,001846154	1846,153846	86,03383998	0,000328154
-0,708635514	-40,60182417	1623,458824	22,795	0,045	0,001978022	1978,021978	90,1306895	0,000377022
-0,704716291	-40,3772692	1702,238226	22,799	0,049	0,002153846	2153,846154	94,22753902	0,000477846
-0,707732828	-40,55010408	1784,603395	22,78	0,03	0,001318681	1318,681319	98,32438855	-0,000440319
-0,703097957	-40,28454555	1864,396285	22,802	0,052	0,002285714	2285,714286	102,4212381	0,000451714
-0,708884457	-40,61608755	1941,023838	22,804	0,054	0,002373626	2373,626374	106,5180876	0,000459626
-0,70849508	-40,59377789	2004,31773	22,806	0,056	0,002461538	2461,538462	110,6149371	0,000485538
-0,708469799	-40,59232938	2097,753065	22,809	0,059	0,002593407	2593,406593	114,7117866	0,000525407
-0,707937976	-40,56185817	2180,473078	22,811	0,061	0,002681319	2681,318681	118,8086362	0,000532319
-0,708375799	-40,58694361	2263,259165	22,814	0,064	0,002813187	2813,186813	122,9054857	0,000582187
-0,707834889	-40,55595173	2353,274163	22,817	0,067	0,002945055	2945,054945	127,0023352	0,000626055
-0,707933786	-40,56161813	2431,355772	22,82	0,07	0,003076923	3076,923077	131,0991847	0,000680923
-0,708195938	-40,57663834	2518,589374	22,823	0,073	0,003208791	3208,791209	135,1960342	0,000726791
-0,707873115	-40,55814189	2601,180081	22,825	0,075	0,003296703	3296,703297	139,2928838	0,000733703
-0,708434856	-40,59032734	2681,059066	22,828	0,078	0,003428571	3428,571429	143,3897333	0,000786571
-0,708407933	-40,58878475	2859,235634	22,83	0,08	0,003516484	3516,483516	147,4865828	0,000699484
-0,708914661	-40,61781814	2868,918244	22,835	0,085	0,003736264	3736,263736	151,5834323	0,000909264
-0,709507679	-40,65179556	2948,276302	22,837	0,087	0,003824176	3824,175824	155,6802819	0,000918176
-0,709619859	-40,658223	3030,466311	22,84	0,09	0,003956044	3956,043956	159,7771314	0,000969044
-0,710632223	-40,71622714	3114,407775	22,843	0,093	0,004087912	4087,912088	163,8739809	0,001016912
-0,71094395	-40,73408783	3195,419593	22,846	0,096	0,00421978	4219,78022	167,9708304	0,00106878
-0,711693894	-40,77705644	3268,524327	22,849	0,099	0,004351648	4351,648352	172,06768	0,001127648
-0,711693894	-40,77705644	3268,524327	22,849	0,099	0,004351648	4351,648352	176,1645295	0,001127648
-0,71224476	-40,80861874	3414,912535	22,855	0,105	0,004615385	4615,384615	180,261379	0,001246385
-0,71224476	-40,80861874	3414,912535	22,855	0,105	0,004615385	4615,384615	184,3582285	0,001246385
-0,712834158	-40,84238876	3587,394947	22,86	0,11	0,004835165	4835,164835	188,455078	0,001295165
-0,712782313	-40,83941823	3671,665573	22,863	0,113	0,004967033	4967,032967	192,5519276	0,001344033
-0,712782313	-40,83941823	3671,665573	22,863	0,113	0,004967033	4967,032967	196,6487771	0,001344033
-0,713519459	-40,88165358	3847,185916	22,87	0,12	0,005274725	5274,725275	200,7456266	0,001477725
-0,712828554	-40,84206763	3951,74187	22,873	0,123	0,005406593	5406,593407	204,8424761	0,001507593
-0,713604715	-40,8865384	4021,535406	22,876	0,126	0,005538462	5538,461538	208,9393257	0,001569462
-0,713604715	-40,8865384	4021,535406	22,876	0,126	0,005538462	5538,461538	213,0361752	0,001569462
-0,712163607	-40,80396903	4209,628807	22,882	0,132	0,005802198	5802,197802	217,1330247	0,001650198
-0,712163607	-40,80396903	4209,628807	22,882	0,132	0,005802198	5802,197802	221,2298742	0,001650198

