

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Teste de Perfuração em Camadas Poliméricas de
Dutos Flexíveis**

Danilo Scharf Reis
Gabriel Mafra de Faria
Yan Cavalcante Buarque

Professor Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Novembro de 2019**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Teste de Perfuração em Camadas Poliméricas de Dutos Flexíveis

Danilo Scharf Reis
Gabriel Mafra de Faria
Yan Cavalcante Buarque

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Novembro de 2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R375 Reis, Danilo Scharf.

Teste de perfuração em camadas poliméricas de dutos flexíveis /
Danilo Scharf Reis, Gabriel Mafra de Faria [e] Yan Cavalcante
Buarque – 2019.

xiv, 133f. + apêndice : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.

Bibliografia: f. 129-133.

Orientador: Paulo Pedro Kenedi.

1. Engenharia mecânica. 2. Dutos Flexíveis. 3. Polímeros. I.
Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). II. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

RESUMO

O presente estudo visa a avaliação qualitativa e comparativa dos resultados de um teste de perfuração, desenvolvido especialmente para entender qual material oferece a maior resistência a possíveis danos externos à dutos flexíveis durante seu comissionamento, operação e descomissionamento. A proposta sugerida foi a qualificação de uma nova camada a ser fabricada acima da capa externa, visando manter sua integridade. Para isso, foram elaborados o teste propriamente dito, uma análise numérica e o estudo microestrutural dos materiais envolvidos e de seu comportamento em diferentes velocidades de teste. Por meio de uma modelagem analítica proposta, foi transformada a curva Força x Deslocamento, adquirida pela máquina de ensaios mecânicos, em Tensão x Deformação além de ter sido implementado um código numérico para cálculo da área abaixo desta última curva. A propriedade dos materiais encontrada ao efetuar este cálculo é o Módulo de Tenacidade à Perfuração, que é uma medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Tal propriedade, medida em MPa, pode também ser lida em mJ/mm^3 , o que dá a ideia do quanto de energia é necessária para deslocar um mm^3 de volume de determinado material, de acordo com o carregamento imposto pelo teste, seja este de tração, compressão ou mesmo perfuração. Essa propriedade se mostra de extrema importância ao estudar o deslocamento de volume ocorrido durante a perfuração no teste e pelo fato de todos os testes terem sido feitos nas mesmas condições e adotando as mesmas premissas, esta pode ser analisada comparativamente entre os materiais testados. Assim, por meio desta comparação, será selecionado o material mais adequado para servir de reforço à capa externa, sendo o fator determinante desta escolha a maior Energia de Perfuração encontrada dentre os materiais testados.

Palavras-chave: Dutos Flexíveis, Polímeros, Ensaios.

ABSTRACT

The present study aims the qualitatively and comparative evaluation of the perforation test developed specially to understand which material offers the highest resistance to possible external damage on flexible pipes during its commissioning, operation and decommissioning. The suggested proposal was the qualification of a new reinforcing layer to be manufactured over the External Sheath, aiming the maintenance of its integrity. Therefore, were elaborated the test itself, a numerical analysis and the microstructural study of the involved materials and their behaviour on different test velocities. Through the analytical model proposed, the Force x Displacement curve obtained by the mechanical testing machine was converted to a Stress x Strain curve and later, a numerical code for calculating the area above this last curve was also developed. The material property found after this last calculation was the Perforation Toughness (Tenacity) Modulus, which is a measure of how much energy a material can absorb before fracturing. This property, measured in MPa, can also be read on mJ/mm^3 , that gives the idea of how much energy is necessary to shift one mm^3 (volume) of the material, according to the load imposed by the test, being this a tensile, compression or even a perforation test. This property has a high level of importance when studying the volume displacement occurred during the perforation test. Based on the assumption that all the tests were executed on the same conditions and also adopting the same premises, this property can be comparatively analyzed between the tested materials. Furthermore, through this comparative analysis, the most appropriate reinforcing material will be chosen to serve as a sacrificial layer for the External Sheath. In brief, the decisive factor for the material choice will be the highest Perforation Energy found between the materials tested.

Key-words: Flexible Pipes, Polymers, Tests.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
1.Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado	2
1.5 Organização do Trabalho	3
Capítulo 2	4
2.Considerações Iniciais	4
2.1 Histórico da Produção de Petróleo	4
2.1.1 No Mundo	4
2.1.2 No Brasil	5
2.2 Exploração e Produção do Petróleo	6
2.2.1 Classificação de Plataformas	6
2.3 Histórico dos Dutos Flexíveis	8
2.4 Dutos Submarinos	9
2.5 Tipos de Dutos	10
2.5.1 Dutos Rígidos	10
2.5.2 Dutos Flexíveis	11
2.6 Classificação	12
2.7 Funcionalidades	14
2.8 Configurações dos <i>Risers</i>	15
2.8.1 Catenária Livre (<i>Free hanging</i>)	15
2.8.2 <i>Lazy Wave</i>	16
2.8.3 <i>Steep Wave</i>	16
2.8.4 <i>Lazy-S</i>	17
2.8.5 <i>Steep-S</i>	17

2.9 Camadas	18
2.9.1 Carcaça Intertravada	19
2.9.2 Barreira de Pressão	21
2.9.3 Armadura de Pressão	22
2.9.4 Armaduras de Tração	24
2.9.5 Capa Externa	27
2.9.6 Isolamento Térmico	28
2.10 Acessórios	29
2.11 Instalação dos Dutos	30
2.11.1 Maneiras de Instalação	31
2.11.2 Curvas de Aperto	32
2.11.3 Possíveis Mecanismos de Falha da Capa Externa e o SCC	34
Capítulo 3	36
3. Materiais e Métodos	36
3.1 Teste de Perfuração	36
3.1.1 Amostragem	37
3.1.2 Máquina de Ensaio Mecânicos	40
3.1.3 Dispositivo de Perfuração	41
3.1.4 Programação da Máquina de Ensaio	42
3.1.4.1 Pré-teste	42
3.1.4.2 Definição da Rampa de Teste	43
3.1.4.3 Critérios de Fim de Teste	44
3.1.5 Passo a Passo do Teste	44
Capítulo 4	45
4. Revisão Bibliográfica	45
4.1 Dispositivo de Perfuração	45
4.1.1 Projeto de Matriz de Corte	47
4.1.2 Modelo Analítico por Método de Energia com Carga Localizada	47

4.1.2.1 Cálculo de Flambagem com Carregamento Excêntrico	50
4.1.2.2 Fator de Segurança	52
4.1.3 Cálculo do Espanamento de Rosca do Eixo Central	52
4.1.4 Cálculo da Tensão de Escoamento no Eixo Central	53
4.2 Metodologia para Cálculo da Energia de Perfuração	54
4.2.1 Introdução ao Conceito de Energia de Deformação e aos Dados Aquisitados	54
4.2.2 Cálculo da Área Projetada	55
4.2.3 O Gráfico Tensão x Deformação	57
4.3 Estruturas Poliméricas	59
4.3.1 Cristalinidade Polimérica	61
4.3.1.1 Modelo do Micélio com Bordas	61
4.3.1.2 Modelo da Cadeia Dobrada	62
Capítulo 5	64
5. Dimensionamento do Dispositivo	64
5.1 Projeto de Matriz de Corte	64
5.2 Modelo Analítico por Método de Energia com Carga Localizada	65
5.3 Cálculo de Escoamento em Membro Curto de Compressão	65
5.4 Cálculo do Espanamento de Rosca e Escoamento Eixo Central	66
5.5 Modelo 3D	67
5.6 Detalhamento do Dispositivo	69
5.7 Detalhamento Renderizado	71
Capítulo 6	73
6. Análise pelo Método dos Elementos Finitos	73
6.1 Descrição do Modelo	73
6.2 Considerações do Modelo	75
6.2.1 Análise Estrutural Não-Linear	75
6.3 Materiais	77
6.3.1 Amostra Polimérica	77

6.3.2 Dispositivo de Perfuração	77
6.4 Contatos	78
6.5 Malha	78
6.6 Definições do Modelo	80
Capítulo 7	82
7. Resultados e Discussão	82
7.1 Resultados	82
7.1.1 Testes a 500 mm/min	83
7.1.2 Testes a 50 mm/min	89
7.1.3 Resultados Compilados	95
7.1.4 Amostras após a Perfuração	96
7.2 Discussão	98
7.2.1 Discussão Sobre os Resultados dos Testes	98
7.2.2 Discussão Comparativa entre Velocidades	99
7.2.3 Discussão Sobre o Modo de Falha	103
7.2.3.1 Discussão Microestrutural	104
7.2.3.1.1 Possível Falha Observada na Micrografia – Deslizamento de Planos Subsequentes	108
7.2.3.1.2 Possível Falha Observada na Micrografia – Fendilhamento	110
7.2.4 Análise dos Resultados do Método de Elementos Finitos	112
7.3 Trabalhos Futuros	120
7.3.1 Análise de Camada Dupla no Polímero 6	121
7.3.1.1 Testes Adicionais – Amostragem e Resultados	121
7.3.1.2 Discussão Sobre os Resultados	124
7.3.2 Análise da Perfuração em uma Fita Metálica	124
7.3.2.1 Testes Adicionais – Amostragem e Resultados	124
7.3.2.2 Discussão Sobre os Resultados	127
Capítulo 8	128
8. Conclusão	128

Capítulo 9	129
9. Referências Bibliográficas	129
APÊNDICE A: Método dos Trapézios Implementado com <i>Visual Basic for Applications</i>	134

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Maiores reservas de petróleo no mundo [8]	6
FIGURA 2: FPSO P-50 no campo de Albacora Leste, Bacia de Campos [10].....	7
FIGURA 3: Plataforma Sevan Piranema, Bacia Sergipe-Alagoas [10]	8
FIGURA 4: Comparativo entre os tipos de plataformas [10].....	8
FIGURA 5: Duto HAIS utilizado na segunda guerra mundial [12]	9
FIGURA 6: Dutos submarinos [18]	10
FIGURA 7: Duto rígido em processo de fabricação [13].....	11
FIGURA 8: Duto flexível tipo <i>Bonded</i> [15].....	12
FIGURA 9: Duto flexível tipo <i>Unbonded Smooth Bore</i> [3]	13
FIGURA 10: Duto flexível tipo <i>Unbonded Rough Bore</i> [3]	13
FIGURA 11: Posicionamento de <i>Risers</i> e <i>Flowlines</i> [3].....	14
FIGURA 12: Configuração em catenária livre [20]	15
FIGURA 13: Configuração em <i>Lazy Wave</i> [20]	16
FIGURA 14: Configuração <i>Steep Wave</i> [20]	17
FIGURA 15: Configuração <i>Lazy-S</i> [20].....	17
FIGURA 16: Configuração <i>Steep-S</i> [20].....	18
FIGURA 17: Perfil intertravado da carcaça [3].....	19
FIGURA 18: Fabricação da carcaça [15]	19
FIGURA 19: Exemplo de dobramentos em série para confecção da carcaça [15]	20
FIGURA 20: Falha por colapso da carcaça intertravada [3]	20
FIGURA 21: Extrusão da barreira de pressão [3]	21
FIGURA 22: Fabricação da Armadura de Pressão [15].....	22
FIGURA 23: Distribuição longitudinal das tensões no perfil zeta [18]	23
FIGURA 24: Espaço anular [18].....	23
FIGURA 25: Processo de fabricação das armaduras de tração [18]	24
FIGURA 26: Flambagem radial [15].....	24
FIGURA 27: Aplicação de fita de alta resistência [15].....	25
FIGURA 28: Flambagem lateral [15].....	25
FIGURA 29: Máquina armadora [15]	26
FIGURA 30: Extrusão da capa externa [15]	28
FIGURA 31: Formação de hidratos no interior de um duto [21]	29
FIGURA 32: Formação de Parafinas no Interior de um duto rígido [21]	29
FIGURA 33: Alguns acessórios de linhas flexíveis [22]	30

FIGURA 34: Modelo esquemático do sistema de lançamento horizontal (HLS) [23]	31
FIGURA 35: Modelo esquemático do sistema de lançamento vertical (VLS) [23].....	32
FIGURA 36: Curva de aperto [3]	33
FIGURA 37: Trinca gerada pela corrosão sob tensão [24]	34
FIGURA 38: Perfuração até o fundo da amostra	37
FIGURA 39: Amostra planificada.....	38
FIGURA 40: Amostragem dos seis materiais testados	38
FIGURA 41: Máquina de ensaio mecânico EMIC 23-100 com o dispositivo de perfuração posicionado.....	40
FIGURA 42: Exemplo de curva de Força x Deslocamento adquirida	41
FIGURA 43: Modelo 3D do dispositivo de perfuração. 1 (Punção); 2 (Matriz).....	41
FIGURA 44: Pré teste, interface Bluehill 3.....	42
FIGURA 45: Rampa de teste (500 mm/min), interface <i>Bluehill 3</i>	43
FIGURA 46: Rampa de teste (50 mm/min), interface <i>Bluehill 3</i>	43
FIGURA 47: Critérios de fim de teste, interface <i>Bluehill 3</i>	44
FIGURA 48: Vista explodida do dispositivo de perfuração / Vista em corte do dispositivo.....	46
FIGURA 49: Detalhe da simetria do dispositivo.....	48
FIGURA 50: Quadro analítico de reações (à esquerda) e diagramas de corpo livre do modelo analítico (à direita).....	48
FIGURA 51: Exemplo Força x Deslocamento.....	55
FIGURA 52: Conceito de área projetada	56
FIGURA 53: Exemplo Área Projetada x Deslocamento	56
FIGURA 54: Exemplo Tensão x Deslocamento	57
FIGURA 55: Exemplo Tensão x Deformação do Teste 1.3.....	58
FIGURA 56: Cadeia polimérica do Polipropileno [37]	60
FIGURA 57: Curvas Tensão x Deformação – (a) Termorrígidos, (b) Termoplásticos [38].....	60
FIGURA 58: Modelo do micélio com bordas [36].....	61
FIGURA 59: Modelo da cadeia dobrada [39]	62
FIGURA 60: Desenho esquemático da Esferulite [36]	62
FIGURA 61: Fotomicrografia de transmissão utilizando luz polarizada cruzada [36].....	63
FIGURA 62: Modelo 3D do dispositivo de perfuração	68
FIGURA 63: Folha 1	69
FIGURA 64: Folha 2	70
FIGURA 65: Folha 3	70
FIGURA 66: Folha 1	71

FIGURA 67: Folha 2	72
FIGURA 68: Folha 3	72
FIGURA 69: Geometria do teste de perfuração projetada em 180°	74
FIGURA 70: Geometria do teste de perfuração	74
FIGURA 71: Amostra dividida em superfícies de 70°	79
FIGURA 72: Geometria discretizada	80
FIGURA 73: Detalhe da malha	80
FIGURA 74: Condições de Contorno	81
FIGURA 75: Polímero 1	83
FIGURA 76: Polímero 2	84
FIGURA 77: Polímero 3	85
FIGURA 78: Polímero 4	86
FIGURA 79: Polímero 5	87
FIGURA 80: Polímero 6	88
FIGURA 81: Polímero 1	89
FIGURA 82: Polímero 2	90
FIGURA 83: Polímero 3	91
FIGURA 84: Polímero 4	92
FIGURA 85: Polímero 5	93
FIGURA 86: Polímero 6	94
FIGURA 87: Polímero 1	97
FIGURA 88: Polímero 2	97
FIGURA 89: Polímero 3	97
FIGURA 90: Polímero 4	97
FIGURA 91: Polímero 5	97
FIGURA 92: Polímero 6	97
FIGURA 93: Energia de Perfuração – Estudo comparativo.....	98
FIGURA 94: Comparativo da Energia de Perfuração Normalizada em diferentes velocidades...99	99
FIGURA 95: Falha Prematura no Teste 4.2	100
FIGURA 96: Comparativo da Energia de Perfuração em diferentes velocidades – Corrigido...100	100
FIGURA 97: Gráficos Tensão x Deformação do Polímero 2 em diferentes taxas de deformação, 500 mm/min (imagem superior) e 50 mm/min (imagem inferior)	102
FIGURA 98: Possíveis variações na curva Tensão x Deformação [54].....	103
FIGURA 99: Curva Tensão x Deformação Verdadeira para diferentes comportamentos mecânicos [37]	104

FIGURA 100: Curvas Tensão x Deformação para o Polímero 2 (Teste 2.4).....	104
FIGURA 101: Tamanho real da amostra e indicação da área analisada	105
FIGURA 102: Ampliação de 27X	105
FIGURA 103: Ampliação de 50X	106
FIGURA 104: Ampliação de 100X	106
FIGURA 105: Ampliação de 300X	107
FIGURA 106: Ampliação de 500X	107
FIGURA 107: Ampliação de 1000X	108
FIGURA 108: Indicação da direção da tensão aplicada e do escoamento de planos nesta direção	109
FIGURA 109: Carregamento de tração e deslizamento entre lamelas de a) até e) [36].....	109
FIGURA 110: Deslocamento de planos	110
FIGURA 111: Escoamento plástico antes da fratura.....	111
FIGURA 112: Microvazios e Fibrilas orientadas na direção da tensão aplicada [36]	111
FIGURA 113: Fibrilas orientadas na direção do fendilhamento	112
FIGURA 114: Contorno de tensão equivalente na amostra (projeção em 180°)	114
FIGURA 115: Contorno de deformação da amostra referente ao Teste 4.3 (projeção em 180°)	114
FIGURA 116: Curva Força x Deslocamento do Polímero 4.....	114
FIGURA 117: Comparativo MEF x Teste – Polímero 2.....	115
FIGURA 118: Comparativo MEF x Teste – Polímero 4.....	116
FIGURA 119: Polímeros 2 e 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração normalizada).....	1168
FIGURA 120: Energia de deformação do Polímero 4	1189
FIGURA 121: Amostragem total	121
FIGURA 122: Amostras de espessura igual a 3.5 mm do Polímero 6 separadas após a perfuração	122
FIGURA 123: Testes em camada dupla de espessura simples igual a 3.5mm.....	123
FIGURA 124: Fita metálica antes e após a perfuração	125
FIGURA 125: Teste realizado na fita metálica	126
FIGURA 126: Rebarba gerada pela fratura frágil	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Estrutura típica de um duto flexível [18]	18
TABELA 2: Dimensões das amostras	37
TABELA 3: Testes no Polímero 1	39
TABELA 4: Testes no Polímero 2	39
TABELA 5: Testes no Polímero 3	39
TABELA 6: Testes no Polímero 4	39
TABELA 7: Testes no Polímero 5	39
TABELA 8: Testes no Polímero 6	39
TABELA 9: Especificações técnicas EMIC 23-100 [27]	40
TABELA 10: Especificação de cada componente do dispositivo	46
TABELA 11: Diâmetros e área de roscas métricas de passo grosso e passo fino [31]	53
TABELA 12: Valores utilizados nos gráficos para o teste 1.3 (os valores abaixo são representativos, uma vez que em compressão, os dados de Carga, Tensão e Deformação seriam negativos)	59
TABELA 13: Parâmetros de entrada do projeto de matriz de corte	64
TABELA 14: Parâmetros de saída do projeto de matriz de corte	64
TABELA 15: Parâmetros de entrada do modelo analítico por método de energia	65
TABELA 16: Parâmetros de saída do modelo analítico por método de energia	65
TABELA 17: Parâmetros de entrada do cálculo de escoamento em membro curto	66
TABELA 18: Parâmetros de saída do cálculo de escoamento em membro curto de compressão	66
TABELA 19: Parâmetros de entrada do cálculo de espanamento e escoamento do acoplamento	67
TABELA 20: Parâmetros de saída do cálculo de espanamento e escoamento do acoplamento	67
TABELA 21: Propriedades dos polímeros	77
TABELA 22: Propriedades do Aço AISI 4340 Temperado e Revenido [51]	77
TABELA 23: Número de nós e elementos por componente.	79
TABELA 24: Resultados da Energia de Perfuração a 500 mm/min	95
TABELA 25: Resultados da Energia de Perfuração a 50 mm/min	96
TABELA 26: Desvio padrão entre os resultados de 500 e 50 mm/min	101
TABELA 27: Análise de Convergência	113
TABELA 28: Polímero 2 - MEF x Teste (Força)	117
TABELA 29: Polímero 2 - MEF x Teste (Tensão)	117
TABELA 30: Polímero 4 - MEF x Teste (Força)	117
TABELA 31: Polímero 4 - MEF x Teste (Tensão)	117
TABELA 32: Polímero 2 - MEF x Teste (Energia de Perfuração)	118

TABELA 33: Polímero 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração)	118
TABELA 34: Polímeros 2 e 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração Normalizada)	118
TABELA 35: Cálculo da Energia de Perfuração do Polímero 4	120
TABELA 36: Comparativo entre a Energia de Perfuração Normalizada do Polímero 4	120
TABELA 37: Testes no Polímero 6	122
TABELA 38: Comparativo – Camada Dupla x Simples	123
TABELA 39: Comparativo – Energia de Perfuração dos Testes 6.1, 6.2, 6.3 e 7.1	124
TABELA 40: Dados do aço SAE 1075 [51]	125
TABELA 41: Testes adicionais na Fita Metálica	125
TABELA 42: Resultados dos testes preliminares da fita metálica	126

Capítulo 1

1.Introdução

Na atual conjuntura, as energias renováveis vêm ganhando espaço não só na matriz energética Brasileira, mas também em escala mundial [1]. Tal mudança, aliada a crise gerada pelo baixo preço do petróleo nos últimos anos - ambos motivados pela instabilidade intrínseca ao setor - gerou reestruturações e reduções em grande parte do corpo de colaboradores de várias líderes de mercado do setor petrolífero [2].

Como resposta, as “Gigantes do Óleo e Gás” se fundiram, buscando oferecer uma solução completa e eficiente para a exploração em águas ultra profundas. O objetivo é prover ao cliente um projeto de exploração de sua concepção à instalação e manutenção das linhas e equipamentos, aumentando a eficiência da produção e preocupando-se com segurança ambiental, durante vidas em serviço de mais de 25 anos e em condições de trabalho extremamente severas.

Lâminas d'água de 2500 metros, temperaturas de escoamento do óleo de 90°C, pressões internas ao duto da ordem de 9000 psi e altas concentrações de contaminantes corrosivos (CO₂ e H₂S) requerem o desenvolvimento e aperfeiçoamento das tecnologias para escoar o óleo do leito do oceano até a unidade produtora. Dutos flexíveis são hoje uma das soluções mais adequadas e inovadoras para exploração nessas condições. Estes são compostos por um arranjo de camadas metálicas (com função estrutural) e poliméricas (impermeabilizantes) concêntricas, que oferecem resistência às pressões de escoamento interna, hidrostática externa, bem como às cargas dinâmicas trativas e compressivas de operação.

No Brasil, razões de ordens comercial, logística, conjuntural, técnica e estratégica combinadas resultaram em um extenso portfólio de linhas flexíveis operadas no país. Com a descoberta parcial do pré-sal, um dos principais motivos para a utilização de flexíveis é a possibilidade de reinstalação destes em outras localidades, caso não seja atendida a expectativa de produção do poço em questão [3].

1.1 Motivação

A principal motivação do presente projeto é garantir a integridade da camada polimérica mais externa do duto e conseqüentemente assegurar que não haja alagamento do espaço anular

(espaço entre a barreira e a capa externa, respectivamente as camadas poliméricas mais interna e mais externa que garantem a vedação do espaço).

No lançamento dos dutos flexíveis, estes podem ser danificados, por exemplo, pelo impacto com as bordas agudas da mesa de trabalho ou desalinhamento dos tensionadores das estruturas de lançamento, por isso, é de suma importância que sejam criados mecanismos de defesa e proteção do duto como a implementação de camadas de reforço.

1.2 Justificativa

Como dito anteriormente, uma vez em contato com o aço carbono utilizado nas armaduras do duto, as altas concentrações de H₂S e CO₂ encontradas nos campos do pré-sal podem gerar problemas de corrosão, danificando as armaduras metálicas (de aço carbono) e gerando consequências ambientais e prejuízos imensuráveis em caso de falha do duto. Um tubo flexível com a capa externa rompida, tem seu espaço anular alagado, podendo intensificar fenômenos de corrosão sob tensão (SCC – *Stress Corrosion Cracking*), os quais são os principais mecanismos de falha estudados para este tipo de duto na atualidade.

1.3 Objetivos

O objetivo do presente projeto é avaliar qualitativamente a resistência à indentação de diferentes materiais poliméricos (já utilizados como capa externa) visando eleger o mais apropriado para servir como camada de reforço para a capa. Essa avaliação foi viabilizada através de um teste experimental de perfuração.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

Este projeto foi pautado em pesquisa acadêmica sobre os principais assuntos abordados, por meio da utilização de livros, dissertações acadêmicas e normas técnicas, buscando sempre fontes atuais e de confiança.

Primeiramente elaborou-se um cronograma de atividades a serem desempenhadas, buscando o atendimento aos prazos da disciplina Projeto Final. Posteriormente, foi selecionada a máquina de ensaios a ser utilizada para o teste e a amostragem de materiais e configurações a serem testadas.

Além disso, para o projeto e fabricação do dispositivo de perfuração foram realizados cálculos analíticos e a modelagem 3D acompanhada do detalhamento do mesmo utilizando o

SolidWorks. Para o tratamento dos dados aquisitados pela máquina e análise de resultados, foi desenvolvida uma modelagem analítica que visa a obtenção da Energia de Perfuração dos materiais testados, bem como um código escrito em *Visual Basic for Applications* para o cálculo da área abaixo da curva Tensão x Deformação obtida pelo Método dos Trapézios. Também foi elaborada, para um dos polímeros testados, uma análise estrutural do teste por Elementos Finitos utilizando o *ANSYS*. Por fim, utilizou-se um Microscópio Eletrônico por Varredura visando o melhor entendimento do mecanismo de falha microestrutural envolvido na perfuração.

1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 9 capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1 – Introdução, onde o tema é proposto e os principais objetivos e diretrizes de condução do projeto são definidos;
- Capítulo 2 – Considerações Iniciais, onde o leitor se familiarizará com os principais conceitos para o entendimento de dutos flexíveis;
- Capítulo 3 - Materiais e Métodos, onde o teste de perfuração é descrito;
- Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica, onde são apresentados os conceitos aprendidos durante o curso de Engenharia Mecânica e ao longo da experiência profissional adquirida até o momento;
- Capítulo 5 – Dimensionamento do Dispositivo, onde são apresentados os cálculos analíticos realizados para o dimensionamento do dispositivo de perfuração, bem como o modelo 3D e o seu detalhamento técnico;
- Capítulo 6 – Análise pelo Método dos Elementos Finitos;
- Capítulo 7 – Resultados e Discussão, onde são apresentados os resultados dos testes e da análise de elementos finitos, bem como sugestões para continuação do trabalho;
- Capítulo 8 – Conclusão;
- Capítulo 9 - Referências Bibliográficas utilizadas;
- Apêndice A.

Capítulo 2

2.Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordados um breve histórico sobre a produção de petróleo no Brasil e no mundo, conceitos básicos para o entendimento do *layout* submarino de dutos e acessórios utilizados na extração, bem como as classificações, funcionalidades, camadas características e maneiras de instalação de dutos flexíveis. Por fim, serão abordados alguns mecanismos de falha que podem afetar a integridade da capa externa, sendo estes o objetivo de estudo do presente projeto, motivando a elaboração do teste de perfuração.

2.1 Histórico da Produção de Petróleo

Esta seção abordará brevemente o histórico da produção nacional e internacional de petróleo, culminando em sua situação atual.

2.1.1 No Mundo

A obtenção do Petróleo na história, até meados do século XIX, decorria de exsudações naturais encontradas em todos os continentes, onde o petróleo ascende por meio de fraturas e fissuras das rochas até atingir a superfície terrestre. Na antiga Babilônia, os tijolos eram assentados com asfalto e no Egito o usavam na pavimentação de estradas, para embalsamar os mortos e na construção de pirâmides [4].

Em 1859 foi marcado o início da exploração comercial nos EUA quando, a partir de um sistema de percussão movido a vapor, descobriu-se um poço de apenas 21 metros de profundidade em Tittusville, na Pensilvânia [5]. Até o final do século XIX, os Estados Unidos dominaram praticamente sozinhos o comércio mundial de petróleo, que a partir da destilação foi amplamente utilizado como fonte energética para a iluminação pública.

A primeira guerra mundial, em 1914, pôs em evidência a importância estratégica do petróleo. Pela primeira vez foi usado o submarino com motor a diesel. A transformação do petróleo em material de guerra e o uso generalizado de seus derivados fizeram com que o controle do suprimento se tornasse questão de interesse nacional (época em que a indústria automobilística começava a ganhar corpo). O governo americano passou a incentivar empresas petrolíferas do país a operarem no exterior [6].

A importância do Petróleo em âmbitos globais se tornou cada vez mais notória, o que se justifica pelo avanço em inovações e a necessidade de proteção do conhecimento desenvolvido. Com isso, o produto veio a se tornar uma das maiores commodities da atualidade e a competitividade no setor se acirrou, uma vez que este é aplicado como insumo para a produção de plásticos, tecidos, tintas entre outros e principalmente combustíveis.

2.1.2 No Brasil

A história do Petróleo no Brasil se inicia em 1897 pelo fazendeiro Eugênio Ferreira Camargo, no município de Bofete em São Paulo, em uma tentativa sem sucesso de encontrar Petróleo através de um poço *onshore* com 488 metros de profundidade que teve como resultado apenas 0,5 m³ de óleo extraído [4].

Depois de ser criado o serviço geológico e mineralógico do Brasil em 1919, mais de 60 poços foram perfurados sem sucesso até que, em 1939, foi descoberta a primeira jazida de petróleo explorável comercialmente em território brasileiro na cidade de Salvador (BA) [7]. O poço foi perfurado por uma sonda rotativa encontrando petróleo a uma profundidade de 210 metros.

Com o decorrer dos anos, o país se empenhava em desenvolver e aperfeiçoar suas técnicas de exploração e produção do petróleo. Em 1968 no campo de Guaracema (SE), o primeiro poço *offshore* foi descoberto, iniciando um novo ciclo de exploração a partir de águas mais profundas. Essas novas descobertas foram marcadas por ampliarem significativamente a produção petrolífera brasileira.

A produção de petróleo no Brasil cresceu de 750 m³/dia na época do governo Getúlio Vargas para mais de 182.000 m³/dia no final dos anos 90, graças aos contínuos avanços tecnológicos de produção e perfuração na plataforma continental [4]. A Figura 1 apresenta as maiores reservas provadas de petróleo no mundo (em outubro de 2018) e o Brasil se encontra na 15^o posição contando com 12,8 bilhões de barris.



Figura 1: Maiores reservas de petróleo no mundo [8]

2.2 Exploração e Produção do Petróleo

O petróleo é um óleo de origem fóssil que leva milhões de anos para se formar em rochas sedimentares de ambientes marítimos e terrestres. No Brasil, a maior concentração das reservas encontra-se em ambientes marítimos, águas profundas e ultra profundas. Atuar nessas áreas exige muito estudo, tecnologia e investimento.

A busca pelo petróleo em alto mar é realizada por navios de pesquisa equipados com ferramentas que auxiliam na verificação de poços com boas perspectivas de produção. Após as fases da perfuração, inicia-se a completção do poço com a instalação dos equipamentos necessários para a produção de hidrocarbonetos ou para injeção de fluidos e, por fim, a instalação da árvore de natal molhada, que direciona o fluxo do poço para as linhas acopladas [3].

A árvore de natal molhada é um equipamento fundamental para a segurança da extração do petróleo, pois ela é encaixada na cabeça de poço e conectada a uma base adaptadora de produção. Sua função é controlar a pressão dos fluidos na saída do poço, através de válvulas de acionamento manual e hidráulico, comandados normalmente por dutos flexíveis de controle, chamados Umbilicais.

2.2.1 Classificação de Plataformas

As plataformas têm por objetivos a perfuração (*drilling*) ou a produção (*production*), e ainda o armazenamento de hidrocarbonetos (*storage*) além de desempenhar diversas outras

atividades de apoio à produção de petróleo *offshore* [9]. Em cada campo, são analisadas as condições para encontrar o tipo de plataforma mais adequada, podendo esta ser: fixa, autoelevável, semissubmersível, TLWP, Navio-sonda, FPSO e FPSO monocoluna.

- Plataformas Fixas – São utilizadas na perfuração de poços e produção de petróleo, própria para serem instaladas em águas rasas, em lâminas d’água de até 300 metros.
- Autoeleváveis – Usadas também para perfuração de poços em águas rasas, podendo se movimentar, mas também oferecendo grande estabilidade.
- Semissubmersível – Utilizada na produção de hidrocarbonetos e em perfurações, possui grande mobilidade, podendo mudar de campo rapidamente.
- FPSO – Unidade flutuante também conhecida como navio-plataforma que pode produzir, armazenar e transferir petróleo. Na Fig. 2, pode-se ver um exemplo desse tipo de plataforma.
- FPSO Monocoluna – Plataforma que consiste em uma estrutura cilíndrica vertical flutuante, como mostra na Fig. 3, ancorada no fundo do mar por cabos tensionados. É um FPSO, mas com casco redondo, que gera maior estabilidade pois possui uma abertura na parte central, que permite a entrada da água e reduz os efeitos provocados pelas ondas.
- TLWP – Uma plataforma de produção que alcança até 1500 metros de profundidade. Essa plataforma também é conhecida como “flutuante quase fixa” e tem um sistema de ancoragem com tendões.
- Navio-sonda – Unidade flutuante usada na perfuração de poços e pode operar em águas ultra profundas, alcançando até 2000 metros de lâmina d’água.



Figura 2: FPSO P-50 no campo de Albacora Leste, Bacia de Campos [10]



Figura 3: Plataforma Sevan Piranema, Bacia Sergipe-Alagoas [10]

A Figura 4 indica o comparativo entre os diferentes tipos de plataformas e suas principais características, que definem qual é a melhor opção a ser usada para condições específicas de trabalho.



	FIXA	AUTOELEVÁVEL	SEMISSUBMERSÍVEL	FPSO	FPSO MONOCOLUNA	TLWP	NAVIO-SONDA
LAMINA D'ÁGUA	Até 300 metros	Até 150 metros	Mais de 2000 metros	Mais de 2000 metros	Mais de 2000 metros	Até 1500 metros	Mais de 2000 metros
ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
ATIVIDADE DE PRODUÇÃO	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
CONTROLE DOS POÇOS	Superfície	Superfície	Fundo do mar	Fundo do mar	Fundo do mar	Superfície	Fundo do mar
CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não
VANTAGEM	A instalação é mais simples e permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	A facilidade para mudar de locação e o comportamento de estrutura fixa, que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Especialmente projetada para ter pouco movimento	A capacidade de armazenamento permite que opere a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos é inviável.	Movimentos menores do que os FPSOs tipo Navio.	Possui sistema de ancoragem rígido e movimentos reduzidos, o que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Maior autonomia para perfurar em grandes distâncias da costa

Figura 4: Comparativo entre os tipos de plataformas [10]

2.3 Histórico dos Dutos Flexíveis

A exploração do Petróleo brasileiro começou em águas rasas, passando para águas profundas e, por último, ultra profundas. No contexto de desenvolvimento tecnológico, uma alternativa para operar em condições dinâmicas extremas, foram desenvolvidos os dutos flexíveis.

Esses tipos de dutos são capazes de suportar grandes esforços, historicamente tiveram sua primeira concepção durante a segunda guerra mundial onde houve a necessidade de se transferir combustível para abastecer as tropas aliadas na Normandia (França) a partir da

Inglaterra. Optou-se pela transferência através de dutos sob o leito marinho do Canal da Mancha, e a esta operação deu-se o nome de PLUTO (*Pipe Line Under the Ocean*) [11].

O duto flexível recebeu o nome do chefe da companhia de óleo anglo-iraniana que o projetou, a HAIS. Embora o duto seja bem parecido com os flexíveis de hoje, possuía algumas diferenças como a utilização de apenas uma armadura de tração e a camada interna de chumbo como mostra a Fig. 5 [12].



Figura 5: Duto HAIS utilizado na segunda guerra mundial [12]

Após a guerra, as instalações da operação PLUTO foram desfeitas e somente na década de 1960 foram retomados os estudos de desenvolvimento de dutos flexíveis a serem empregados na extração de petróleo.

Apenas 25 anos depois da operação PLUTO, em 1970, foi desenvolvido um duto flexível para transporte de petróleo para fins comerciais através de um grupo formado por várias empresas do ramo de arames e cabos de aço [11]. Em território brasileiro, neste mesmo ano, os dutos flexíveis começaram a ser utilizados no desenvolvimento da Bacia de Campos [3].

Atualmente, os *risers* e *flowlines* são utilizados em quase todos os campos de petróleo brasileiro em águas profundas e ultra profundas, principalmente após o aumento progressivo da utilização das plataformas flutuantes.

2.4 Dutos Submarinos

Os dutos submarinos são responsáveis por conduzir fluidos em diferentes aplicações no campo de exploração de petróleo *offshore*. São eles, por exemplo, que conduzem o fluxo de óleo e gás produzidos pelo poço para as unidades de produção. Também são responsáveis pelo transporte de gás, produtos químicos e fluidos de injeção. A Figura 6 apresenta exemplos de possíveis configurações desses dutos.

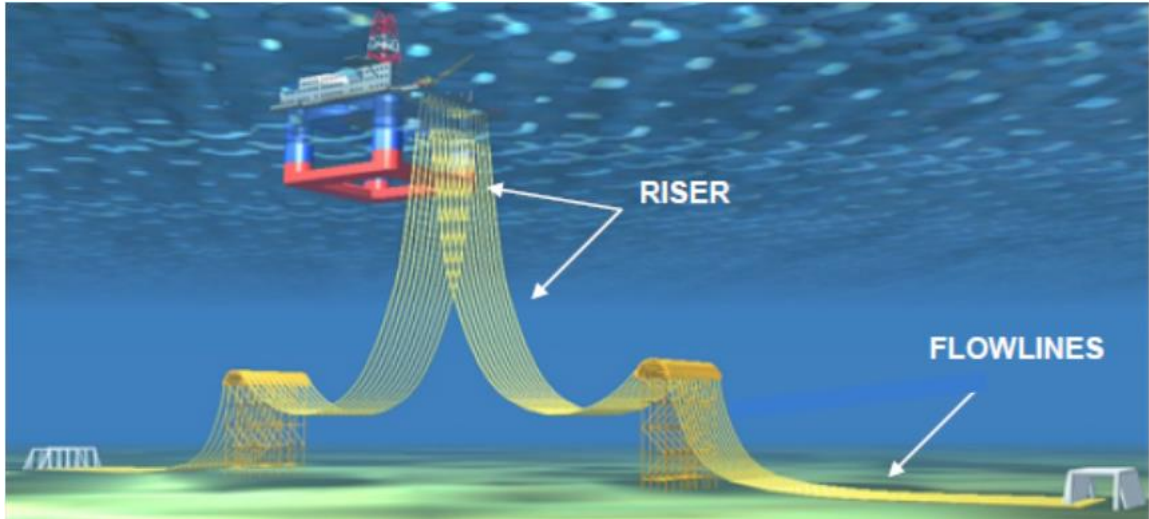


Figura 6: Dutos submarinos [18]

Devido à sua grande gama de aplicação, os dutos submarinos estão submetidos a diferentes condições de trabalho. Com isso, foram desenvolvidas diferentes estruturas, buscando aumentar sua eficiência e criar soluções específicas para cada aplicação, portanto, estes não são um produto de bancada, sendo o duto projetado de acordo com as condições específicas do poço em que atuará.

2.5 Tipos de Dutos

Atualmente, existem diferentes opções de *layout* submarino para extração de petróleo e com o desenvolvimento de novas tecnologias no setor, estes vêm se tornando cada vez mais complexos. Tratando-se de dutos, estes podem ser divididos em duas grandes famílias: dutos rígidos e flexíveis. Na seção a seguir será abordada uma breve elucidação sobre dutos rígidos e posteriormente os dutos flexíveis serão tratados com mais detalhes.

2.5.1 Dutos Rígidos

Os dutos rígidos são geralmente fabricados em aço carbono. Dependendo da aplicação, eles podem ser revestidos por camadas de outros materiais, visando melhorar propriedades da estrutura como resistência a corrosão e isolamento térmico.

Quando comparados aos dutos flexíveis, os dutos rígidos apresentam vantagens quanto aos custos de fabricação, uma vez que apresentam uma estrutura mais simples como mostra a Fig. 7, além de possuírem alta rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão, sendo

também capazes de resistir a altas pressões. Em contrapartida, estes apresentam menor flexibilidade, influenciando no raio mínimo de operação [3].



Figura 7: Duto rígido em processo de fabricação [13]

2.5.2 Dutos Flexíveis

Os dutos flexíveis são fabricados aliando camadas poliméricas a camadas metálicas gerando uma estrutura de baixa rigidez à flexão e alta resistência à tração axial. Geralmente, os dutos flexíveis são projetados especificamente para cada aplicação e a definição de suas camadas depende de variáveis como temperatura, fluido de trabalho, profundidade, pressão e vida útil.

Na estrutura dos dutos flexíveis, cada camada possui uma função e características específicas. As camadas poliméricas têm como principal função a vedação, seja esta interna ou externa. Outras possíveis funções podem ser a proteção contra corrosão, redução do atrito entre as camadas e isolamento térmico. As camadas metálicas são fabricadas em um arranjo helicoidal e tem como principal função proporcionar características estruturais ao duto. Essa configuração permite que os dutos flexíveis atinjam raios de curvatura menores que os alcançados por um duto rígido com a mesma capacidade de pressão.

O duto flexível é fabricado de dentro para fora e ao longo da fabricação, cada camada passa por processos de inspeção. No caso das camadas metálicas, realiza-se inspeção dimensional e as camadas poliméricas são submetidas à inspeção de ultrassom, para verificar a

regularidade de sua espessura. Depois de montados, os dutos passam por testes dimensionais e hidrostáticos para verificar se são capazes de suportar a pressão máxima de projeto [14].

Depois de fabricados, os dutos são armazenados em bobinas, sendo mais facilmente transportados e estocados, reduzindo custos de instalação e transporte. Uma grande vantagem do duto flexível, em relação ao duto rígido, é sua capacidade de ser reinstalado, podendo ser reutilizado até o fim de sua vida útil.

2.6 Classificação

Os dutos flexíveis podem ser classificados de acordo com o seu processo construtivo. O duto flexível *bonded* possui camadas aderentes e é composto tipicamente por camadas de elastômero. Essas camadas são enroladas ou extrudadas individualmente e posteriormente unidas por adesivos ou pelo processo de vulcanização, sendo fundidas em um componente único. Isso faz com que as camadas atuem de maneira uniforme. A aplicação desse tipo de dutos é, em geral, para trechos curtos, pois seu comprimento é limitado às dimensões da autoclave, utilizada em seu processo de fabricação. Na Figura 8 pode-se observar um exemplo do duto tipo *bonded* [3].



Figura 8: Duto flexível tipo *Bonded* [15]

Os dutos flexíveis *unbonded* (camadas não aderentes) são compostos por camadas metálicas e poliméricas desacopladas, permitindo movimentos relativos entre elas. Esse tipo de duto é o mais utilizado na produção de petróleo *offshore* no Brasil, sendo o objeto de estudo desse projeto final. Podemos classificá-lo quanto a sua camada mais interna. Dutos que possuem a camada mais interna de material polimérico são denominados *smooth bore* e sua configuração de camadas está ilustrada na Fig. 9 [16].

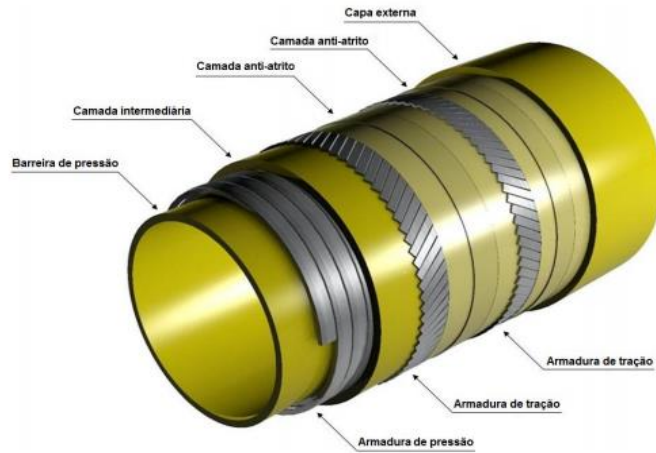


Figura 9: Duto flexível tipo *Unbonded Smooth Bore* [3]

O duto *smooth bore* é utilizado para transporte de fluidos quando não há presença de gás, como no caso de injeção de água ou injeção de produtos químicos. A camada polimérica, chamada barreira de pressão, reduz a perda de carga do duto assim como o custo. Entretanto, para funcionalidades do duto em que haja presença de gás no escoamento deve-se utilizar o duto *rough bore* (Fig. 10), que apresenta uma carcaça intertravada internamente à barreira de pressão [17].

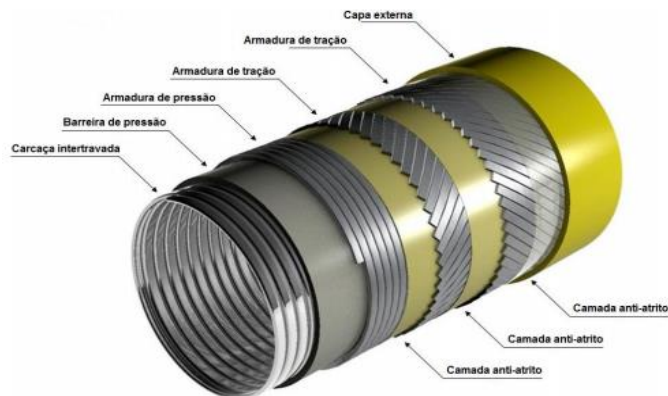


Figura 10: Duto flexível tipo *Unbonded Rough Bore* [3]

A função da carcaça intertravada é resistir ao efeito radial da pressão hidrostática externa. Essa proteção é necessária em casos de escoamento que possam conter gás, devido ao efeito da difusão destes gases para o espaço anular. Se em algum momento a produção for interrompida, a pressão interna tende a diminuir, podendo ser superada pela pressão externa, que somada a pressão do anular pode vir a colapsar o duto.

Os dutos submarinos também podem ser classificados de acordo com a sua configuração, como *risers*, *flowlines* ou *jumpers*. Os *risers* são linhas flexíveis projetadas para

aplicações dinâmicas. Esse tipo de duto é responsável por conectar a unidade produtora aos *flowlines* para extração, além de injetar fluidos nos poços.

Os *Flowlines* são linhas flexíveis destinadas a aplicações estáticas. Após sua instalação ficam assentados em leito marinho, com a finalidade de interligar equipamentos submarinos [18]. A Figura 11 mostra um exemplo de posicionamento dos *Risers e Flowlines*.

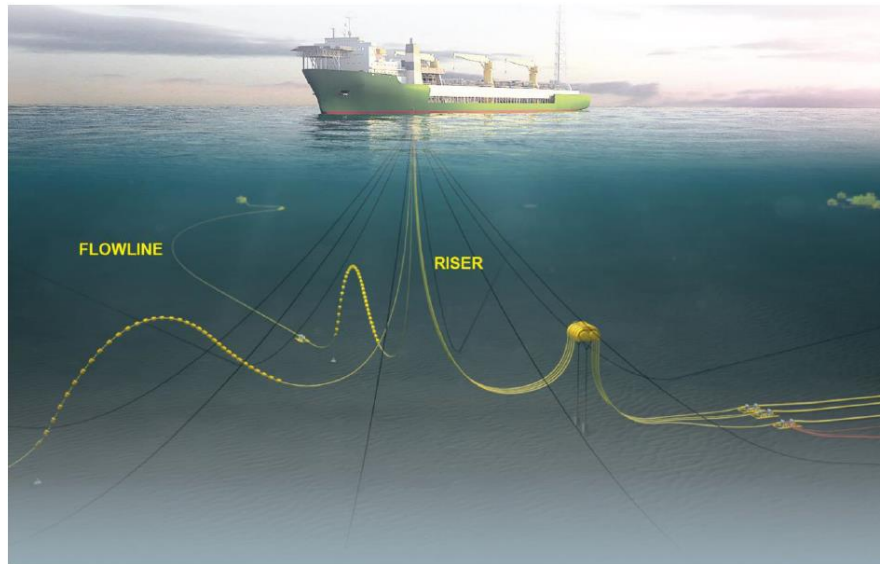


Figura 11: Posicionamento de *Risers e Flowlines* [3]

O duto flexível tipo *Jumper* pode ser utilizado tanto em aplicações dinâmicas quanto em aplicações estáticas. Sua principal característica é seu comprimento reduzido. Os *jumpers* podem ser utilizados para fazer interligações entre duas terminações ou estruturas submarinas.

2.7 Funcionalidades

Os dutos flexíveis são utilizados para diversas funções dentro da produção de óleo e gás *offshore*, como, por exemplo: produção de óleo, produção de gás, injeção de gás, *gás lift*, injeção de água, exportação de óleo e exportação de gás [18].

Os dutos responsáveis pela produção de óleo e gás escoam o petróleo bruto desde a árvore de natal molhada dos poços produtores até a unidade produtora de petróleo.

Os dutos de *gás lift* tem como objetivo injetar gás na coluna de produção, de forma a diminuir a pressão hidrostática, o que provoca o aumento da vazão do escoamento e otimização da produção de óleo. Esses dutos podem ser empregados tanto para aumentar a produtividade dos poços, quanto para adicionar energia externa a estes, de forma que os mesmos estejam aptos

a produzir mesmo quando a pressão do reservatório for insuficiente para vencer o peso da coluna do poço [18].

Os dutos de injeção de água e gás tem como objetivo controlar a pressão dos reservatórios. Esses dutos escoam os fluidos tratados na unidade produtora de petróleo até a árvore de natal molhada dos poços injetores submarinos. À medida que os fluidos de um reservatório são extraídos, a pressão cai, diminuindo sua produtividade. A injeção de água e gás é um método de recuperação do petróleo [18].

Os dutos de exportação escoam todo o volume de óleo e gás produzidos da unidade produtora de petróleo. Por esse motivo, estes apresentam diâmetros superiores aos demais [18].

2.8 Configurações dos *Risers*

Conforme visto anteriormente, *risers* são dutos flexíveis projetados para aplicações dinâmicas, submetidas a diferentes condições e funcionalidades. Sua configuração dependerá de fatores como: profundidade, movimentações da embarcação, números de *risers* e condições físicas.

Em lâminas d'água rasas, por exemplo, pode haver movimentações dos *risers* e das embarcações. Com isso, os *risers* correm o risco de atingir raios de curvatura menores do que sua capacidade. Já em águas profundas, devido ao grande comprimento, os *risers* estarão sujeitos a altas cargas.

Para diminuir esses efeitos, utiliza-se configurações de instalação específicas, podendo ser necessário o emprego de boias ou sistemas flutuadores [19]. Hoje, as empresas exploradoras buscam majoritariamente a qualificação de catenária livre em lâminas d'água cada vez mais profundas, sendo esta configuração e a *lazy-wave* as mais utilizadas.

2.8.1 Catenária Livre (*Free hanging*)

A Figura 12 ilustra a configuração em catenária livre.

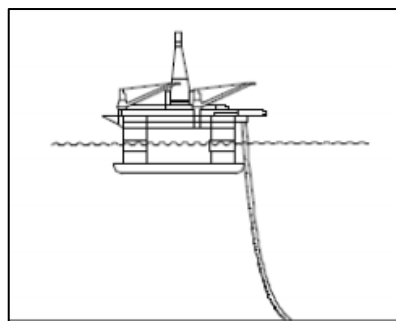


Figura 12: Configuração em catenária livre [20]

Essa é a configuração mais simples de todas, pois não utiliza sistemas flutuantes, reduzindo o custo de instalação. Entretanto, essa configuração gera maiores esforços na conexão com a plataforma, uma vez que o peso de duto “pendurado” é referente a linha toda, pois não há flutuadores [19].

2.8.2 *Lazy Wave*

Essa configuração utiliza um sistema de flutuadores distribuídos em um trecho central entre a unidade produtora e o poço. Esses flutuadores aliviam a tração no topo do *riser* e podem diminuir a movimentação na região do *touch-down-point* (região em que o duto toca o leito marinho). Os flutuadores distribuídos são vantajosos em relação ao módulo concentrado, pois suas menores dimensões permitem que sejam utilizados em qualquer tipo de embarcação. Outra característica dessa configuração é sua forma em “corcova” como indicado na Fig. 13, tendo na seção inferior uma catenária livre, apoiada no fundo do mar [19].

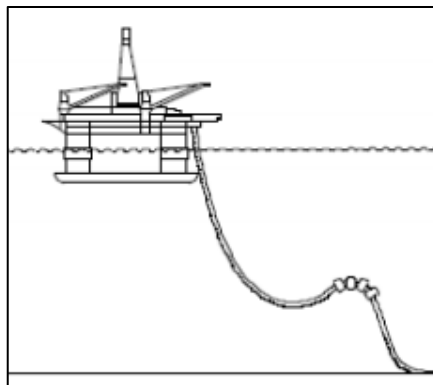


Figura 13: Configuração em *Lazy Wave* [20]

Hoje em dia, procura-se evitar esta configuração, tentando utilizar sempre que possível a Catenária Livre, o que diminui muito o tempo e conseqüentemente os custos de instalação.

2.8.3 *Steep Wave*

A configuração *Steep Wave* (Fig. 14) se assemelha muito à *Lazy Wave*, todavia nessa configuração o trecho de flutuação prolonga-se até a extremidade inferior da linha de ancoragem.

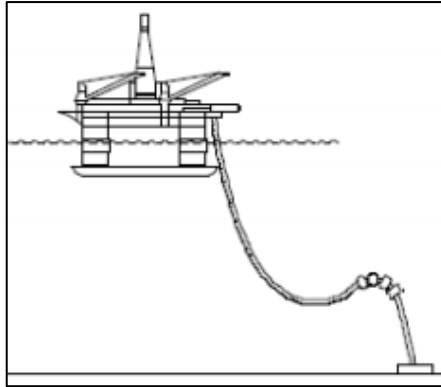


Figura 14: Configuração *Steep Wave* [20]

A extremidade inferior da linha não repousa no fundo do mar, o que faz com que a configuração seja menos complacente [19].

2.8.4 *Lazy-S*

A configuração *Lazy-S* (Fig. 15) é bem semelhante à *Lazy Wave*, diferenciando-se no tipo de flutuador utilizado.

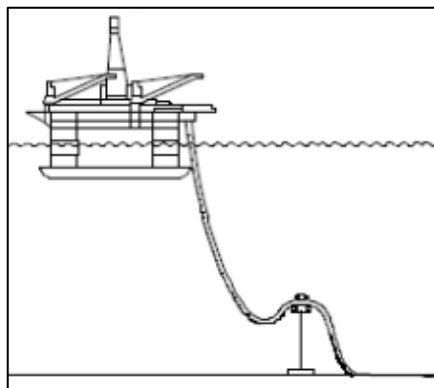


Figura 15: Configuração *Lazy-S* [20]

Nesse caso, o elemento de flutuação é concentrado em uma única boia localizada em uma posição intermediária. Dessa maneira, uma catenária livre fica suspensa da UEP (Unidade Estacionária de Produção) até a boia e, na região inferior, outra catenária se estende até o leito marinho [19].

2.8.5 *Steep-S*

A configuração Steep-S se assemelha à Steep Wave, diferenciando-se no trecho de flutuação, pois utiliza apenas uma boia (Fig. 16).

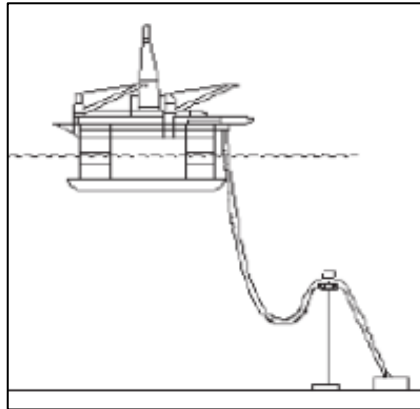


Figura 16: Configuração *Steep-S* [20]

Essa configuração é mais susceptível à instabilidade de torção, pelo fato de apresentar todo o módulo de flutuação concentrado [19].

2.9 Camadas

Como dito, os dutos flexíveis classificados como *unbonded* são compostos por uma série de camadas metálicas (com função estrutural) e poliméricas (impermeabilizantes), as quais lhes permitem resistir às cargas dinâmicas de operação (movimentação da UEP, condições de mar, pressões interna e externa), escoando o fluido interno de forma segura e otimizada. Esta seção irá tratar de cada camada, elucidando sua função, seu processo de fabricação e seus modos de falha, bem como os tipos de materiais normalmente utilizados para a confecção mesmas. Na Tabela 1 podemos observar um resumo da funcionalidade de cada camada.

Tabela 1: Estrutura típica de um duto flexível [18]

ESTRUTURA TÍPICA DE UM DUTO FLEXÍVEL		
Camada	Nome	Função Básica
1	Carcaça Intertravada	Pressão Externa, colapso, compressão mecânica radial
2	Barreira de Pressão	Estanqueidade ao fluido interno
3	Armadura de Pressão	Pressão interna, colapso, compressão mecânica radial
4	Armaduras de Tração	Cargas axiais de tração
5	Capa Externa	Estanqueidade ao fluido externo

2.9.1 Carcaça Intertravada

Utilizada em dutos *Rough Bore*, a carcaça intertravada tem como principal objetivo resistir a cargas de pressão externa (colapso), podendo ser analogamente comparada estruturalmente ao esqueleto do corpo humano (é o que dá sustentação ao duto). Na Figura 17 pode-se observar o seu perfil característico.



Figura 17: Perfil intertravado da carcaça [3]

Quanto à sua fabricação, mostrado na Fig. 18, ocorrem simultaneamente a conformação de fitas metálicas por dobramentos em série, mostrado na Fig. 19, dando forma ao perfil travado nele mesmo e a alimentação do maquinário que assenta estas fitas radialmente de acordo com o diâmetro interno do duto a ser formado.