-0,711237214	-40,75089062	4428,078328	22,889	0,139	0,00610989	6109,89011	225,3267237	0,00174489
-0,711352787	-40,75751246	4436,979666	22,889	0,139	0,00610989	6109,89011	229,4235733	0,00173589
-0,709378176	-40,64437557	4629,806842	22,894	0,144	0,00632967	6329,67033	233,5204228	0,00176967
-0,70944433	-40,64816593	4728,420066	22,896	0,146	0,006417582	6417,582418	237,6172723	0,001760582
-0,703104797	-40,28493743	4925,954292	22,898	0,148	0,006505495	6505,494505	241,7141218	0,001668495
-0,702192626	-40,23267386	5083,448332	22,9	0,15	0,006593407	6593,406593	245,8109714	0,001604407
-0,702192626	-40,23267386	5083,448332	22,9	0,15	0,006593407	6593,406593	249,9078209	0,001604407
-0,698098132	-39,99807665	5310,884485	22,904	0,154	0,006769231	6769,230769	254,0046704	0,001568231
-0,696730675	-39,91972713	5446,682021	22,906	0,156	0,006857143	6857,142857	258,1015199	0,001527143
-0,696730675	-39,91972713	5446,682021	22,906	0,156	0,006857143	6857,142857	262,1983695	0,001527143
-0,691821236	-39,638437	5759,776541	22,909	0,159	0,006989011	6989,010989	266,295219	0,001370011
-0,691821236	-39,638437	5759,776541	22,909	0,159	0,006989011	6989,010989	270,3920685	0,001370011
-0,696432075	-39,90261863	6174,11686	22,916	0,166	0,007296703	7296,703297	274,488918	0,001263703
-0,691849858	-39,64007693	7004,376693	22,922	0,172	0,00756044	7560,43956	278,5857675	0,00076144
-0,691849858	-39,64007693	7004,376693	22,922	0,172	0,00756044	7560,43956	282,6826171	0,00076144
-0,628499543	-36,01037126	8682,148446	22,928	0,178	0,007824176	7824,175824	286,7794666	-0,000164824
-0,599943417	-34,37422576	9581,84564	22,934	0,184	0,008087912	8087,912088	290,8763161	-0,000430088
-0,587091537	-33,63786725	10141,8737	22,938	0,188	0,008263736	8263,736264	294,9731656	-0,000590264
-0,579095602	-33,1797339	10546,62281	22,942	0,192	0,00843956	8439,56044	299,0700152	-0,00063844
-0,579095602	-33,1797339	10546,62281	22,942	0,192	0,00843956	8439,56044	303,1668647	-0,00063844
-0,577071379	-33,06375451	11028,95609	22,949	0,199	0,008747253	8747,252747	307,2637142	-0,000727747



Figura B 10: Gráfico Tensão-Deformação Ensaio 5 (Verde e roxo - Extensômetro; Azul e vermelho - Transdutor)

Tabela B 6: Ensaio de pressão interna, 1º Carregamento, fundo copado

	Pressão (Psi)	Pressão (bar)	Canal 1	Canal 1 normalizado (µε)	Canal 2	Canal 2 normalizado (µε)	Canal 3	Canal 3 normalizado (µε)	εP (µε)	εQ (µε)	Θ (Rad)	Θ (grau)
Carregamento	950	65,5006	-3	0	-	2798	0	-	0	0	-	-
	1200	82,7376	-162	-159	-	2294	504	-	553,4524 146	439,4524 146	0,560330 704	32,10458 449
	1400	96,5272	156	159	-	1845	953	-	965,8180 228	385,8180 228	0,687861 147	39,41154 064
	2000	137,896	689	692	-	1170	1628	-	1629,923 997	369,9239 971	0,754375 907	43,22255 567
	2200	151,6856	1038	1041	-	-790	2008	-	2028,547 436	390,5474 36	0,693105 092	39,71199 655
	2400	165,4752	1203	1206	-	-650	2148	-	2837,598 35	1195,401 65	0,080421 984	4,607840 286
Descarregamento	2000	137,896	932	935	-	-979	1819	-	1865,229 302	674,2293 019	0,650061 751	37,24579 473
	1800	124,1064	714	717	-	1235	1563	-	1600,627 856	757,6278 557	0,658743 547	37,74322 503
	1600	110,3168	447	450	-	1550	1248	-	1264,922 843	730,9228 427	0,693185 869	39,71662 47
	1400	96,5272	384	387	-	1626	1172	-	1194,570 272	847,5702 718	0,680073 803	38,96535 865
	1200	82,7376	262	265	-	1755	1043	-	1058,688 968	875,6889 681	0,695217 102	39,83300 578
	950	65,5006	44	47	-	2028	770	-	776,6900 981	893,6900 981	0,722069 707	41,37154 67

Tabela B 7: Ensaio de pressão interna, 1º Carregamento, corpo cilíndrico

	P (Psi)	P (bar)	C 4	C4 n (µε)	C5	C5 n (µε)	C 6	C6 n (µε)	εP (µε)	εQ (µε)	Θ (Rad)	Θ (grau)	Temp (°C)
Carregamento	950	65,5006	-	0	-	2271	0	-	0	0	-	-	28
	1200	82,7376	-	598	-	1862	409	-	706,363425 5	402,636574 5	0,64014280 3	36,6774808 9	30
	1400	96,5272	-697	1034	-	1555	716	-	1209,17865 3	703,821350 3	0,62952897 7	36,0693534 5	34
	2000	137,896	-85	1646	-	1134	1137	-	1903,04076 9	1111,95923 1	0,60653065 6	34,7516467 4	38
	2200	151,6856	294	2025	-	875	1396	-	2307,29927 6	1354,70072 4	0,57564647 6	32,9821135 9	40
	2400	165,4752	446	2177	-	768	1503	-	2453,49850 6	1449,50149 4	0,55246077 5	31,6536707 5	41
Descarregamento	2000	137,896	140	1871	-	974	1297	-	2091,60577 9	1245,39422 1	0,53586627 2	30,7028757 7	38,8
	1800	124,1064	-115	1616	-	1147	1124	-	1793,47739 8	1074,52260 2	0,51995926 1	29,7914711 6	36,3
	1600	110,3168	-406	1325	-	1356	915	-	1452,22444 8	862,775552 4	0,48316231 2	27,6831613	34
	1400	96,5272	-510	1221	-	1426	845	-	1332,84828 8	794,151712 5	0,47311547 1	27,1075197 1	33
	1200	82,7376	-636	1095	-	1515	756	-	1182,84227 2	701,157728 5	0,44121877 5	25,2799736 3	30
	950	65,5006	-877	854	-	1683	588	-	909,591732 9	533,408267 1	0,39457877 2	22,6076983 3	28

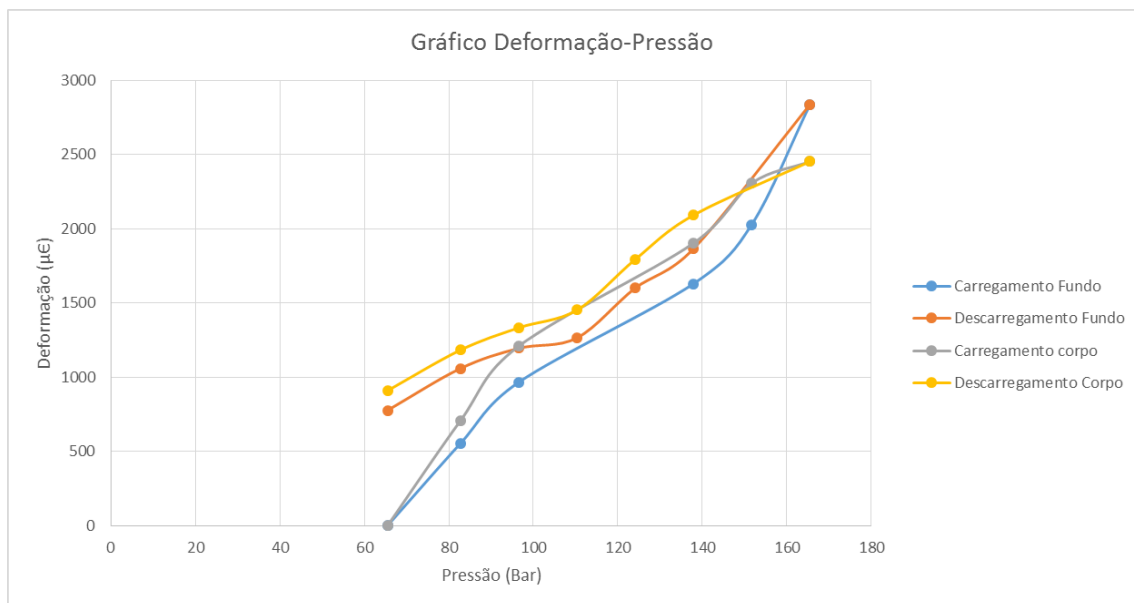


Figura B 11: Gráfico Deformação-Pressão do 1º Carregamento

Tabela B 8: Ensaio de pressão interna, 2º Carregamento, fundo copado

	P (Psi)	P (bar)	C 1	C1 n (μ€)	C 2	C2 n (μ€)	C 3	C3 n (μ€)	εP (μ€)	εQ (μ€)	Θ (Rad)	Θ (grau)
Carregamento	0	0	-146	0	2711	0	3442	0	0	0		
	950	65,5006	-10	136	2168	543	3148	294	552,3796082	122,3796082	0,667222168	38,22901425
	1200	82,7376	185	331	1908	803	3072	370	803,4199709	102,4199709	0,763864525	43,76621343
	1400	96,5272	402	548	1651	1060	2991	451	1062,094437	63,09443652	-0,74224072	42,52726063
	1600	110,3168	544	690	1460	1251	2920	522	1256,44677	44,44676954	0,720646318	41,28999255
	1800	124,1064	695	841	1306	1405	2878	564	1418,522695	13,52269517	0,688069868	39,42349944
	2000	137,896	860	1006	1074	1637	2790	652	1656,159598	1,840402341	0,677571685	38,82199786
	2200	151,6856	1094	1240	-789	1922	2683	759	1952,834411	46,16558858	0,657884195	37,69398778
	2000	137,896	955	1101	-963	1748	2826	616	1780,463394	63,46339407	0,652319704	-37,3751659
Descarregamento	1800	124,1064	752	898	1191	1520	2950	492	1544,608145	-154,608145	0,664764376	-38,0881931
	1600	110,3168	629	775	1344	1367	3018	424	1386,80966	187,8096595	0,672998357	38,55996549
	1400	96,5272	432	578	1570	1141	3131	311	1153,67875	264,6787504	0,690710253	39,57478238
	1200	82,7376	310	456	1722	989	3181	261	996,4941222	279,4941222	0,708686203	40,60472841
	950	65,5006	100	246	1963	748	3261	181	748,9871614	321,9871614	0,755033303	43,26022165
	0	0	-161	-15	2698	13	3488	-46	15,67899956	76,67899956	0,614250359	35,19395315