Figura 18: Fabricação da carcaça [15]



Figura 19: Exemplo de dobramentos em série para confecção da carcaça [15]

O fato dessa camada ser fabricada com um ângulo próximo à 90° em relação ao eixo axial do duto, confere a esta a já mencionada resistência ao colapso, modo de falha mostrado na Fig. 20.



Figura 20: Falha por colapso da carcaça intertravada [3]

O colapso de um duto flexível é uma falha catastrófica e pode ser gerado por alguns cenários, dentre eles: a descompressão do duto, em caso de recolhimento da linha, a pressão externa excessiva gerada pela lâmina d'água, o aperto excessivo na linha causado por tensionadores que direcionam o lançamento desta durante a instalação (*crushing*) ou o aperto na linha causado pelas armaduras de tração (*squeezing*). A espessura da fita que gera a carcaça é selecionada basicamente levando em consideração a altura da lâmina d'água, ou seja, profundidades maiores normalmente requerem carcaças mais espessas.

Quanto a seleção de materiais, pelo fato de esta camada entrar diretamente em contato com o fluido interno, a mesma deve ser fabricada em aço inoxidável, levando em conta a composição do mesmo para definição de qual aço. Deve ser observada a concentração de contaminantes (CO_2 e H_2S), a presença e composição iônica da água, o pH e a temperatura e pressão máxima de operação para selecionar o aço mais adequado.

2.9.2 Barreira de Pressão

A barreira de pressão é a camada polimérica mais interna do duto flexível. Ela garante a estanqueidade interna, uma vez que a carcaça intertravada tem espaços (*gaps*) por meio dos quais o fluido poderia escoar, atingindo as camadas metálicas intermediárias contidas no espaço anular (espaço confinado entre a barreira e a capa externa, primeira e última camadas poliméricas, respectivamente).

A barreira é fabricada pela extrusão contínua de polímeros sobre a carcaça (Fig. 21).



Figura 21: Extrusão da barreira de pressão [3]

Quanto a seleção de materiais, o escolhido para confecção da barreira de pressão pode variar entre Polietilenos (PE), Poliamidas (PA) e Fluoreto de Polivinilideno (PVDF). Quanto maiores as pressões e temperaturas internas de escoamento do fluido, mais resistente deve ser o material da barreira.

Para temperaturas da ordem de 50°C podemos utilizar o Polietileno. Aumentando a temperatura para a ordem de 60°C, com variações desta, atingindo um máximo de 90°, devem ser utilizadas as poliamidas. Já para trabalho contínuo com fluido interno em temperaturas acima de 90°C (até 130°C), devemos utilizar o PVDF, visto que este não tem grandes alterações de suas propriedades, mesmo em altas temperaturas [3].

Em contrapartida à uma alta resistência a altas temperaturas, o PVDF é um material mais frágil. Pelo fato de a extrusão da barreira ser feita em cima da carcaça, esta penetra nos espaços (*gaps*) da mesma, conseqüentemente gerando pontos concentradores de tensão, que podem dar origem a trincas no material, em caso de dutos sujeitos a cargas dinâmicas [3]. Desse modo, ao utilizar o PVDF, faz-se necessária a extrusão preliminar de uma camada de sacrifício para que as trincas formadas devido à fragilidade do PVDF não sejam propagadas para a camada secundária, extrudada logo acima dessa, que impermeabiliza o duto internamente.

Alguns fatores são avaliados no projeto da barreira de pressão, dentre eles: pressão e temperatura de projeto além da composição do fluido interno. Tais fatores são os dados de entrada das análises locais de envelhecimento por hidrólise (quebra das longas cadeias poliméricas, fragilizando o material), fluência e permeação, determinando a espessura da camada a ser extrudada [3].

2.9.3 Armadura de Pressão

Apesar de auxiliar na resistência ao colapso, a principal função da armadura de pressão é resistir à pressão interna de escoamento do óleo, sendo essa de ordem superior à pressão externa devida à lâmina d'água. Da mesma forma que a carcaça, por causa de sua funcionalidade, a armadura de pressão também é enrolada radialmente, com um ângulo próximo a 90° em relação a direção axial do duto (Fig. 22).

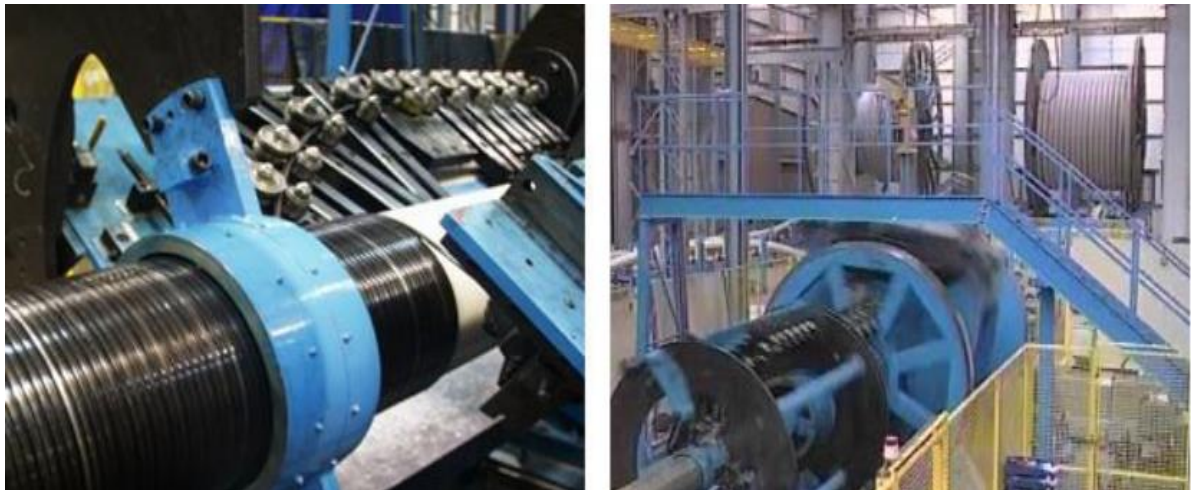


Figura 22: Fabricação da Armadura de Pressão [15]

Como em um efeito cascata, a pressão interna age na camada impermeável mais interna do duto (barreira), a qual, por sua vez se apoia na armadura de pressão. Esta camada é fabricada a partir de arames com perfis (seções transversais) característicos, sendo o mais utilizado o perfil zeta (em formato de Z). A Figura 23 apresenta o perfil zeta e sua distribuição de tensões característica quando sujeito à pressão interna do duto.

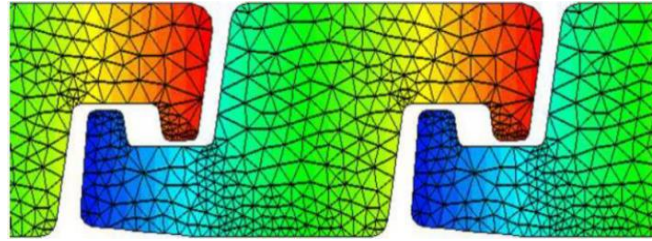


Figura 23: Distribuição longitudinal das tensões no perfil zeta [18]

Para projeto da armadura de pressão, são necessários alguns dados de entrada para a análise local, que define a espessura da camada. Dentre eles, encontram-se as pressões e temperaturas internas e externas, bem como a tração e curvatura no duto em diversos cenários modelados (instalação, operação, operação extrema, entre outros). Pelo fato de o perfil dessa armadura ter uma geometria diferenciada, as análises de tensão locais realizadas não são baseadas em modelos analíticos implementados computacionalmente, mas sim em modelagem por Elementos Finitos, associada a estes modelos numéricos.

Quanto a seleção de materiais, esta armadura é geralmente fabricada em aço carbono, sempre escolhendo o material de acordo com as condições do fluido interno. Um balanço entre resistência mecânica e resistência à corrosão é o que define o material a ser utilizado, visto que geralmente em aços carbono, ao ganhar em uma destas propriedades, perde-se na outra.

A resistência a corrosão é um parâmetro a ser considerado porque por mais que esta camada se encontre no espaço anular (espaço vedado entre as camadas poliméricas mais interna e mais externa do duto – Fig. 24), o fenômeno da permeação faz com que gases encontrados no interior do duto (*Bore*) atravessem a barreira e entrem em contato com a armadura. Sendo assim, o teor de CO_2 e H_2S (contaminantes corrosivos) é também dado de entrada para a análise de permeação da barreira e de vida em serviço das camadas metálicas contidas no anular. A permeação gera uma pressão parcial de contaminantes no anular e dependendo da concentração destes no *Bore* é definido o grau do aço carbono das armaduras.

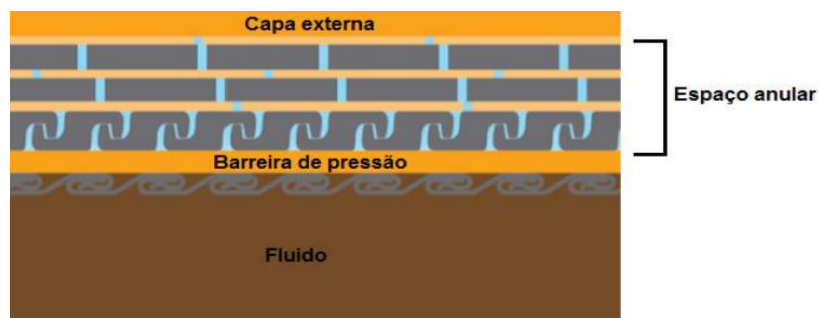


Figura 24: Espaço anular [18]

2.9.4 Armaduras de Tração

As armaduras de tração (Fig. 25) são compostas por arames de aço carbono e seção transversal retangular (com arestas adoçadas) enrolados helicoidalmente no duto flexível e tem como seu principal objetivo resistir as cargas axiais de tração e compressão radial/axial, impostas pelas condições de instalação e de operação [3].

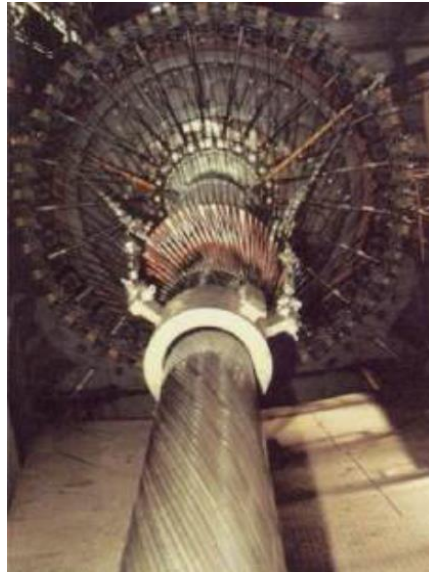


Figura 25: Processo de fabricação das armaduras de tração [18]

A tração pode falhar os arames das armaduras por escoamento do material devido ao peso próprio do duto “pendurado”, quando em catenária livre por exemplo. Enquanto isso, a compressão radial é causada pelo diferencial de pressão entre a pressão da coluna de fluido no interior do duto e a pressão externa devida à coluna de água do mar. O modo de falha resultante da compressão radial é a flambagem radial (gaiola de passarinho ou *Birdcage*) e pode-se observar esse tipo de falha na Fig. 26. A compressão axial (gerada pelo contato do duto com o leito marinho no *Touch Down Point*) e a curvatura do duto também podem contribuir para esse tipo de falha catastrófica [3].



Figura 26: Flambagem radial [15]

A tecnologia utilizada para evitar esse tipo de falha é a utilização de fitas anti-flambagem (*anti-buckling* – Fig. 27). Estas, por sua vez, são fitas de alta resistência enroladas radialmente no duto, por cima das armaduras de tração para evitar o deslocamento radial dos arames. Ao restringir o movimento dos arames nessa direção, os mesmos tendem a falhar lateralmente, gerando a flambagem lateral (Fig. 28).

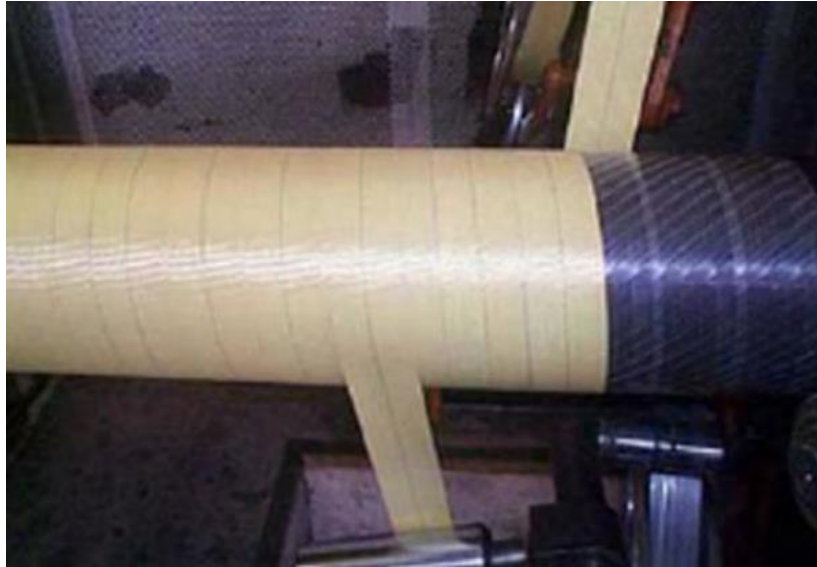


Figura 27: Aplicação de fita de alta resistência [15]



Figura 28: Flambagem lateral [15]

Do mesmo modo que a armadura de pressão, a carcaça é enrolada no duto a aproximadamente 90° da direção a axial do mesmo, visando resistir a esforços radiais de pressão, as armaduras de tração são fabricadas com ângulos opostos, próximos a direção

longitudinal do duto, visando resistir a esforços axiais de todas as origens. As armaduras de tração são enroladas opostamente e aos pares no duto, visando garantir também a rigidez a torção necessária para dar estabilidade à estrutura [3].

Ao selecionar o material, os critérios são parecidos com os da seleção de material para armadura de pressão, visto que ambas são fabricadas com aço carbono de alta resistência e devem resistir às pressões parciais de contaminantes corrosivos encontrados no espaço anular. Para poços com altas concentrações de H_2S , utiliza-se aços para serviço ácido (*Sour*), enquanto para menores ou nenhuma concentração desse contaminante, utiliza-se aços para serviço doce (*Sweet*). Além disso, existem aços para concentrações médias de H_2S . A escolha é feita basicamente pelo balanço entre resistência mecânica e resistência à corrosão, buscando sempre atender as condições de operação do poço, uma vez que quando se ganha em uma propriedade, se perde na outra [3].

Quanto a fabricação, a Armadora (Fig. 29) é a máquina responsável por enrolar os arames das armaduras de tração no duto, sendo esta composta por uma estrutura que comporta por várias bobinas alimentadoras de arame.



Figura 29: Máquina armadora [15]

As bobinas alimentam roletes que endireitam (retificam) os arames para que estes entrem na alimentação da máquina. Esta é dotada de movimento rotativo que concomitantemente com o movimento linear da tubulação forma helicoides ao redor do duto. Este processo de conformações sucessivas gera tensões residuais no arame, tensões estas que

vêm sido estudadas [18] visando o entendimento mais aprofundado do estado de tensões na superfície do arame, que é região mais suscetível à nucleação de trincas por corrosão sob tensão (*SCC – Stress Corrosion Cracking*).

2.9.5 Capa Externa

A capa externa é a camada polimérica que garante a estanqueidade externa do duto, ou seja, é nela que a pressão externa age primeiramente, sendo posteriormente transferida para as armaduras de tração e como em uma reação em cadeia as camadas apoiam-se umas nas outras, transferindo a carga para a armadura de pressão, barreira e carcaça, nesta ordem. Tal fato nos permite concluir que há um *Load Share*, ou seja, as duas camadas enroladas radialmente resistem à pressão externa, sendo a contribuição da carcaça a resistência ao colapso propriamente dito e a contribuição da armadura de pressão o fato de essa adicionar rigidez à carcaça, impossibilitando que essa se deforme excessivamente [3].

O fato de garantir a estanqueidade externa, faz com que esta camada feche o espaço anular, o que impediria a corrosão das camadas metálicas internas. Como dito anteriormente, o espaço anular tem sua pressão parcial definida pelos gases que permeiam pela barreira, somada ao volume de água do mar que também permeia pela capa externa. Esta condição de operação, chamada de anular alagado (*Flooded Annulus*) é constantemente enfrentada por dutos flexíveis, entretanto, não é considerada tão crítica em virtude da saturação da água presente no anular por íons de ferro, o que faz com que depois de algum tempo, o processo de corrosão fique estagnado ou diminua consideravelmente. Entretanto, quando ocorre o rompimento da capa externa, a água do mar presente no anular é renovada e assim, o processo de corrosão se intensifica. A tecnologia desenvolvida para solucionar a renovação é a proteção catódica, conferida aos flexíveis por colares de anodo ligados às armaduras pelos conectores (terminações dos tramos dos dutos). Estes, por sua vez, são mais reativos com a água do mar do que as camadas metálicas internas e por isso, serão corroídos antes delas.

Com relação a fabricação, da mesma forma que a barreira, a capa externa é extrudada por cima do duto (Fig. 30). Ao pensar na seleção de materiais, os mais utilizados para fabricação dessa camada são polietilenos e poliamidas. Dependendo do material, o fenômeno da permeação pode se intensificar ou diminuir. Neste caso, materiais com uma maior permeabilidade (permitem uma maior passagem dos contaminantes corrosivos) vêm sendo desenvolvidos, para que a pressão parcial de contaminantes no anular seja diminuída, diminuindo conseqüentemente o processo de corrosão. Além disso, o envelhecimento por raios UV pode ser solucionado adicionando pigmentação de negro de fumo (fuligem) na composição

da camada. Esta solução é mais frequentemente empregada nos *risers*, visto que estes estão em posição vertical e em profundidades menores e por isso mais sujeitos a exposição a luz solar.

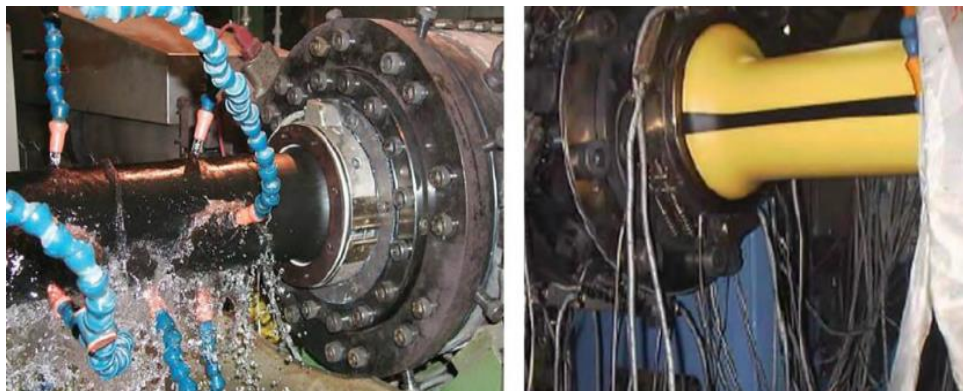


Figura 30: Extrusão da capa externa [15]

Com a recente descoberta do pré-sal, que possui campos com altas concentrações de contaminantes corrosivos, os fabricantes de dutos flexíveis e as empresas detentoras dos campos vêm investindo cada vez mais em soluções que garantam a integridade da capa externa. Visando materiais mais resistentes aos possíveis danos que a linha pode vir a ter na instalação e operação e às cargas radiais compressivas dos tensionadores, também durante a instalação, os fabricantes vêm pesquisando diversas modificações para evitar o fenômeno da corrosão sob tensão, agravado quando há rompimento da capa externa.

2.9.6 Isolamento Térmico

A fita de isolamento térmico é adicionada aos dutos visando diminuição da troca de calor entre o fluido interno e a água do mar. Esta se encontra entre a última armadura de tração e a capa externa e por isso, deve ser compatível com os fluidos presentes no anular.

A fita foi desenvolvida para aumentar a resistência térmica do duto, que é traduzida em um coeficiente de troca térmica (TEC – *Thermal Exchange Coefficient*). Quanto menor o TEC, maior a resistência térmica do duto, ou seja, maior a capacidade deste de reter o calor gerado pelo escoamento do fluido no *Bore*. A manutenção da temperatura interna do fluido é necessária para que este não mude de fase, se tornando sólido e obstruindo o escoamento.

Ao não isolar termicamente o duto de forma adequada, pode ocorrer a formação de hidratos e parafinas no interior do duto pela perda de calor para a água do mar, que por ter uma temperatura que gira em torno de 4°C, intensifica o fluxo de calor e conseqüentemente a queda de temperatura no *Bore*. A formação destes hidratos (Fig. 31) se dá em função do gradiente de calor, fazendo com que estes se formem primeiramente nas paredes internas da carcaça e

gradualmente vão literalmente entupindo o duto, podendo diminuir sua vazão, ou até bloqueá-la. Os cristais de parafina (Fig. 32) também podem ser formados durante paradas de produção, visto que a origem da alta temperatura interna do duto é justamente o constante escoamento de fluido no interior do mesmo. Assim, o oceano absorve o calor do duto, dando origem aos cristais, que migram para as paredes internas da carcaça de acordo com a Lei de Fick [3].



Figura 31: Formação de hidratos no interior de um duto [21]



Figura 32: Formação de Parafinas no Interior de um duto rígido [21]

2.10 Acessórios

Para compor o sistema de extração do petróleo, além dos dutos, devemos considerar seus acessórios, alguns descritos na Fig. 33. Os principais são: Conectores (*End-fitting*),

enrijecedor de curvatura (*Bend stiffener*), restritor de curvatura (*Bend restrictor*) e módulos de flutuação.

- Conectores (*End-fitting*) – Cada camada da parede do duto flexível é fixada separadamente ao conector garantindo terminações confiáveis, estanqueidade à vazão e suporte confiável de qualquer equipamento acoplado a ele.
- Enrijecedores de curvatura (*Bend stiffener*) – Utilizados na conexão entre o riser e a plataforma, visando o impedir as grandes taxas de deformação angular neste ponto de maiores cargas, devidas ao maior “peso de duto pendurado”. Sua forma cônica garante uma transição de rigidez suave entre o acoplamento à plataforma e o conector de topo.
- Restritor de curvatura (*Bend restrictor*) – Sua principal função, como o nome sugere, restringir o limite de físico de curvatura dos dutos a um raio mínimo admissível.
- Módulos de flutuação - Boias acopladas ao duto para adquirir a configuração de projeto, como exemplo as configurações *steep wave* e *lazy wave*.

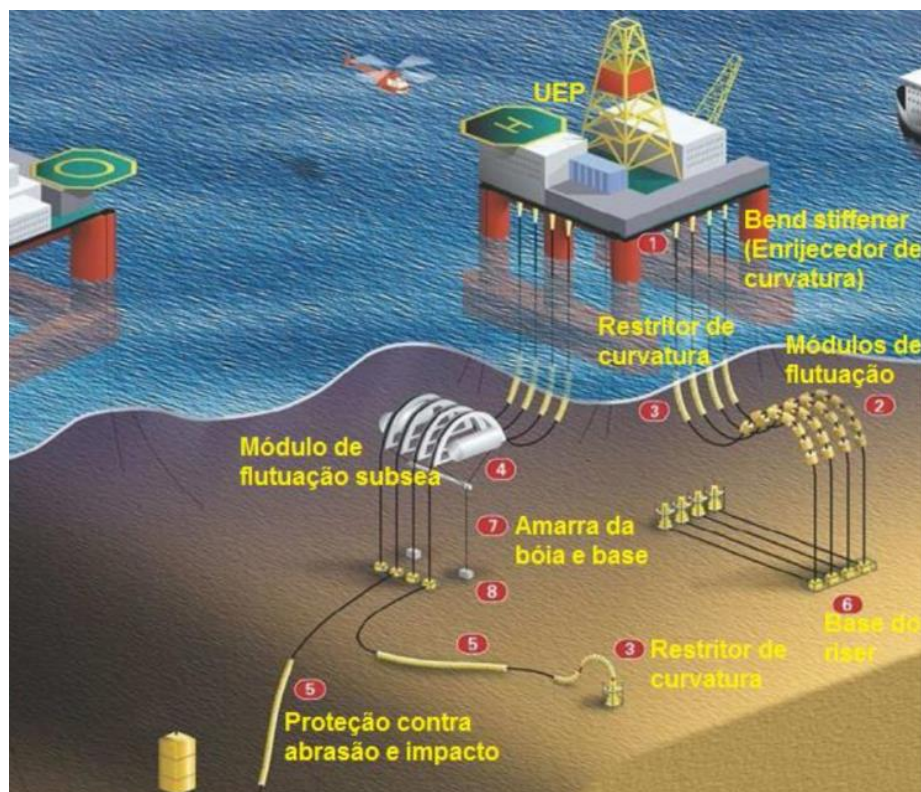


Figura 33: Alguns acessórios de linhas flexíveis [22]

2.11 Instalação dos Dutos

Quando o assunto é instalação de dutos, realizam-se estudos a fim de identificar as condições de mar e corrente adequadas para esta, realizada pelo navio instalador. Em geral,

esses navios trabalham com bobinas ou cestas e, para lançamento do duto, é necessário um sistema de tensionadores com lagartas ou sapatas que pressionam a superfície externa do duto e o deslocam por atrito.

Alguns parâmetros importantes de se destacar para adequação do sistema de instalação são: diâmetro do duto, raio mínimo de curvatura, cargas máximas de tração e forças mínimas de aperto [3]. O sistema de tensionamento pode ser estruturado com duas ou quatro lagartas, posicionadas na horizontal ou vertical, dependendo do método de instalação dos dutos no mar.

2.11.1 Maneiras de Instalação

Existem três maneiras diferentes para a instalação de um duto flexível: o sistema de lançamento horizontal (HLS), o sistema de lançamento vertical (VLS) e o sistema de lançamento “quase vertical” (TLS).

- Sistema de lançamento horizontal (HLS) – Se apresenta como o mais antigo dos métodos, pois surgiu em condições onde não eram necessárias altas cargas de lançamento devido a operações em lâminas d'água rasas. Este sistema acabou caindo em desuso, em virtude das limitações de carga compressiva e curvatura impostas ao duto pela roda de lançamento [3]. A Figura 34 apresenta um modelo esquemático de instalação utilizando o sistema horizontal (HLS).

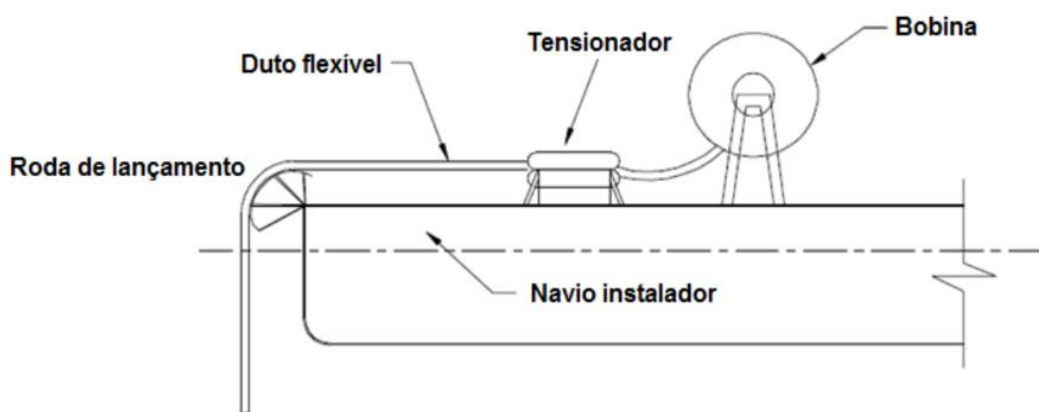


Figura 34: Modelo esquemático do sistema de lançamento horizontal (HLS) [23]

- Sistema de lançamento vertical (VLS) – Com a possibilidade de exploração do petróleo em lâminas cada vez maiores e visando resolver problemas de tração e curvatura nos navios instaladores, foi desenvolvido o sistema de lançamento vertical (VLS). Esse

o sistema apresenta o duto sendo elevado até a torre de lançamento, respeitando o raio de curvatura especificado, passando pelos tensionadores verticais e por fim, pela mesa de trabalho, aberta no interior do navio instalador para a passagem do duto (Fig. 35).

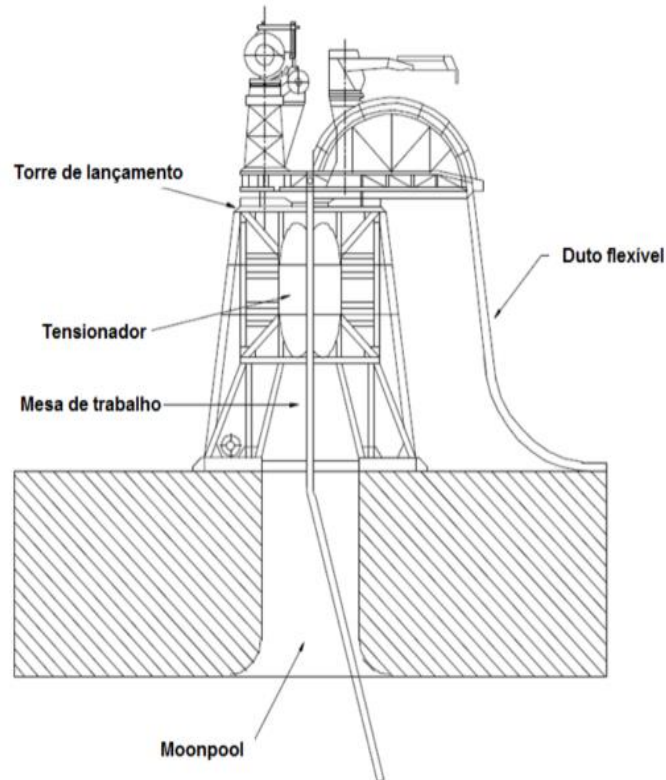


Figura 35: Modelo esquemático do sistema de lançamento vertical (VLS) [23]

- Sistema de lançamento “quase vertical” (TLS) – A existência desse modelo de lançamento se justifica pelo fato do sistema de lançamento vertical ser um projeto patenteado. Assim, a diferença desse projeto ao VLS é uma pequena inclinação no lançamento.

2.11.2 Curvas de Aperto

Uma das análises estruturais que devem ser feitas ao projetar um duto flexível é a análise de instalação. Nessa, consideram-se os carregamentos do aperto dos tensionadores como força compressiva radial e da tração axial no tubo devido ao seu peso próprio.

A ferramenta utilizada para essa verificação da compatibilidade entre o navio instalador e o duto projetado é a curva de aperto, cujo exemplo é mostrado na Fig. 36.

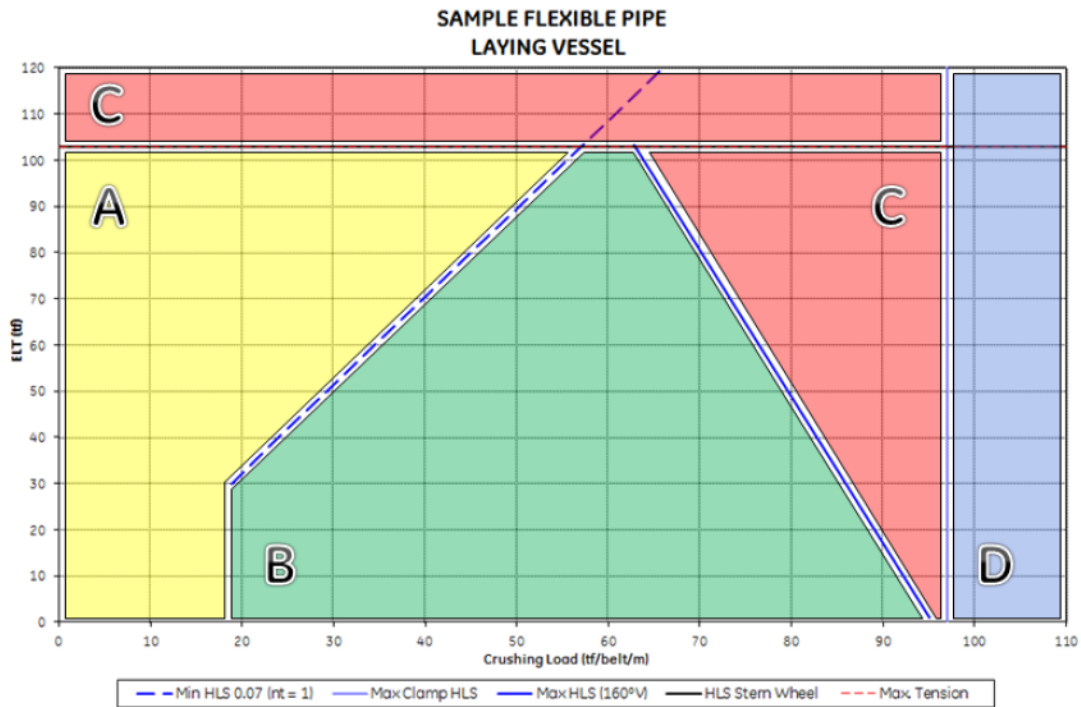


Figura 36: Curva de aperto [3]

Nesta curva, temos o eixo vertical, que representa o valor de tração na linha, imposto pelo peso próprio pendurado (em toneladas) e o eixo horizontal, que representa a carga de aperto imposta pelos tensionadores (em toneladas por metro de tensionador) do navio instalador. Para verificar a compatibilidade entre o duto e o navio, deve-se entender o que cada seção delimita na curva de aperto significa.

A região D (Fig. 36), representa o limite de instalação do navio, ou seja, a sua capacidade de instalação máxima, a partir da qual, seus tensionadores não conseguem mais instalar o duto, pois isto iria requerer um aperto maior do que o que os mesmos podem oferecer.

Já a região C (Fig. 36), indica o limite de tração da linha, a partir do qual, suas armaduras de tração não conseguem mais suportar o peso próprio do duto.

As regiões A e C (Fig. 36) mostram, respectivamente o mínimo e máximo aperto necessário para que a linha não escorregue em relação aos tensionadores e nem seja colapsada por um aperto muito grande. Estas regiões apresentam inclinações em virtude dos fenômenos de *Load Share e Squeezing*, que são definidos como o compartilhamento da resistência a cargas radiais compressivas entre a carcaça e a armadura de pressão e o aperto adicional conferido à armadura de pressão quando se traciona as armaduras de tração helicoidais.

Deste modo, dentro dos limites da região B, o duto pode ser instalado pelo navio.

2.11.3 Possíveis Mecanismos de Falha da Capa Externa e o SCC

Como o teste de perfuração tem como objetivo garantir uma maior proteção à capa externa, esta seção irá tratar exclusivamente dos possíveis mecanismos de falha desta camada durante a instalação e operação que podem agravar o fenômeno mais preocupante da atualidade para previsão da vida útil de dutos flexíveis: o SCC (*Stress Corrosion Cracking*).

O SCC é o fenômeno de aparecimento de trincas (Fig. 37) devido a exposição da estrutura à ambientes corrosivos, combinada com carregamento trativo, podendo fazer com que o material falhe antes de atingir seu limite de escoamento ou a previsão de sua vida útil [24]. Particularmente o SSC (*Sulfide Corrosion Cracking*), que é o modo de corrosão sob tensão quando esta deve-se a ambientes ricos em Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), vem sendo cada vez mais estudado pelos fabricantes de dutos flexíveis.



Figura 37: Trinca gerada pela corrosão sob tensão [24]

O Sulfeto de Hidrogênio está presente no anular do duto por conta da permeação já citada de gases provenientes do *Bore*. Este gás encontra-se em maiores concentrações em poços que se utilizam do artifício da injeção de água para aumentar a pressão nos mesmos e facilitar o escoamento do fluido até a superfície. Nestes poços, bactérias características de ambientes anaeróbios (sem oxigênio) transformam o sulfato de hidrogênio presente na água do mar no gás corrosivo que permeia pela barreira até o anular, iniciando o processo de corrosão sob tensão [24].

O processo se intensifica quando o anular é alagado, uma vez que a entrada de água do mar fornece mais sulfeto para que a reação ocorra. Para contornar esse desafio, a indústria do óleo e gás vem tomando cada vez mais providências visando garantir a integridade da vedação do espaço anular. O teste de perfuração, que é objetivo deste projeto, visa auxiliar esse processo,

garantindo uma capa externa íntegra, com uma camada de reforço que serve como proteção externa para o duto.

Quando em instalação ou em operação, diversos são os cenários que podem danificar ou mesmo rasgar a capa externa do duto. Nos sistemas de Lançamento Vertical e Quase-Vertical, já citados anteriormente, devido ao balanço da maré e movimentação do navio instalador o duto pode entrar em contato com as bordas da mesa de trabalho, causando o rasgamento da capa externa, quando este movimenta-se verticalmente. Também na instalação, em caso de desalinhamento dos tensionadores, o duto pode ser apertado pelas bordas dos mesmos (e não pela parte plana do tensionador, que é a que deveria entrar em contato com o duto), causando marcas que podem vir a se tornar pontos de iniciação de trincas durante a vida em fadiga. Além disso, quando em operação, o duto pode ter interferência com outras linhas instaladas na mesma plataforma, gerando atrito e impacto entre as capas externas e danificando-as.

Outros possíveis impactos, perfurações e pontos de contato da capa externa com as mais variadas geometrias também podem vir a danificá-la. O Capítulo 3 elucidará como o planejamento e a execução do teste de perfuração, que tem como principal motivação o efeito deletério nas armaduras de tração que as crescentes concentrações de Sulfeto de Hidrogênio nos campos de petróleo podem impor, em lâminas d'água cada vez mais profundas, objetivando verificar a melhor forma de proteger a capa externa.

Capítulo 3

3. Materiais e Métodos

Visando a qualificação de novas linhas de dutos flexíveis para entrarem em operação, realizam-se análises numéricas locais e globais que determinam o comportamento dos dutos quando em estoque, instalação, operação e recolhimento. Para validar estas análises, são realizados testes experimentais em escala real ou reduzida segundo as normas ISO 13628-2 [25] e API 17J [26], com o objetivo de simular os possíveis modos de falha das linhas.

Conforme dito anteriormente, à medida que os fluidos escoam em um duto flexível, gases como CO₂ e H₂S podem permear através da barreira gerando um ambiente com alto potencial corrosivo quando associado com a água do mar que pode permear pela capa externa, alagando o anular. De acordo com a premissa do anular intacto, item 5.4.1 da API 17J [26], os dutos não devem ser projetados para operar com o seu anular alagado, mas este deve ser considerado no projeto como um cenário acidental.

Como também já dito anteriormente, quando em instalação ou operação, as capas externas dos dutos flexíveis podem ser danificadas de diversas maneiras, gerando a possibilidade de rompimento e conseqüente alagamento do anular, dentre elas: o desalinhamento dos tensionadores e o contato com as bordas da mesa de lançamento. Tal cenário pode vir a intensificar a corrosão sob tensão (*SCC*) nas armaduras, eventualmente podendo gerar falhas catastróficas.

3.1 Teste de Perfuração

O foco deste projeto consiste em um teste de perfuração em amostras de materiais poliméricos utilizados nas camadas de dutos flexíveis (Fig. 38). Este teste tem como finalidade observar comparativamente a energia necessária para perfuração de cada material utilizado em camadas externas de dutos flexíveis. Deste modo, é possível avaliar a camada mais adequada para servir como reforço ao duto, garantindo sua integridade.

Por ser um teste comparativo e não convencional (que não tem critério de aceitação padronizado por norma) o critério de falha utilizado está relacionado a chegada da superfície inferior de um punção cônico (superfície circular de diâmetro igual a 4 mm) ao fim da espessura da amostra (Fig. 38), pois neste ponto, entende-se que a camada de reforço não auxilia mais na proteção da capa externa. Assim, por mais que o teste continue com o deslocamento do punção além da espessura total da amostra, a partir deste ponto os dados aquisitados não são tratados

como válidos. Deste modo, pode-se garantir que o objeto que venha a perfurar o duto flexível não atinja a capa externa, mantendo-a íntegra, uma vez que a camada de reforço absorveu a energia gerada na perfuração. Os materiais a serem testados e as dimensões das amostras constam na Tab. 2.



Figura 38: Perfuração até o fundo da amostra

Tabela 2: Dimensões das amostras

Material	Dimensões da Amostra Comprimento x Largura (mm)
Polímero 1	100 x 100
Polímero 2	100 x 100
Polímero 3	100 x 100
Polímero 4	100 x 100
Polímero 5	100 x 100
Polímero 6	100 x 50

Além disso, devido ao fato de o teste não ser convencional, ao integrar a curva Tensão x Deformação até a espessura total da amostra, o valor obtido não representa o Módulo de Tenacidade convencional do material, mas sim uma propriedade específica do teste, a Energia de Perfuração.

3.1.1 Amostragem

Pelo fato de as amostras terem sido retiradas de dutos flexíveis reais e com estruturas diferentes e por isso espessuras de camadas diferentes (Fig. 40), estas devem ser submetidas a um processo de planificação imposto pela placa superior do dispositivo de perfuração, como mostra a Fig. 39. Além disso, como já dito, o processo de fabricação das camadas poliméricas de dutos flexíveis é a extrusão e por isso, o controle dimensional não é tão apertado. Portanto, levando em consideração que as espessuras de um mesmo material podem não ser as mesmas,

cada amostra foi medida com um micrômetro em 4 pontos próximos ao centro (onde ocorre a perfuração) e a espessura foi arbitrada como a média dos 4 valores medidos.

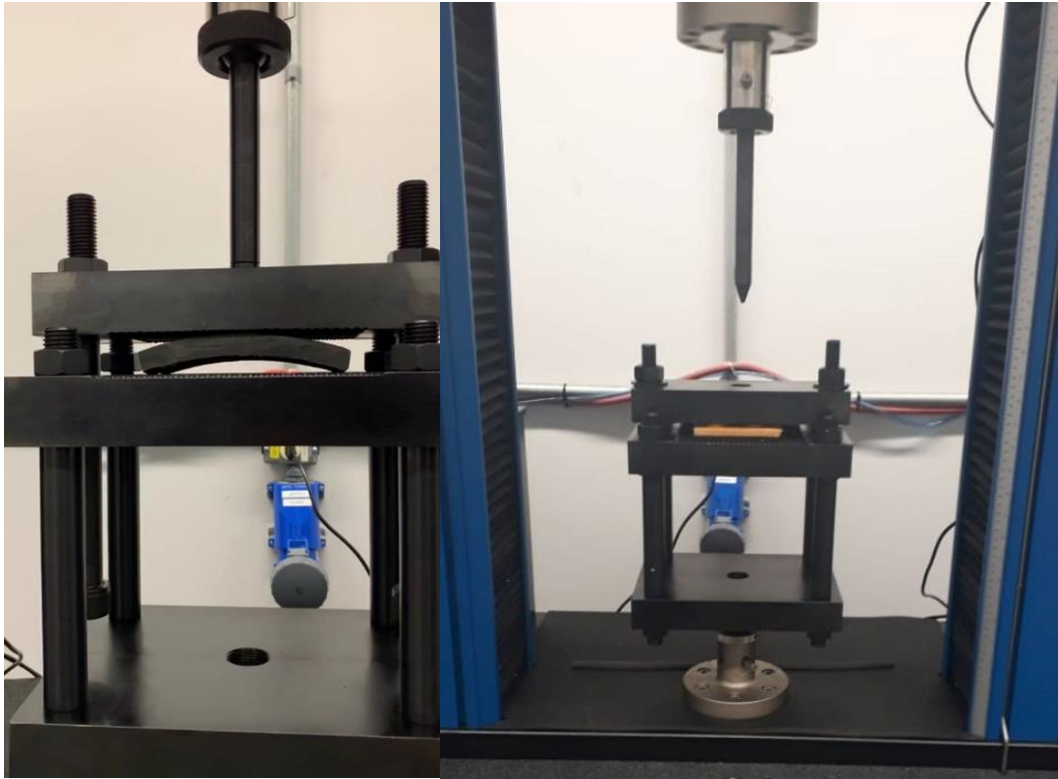


Figura 39: Amostra planificada

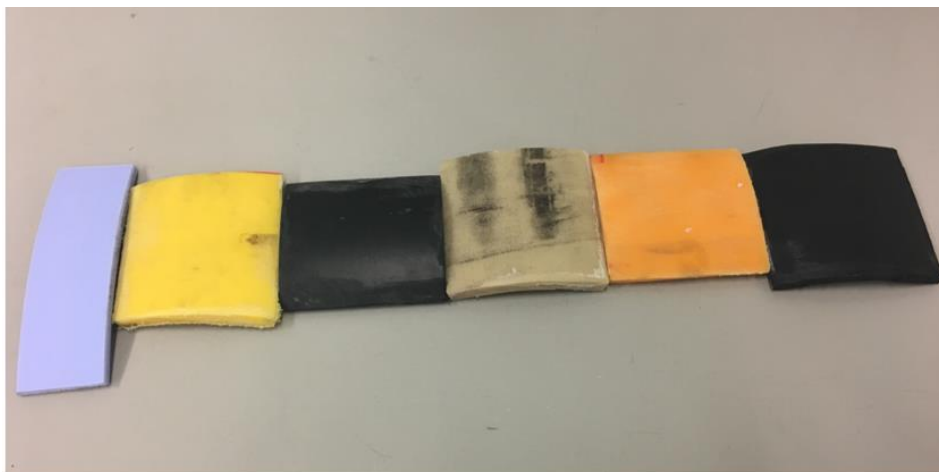


Figura 40: Amostragem dos seis materiais testados

As Tabelas 3 a 8 apresentam a numeração de cada perfuração a ser realizada e a espessura de cada amostra, adotando como critério de repetibilidade 6 testes por material, sendo 3 testes à velocidade de 500 mm/min e 3 testes a 50 mm/min.

Tabela 3: Testes no Polímero 1

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
1.1	11.00	500
1.2	11.70	500
1.3	11.75	500
1.4	11.85	50
1.5	11.30	50
1.6	10.55	50

Tabela 6: Testes no Polímero 4

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
4.1	7.30	500
4.2	7.10	500
4.3	7.60	500
4.4	6.90	50
4.5	7.80	50
4.6	7.50	50

Tabela 4: Testes no Polímero 2

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
2.1	9.00	500
2.2	9.10	500
2.3	8.05	500
2.4	8.00	50
2.5	8.00	50
2.6	9.40	50

Tabela 7: Testes no Polímero 5

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
5.1	8.30	500
5.2	8.75	500
5.3	8.80	500
5.4	9.00	50
5.5	11.55	50
5.6	7.65	50

Tabela 5: Testes no Polímero 3

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
3.1	11.50	500
3.2	12.55	500
3.3	12.60	500
3.4	12.67	50
3.5	11.95	50
3.6	11.90	50

Tabela 8: Testes no Polímero 6

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
6.1	7.00	500
6.2	7.00	500
6.3	7.00	500
6.4	7.00	50
6.5	7.00	50
6.6	7.00	50

3.1.2 Máquina de Ensaios Mecânicos

Para a realização do teste, foi selecionada a máquina de ensaios mecânicos EMIC 23-100 (Fig. 41), própria para ensaios em materiais poliméricos, com as especificações que constam na Tab. 9.

Tabela 9: Especificações técnicas EMIC 23-100 [27]

Propriedades	Valores
Capacidade de Carga [kN]	100
Velocidade Máxima de Ensaio [mm/min]	500
Velocidade Mínima de Ensaio [mm/min]	0.005
Velocidade de Retorno Pós Ensaio [mm/min]	600
Curso Máximo de Ensaio [mm]	1235
Altura [mm]	2393
Largura [mm]	1124
Profundidade [mm]	779
Peso [Kg]	766
Potência Máxima [VA]	1500



Figura 41: Máquina de ensaio mecânico EMIC 23-100 com o dispositivo de perfuração posicionado

O teste realizado no presente projeto visa determinar a curva (Fig. 42) de força necessária para a perfuração das amostras em função do deslocamento do travessão da máquina, esta curva é gerada pelo próprio *software* de controle, a partir dos dados adquiridos por meio da célula de carga e do transdutor de deslocamento da máquina.

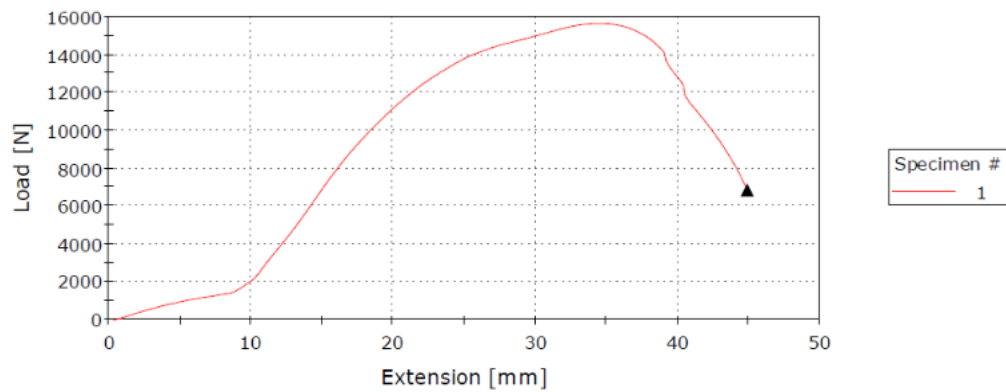


Figura 42: Exemplo de curva de Força x Deslocamento adquirida

3.1.3 Dispositivo de Perfuração

Para a realização dos testes de perfuração utilizando a máquina especificada, foi necessário projetar um dispositivo de perfuração, uma vez que a mesma não possui acessórios para realização desse tipo de teste. O dispositivo, ilustrado na Fig. 43, foi dimensionado com base no projeto de uma matriz de corte, cálculos de escoamento, flambagem, espanamento de rosca e um método de energia para cargas localizadas.

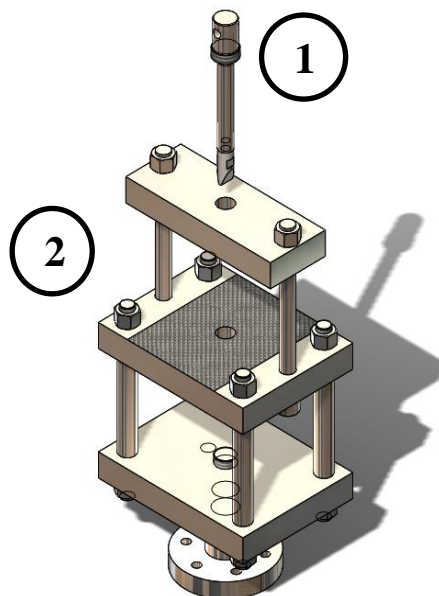


Figura 43: Modelo 3D do dispositivo de perfuração. 1 (Punção); 2 (Matriz)

3.1.4 Programação da Máquina de Ensaio

Para definir o método de ensaio, utilizou-se o *software* comercial *Bluehill 3* que nos permite programar a máquina de acordo com os parâmetros desejados. Essa programação é dividida em três etapas, na qual são definidas: pré-carga, velocidade de execução do teste e critérios de fim de teste.

O *software* disponibiliza diferentes tipos convencionais de ensaios e para a realização deste teste foi definido o ensaio de compressão, uma vez que o punção vai de encontro à amostra. Entretanto, vale ressaltar que este não é um ensaio de compressão convencional e por isso serão feitas algumas alterações para que a máquina execute o teste adequadamente.

3.1.4.1 Pré-teste

Nessa etapa inicial do programa são definidos parâmetros para iniciar o ensaio de perfuração. Na situação inicial, o punção se encontra a uma altura conhecida da amostra, dessa forma define-se uma velocidade de aproximação do punção até que este encoste na amostra. Para detectar o contato, definiu-se o avanço com uma velocidade de 500 mm/min (velocidade máxima da máquina) até que a célula de carga detecte uma força de 40 N (força de contato irrisória), como ilustra a Fig. 44. A partir deste momento, os dados de Força e Deslocamento são zerados e passa-se a aquistar os dados do teste.

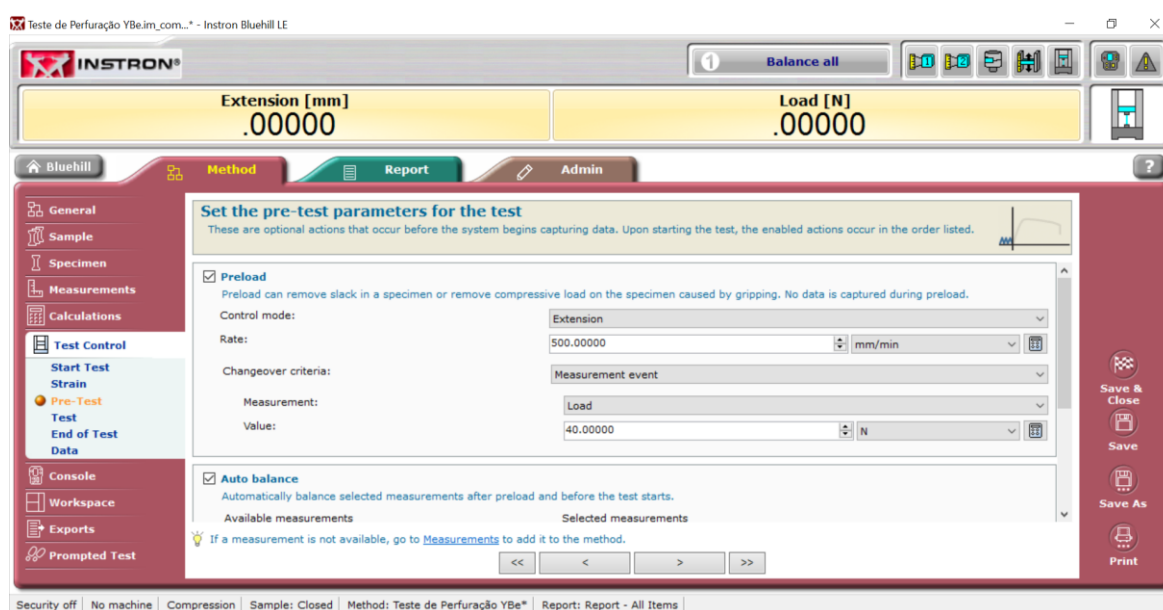


Figura 44: Pré teste, interface *Bluehill 3*

3.1.4.2 Definição da Rampa de Teste

Nessa etapa, definiu-se uma rampa de ensaio com a taxa de deslocamento de travessão máxima da máquina (Fig. 45). Além disso, foram feitos testes com uma velocidade de uma ordem de grandeza menor (Fig. 46), visando a observação do comportamento do material submetido a taxas diferentes de deslocamento do punção.

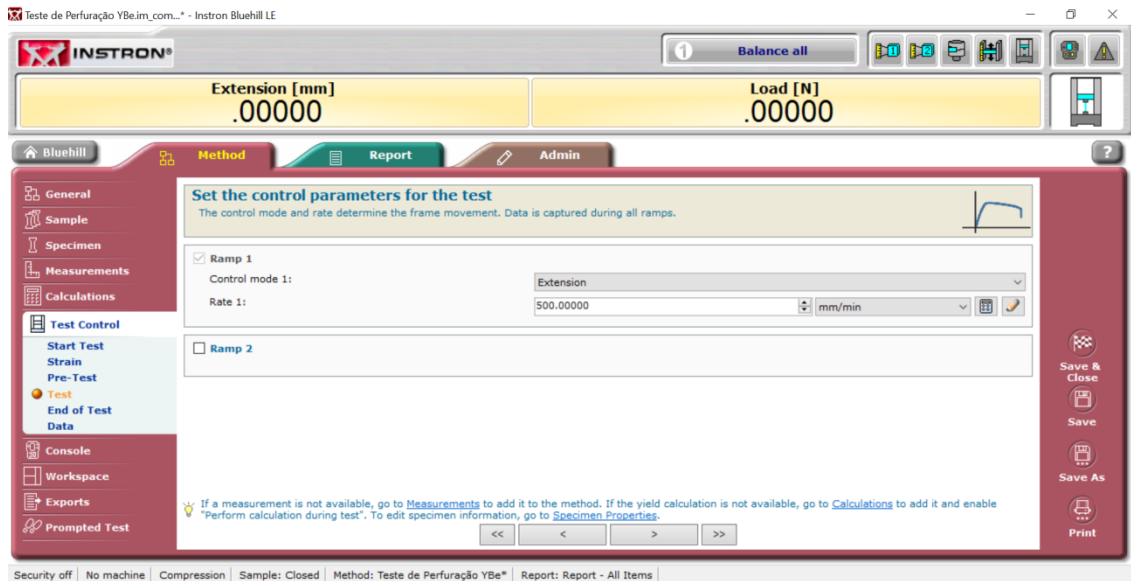


Figura 45: Rampa de teste (500 mm/min), interface *Bluehill 3*

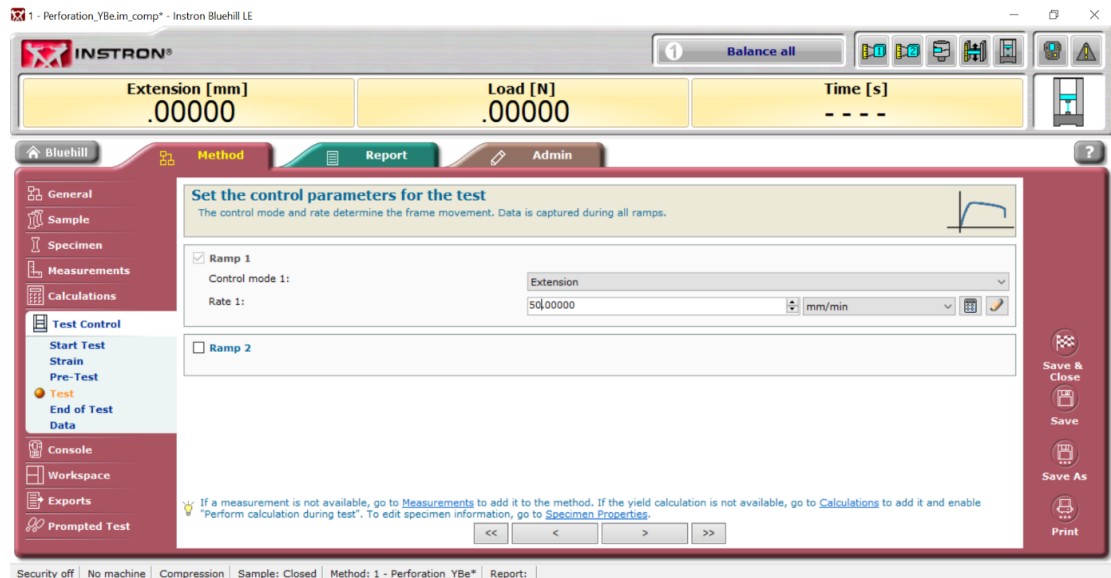


Figura 46: Rampa de teste (50 mm/min), interface *Bluehill 3*

3.1.4.3 Critérios de Fim de Teste

Para finalização do teste, foram definidos dois critérios, um visando a segurança e a manutenção da vida útil da célula de carga e outro com o objetivo de finalizar o teste em um ponto determinado a partir de sua altura inicial para todas as amostras. De acordo com a Fig. 47, define-se como carga máxima 99KN para não ultrapassar 100 KN (limite da máquina e da célula de carga). Além disso, o teste será interrompido quando o deslocamento do punção ultrapassar 15 mm da espessura da amostra, o que garante o rompimento total da mesma. Como já dito, só serão considerados os dados adquiridos até a ponta do punção atingir o final da espessura da amostra, uma vez que neste ponto foi considerado que a camada perde sua função de reforço.