Tabela B 9: Ensaio de pressão interna, 2º Carregamento, corpo cilíndrico

	P (Psi)	P (bar)	C 4	C4 n (μ€)	C5	C5 n (μ€)	C 6	C6 n (μ€)	εP (μ€)	εQ (μ€)	Θ (Rad)	Θ (grau)
Carregamento	0	0	0	-2160	0	-2031	0	0	0			22,5
	950	65,5006	584	-1758	402	-1509	522	707,1492783	398,8507217	0,684155876	39,19924423	26,4
	1200	82,7376	848	-1564	596	-1263	768	1023,740585	592,259415	0,692154713	39,6575438	28,4
	1400	96,5272	1082	-1415	745	-1096	935	1282,058952	734,9410484	0,649386631	37,20711321	30,5
	1600	110,3168	1261	-1265	895	-896	1135	1507,480209	888,5197906	0,682898175	39,12718329	32,1
	1800	124,1064	1413	-1180	980	-820	1211	1659,023054	964,976946	0,637737675	36,53967723	33,1
	2000	137,896	1647	-1005	1155	-585	1446	1950,693642	1142,306358	0,659758558	37,8013809	36,2
	2200	151,6856	1910	-828	1332	389	2420	3036,156702	1293,843298	-0,636866057	-36,48973719	37,2
Descarregamento	2000	137,896	1730	-959	1201	-559	1472	2021,286807	1180,713193	0,629413626	36,06274432	34,6
	1800	124,1064	1513	-1096	1064	-729	1302	1766,836194	1048,163806	0,636404452	36,46328917	34
	1600	110,3168	1341	-1222	938	-901	1130	1551,152499	919,8475012	0,615004998	35,23719076	31,9
	1400	96,5272	1134	-1361	799	-1042	989	1333,827927	789,1720727	0,650661838	37,28017723	31,2
	1200	82,7376	973	-1483	677	-1217	814	1124,134993	662,865007	0,609438301	34,91824253	29,9
	950	65,5006	761	-1625	535	-1383	648	883,1686878	525,8313122	0,624522886	35,78252559	28,6
	0	0	2	-2150	10	-2036	-5	10,52081528	-13,52081528	-0,637677745	-36,53624347	28

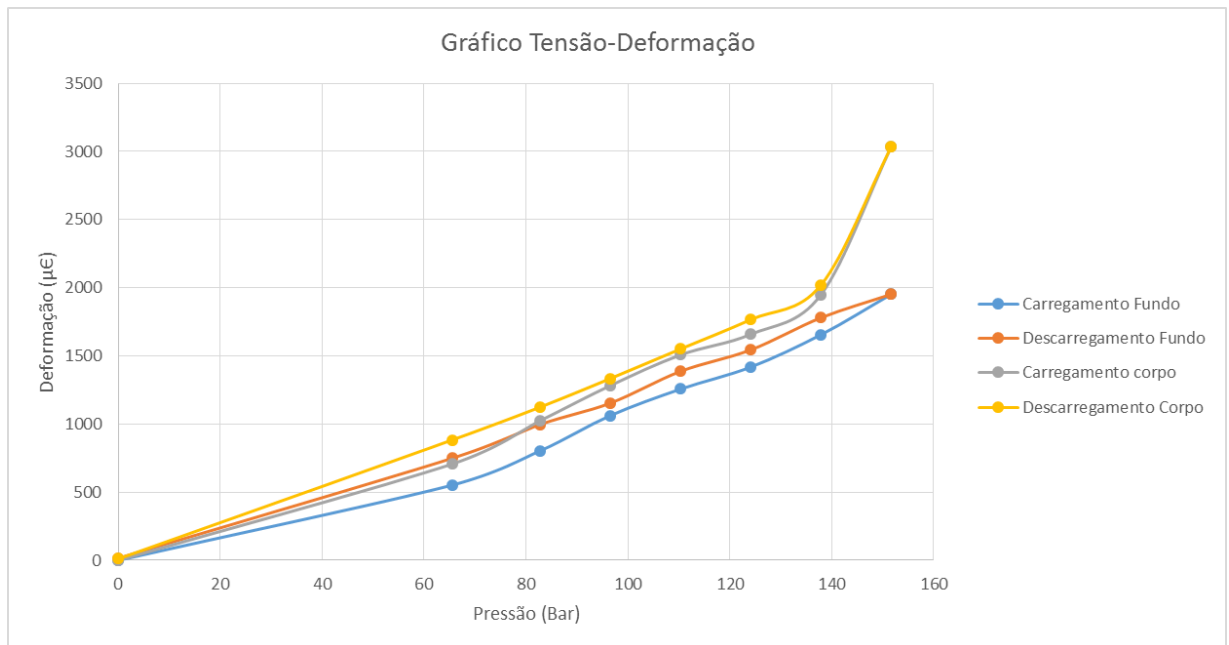


Figura B 12: Gráfico Deformação-Pressão do 2º Carregamento

ANEXO C – Detalhes das Simulações Numéricas

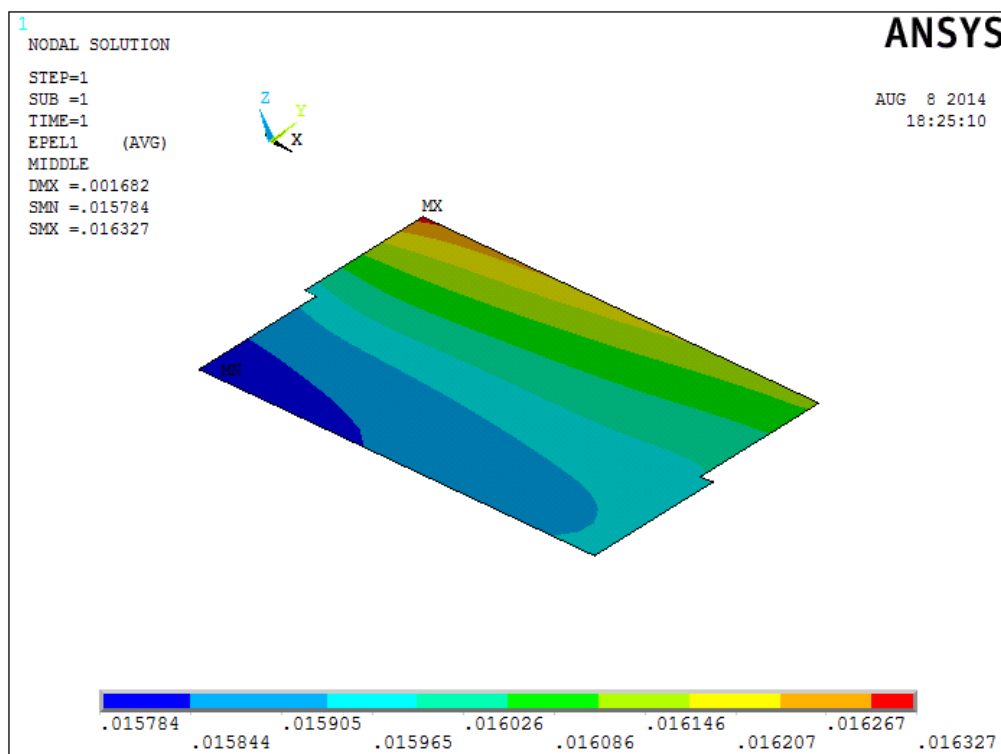


Figura C 1: Representação de ϵ_P em provete simulado em ANSYS sujeito a uma força de 21kN