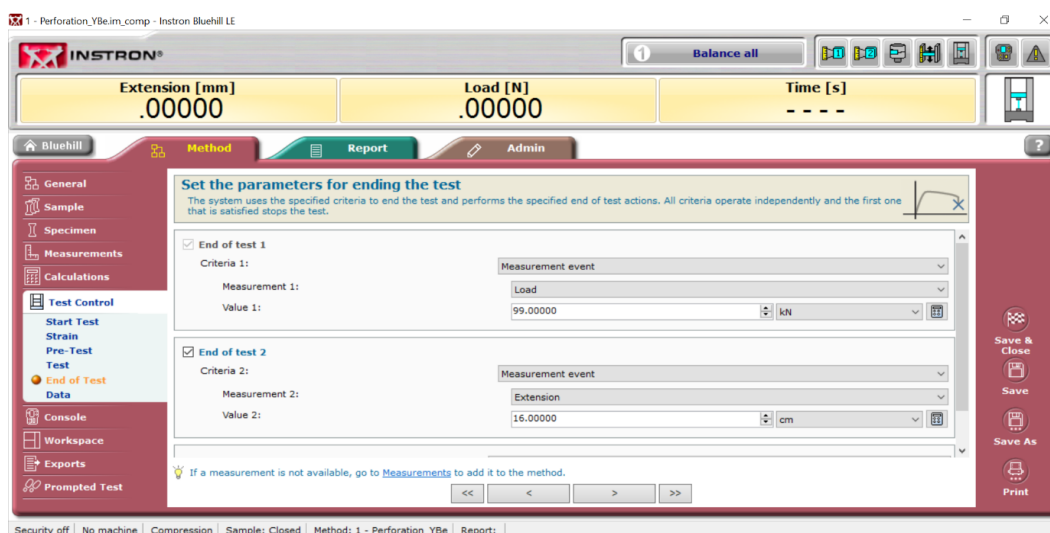


Figura 47: Critérios de fim de teste, interface *Bluehill 3*

3.1.5 Passo a Passo do Teste

- Medir a espessura da amostra em 4 pontos próximos ao centro da mesma utilizando um micrômetro;
- Posicionar a amostra na superfície recartilhada e aplicar torque nos dois estojos que conectam a placa superior à do meio (este passo é necessário para planificar a amostra e evitar que o momento de reação da planificação mascare os resultados do teste);
- Selecionar o método de ensaio programado no Item 3.1.4;
- Nomear a pasta que irá conter os resultados de acordo com o número do teste;
- Aplicar força com controle de deslocamento;
- Remover a amostra;
- Iniciar o próximo teste.

Capítulo 4

Esta seção será dedicada a revisão bibliográfica dos conceitos de engenharia estudados e desenvolvidos durante a graduação que foram utilizados para o projeto do dispositivo de corte e para a modelagem analítica realizada a partir dos dados obtidos nos ensaios experimentais.

4. Revisão Bibliográfica

Além dos conceitos básicos citados, essa seção também introduz alguns conceitos necessários para o entendimento da discussão microestrutural contida na Seção 7.2.4.1. Na Seção 4.1 são descritos os conceitos utilizados para o projeto e o dimensionamento do dispositivo de perfuração, na Seção 4.2 são descritos os conceitos utilizados para a elaboração da metodologia desenvolvida para o cálculo da Energia de Perfuração e na Seção 4.3 são introduzidos os conceitos sobre polímeros.

4.1 Dispositivo de Perfuração

Para o projeto do dispositivo de perfuração foi considerado o caso de carregamento mais crítico, ou seja, quando este está sujeito à carga máxima da máquina (100kN). Foram aplicados os seguintes conceitos estudados durante o curso de Engenharia Mecânica: Cálculo de escoamento de componentes mecânicos, cálculo de flambagem em colunas, cálculo de espanamento de rosca, projeto de matriz de corte e método de energia para carregamento localizado, sempre impondo fatores de segurança que garantam a integridade do projeto. A Figura 48 ilustra o dispositivo em vista explodida com seus componentes especificados na Tab. 10.

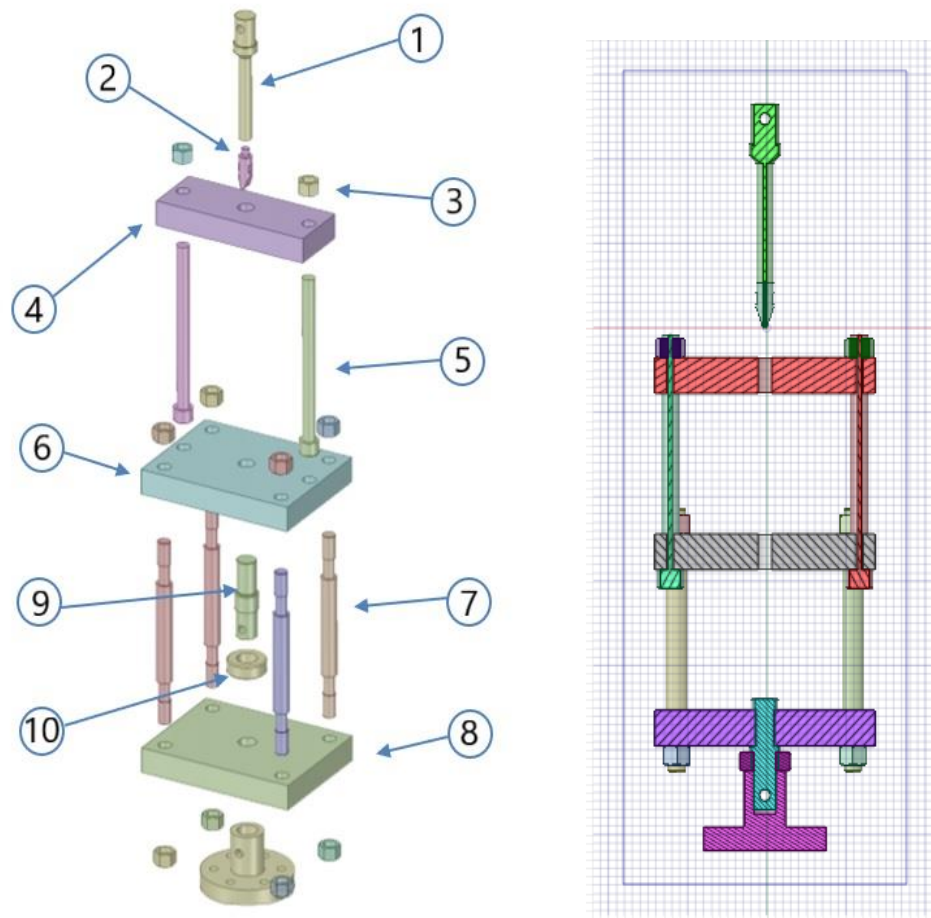


Figura 48: Vista explodida do dispositivo de perfuração / Vista em corte do dispositivo

Tabela 10: Especificação de cada componente do dispositivo

LISTA DE PEÇAS			
Item	Quantidade	Descrição	Material
1	1	Porta Punção	AISI 4340
2	1	Punção Cônico	AISI 4340
3	10	Porca M20 x 2	AISI 4340
4	1	Placa Matriz	AISI 4340
5	2	Parafuso Regulador (M20 x 2 x 250L)	AISI 4340
6	1	Placa Planificadora	AISI 4340
7	4	Colunas da Matriz	AISI 4340
8	1	Placa Base Inferior	AISI 4340
9	1	Eixo Central	AISI 4340
10	1	Contra Porca de Acoplamento	AISI 4340

O cálculo de escoamento foi utilizado para verificar possíveis falhas por compressão nas colunas da matriz e no eixo central de acoplamento da base. Já o cálculo de flambagem foi utilizado para verificar possíveis falhas utilizando o teorema de Castigliano [28] nas colunas da matriz. Outros possíveis mecanismos de falha abordados foram o espanamento da rosca do

acoplamento, a falha das placas da matriz por flexão e a falha do punção por flambagem. A determinação da modelagem analítica pela força máxima de corte empregada também foi feita utilizando o conceito de projeto de uma matriz de corte.

4.1.1 Projeto de Matriz de Corte

Para dimensionar a ferramenta de corte necessária para o ensaio, o cálculo foi dividido em duas etapas de acordo com [29].

Etapa 1 - Determinação da altura máxima do punção: Nesta etapa foi determinada a altura máxima do punção, para que este não falhe por flambagem. A altura do punção (Eq. 1) é função da força de Flambagem estabelecida por Euler (F_t). Logo a condição mínima de flambagem é $F_c = F_t$. Dessa forma, segundo [29]:

$$h_{max} < \pi \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{F_c}} \quad (1)$$

Onde:

h_{max} é a altura máxima do punção para evitar a flambagem;

E é o módulo de elasticidade do material do punção;

I é o menor momento de inércia em relação a um eixo que passa pelo centro da seção transversal do punção (mm^4);

F_c é a força de corte máxima – carga máxima da máquina de ensaios em Kgf

Etapa 2 – Altura mínima da placa matriz: nesta etapa, a altura mínima da placa matriz é calculada com base na força de corte máxima, Eq. 2.

$$h_{min} \geq \sqrt[3]{F_c} \quad (2)$$

Onde:

h_{min} é a altura mínima da matriz em milímetros;

4.1.2 Modelo Analítico por Método de Energia com Carga Localizada

Para dimensionar as colunas da matriz e a placa matriz, foi sugerido um modelo analítico baseado em um quadro de reação simétrico em cima do qual foi utilizado o método de energia e o Teorema de Castigliano [28] para encontrar a deflexão no centro da placa matriz (Ponto C da Fig. 49), bem como o fator de segurança para flambagem por compressão das colunas. Neste

quadro de reações, foi considerado um modelo simplificado no qual a placa matriz foi representada por uma viga visando entender melhor o comportamento dessa estrutura.

Aproveitando a simetria em relação aos eixos X e Y da estrutura observada na vista em corte do dispositivo (Fig.49), considera-se o quadro analítico de reações da matriz e os diagramas de corpo livre dos elementos descritos na Fig. 50, em que a carga P representa 1/4 da carga máxima aplicada ao dispositivo no ponto C [30].

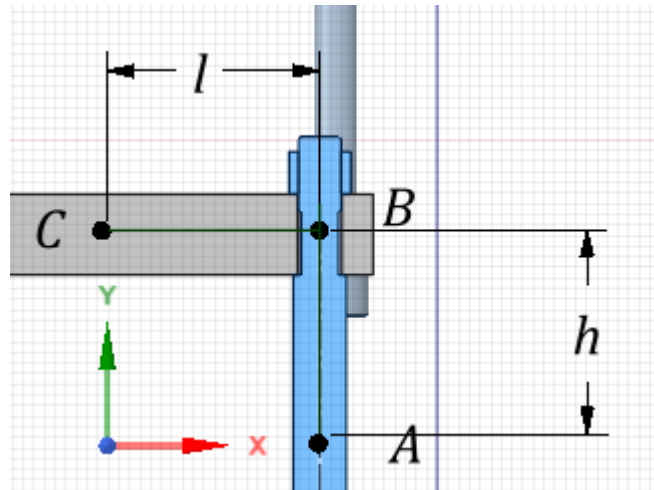


Figura 49: Detalhe da simetria do dispositivo em relação aos eixos X e Y

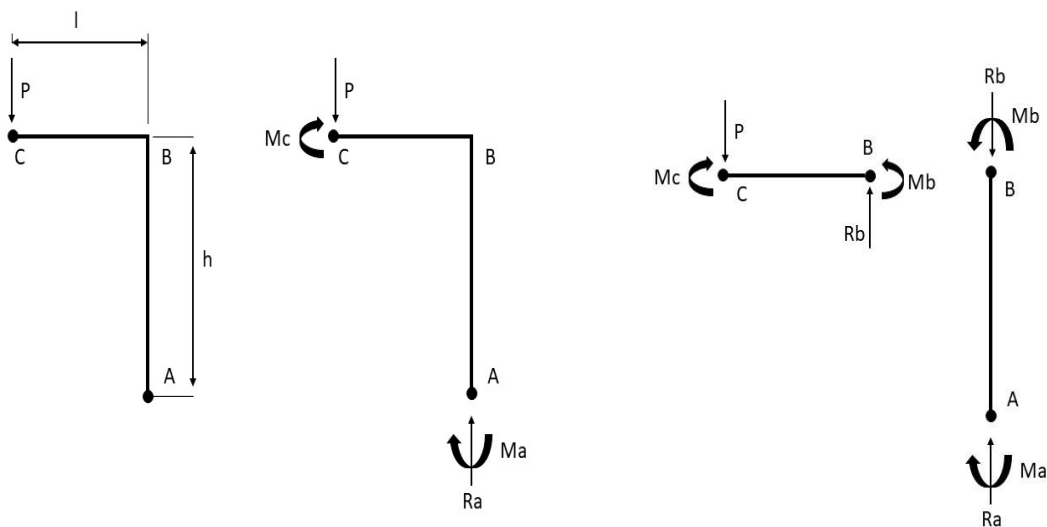


Figura 50: Quadro analítico de reações (à esquerda) e diagramas de corpo livre do modelo analítico (à direita)

Com os diagramas de corpo livre ilustrados na Fig. 50 e aplicando as equações de equilíbrio estático, temos:

- Para a viga CB:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = P - R_b = 0$$

$$P = R_b$$

- Para a coluna AB:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = R_a - R_b = 0$$

$$R_a = R_b = P$$

$$\Sigma M = 0$$

$$M_a - M_b = 0$$

$$M_a = M_b$$

Segundo [28], a energia do sistema pode ser calculada por meio da Eq. 3 [30]. Esta apresenta duas parcelas referentes a energia decorrente da flexão e duas parcelas referentes a energia decorrente de esforços axiais (uma em x e uma em y, visto que o modelo é bidimensional). As parcelas referentes ao esforço cortante em AB e esforço normal em BC foram igualadas a zero uma vez que esses esforços são nulos através das equações de equilíbrio.

$$U = \int_0^h \frac{N_{ab}(y)^2}{2EA1} dy + \int_0^h \frac{M_{ab}(y)^2}{2EI1} dy + \int_0^l \frac{V_{bc}(x)^2}{2EA2} dx + \int_0^l \frac{M_{bc}(x)^2}{2EI2} dx \quad (3)$$

Para encontrar o momento M_a , que é um dos esforços responsáveis pela possível flambagem das colunas da matriz e deflexão no ponto C, utilizou-se o Teorema de Castigliano [28]. Tal teorema enuncia que ao derivar a Eq. 3 em relação ao momento M_a obtém-se o ângulo de rotação θ_a descrito na Eq. 4. Vale ressaltar que para efeito de cálculo conservativo, foi considerado o quadro de reações com a viga BC de comprimento igual a maior das dimensões da placa matriz visando obter o maior momento em C.

$$\theta_a = \frac{\partial U}{\partial M_a} \quad (4)$$

O fato de A ser um ponto de simetria fixo, permite que seja assumido um ângulo de rotação do quadro θ_a nulo. Deste modo, igualando θ_a a zero e efetuando a derivada da Eq. 4 em relação ao momento M_a , obtém-se a Eq. 5 que expressa o momento M_a em termos do momento de inércia da coluna, que por conservadorismo foi adotado como o menor diâmetro da coluna AB, (I_1) e de $\frac{1}{4}$ da placa matriz (I_2), além de P, h e l, representados na Fig. 50 :

$$M_a = \frac{1}{2} I_1 l^2 \frac{P}{I_2 h + I_1 l} \quad (5)$$

O momento M_a poderá ser utilizado posteriormente em conjunto com a Eq. 10 visando encontrar a tensão admissível para flambagem por compressão, caso seja confirmado que a coluna é um membro curto de compressão por meio da Eq. 8, que expressa a razão de esbeltez.

Aplicando novamente o teorema de Castigliano à Eq. 3, porém, desta vez em relação à carga P, pode-se encontrar a deflexão do ponto C derivando a energia em relação a carga P, obtendo assim a Eq. 7, na qual vemos que a deflexão irá depender também dos valores de P, h e l, dos momentos de inércia citados, do momento M_a e da área da seção transversal da coluna.

$$\delta_c = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (6)$$

$$\delta_c = \frac{1}{6} (6hPI_2 + 2l^3 A_1 P - 3l^2 A_1 M_a) / EA_1 I_2 \quad (7)$$

Com esta deflexão, poderá ser verificado se a placa matriz irá defletir em valor comparável ao de sua espessura, ou se a deflexão será mínima, não oferecendo riscos à estrutura.

4.1.2.1 Cálculo de Flambagem com Carregamento Excêntrico

Considerando que a aplicação da carga no quadro é deslocada dos centroides da seção transversal de $\frac{1}{4}$ da placa matriz, verifica-se a existência de uma excentricidade no carregamento que faz com que o limite elástico possa ser atingido em cargas menores. Para a continuação do cálculo de flambagem por compressão, foi utilizado o momento M_a calculado, no lugar da carga P vezes a excentricidade e contidas na parcela da Eq. 10 referente à flexão.

Com o objetivo de calcular a tensão limite de escoamento, precisou-se identificar, primeiramente se as colunas eram “colunas secantes” ou “membros curtos de compressão

(pilaretes)”, uma vez que de acordo com [31], para cada um destes existe uma forma de calcular a tensão admissível. A Eq. 8, expressa as razões limite e real de esbeltez:

$$\left(\frac{L}{K}\right) = 0,282 \left(\frac{AE}{P}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Se a razão de esbeltez limite for maior que $\left(\frac{L}{K}\right)$, o problema será tratado como coluna secante. Caso contrário, como membro curto de compressão (pilarete).

Considerando o projeto como “colunas secantes”, temos a Eq. 9 para a máxima tensão de compressão nas vigas-colunas.

$$\sigma = \left(\frac{P}{A}\right) \left[1 + \left(\frac{ec}{k^2}\right) \sec \left(\left(\frac{L}{2k}\right) \sqrt{\frac{P}{AE}} \right)\right] \quad (9)$$

Caso o projeto se aplique a membro curto de compressão, a magnitude da tensão máxima de compressão σ_c é expressa pela Eq. 10 [31]. Levando em consideração que a carga utilizada nos cálculos de tensão admissível deve ser a mais conservadora, a análise de distribuição de carregamento foi feita considerando a máxima carga da máquina atuando diretamente na estrutura.

Parcela referente à carga axial

$$\sigma_c = \underbrace{\left(\frac{P}{A}\right)}_{\text{Parcela referente à carga axial}} + \underbrace{\left(\frac{P \cdot e \cdot c}{A \cdot k^2}\right)}_{\text{Parcela referente à carga de flexão}} \quad (10)$$

Onde:

Parcela referente à carga de flexão

P: 1/4 da carga máxima da máquina de ensaios

e: Excentricidade

c: Distância entre o centroide e a fibra mais externa da coluna

$k = \left(\frac{I_1}{A}\right)^{\frac{1}{2}}$: Raio de giração

I_1 : Momento de inércia da seção transversal da coluna da matriz

A: Área da seção transversal da coluna da matriz

L = Comprimento da coluna da matriz

P.e = M_a : momento encontrado pelo teorema de Castigliano por meio da Eq. 5

4.1.2.2 Fator de Segurança

Para encontrar o coeficiente de segurança (Eq.11) das colunas da matriz, utiliza-se a relação entre a tensão admissível (σ_{adm}) e tensão limite de escoamento do material conforme [28].

$$F.S = \frac{S_{yc}}{\sigma_{adm}} \quad (11)$$

4.1.3 Cálculo do Espanamento de Rosca do Eixo Central

A fim de definir o dimensional do eixo central utilizado na base do dispositivo, foi realizado o cálculo de espanamento de rosca, quando sujeito a carga máxima da máquina de ensaio de acordo com [34].

Primeiramente, foi calculada a tensão no eixo expressa na Eq. 12 [34]:

$$\tau = \frac{Kt . C}{A_p} \quad (12)$$

Sendo:

$$A_p = \pi . di . 3 . p \quad (13)$$

A Equação 13 expressa o valor da área A_p lateral do parafuso utilizada para cálculo de espanamento, segundo [34]. C é a carga máxima da máquina de ensaio, di é o menor diâmetro do eixo central e p é o passo da rosca do mesmo. Para eixos roscados, o Kt é definido como 2,7 [34]. Dessa forma, obtém-se a Eq. 14 [34]:

$$\tau = \frac{2,7 . C}{\pi . di . 3 . p} \quad (14)$$

Após o cálculo da tensão, deve-se calcular o fator de segurança (n), descrito na Eq. 15 [34], para garantir que o material escolhido suportará a tensão imposta pelo carregamento, onde S_y é o limite de escoamento do material do parafuso.

$$n = \frac{\tau_y}{\tau} = \frac{0,577 \cdot S_y}{\tau} \quad (15)$$

4.1.4 Cálculo da Tensão de Escoamento no Eixo Central

A fim de verificar também a falha por escoamento no eixo central, foi calculado o fator de segurança referente a este modo de falha conforme descrito abaixo.

Através de ensaios em barras roscadas, identificou-se que a resistência a cargas axiais em um eixo não roscado será a mesma resistência de uma barra roscada quando o diâmetro deste for igual a média entre os diâmetros do passo e o diâmetro nominal. A área da seção transversal dessa barra não roscada é chamada de A_t [31]. Portanto, a área utilizada para o cálculo de escoamento na seção roscada do eixo central do dispositivo está disponível na Tab. 11, a partir do diâmetro nominal da rosca utilizada.

Tabela 11: Diâmetros e área de roscas métricas de passo grosso e passo fino [31]

Diâmetro maior nominal d (mm)	Passo p (mm)	Área de tensão de tração A_t (mm ²)	Área de diâmetro menor A_r (mm ²)
10	1,50	58	52
12	1,75	84	76
14	2,00	115	104
16	2,00	157	144
20	2,50	245	225
24	3,00	353	324
30	3,50	561	519
36	4,00	817	759
42	4,50	1120	1050
48	5,00	1470	1380

Utilizando as equações da tensão admissível para forças axiais (Eq. 16 [31]) e o fator de segurança (Eq. 17 [31]), temos:

$$\sigma = \frac{C}{A_t} \quad (16)$$

$$F \cdot S = \frac{S_{yc}}{\sigma_{adm}} \quad (17)$$

Onde:

C: Carga máxima da máquina de ensaios

Syc: Limite de escoamento do material do eixo central

4.2 Metodologia para Cálculo da Energia de Perfuração

4.2.1 Introdução ao Conceito de Energia de Deformação e aos Dados Aquisitados

Durante a pesquisa acadêmica realizada, buscou-se modelagens de conformação mecânica que se aproximassem ao “embutimento cônico de polímeros” em livros, dissertações e na experiência de profissionais qualificados da área. Das referências estudadas [29], [32] e [33], nenhuma conseguiu descrever o teste de perfuração. Por isso, será sugerida a modelagem qualitativa apresentada abaixo.

Como dito anteriormente, o teste de perfuração tem como motivação a determinação de um material que ofereça as melhores condições de reforço para a capa externa. Por isso, foi decidido que seria analisada uma importante propriedade dos materiais: o Módulo de Tenacidade à Perfuração. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia de conversão dos dados de Força x Deslocamento adquiridos por meio da célula de carga da máquina e o transdutor de deslocamento, em Tensão x Deformação. Além disso, por conservadorismo, foi definido como critério de falha para as camadas, que estas perdem sua função de reforço quando o punção chega ao final de suas respectivas espessuras, visando obter a Energia de Perfuração antes que o punção encoste na capa externa.

Essa propriedade se faz importante estruturalmente, uma vez que expressa a densidade de energia de deformação do material momentos antes da ruptura [28]. Nesta análise, primeiramente foram plotados os dados de saída do teste de perfuração até a ruptura da amostra dos 3 testes realizados para cada material, visando observar o comportamento da força em função do deslocamento compressivo do punção, como mostra a Fig. 51. Vale ressaltar que o sinal da força e do deslocamento compressivos foram invertidos, a fim de facilitar a visualização do comportamento do material (em compressão, estes seriam negativos).

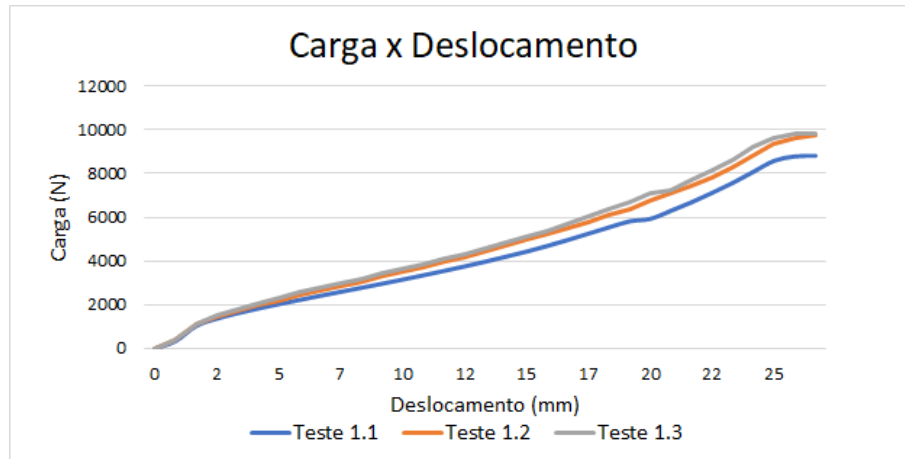


Figura 51: Exemplo Força x Deslocamento

Posteriormente, foi calculada a área a cada ponto do deslocamento, conforme a metodologia a seguir, visando obter o gráfico Tensão x Deformação e consequentemente a Energia de Perfuração.

4.2.2 Cálculo da Área Projetada

Visando obter os valores de tensão em cada ponto do deslocamento a área projetada (A_p) foi calculada. Esta foi definida como a área superior do tronco de cone que se encontra dentro da amostra a cada momento da perfuração, como mostra a Fig. 52. Visando encontrar esses valores, foi utilizada trigonometria básica (Eq. 18) para encontrar a equação da área projetada em função do deslocamento do punção (Eq.19). A partir do deslocamento igual a 22 mm, a área foi considerada constante, como sendo igual a área projetada do porta punção.

$$\tan 20^\circ = \frac{R}{Dc+5,49} \quad (18)$$

Assim,

$$R = \tan 20^\circ \cdot (Dc + 5,49) \quad (19)$$

$$A_p = \pi R^2 \quad (20)$$

Substituindo a Eq.19 em 20 (área circular projetada), obtém-se a Eq. 21:

$$A_p = \pi(\tan 20^\circ \cdot (Dc + 5,49))^2 \quad (21)$$

Onde D_c é o Deslocamento Compressivo, como mostra a Fig. 52.