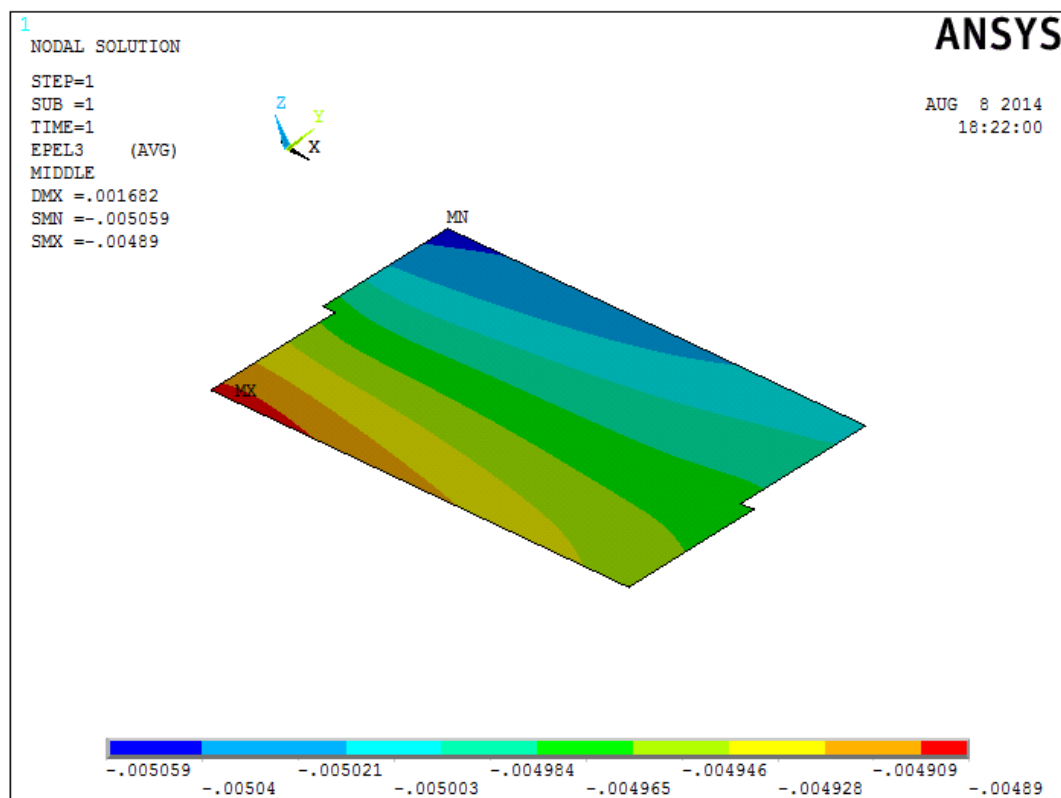


Figura C 2: Representação de σ_Q em provete simulado em ANSYS sujeito a uma força de 21kN

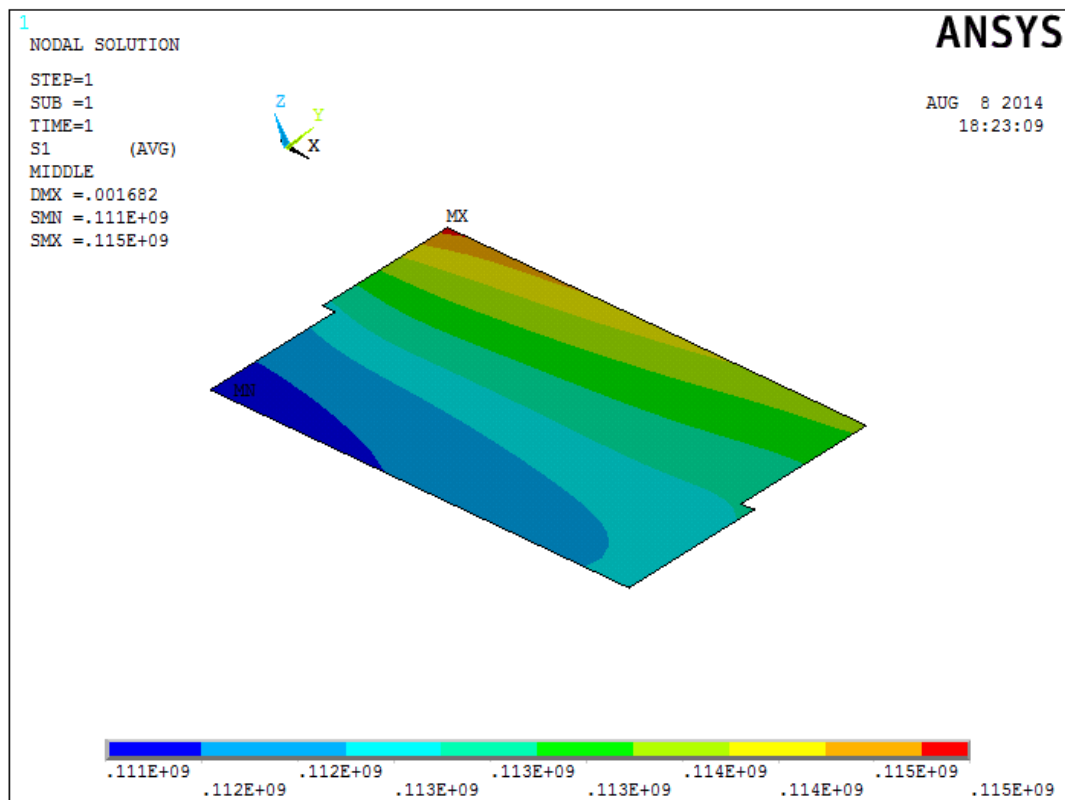


Figura C 3: Representação da σ em provete simulado em ANSYS sujeito a uma força de 21kN

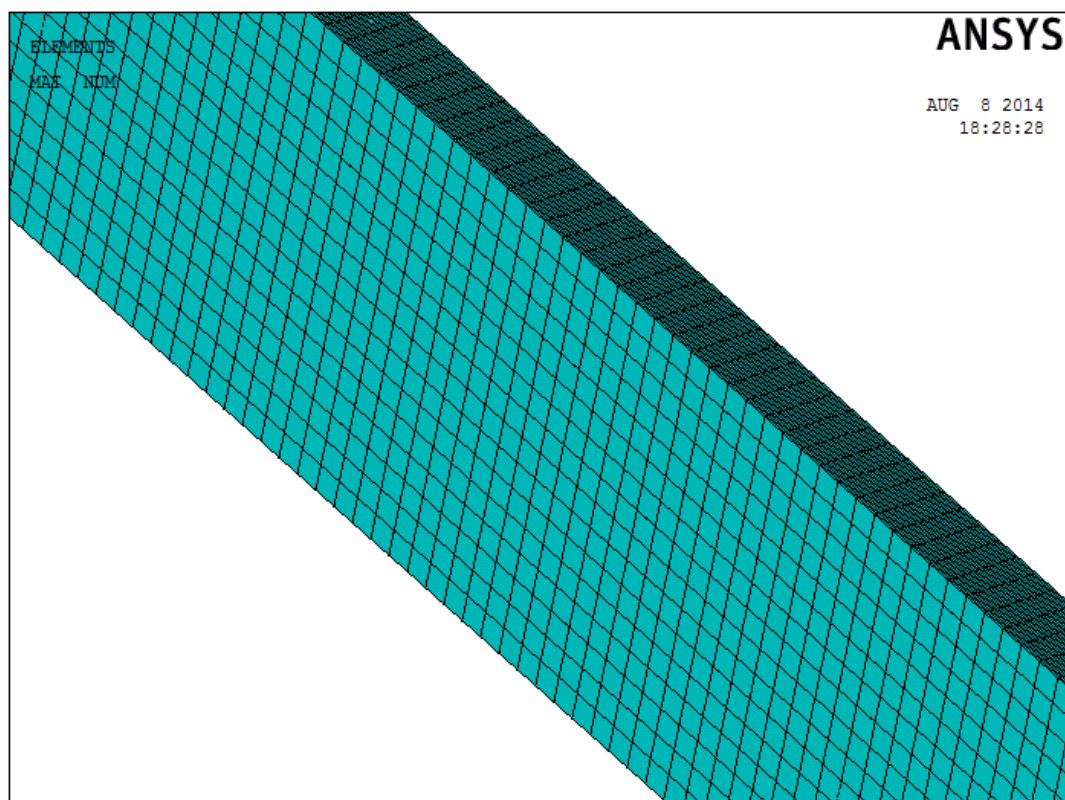


Figura C 4: Representação da malha, espessura e orientação das fibras no provete simulado em ANSYS