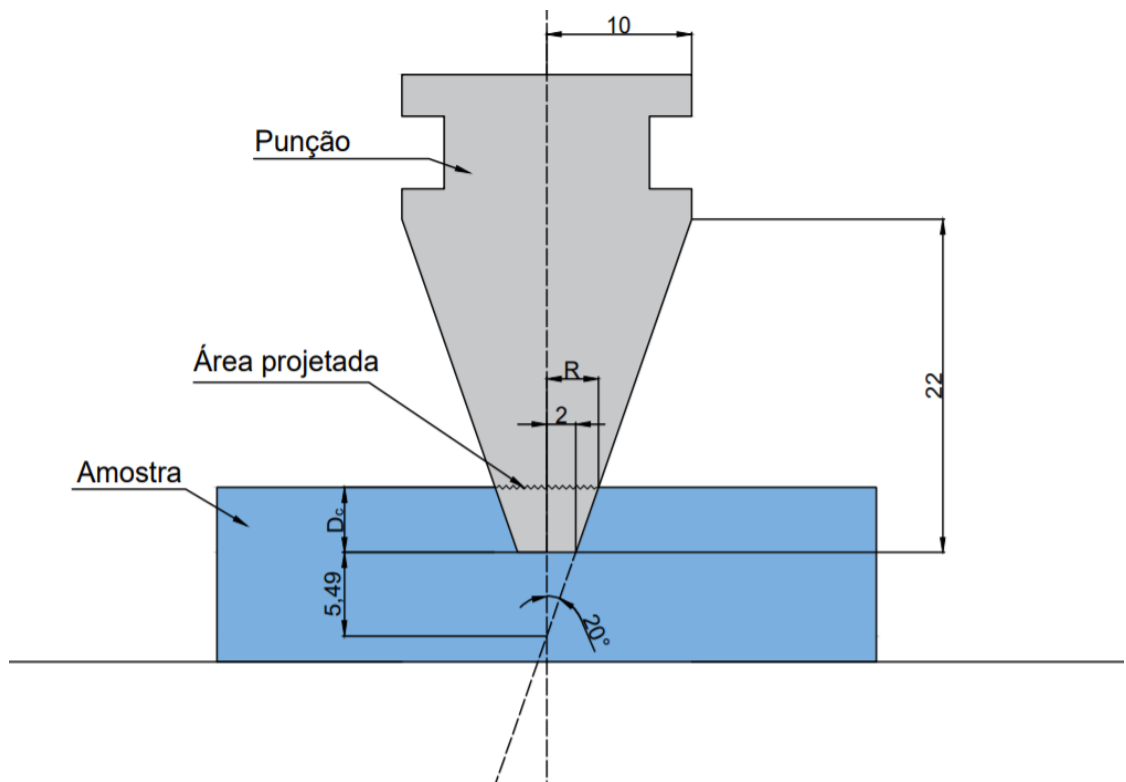


Figura 52: Conceito de área projetada

Assim, foi traçado o gráfico Área Projetada x Deslocamento, como ilustra a Fig. 53.

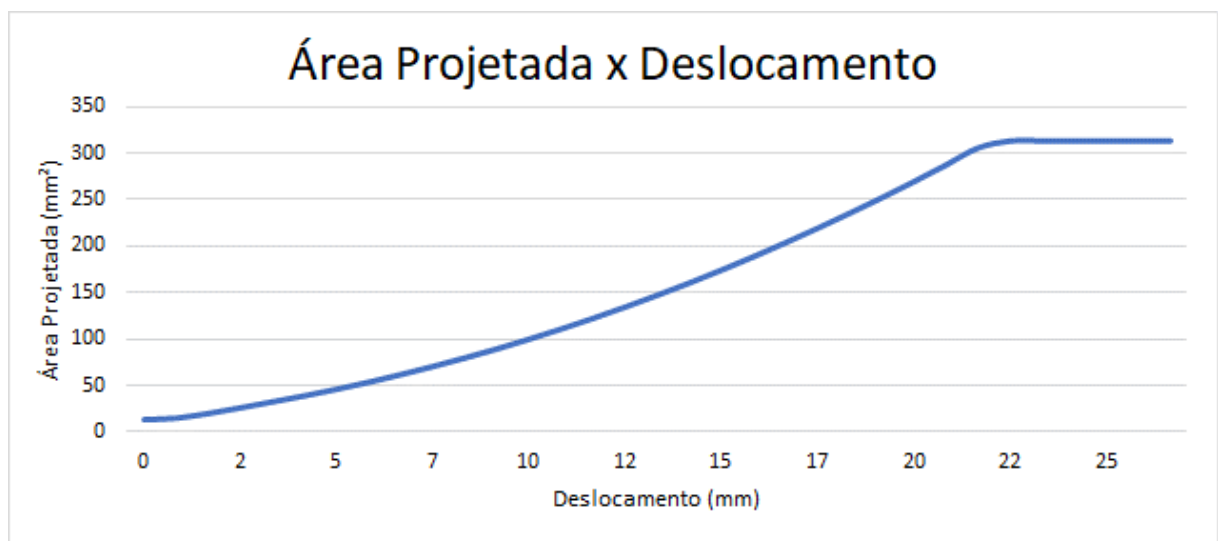


Figura 53: Exemplo Área Projetada x Deslocamento

4.2.3 O Gráfico Tensão x Deformação

Tendo os valores de força e área a cada ponto, podemos encontrar a curva Tensão x Deslocamento efetuando uma simples divisão entre cada ponto. A Figura 54 exemplifica o gráfico encontrado para cada teste realizado do mesmo material.

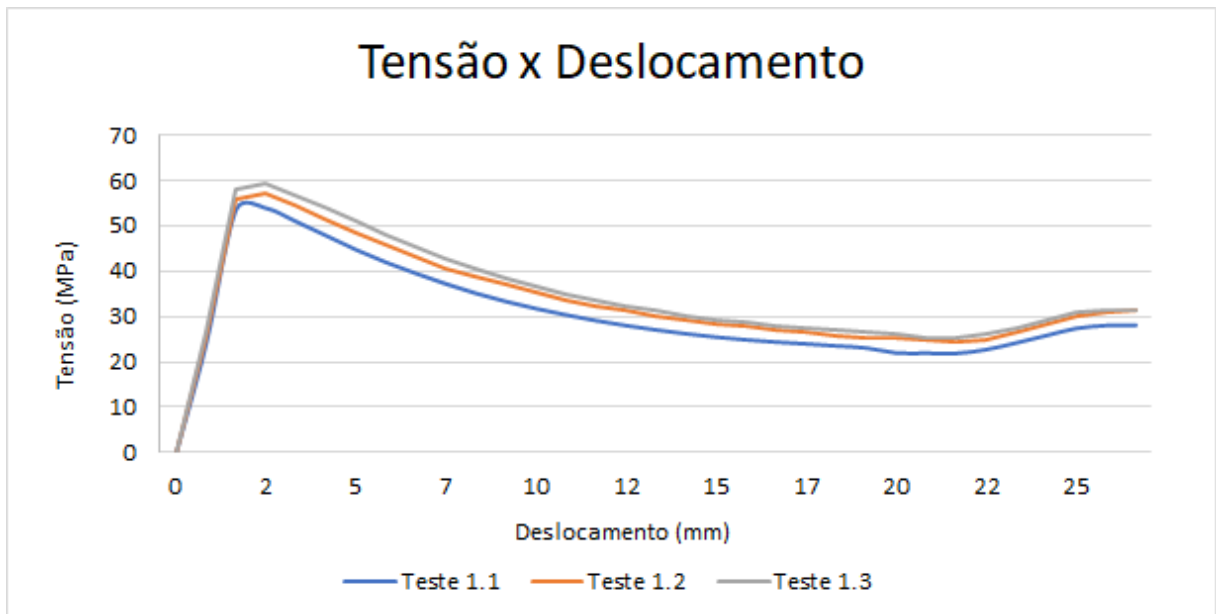


Figura 54: Exemplo Tensão x Deslocamento

Segundo [28], a deformação ε é calculada em função do deslocamento compressivo (D_c) e da espessura da amostra (e), conforme a Eq. 22:

$$\varepsilon = \frac{D_c}{e} \quad (22)$$

Com isso, finalmente é possível obter a curva Tensão x Deformação do teste, como ilustrado na Fig. 55. Nesta curva, os valores de tensão e deformação foram considerados positivos para facilitar a visualização do comportamento do material.

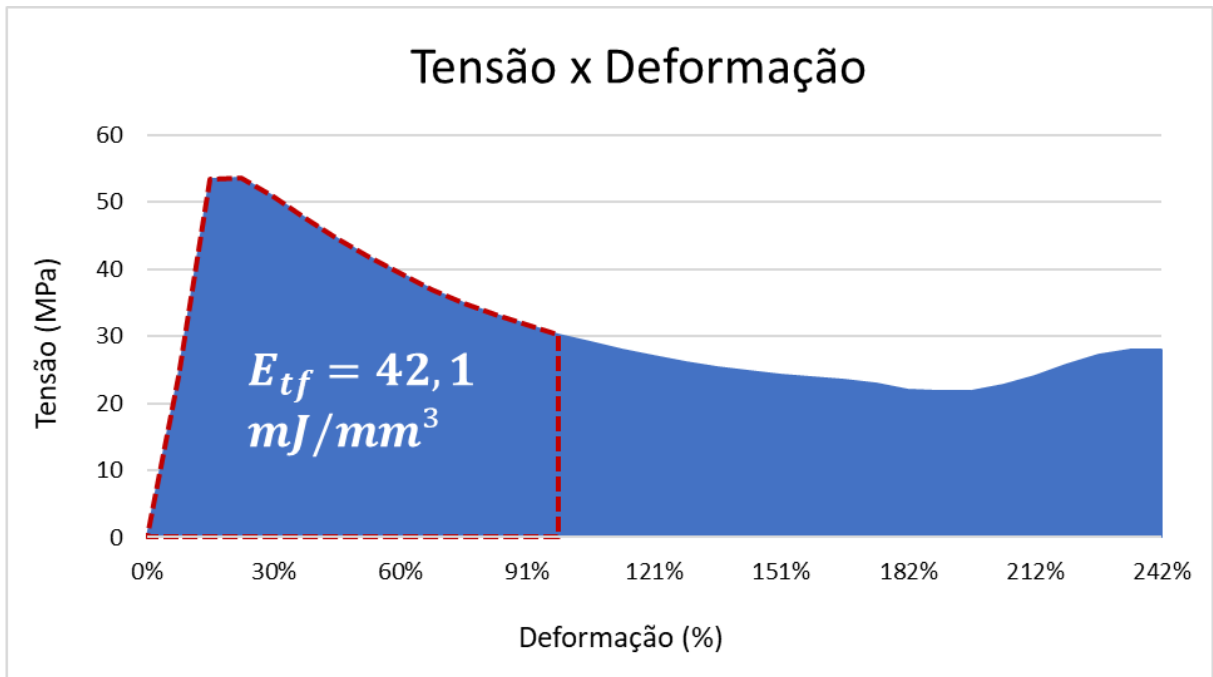


Figura 55: Exemplo Tensão x Deformação do Teste 1.3

A fim de encontrar a Energia de Perfuração, implementou-se um código escrito em *Visual Basic* (descrito no Apêndice A) que, pelo método dos trapézios [35] calcula a área aproximada abaixo da curva Tensão x Deformação. Como já dito anteriormente, esta área foi considerada somente até o ponto de deformação igual a 99.5% da espessura da amostra (área destacada em vermelho na Fig. 55).

A unidade encontrada ao integrar a curva Tensão x Deformação é MPa, que também pode ser lida em mJ/mm^3 , o que justifica o nome “Densidade de Energia de Deformação” citado anteriormente para a propriedade encontrada. Dessa forma, quanto maior a Energia de Perfuração do material, mais adequado este será para reforçar a capa externa [28].

A Tabela 12 ilustra os valores utilizados para a confecção do exemplo dos gráficos da Seção 4.2. Para a realização dos cálculos e plotagem dos gráficos dessa seção, foi utilizado o *software Microsoft Excel*.

Tabela 12: Valores utilizados nos gráficos para o teste 1.3 (os valores abaixo são representativos, uma vez que em compressão, os dados de Carga, Tensão e Deformação seriam negativos)

Carga (N)	Deslocamento (mm)	Area Projetada (mm ²)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
0	0	13	0	0%
345	0	14	24	3%
1035	1	19	53	12%
1370	2	26	54	21%
1617	3	32	51	30%
1834	4	39	48	38%
2031	5	46	45	45%
2223	6	53	42	53%
2413	7	61	39	60%
2596	7	70	37	68%
2776	8	79	35	76%
2963	9	89	33	83%
3154	10	100	32	91%
3349	11	111	30	98%
3548	12	122	29	106%
3756	12	135	28	114%
3971	13	147	27	121%
4196	14	161	26	129%
4431	15	175	25	136%
4685	16	189	25	144%
4959	17	204	24	151%
5250	17	220	24	159%
5535	18	236	23	167%
5814	19	253	23	174%
5924	20	270	22	182%
6296	21	288	22	189%
6684	22	307	22	197%
7114	22	314	23	204%
7571	23	314	24	212%
8076	24	314	26	220%
8572	25	314	27	227%
8777	26	314	28	235%
8798	27	314	28	242%

4.3 Estruturas Poliméricas

Visando o melhor entendimento da discussão microestrutural a ser abordada no fim deste projeto, nesta seção são abordados alguns conceitos fundamentais para melhor compreender a estrutura dos polímeros testados.

A palavra polímero vem do Latim “Poli”, que significa “muitos” e “Mero”, que significa “partes” [36]. Assim, pode-se entender que a estrutura química de um polímero é formada por várias partes iguais, que se repetem ao longo das cadeias poliméricas macromoleculares. A Figura 56 ilustra a configuração de uma cadeia polimérica formada por meros de propileno, gerando o Polipropileno. Ao alterar esta unidade repetitiva da cadeia polimérica, obtemos diferentes tipos de polímeros e conseqüentemente diferentes propriedades do material.

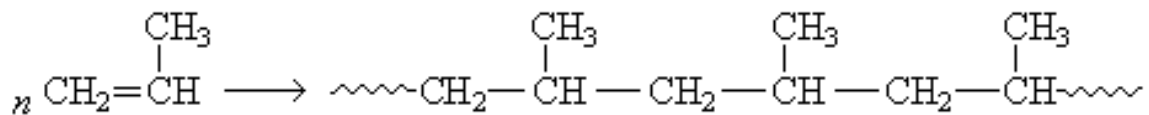


Figura 56: Cadeia polimérica do Polipropileno [37]

Uma importante classificação polimérica a ser considerada para a análise microestrutural e das propriedades de um material é a classificação quanto a fusibilidade do mesmo. Segundo [36], quanto a fusibilidade, os materiais podem ser classificados em: termoplásticos ou termorrígidos. Todos os polímeros testados são termoplásticos e por isso amolecem quando são aquecidos e endurecem ao serem resfriados, processos que são completamente reversíveis, podendo ser repetidos. Tais materiais podem ser fabricados mediante a aplicação simultânea de Calor e Pressão e no caso de dutos flexíveis, onde a extrusão é um dos processos de fabricação que podem ser utilizados. Os polímeros termoplásticos são relativamente moles e dúcteis [36]. Na Figura 57, pode-se observar as curvas Tensão x Deformação típicas de polímeros termorrígidos (a) e termoplásticos (b).

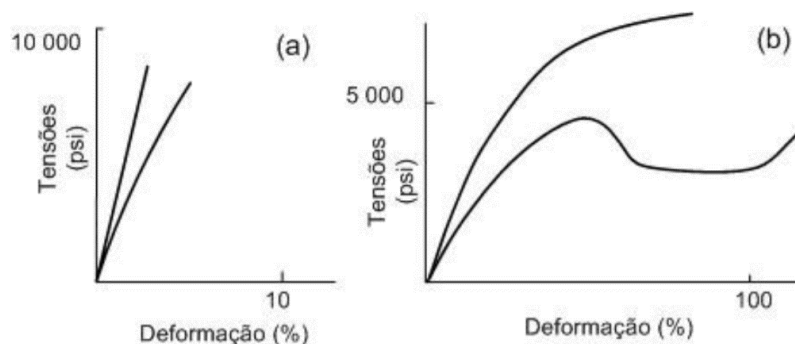


Figura 57: Curvas Tensão x Deformação – (a) Termorrígidos, (b) Termoplásticos [38]

4.3.1 Cristalinidade Polimérica

De acordo com [36], a cristalinidade polimérica é parcial, sendo a microestrutura do polímero dividida em uma parte amorfa e uma parte cristalina e ordenada. O percentual de cristalinidade traduz o quão amorfo ou cristalino é o material. O grau de cristalinidade em polímeros semicristalinos pode variar de completamente amorfo até quase totalmente cristalino (até aproximadamente 95%). Este é influenciado pela taxa de resfriamento durante o processo de solidificação, assim como pela configuração da cadeia polimérica. No caso dos dutos flexíveis, o processo de extrusão inclui etapas de resfriamento lentas e bem definidas, afim de garantir o grau de cristalização adequado para as camadas poliméricas. As próximas duas seções abordarão modelagens propostas para o entendimento da organização cristalina dos polímeros.

4.3.1.1 Modelo do Micélio com Bordas

Um dos modelos que já foram propostos para descrever a configuração microestrutural dos polímeros semicristalinos foi o Modelo do Micélio com Bordas. Este modelo propunha que este tipo de polímero é composto por pequenas regiões cristalinas denominadas cristalitas ou micélios, as quais estariam dispersas em uma matriz amorfa [36]. Tal estrutura pode ser observada, de forma esquemática, na Fig. 58.

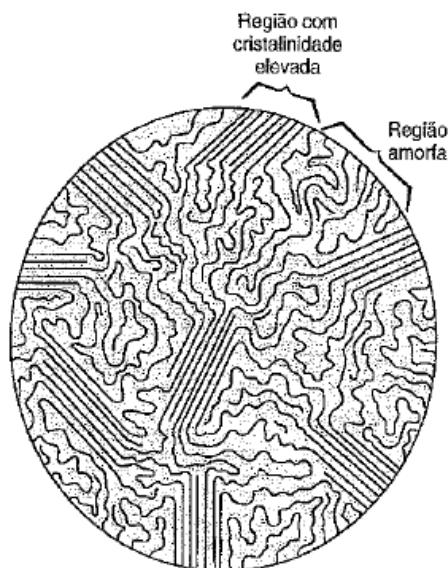


Figura 58: Modelo do micélio com bordas [36]

4.3.1.2 Modelo da Cadeia Dobrada

Segundo [39], um dos modelos mais recentes para a descrição microestrutural semicristalina de polímeros é o Modelo das Cadeias Dobradas. A parte cristalina dos polímeros é constituída de finas placas denominadas lamelas, estas, por sua vez tem espessura de aproximadamente 10 a 20 nm. Nos cristais, as cadeias são orientadas numa direção normal às superfícies das lamelas e além disso, o comprimento das cadeias poliméricas é de uma a três ordens de grandeza maior que a espessura das lamelas [39]. Assim, pode-se concluir que as cadeias estão dobradas sobre si mesmas dentro do cristal como mostra a Fig. 59.

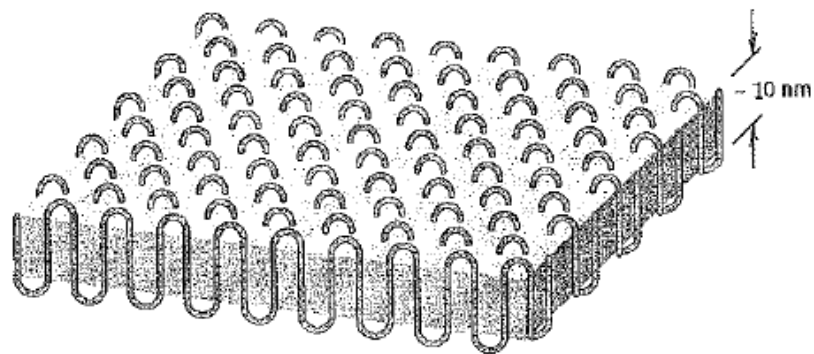


Figura 59: Modelo da cadeia dobrada [39]

Com frequência estas lamelas formam uma estrutura com várias camadas ou planos, esta pode ser observada no esquema de uma esferulite (denominação dada a este tipo de microestrutura) mostrado, de forma esquemática, na Fig. 60.

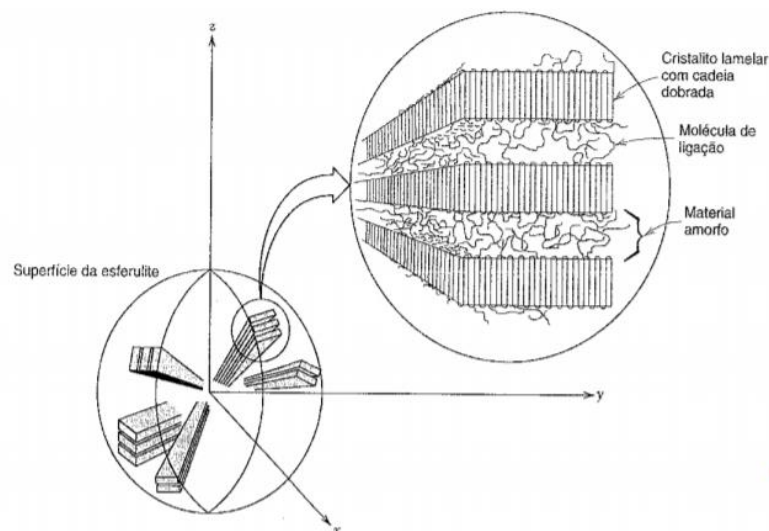


Figura 60: Desenho esquemático da Esferulite [36]

Também segundo [36], polímeros que são cristalizados a partir de uma massa fundida tendem a formar esferulites durante a cristalização. Esta estrutura consiste em um agregado ordenado de cristalitos com cadeias dobradas e o formato de fitas (lamelares) separadas por material amorfo. Estas lamelas nucleiam no centro da esferulite e crescem durante a solidificação até que as extremidades de esferulites adjacentes comecem a se chocar entre si, dando origem a contornos e fronteiras relativamente planos. A “Cruz de Malta” gerada por estes choques pode ser observada na Fig. 61.

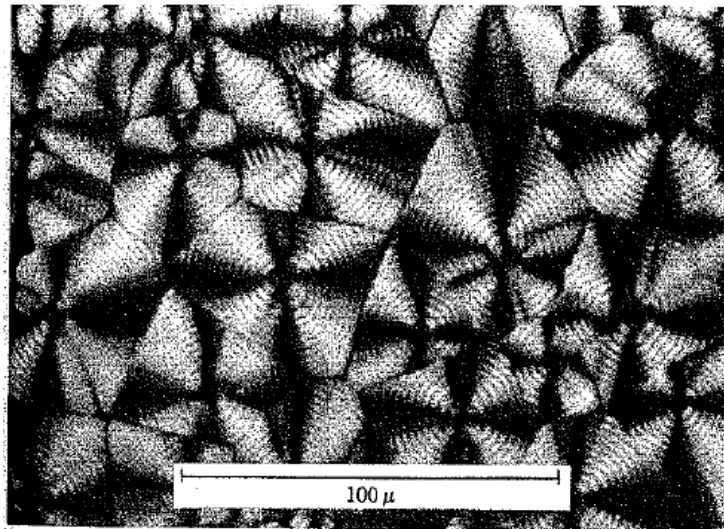


Figura 61: Fotomicrografia de transmissão utilizando luz polarizada cruzada [36]

Capítulo 5

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos cálculos feitos utilizando as equações mencionadas no Capítulo 4 para o dimensionamento o dispositivo de perfuração, assim como a modelagem 3D do mesmo e seu detalhamento realizadas no *software Solidworks*.

5. Dimensionamento do Dispositivo

5.1 Projeto de Matriz de Corte

Nesta seção será verificado por meio da metodologia disposta na Seção 4.1.1 a altura máxima para que o punção não sofra flambagem, e a altura mínima da matriz para que esta mantenha-se em condições de realização do teste.

A seguir estão dispostas na Tab. 13 as variáveis conhecidas das Eq. 1 e 2. F_c foi estabelecida como a carga máxima da máquina de ensaios como medida conservativa e o momento de inércia do punção foi calculado para sua área de seção transversal circular de acordo com [31].

Tabela 13: Parâmetros de entrada do projeto de matriz de corte

PARÂMETROS DE ENTRADA	
Força de corte máxima - F_c (kN)	100
Módulo de elasticidade Aço SAE 4340 Temperado e revenido - E (GPa)	190 – 210 [40]
Momento de inércia do punção - I (mm ⁴)	125664,0

A seguir estão dispostas na Tab. 14 as variáveis encontradas pelas Eq. 1 e 2.

Tabela 14: Parâmetros de saída do projeto de matriz de corte

PARÂMETROS DE SAÍDA	
Altura máxima do punção (mm)	666,4
Altura mínima da matriz (mm)	21,0

Assim, é possível observar que as dimensões do detalhamento do dispositivo contidas na Seção 5.6 garantem a integridade do punção, uma vez que a altura total definida para este como 195 mm (Fig. 65) é menor do que 666,4 mm. Além disso, também pode-se afirmar que a altura da matriz definida como 38 mm garante a integridade da placa matriz durante o teste, para a força máxima da máquina.

5.2 Modelo Analítico por Método de Energia com Carga Localizada

Nesta seção será verificado, por meio da metodologia disposta na Seção 4.1.2 o valor do momento M_a disposto no quadro de reações (Fig. 50) que será posteriormente utilizado no cálculo de flambagem por compressão em membros curtos. Além disso, será verificado o valor da deflexão no ponto C (Fig. 50) visando compará-lo a espessura da placa matriz e entender se a deflexão causada pelo carregamento máximo da máquina de ensaios será comparável a esta.

A seguir estão dispostas na Tab. 15 as variáveis conhecidas das Eq. 5 e 7.

Tabela 15: Parâmetros de entrada do modelo analítico por método de energia

PARÂMETROS DE ENTRADA	
Carga máxima - P (kN)	25
Momento de inércia da coluna AB - I_1 (mm ⁴)	$7,85 \cdot 10^3$
Momento de inércia da viga BC - I_2 (mm ⁴)	$4,54 \cdot 10^6$
Comprimento da viga BC - l (mm)	100
Altura da coluna AB - h (mm)	94

A seguir estão dispostas na Tab. 16 as variáveis encontradas pelas Eq. 5 e 7.

Tabela 16: Parâmetros de saída do modelo analítico por método de energia

PARÂMETROS DE SAÍDA	
Momento no ponto A - M_a (N.m)	2,3
Deflexão vertical do ponto C - δ_c (mm)	0,049

Assim, de posse do valor de M_a , foi possível calcular o fator de segurança para a flambagem por compressão. Além disso, é possível observar que a deflexão no ponto C é 3 ordens de grandeza menor que a espessura de 38 mm da placa matriz. Deste modo, conclui-se que o valor δ_c encontrado não afetará a execução do teste.

5.3 Cálculo de escoamento em Membro Curto de Compressão

Nesta seção foi verificado primeiramente, por meio da metodologia disposta na Seção 4.1.2 que as colunas da matriz são membros curtos de compressão, uma vez que a razão de esbeltez limite encontrada foi menor do que (l/k) . Com isso, deduziu-se que a equação a ser utilizada no cálculo da tensão máxima de compressão atuante na coluna seria a Eq. 10. Após encontrar a Tensão máxima de compressão, foi utilizada a Eq. 11 para a determinação do fator de segurança das colunas da matriz em relação a esse modo de falha.

A seguir estão dispostas na Tab. 17 as variáveis conhecidas das Eq. 8 e 10.

Tabela 17: Parâmetros de entrada do cálculo de escoamento em membro curto de compressão

PARÂMETROS DE ENTRADA	
Carga máxima - P (kN)	25
Comprimento da coluna da matriz - L (mm)	188
Momento de inércia da seção transversal da coluna da matriz - I ₁ (mm ⁴)	7,85. 10 ³
Área da seção transversal da coluna da matriz - A (mm ²)	314
Raio de giração - K (mm)	5
Módulo de elasticidade - E (GPa)	190 - 210 [40]
Distância entre o centroide e a fibra mais externa da coluna - c (mm)	10
Tensão limite de escoamento - S _y (MPa)	1100

A seguir estão dispostas na Tab. 18 as variáveis encontradas pelas Eq. 8 e 10.

Tabela 18: Parâmetros de saída do cálculo de escoamento em membro curto de compressão

PARÂMETROS DE SAÍDA	
Razão de esbeltez - (L/K)	37,6
Razão de esbeltez limite - $0,282 \left(\frac{AE}{P} \right)^{\frac{1}{2}}$	13,8
Tensão máxima de compressão - σ_c (Mpa)	82,5
Fator de segurança à Compressão - F.S	13,3

Assim, é possível observar que as dimensões do detalhamento do dispositivo contidas na Seção 5.6 (Fig. 64 e 65) garantem a integridade das colunas da matriz em relação à flambagem e escoamento por compressão durante o teste, para a força máxima da máquina de ensaios.

5.4 Cálculo do Espanamento de Rosca e Escoamento Eixo Central

Nesta seção será verificado por meio das metodologias dispostas nas Seções 4.1.3 e 4.1.4 que o eixo central do dispositivo não falha por escoamento em compressão e nem por espanamento de rosca.

A seguir estão dispostas na Tab. 19 as variáveis conhecidas das Eq. 12 a 17.

Tabela 19: Parâmetros de entrada do cálculo de espanamento e escoamento do acoplamento

PARÂMETROS DE ENTRADA	
Carga máxima - C (kN)	100
Passo da rosca do acoplamento - p (mm)	2
Diâmetro interno do acoplamento - di (mm)	30
Kt do acoplamento	2,7
Área da seção transversal do acoplamento - At (mm ²)	561
Tensão limite de escoamento - Sy (MPa)	1100

A seguir estão dispostas na Tab. 20 as variáveis encontradas pelas Eq. 12 a 17.

Tabela 20: Parâmetros de saída do cálculo de espanamento e escoamento do acoplamento

PARÂMETROS DE SAÍDA	
Tensão máxima de espanamento no acoplamento - τ (Mpa)	477
Tensão máxima de compressão no acoplamento - σ (Mpa)	178
Fator de segurança para escoamento - F.S	6,17
Fator de segurança para espanamento - n	1,33

Assim, é possível observar por meio dos fatores de segurança encontrados, que as dimensões do detalhamento do eixo central contidas na Seção 5.6 garantem a integridade do mesmo durante o teste, para a força máxima da máquina. Vale ressaltar que a metodologia utilizada para o cálculo do espanamento de rosca é conservativa e por isto, este foi o menor fator de segurança encontrado para a estrutura. Deste modo, entende-se que o eixo central é a peça mais crítica do dispositivo.

5.5 Modelo 3D

O modelo do dispositivo foi desenvolvido com a utilização do *software SolidWorks*. A Figura 62 ilustra o conjunto, que por sua vez, é composto por:

- 01 Punção cônico;
- 01 Contra porca;
- 01 Eixo central;
- 01 Base inferior;

- 04 Colunas;
- 01 Base superior;
- 02 Parafusos reguladores;
- 01 Placa Matriz;
- 10 Porcas;
- 01 Punção bisel;
- 01 Porta Punção.

Nota-se que os principais modos de falha desta estrutura foram abordados anteriormente e que as dimensões dispostas no detalhamento contido na Seção 5.6 estão de acordo com os cálculos propostos.

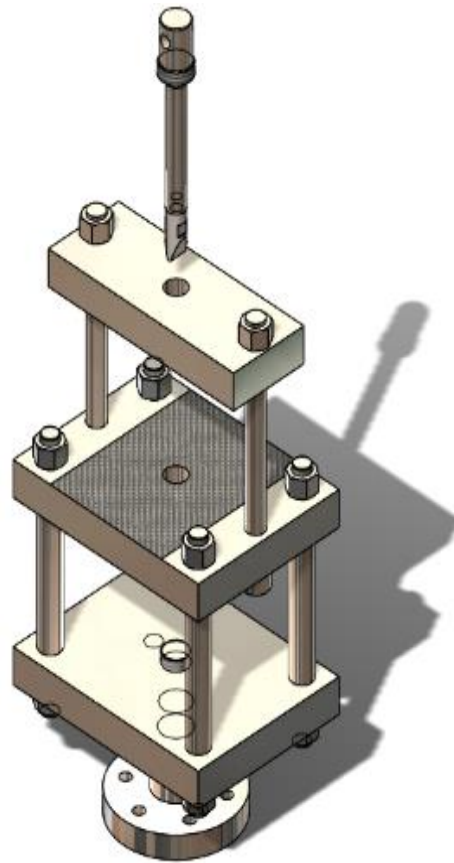


Figura 62: Modelo 3D do dispositivo de perfuração

Assim, pode-se concluir que o dispositivo foi dimensionado e fabricado (tratamentos térmicos e usinagem visando garantir as propriedades mecânicas admitidas nos cálculos) para resistir a testes que cheguem a até 100 KN, tornando-se assim compatível com a máquina de ensaios escolhida, podendo eventualmente ser adaptado para outras máquinas com cargas maiores, se verificados os cálculos para os novos carregamentos.

5.6 Detalhamento do Dispositivo

As vistas do dispositivo e seus componentes estão dispostas nas Fig. 63, 64 e 65:

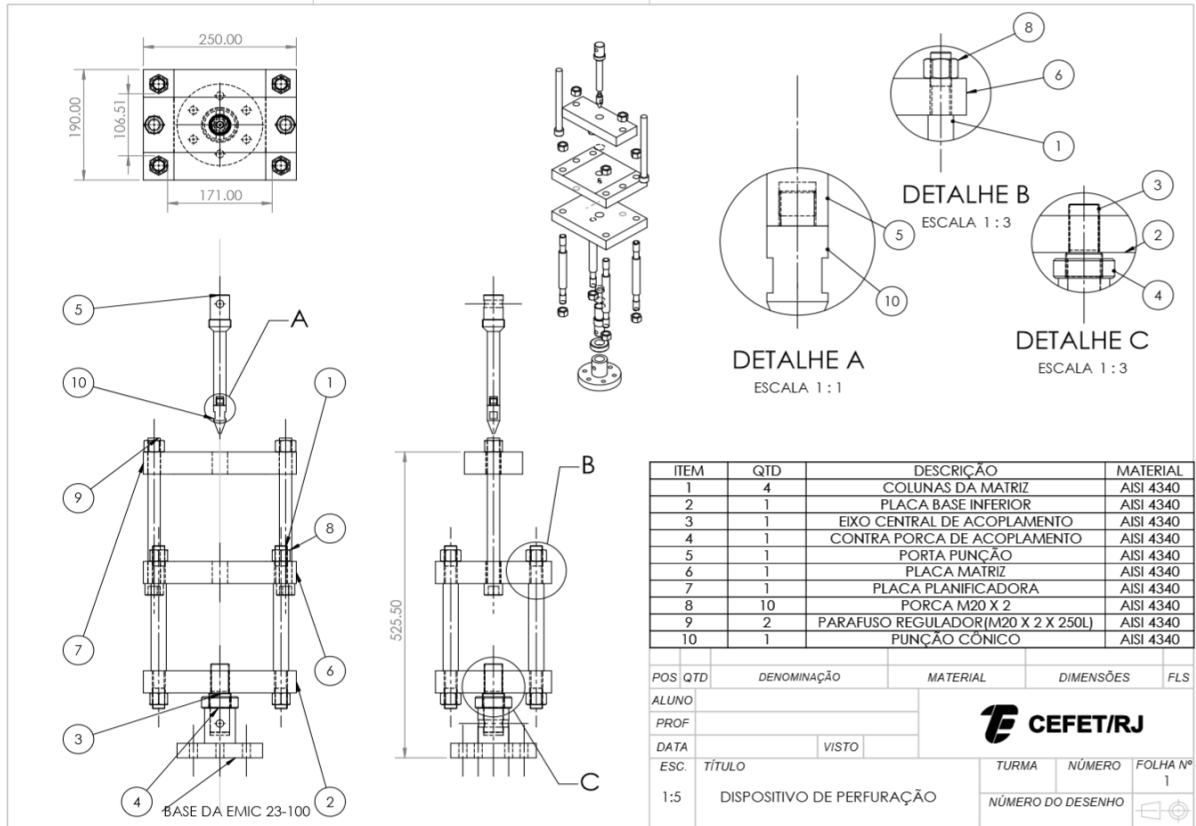


Figura 63: Folha 1

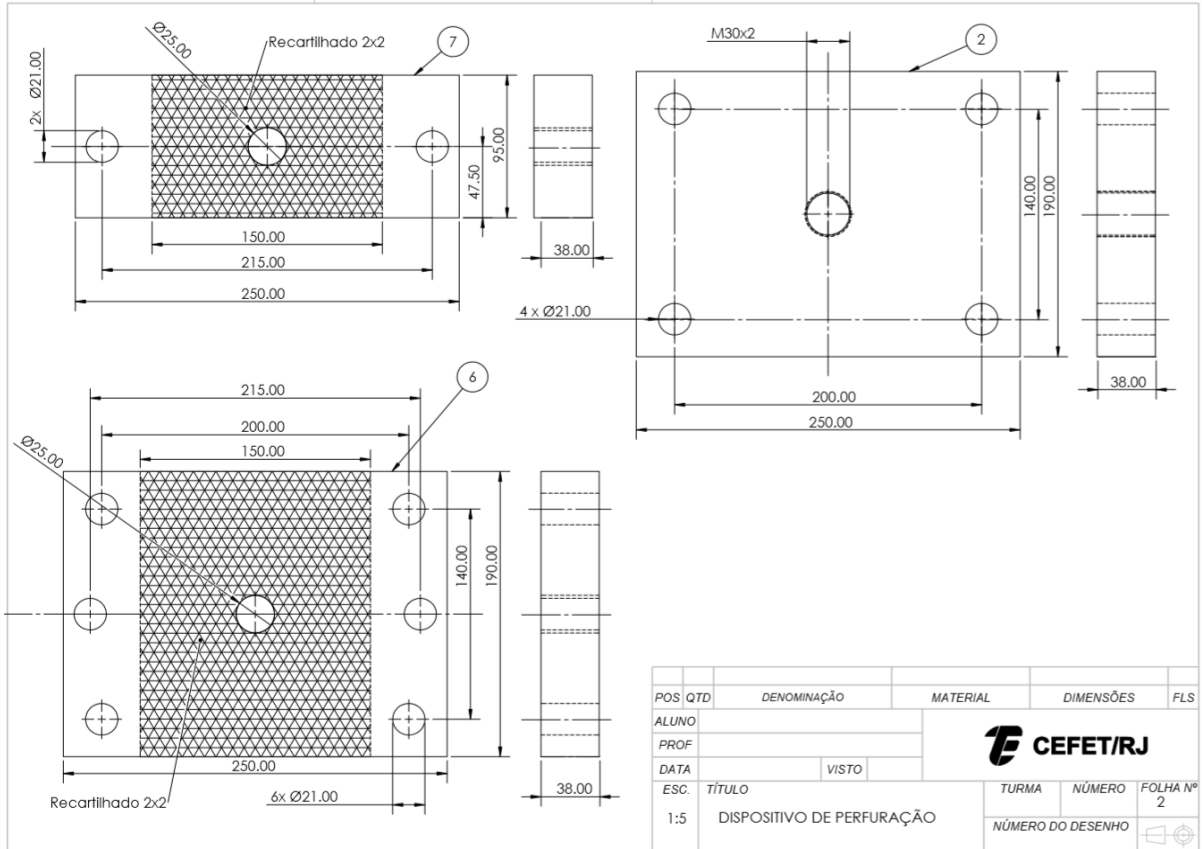


Figura 64: Folha 2

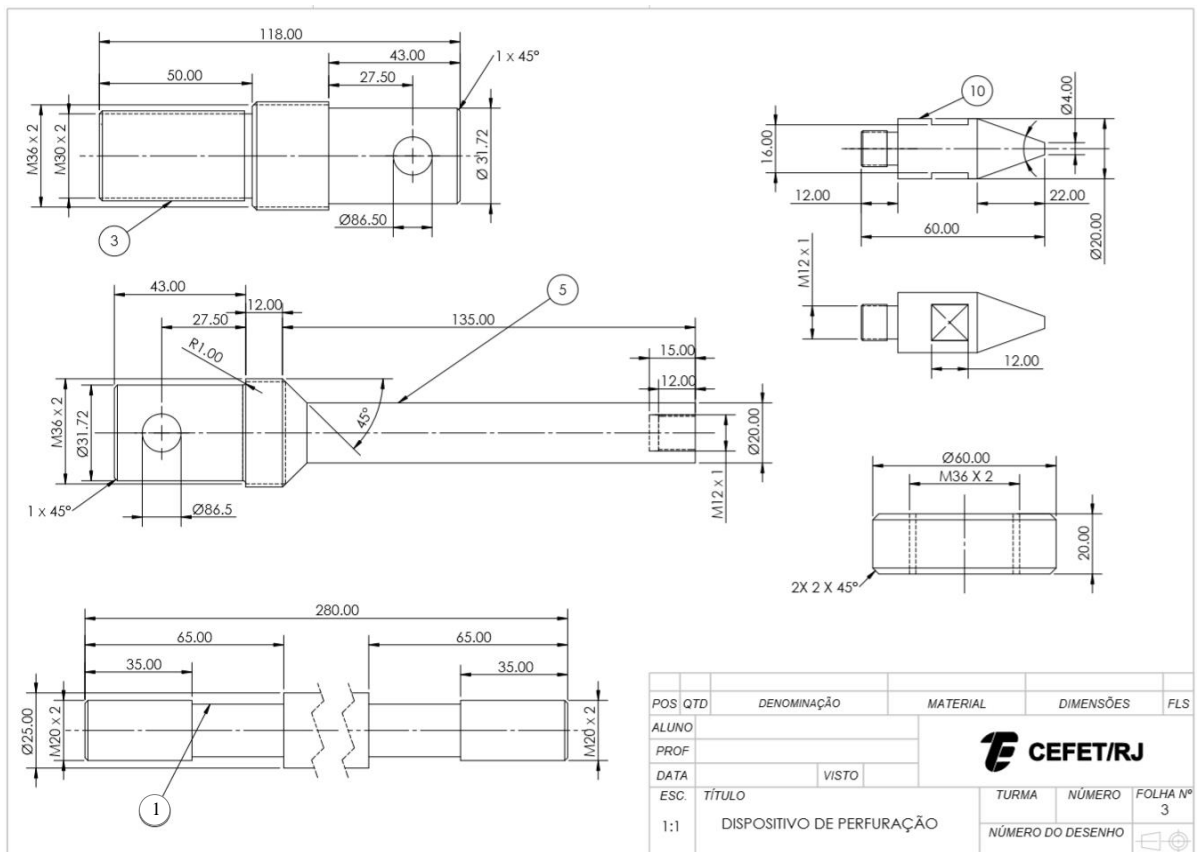


Figura 65: Folha 3

Na folha 1, pode-se observar as 3 principais vistas do conjunto montado, bem como uma vista explodida e detalhes dos acoplamentos. Nas folhas 2 e 3 pode-se observar as vistas de cada componente separadas.

5.7 Detalhamento Renderizado

As vistas renderizadas do dispositivo e seus componentes estão dispostas nas Fig. 66, 67 e 68:

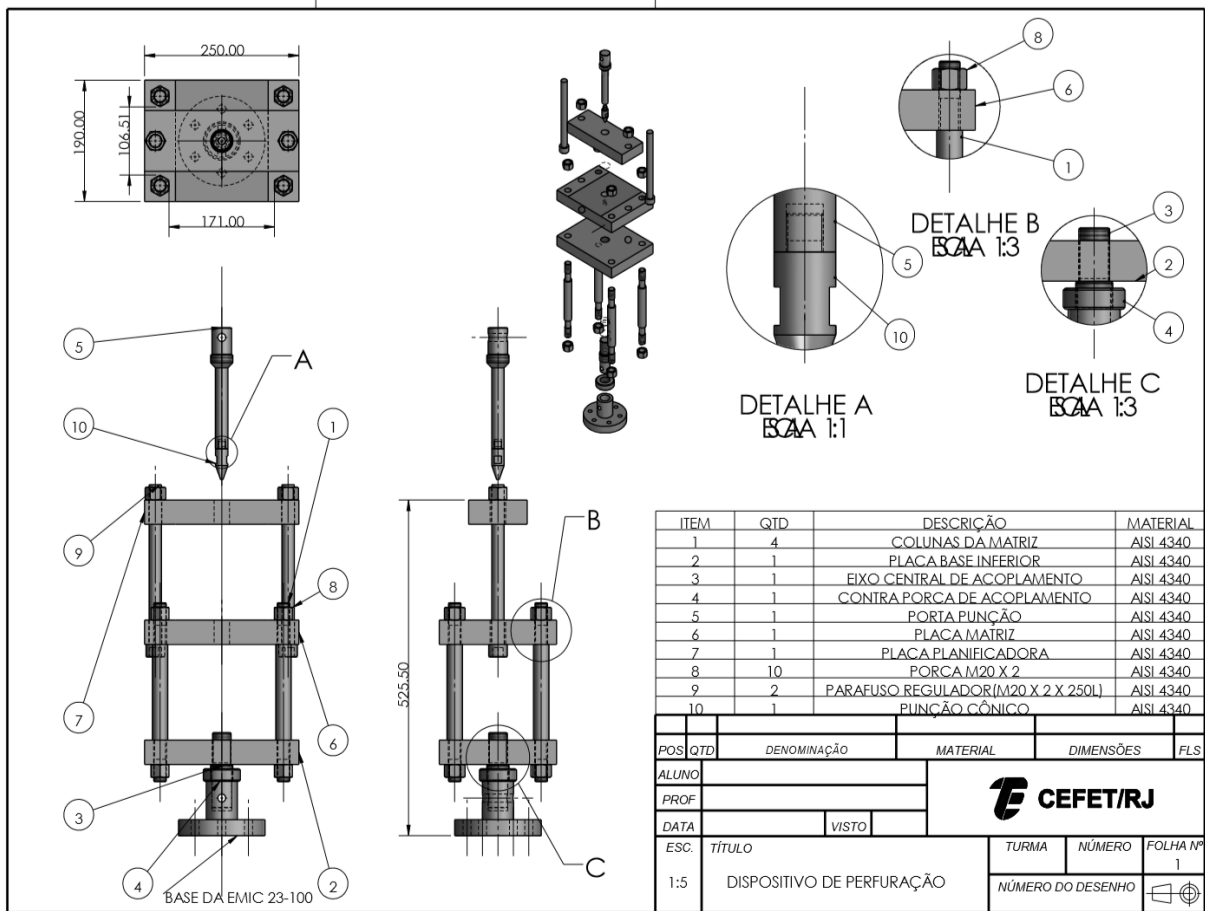


Figura 66: Folha 1

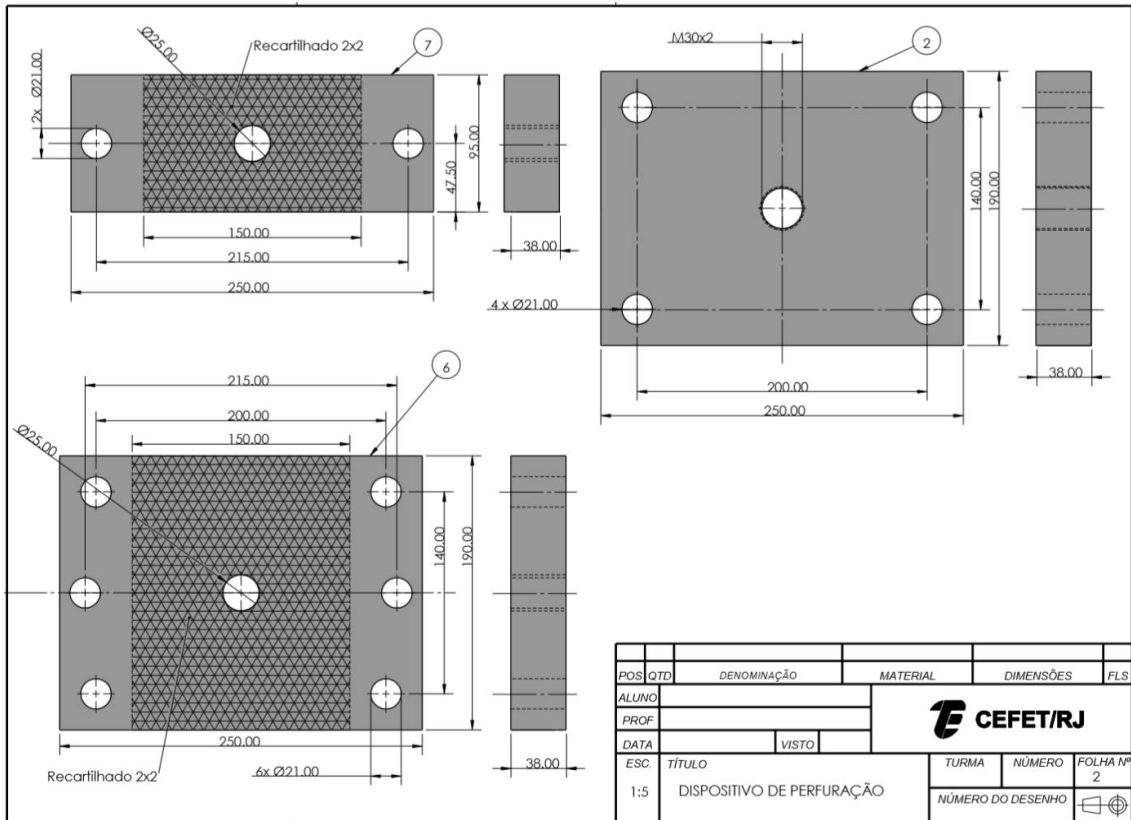


Figura 67: Folha 2

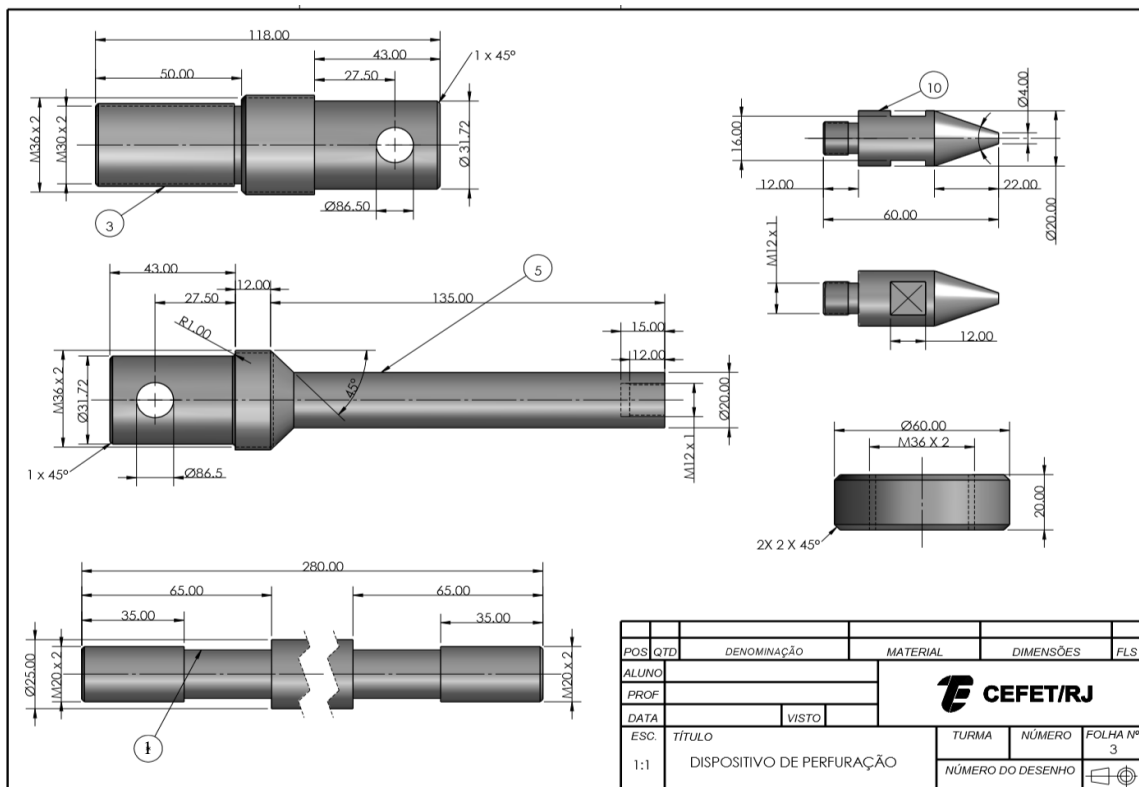


Figura 68: Folha 3

Nas folhas 1, 2 e 3, pode-se observar o mesmo detalhamento técnico exposto anteriormente, porém renderizado para facilitar a visualização dos componentes de cor metálica.

Capítulo 6

Neste capítulo será abordada uma análise numérica elaborada com o objetivo de replicar com o menor erro possível os resultados de Energia de Perfuração obtidos nos testes, para que assim, com base na calibração da modelagem o teste físico possa vir a tornar-se desnecessário.

6. Análise pelo Método dos Elementos Finitos

Nesta seção apresenta-se um modelo numérico axissimétrico, elaborado com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) para analisar o comportamento estrutural dos componentes do teste de perfuração, desenvolvido por meio do software ANSYS STUDENT 2019 R2. O modelo foi proposto com a finalidade de representar a perfuração do punção cônico em amostras poliméricas de dutos flexíveis, visando analisar o comportamento das curvas Tensão x Deformação e da Energia de Perfuração dos polímeros no momento de falha do teste. Estes foram obtidos utilizando a curva Força x Deslocamento de saída da simulação em conjunto com a modelagem analítica apresentada na Seção 4.2.

Um modelo simplificado do teste experimental foi proposto, tomando como dados de entrada, entre outras, as propriedades básicas do material e a espessura da camada polimérica.

A elaboração de um modelo numérico para o teste de perfuração permite que a simulação do teste experimental seja realizada para diversos materiais, na falta de testes experimentais. Também é possível, com simples modificações, alterar a geometria, dimensão do modelo e dispor as amostras em diferentes configurações. Para estudos mais profundos, pode-se ainda realizar análises de otimização no modelo, observando a resposta do polímero em função da variação de determinadas propriedades do material, encontrando assim um modelo ótimo para atuar nessas condições.

6.1 Descrição do Modelo

O modelo elaborado, representa o teste experimental através de 4 componentes: punção, amostra, matriz e placa planificadora. No momento inicial, quando o punção entra em contato sua superfície, a amostra está posicionada entre a matriz e a placa planificadora, como ilustrado na Fig. 69. Ao longo da análise, a placa e a matriz se mantêm estáticas enquanto o punção se desloca no eixo Y, deformando a amostra.

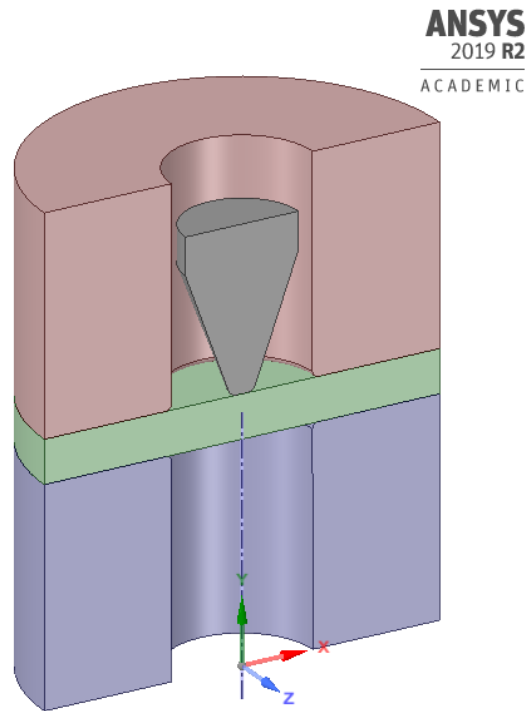


Figura 69: Geometria do teste de perfuração projetada em 180°

A geometria foi projetada no *software SpaceClaim*, considerando um modelo axissimétrico com quatro superfícies, como ilustrado na Fig. 70. O estado axissimétrico representa uma seção transversal, que ao ser rotacionada em torno do eixo de simetria, gera sólidos de revolução. Além disso, a distribuição de massa e ações externas, também são representadas de forma axissimétrica [41].

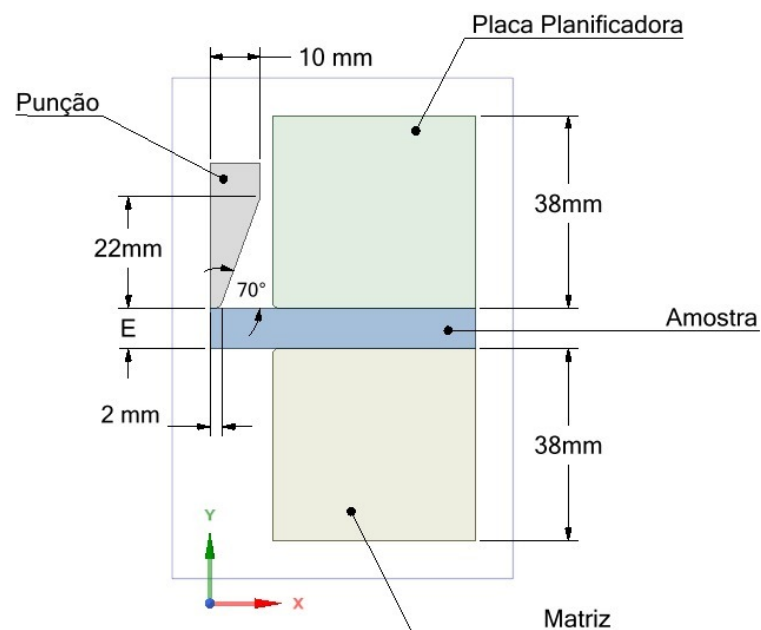


Figura 70: Geometria do teste de perfuração

Ao projetar a geometria do dispositivo de perfuração, foi necessário realizar algumas simplificações no modelo, para evitar que houvesse singularidades na análise. Sendo assim, foi feito o adoçamento nas regiões mais agudas do punção, da placa matriz e da placa planificadora com raios de 1,6 mm.

O modelo de elementos finitos elaborado foi testado para os Polímeros 2 e 4, baseado nos Testes 2.3 e 4.3, visando uma posterior comparação entre os resultados e validação do modelo. Sendo assim, para o Polímero 2 foi definida uma espessura de 8,05 mm e para o Polímero 4 foi definida uma espessura de 7,6 mm.