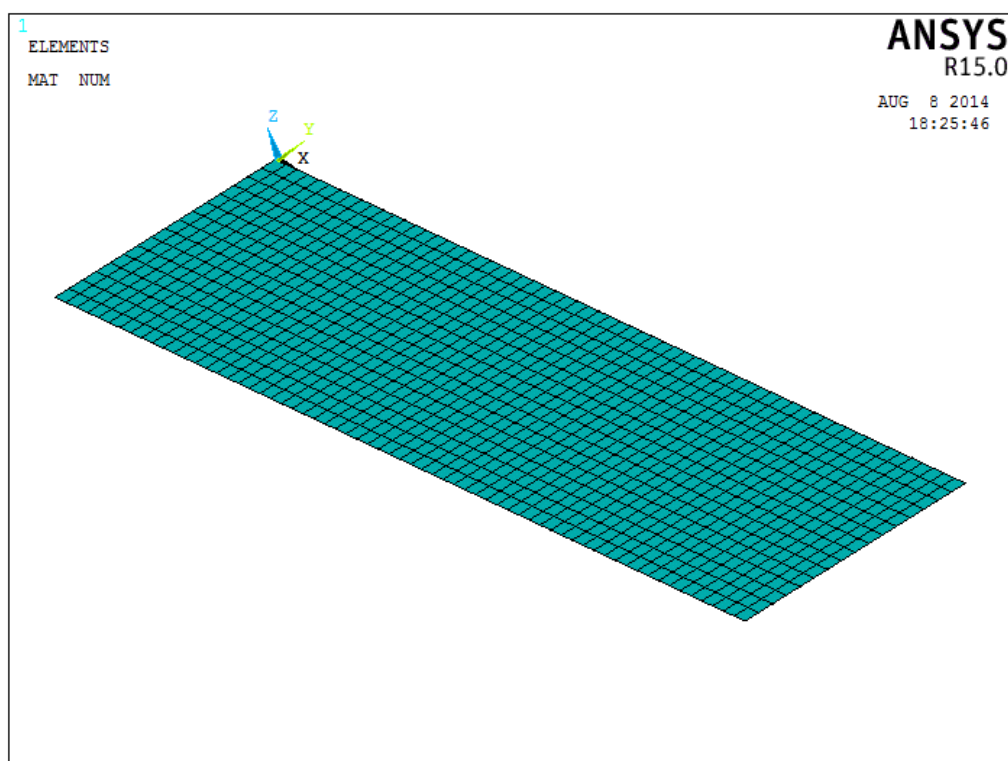


Figura C 5: Geometria do provete simulado em ANSYS

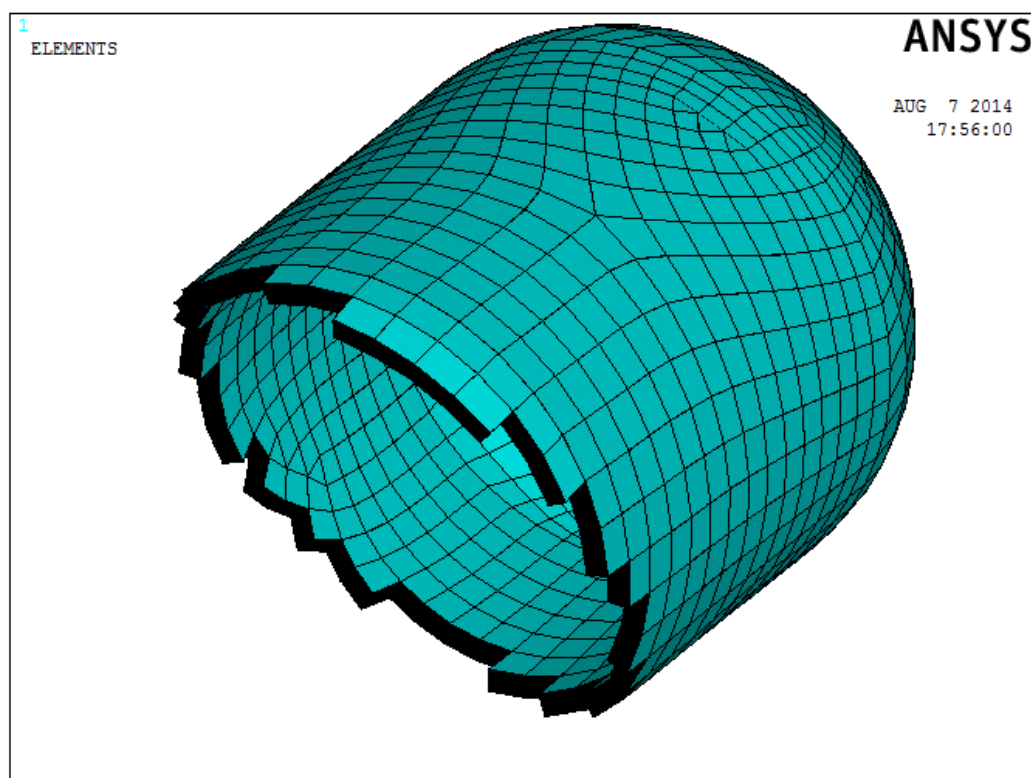


Figura C 6: Malhagem utilizada na simulação da garrafa Stako em materiais compósitos em ANSYS

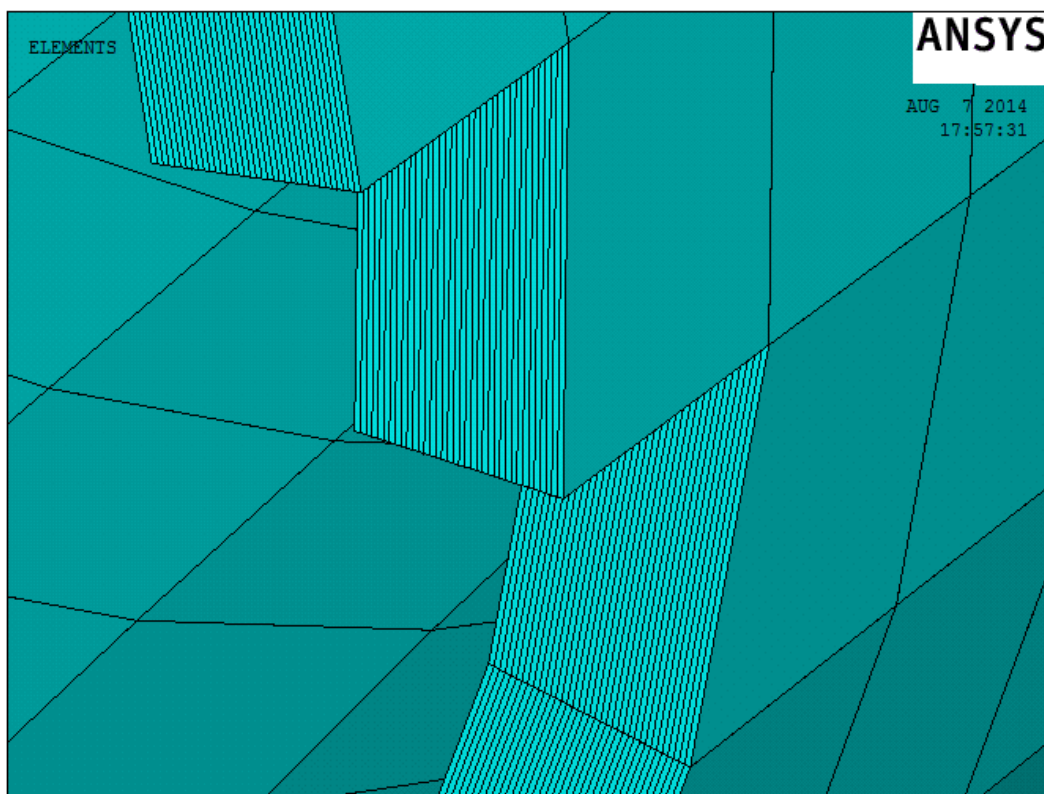


Figura C 7: Representação e pormenor das diversas camadas existentes na conceção da garrafa Stako em materiais compósito