6.2 Considerações do Modelo

Nesta seção serão apresentadas as considerações utilizadas no modelo de elementos finitos, para representar o teste de perfuração.

6.2.1 Análise Estrutural Não-Linear

No Método de Elementos Finitos, um sistema físico é representado através de uma aproximação matemática, por meio da discretização de um meio contínuo. Assim, o domínio do sistema é dividido em uma quantidade finita de elementos, que por sua vez são compostos por nós [42]. A partir do domínio discretizado, desenvolve-se o modelo matemático, representando os nós e elementos através de um sistema de matrizes e vetores. Na hipótese de um comportamento linear, consideramos que o vetor de deslocamentos nodais (u), pode ser calculado diretamente a partir da matriz de rigidez da estrutura (K) e do vetor de forças nodais externas (F), ambos considerados constantes, de acordo com a Eq. 23 [43].

$$[K].\{u\} - \{F\} = 0 \quad (23)$$

Entretanto, essa hipótese desconsidera efeitos que podem ser significativos para o comportamento da estrutura. Em casos não-lineares o vetor de forças e a rigidez do sistema são função do deslocamento. Considerando esse fator, a Eq. 23 pode ser reescrita, obtendo a Eq. 24 [43].

$$[K(u)].\{u\} - \{F(u)\} = \psi(u) = 0 \quad (24)$$

Segundo [43], o produto entre a matriz de rigidez e o vetor de deslocamentos nodais, pode ser interpretado como forças internas da estrutura (P), que no estado de equilíbrio, serão equivalentes às forças externas (F). Todavia, em análises não-lineares de elementos finitos, as forças externas e internas geralmente iniciam fora do estado de equilíbrio, gerando um resíduo (ψ) [43]. Diante dessa complexidade, os problemas não-lineares são calculados por meio de incrementos, realizando interações até reduzir o resíduo ao critério de convergência especificado. Para isso, desenvolveram-se técnicas de solução apropriadas, capazes de superar problemas numéricos gerados pela não-linearidade, como o método de *Newton-Raphson* [44].

Para representar o modelo de forma realista, analisou-se os testes experimentais preliminares buscando compreender o fenômeno físico e conseguir descrevê-lo da melhor forma. Diante disso, foram detectadas diferentes não-linearidades no modelo, em relação aos materiais, variações de geometria e interações entre componentes.

No teste de perfuração, notou-se o comportamento não-linear do material polimérico, uma vez que as tensões ultrapassam o limite de escoamento do material gerando deformações permanentes. Portanto, fez-se necessário considerar os efeitos elasto-plásticos presentes, assumindo um modelo de endurecimento isotrópico [45]. Sob ponto de vista numérico, essa não-linearidade está associada a alteração da matriz constitutiva do elemento ao longo da análise [46]. Vale ressaltar que apesar dos materiais poliméricos apresentarem comportamentos visco-plásticos, no modelo desenvolvido foi adotada uma simplificação, desconsiderando os efeitos viscosos presentes. Esta hipótese foi adotada devido ao grande número de variáveis e constantes necessárias para representar um material de comportamento viscoplastico e a convergência dos resultados obtidas na consideração do modelo de material adotado.

As grandes deformações e deslocamentos presentes no teste também são caracterizadas como fonte de não-linearidade do modelo, uma vez que alteram a forma do elemento e a matriz de rigidez global do sistema [43]. Esse fenômeno, denominado como não-linearidade geométrica, resulta em alterações na função de forma e nas matrizes deformação-deslocamento do modelo [46].

Notou-se também que ao longo do teste as interações entre corpos ocorrem de maneira não-linear, com grandes variações na área de contato. À medida que o punção se desloca, sua área lateral entra em contato com a amostra, que escoia através da matriz. Essas interações são representadas numericamente por elementos de contato e no caso de não-linearidade, esses elementos podem realizar movimentos relativos nas direções normal e tangencial. De acordo com esses movimentos, a área de contato é alterada durante a análise, o que modifica a rigidez da estrutura, gerando uma solução mais interativa [47].

6.3 Materiais

Para a elaboração da análise, foram adotados os seguintes materiais: Aço SAE 4340 para os componentes do dispositivo de perfuração (punção, matriz e placa planificadora) e para a amostra, o polímero referente ao teste a ser reproduzido.

6.3.1 Amostra Polimérica

Como dito na Seção 6.1, o modelo elaborado neste projeto considera o comportamento não-linear da amostra polimérica, que ocorre devido às deformações permanentes geradas pela penetração do punção. Além disso, neste modelo, foram desconsiderados os efeitos viscosos do polímero, de forma que o comportamento da amostra foi assumido como elasto-plástico, adotando um modelo de endurecimento isotrópico bi linear [45]. Na Tabela 21 estão dispostas as propriedades dos Polímeros 2 e 4, utilizados no modelo.

Tabela 21: Propriedades dos polímeros

Propriedades dos Polímeros		
Amostra	Polímero 2 [39][52]	Polímero 4 [55][56]
Módulo de Elasticidade (MPa)	1300	360
Coefficiente de Poisson	0.48	0.4
Densidade (g/cm ³)	0.94	1.02
Tensão de Escoamento (MPa)	22	20
Alongamento no Escoamento (%)	12	11
Tensão de Ruptura (MPa)	36	30
Alongamento na Ruptura (%)	910	150

6.3.2 Dispositivo de Perfuração

O material do dispositivo de perfuração foi definido como aço SAE 4340 temperado e revenido, suas propriedades estão dispostas na Tab. 22.

Tabela 22: Propriedades do Aço AISI 4340 Temperado e Revenido [51]

PROPRIEDADES DO AÇO AISI 4340 TEMPERADO E REVENIDO	
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	190 - 210
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade (Kg/m ³)	7850

6.4 Contatos

Como mencionado anteriormente, todas as interações entre os corpos do modelo ocorrem de maneira não-linear. Para isso, foram definidos 3 contatos:

- Contato entre amostra e punção – Essa é a interação mais importante do modelo, por isso, houve uma preocupação em considerar o coeficiente de atrito, definido como 0,2 [53].
- Contato entre a amostra e placa da matriz – Esse contato foi definido com o coeficiente de atrito nulo, permitindo movimentos relativos sem forças de resistência.
- Contato entre amostra e placa planificadora – Esse contato também foi definido com o coeficiente de atrito nulo.

A consideração do atrito nulo foi adotada para que o tempo de processamento da análise não fosse afetado pelo cálculo do atrito entre a amostra, a placa planificadora e a matriz. Deste modo, foi necessário monitorar o deslocamento relativo entre as superfícies de contato, para verificar se a representação do modelo está coerente com a realidade. Após solucionar o modelo, foi observado que os deslocamentos relativos entre os componentes foram desprezíveis em regiões mais afastadas da perfuração.

A não-linearidade dos contatos está relacionada com a variação da rigidez global do modelo [47], para realizar esse cálculo, são utilizados diferentes algoritmos, dentre eles a formulação Augmented Lagrange, utilizada nesse projeto. Essa formulação calcula a força de contato a partir da penetração ($\Delta Y_{penetração}$), da rigidez de contato ($K_{contato}$) e do termo de correção (λ) que atualiza a rigidez local de cada elemento, conforme descrito na Eq. 28 [50].

$$\Delta F_{contato} = (\Delta Y_{penetração} \cdot K_{contato}) + \lambda \quad (28)$$

6.5 Malha

Para criar a malha do modelo, foram encontradas dificuldades de estabilidade devido a distorção de elementos gerada pela grande variação da geometria ao longo da análise. Diante dessa complexidade, realizaram-se testes com diferentes configurações de malha, até chegar à convergência desejada. Para obter um resultado satisfatório, refinou-se a malha na região onde foi observada maior deformação, além disso, dividiu-se a amostra em superfícies com uma

inclinação de 70° , como ilustrado na Fig. 71, criando elementos com a mesma inclinação do punção.

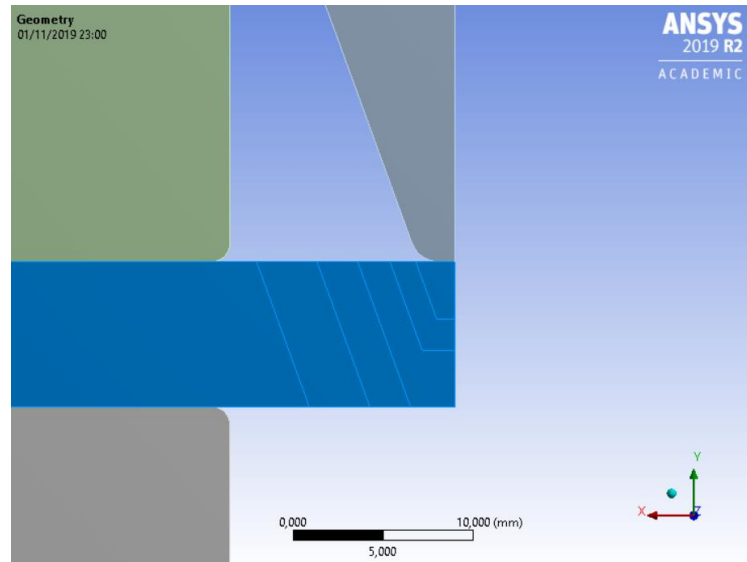


Figura 71: Amostra dividida em superfícies de 70°

A malha foi gerada com 2301 elementos e 2494 nós, utilizando o elemento PLANE182, e os elementos de contato CONTACT172 e TARGET169. Na Tabela 23 estão descritos os números de nós e elementos para cada componente.

Tabela 23: Número de nós e elementos por componente.

Componente	Número de elementos	Número de nós
Punção Cônico	105	131
Matriz	352	394
Placa Planificadora	350	392
Amostra	1494	1577

Vale ressaltar que para evitar singularidades no modelo, realizou-se o refinamento da malha em regiões curvas para representá-las de forma mais suave, como ilustrado nas Fig. 72 e 73.

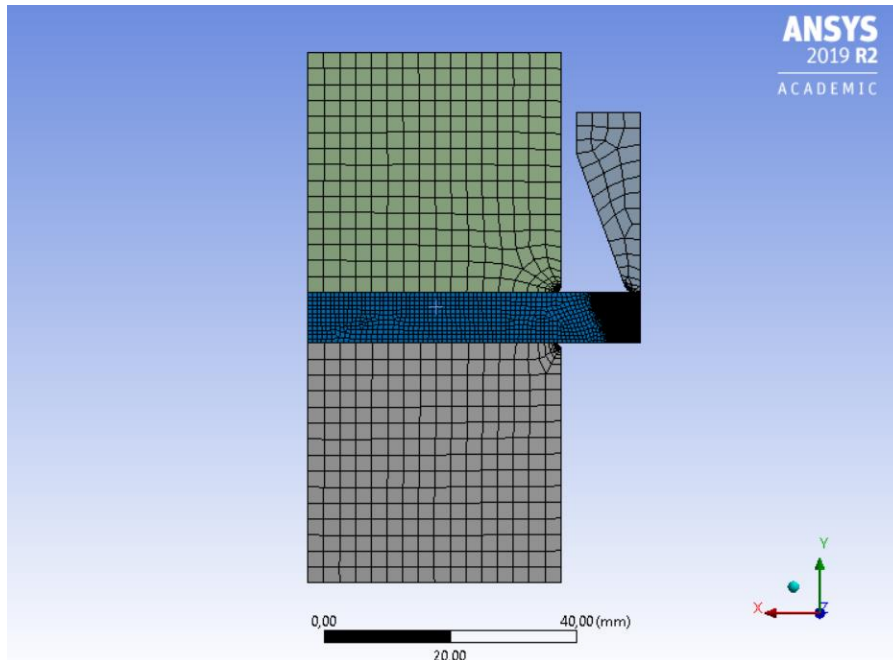


Figura 72: Geometria discretizada

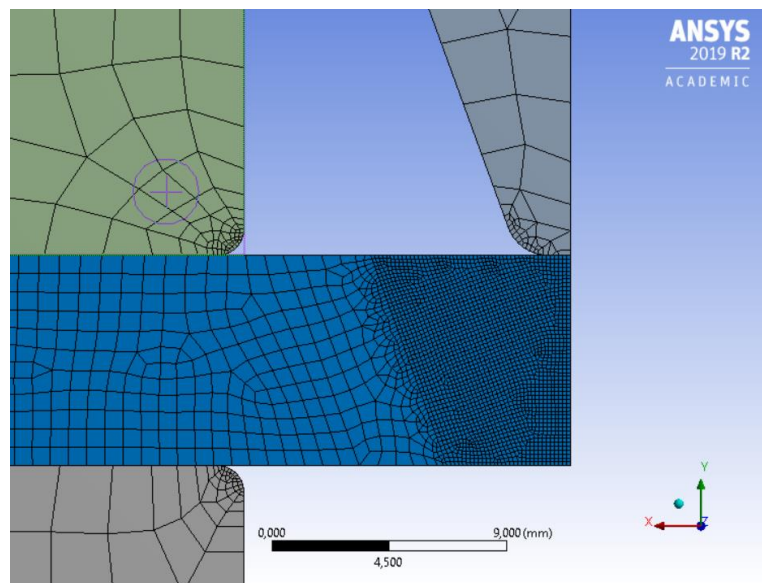


Figura 73: Detalhe da malha

6.6 Definições do Modelo

Como dito na Seção 6.1, no momento inicial o punção encontra-se em contato com a amostra polimérica, que está posicionada entre a matriz e a placa planificadora. Durante toda a

análise, tanto a matriz quanto a placa planificadora se mantêm estáticas, dessa forma foi definido um suporte fixo nas arestas externas desses componentes, restringindo seu movimento.

Para o punção foi definido um deslocamento vertical até o final da espessura da amostra, visando obter como dado de saída, a força necessária para deformar o polímero em cada passo de tempo (apesar do tempo não apresentar um sentido físico no modelo). A Figura 74 ilustra as condições de contorno aplicadas ao modelo.

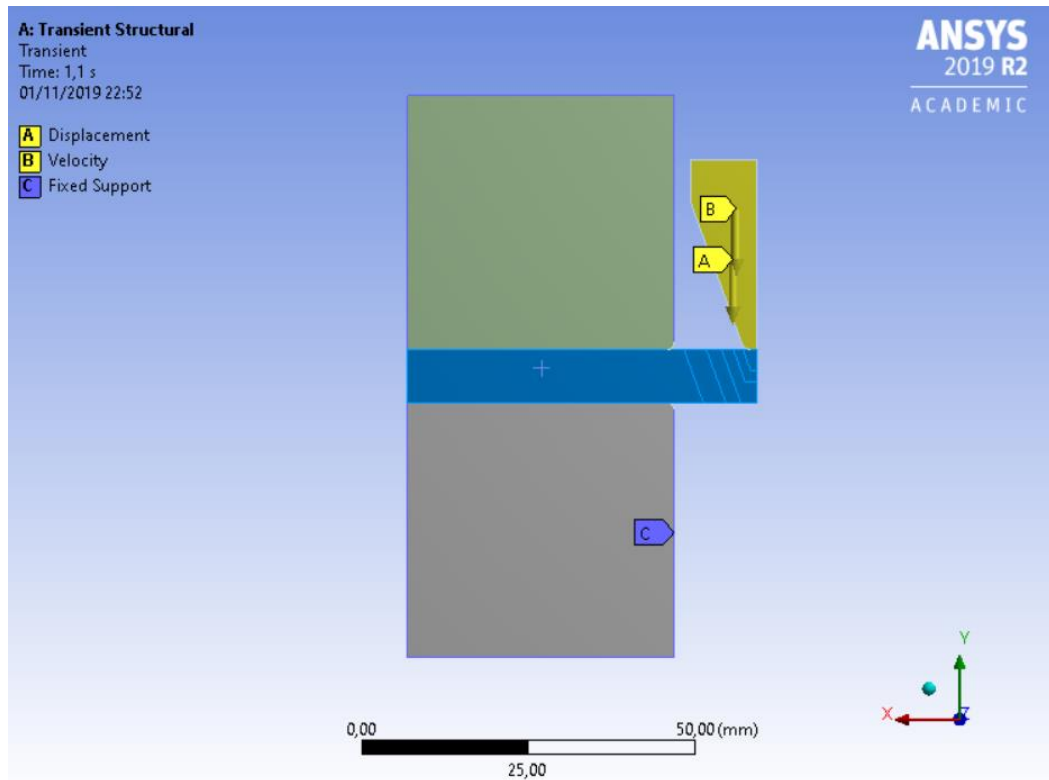


Figura 74: Condições de Contorno

Para considerar as não linearidades geométricas presentes na simulação, conforme descrito na Seção 6.1, ativou-se a opção *Large Deflection*. Além disso, para alcançar a convergência do modelo, diante das grandes distorções de elementos geradas por essa mudança da geometria da amostra, definiu-se um método de solução semi-implícita. Deste modo, a solução do modelo é feita inicialmente através do método implícito convencional, porém, caso a convergência não seja atingida em dado passo de tempo, a solução é alterada para semi-implícita. Este é um método híbrido que apresenta características tanto do método implícito, quando do método explícito, realizando a integração do tempo por diferença central [49]. Para ativar este método, foi adicionado o comando APDL *SEMIIMPLICIT*.

Capítulo 7

7. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos testes realizados em ambas as taxas. Além disso, também serão propostas discussões com base em diferentes aspectos além dos resultados dos testes.

7.1 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos testes realizados (Fig. 75 a 86), descritos na Seção 3, por meio da metodologia apresentada na Seção 4.2. Vale ressaltar que o valor de Energia de Perfuração representado nas curvas Tensão x Deformação é a média entre as Energias encontradas para os 3 testes feitos no material na respectiva velocidade. Além disso, os valores apresentados nos gráficos Tensão x Deformação em mJ/mm^3 também podem ser lidos em MPa.

7.1.1 Testes a 500 mm/min

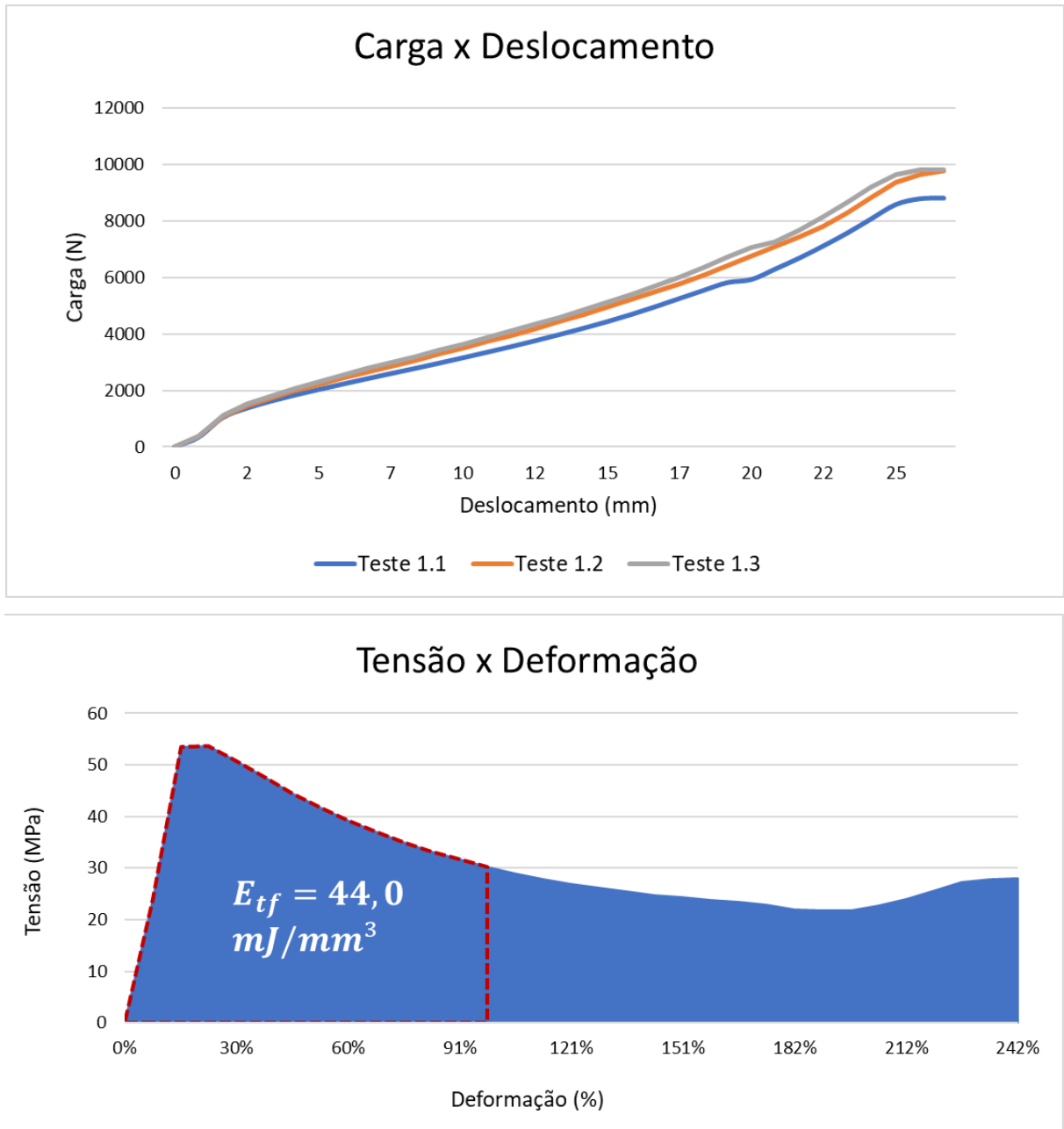
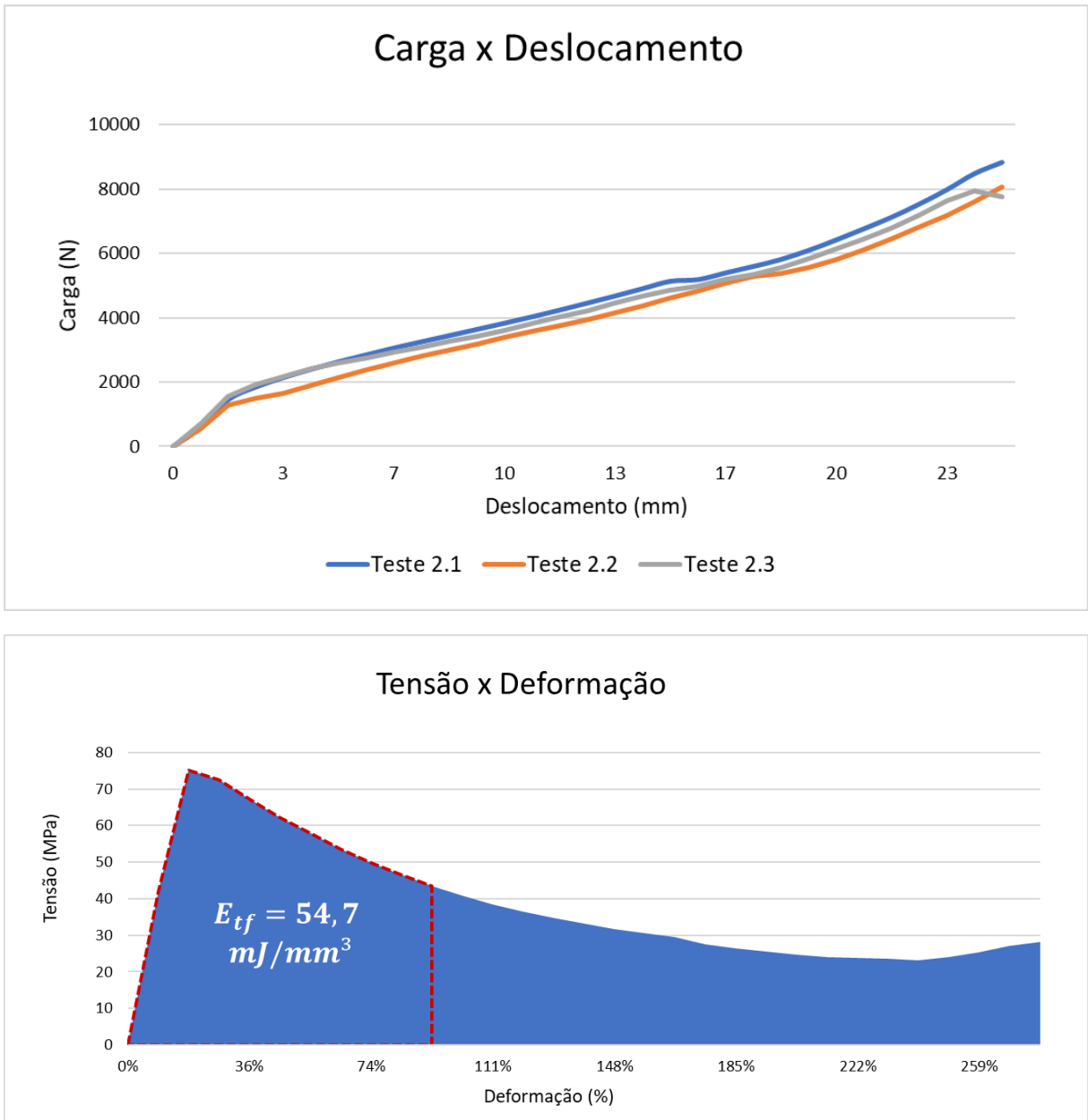


Figura 75: Polímero 1

**Figura 76:** Polímero 2

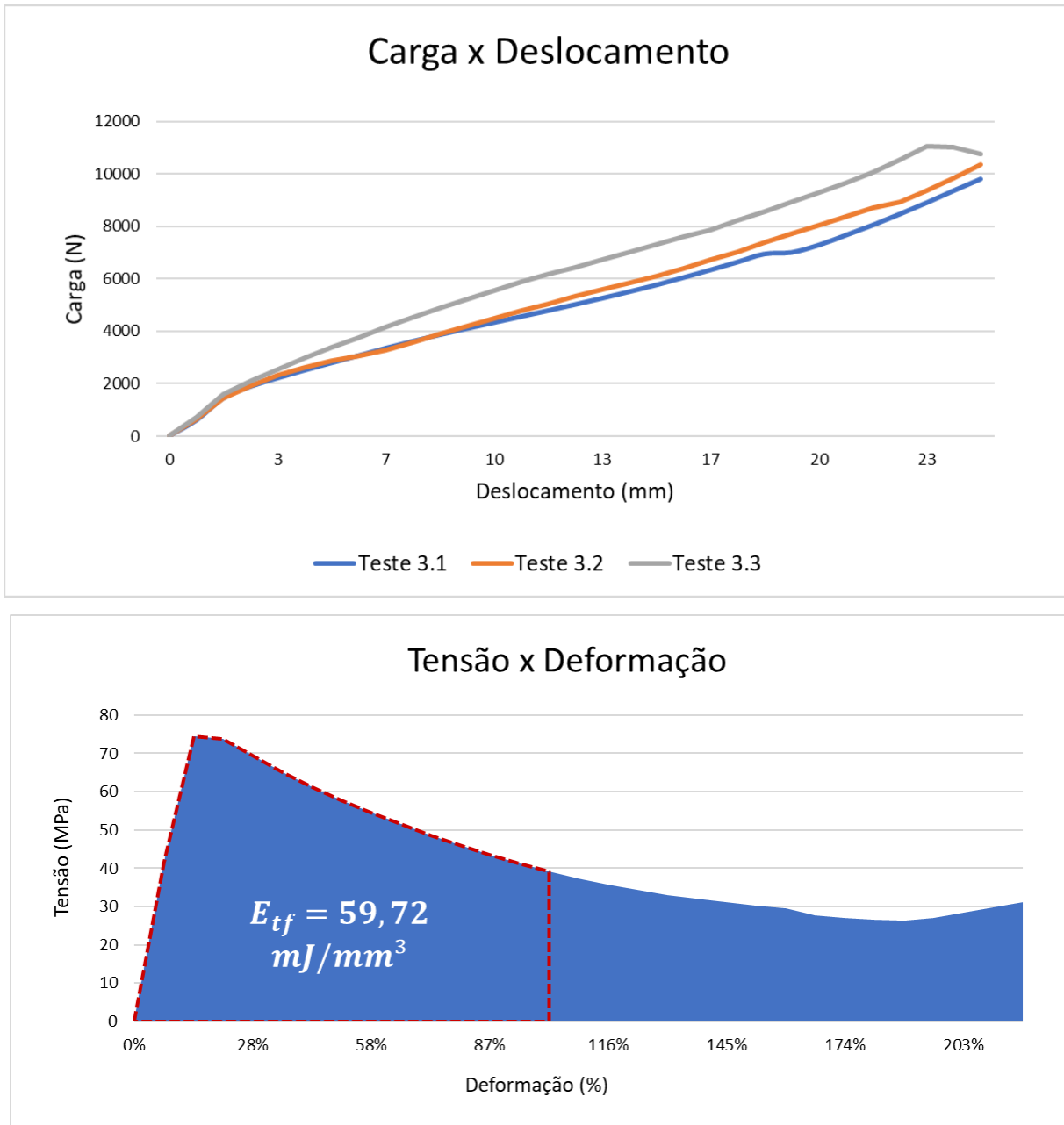


Figura 77: Polímero 3

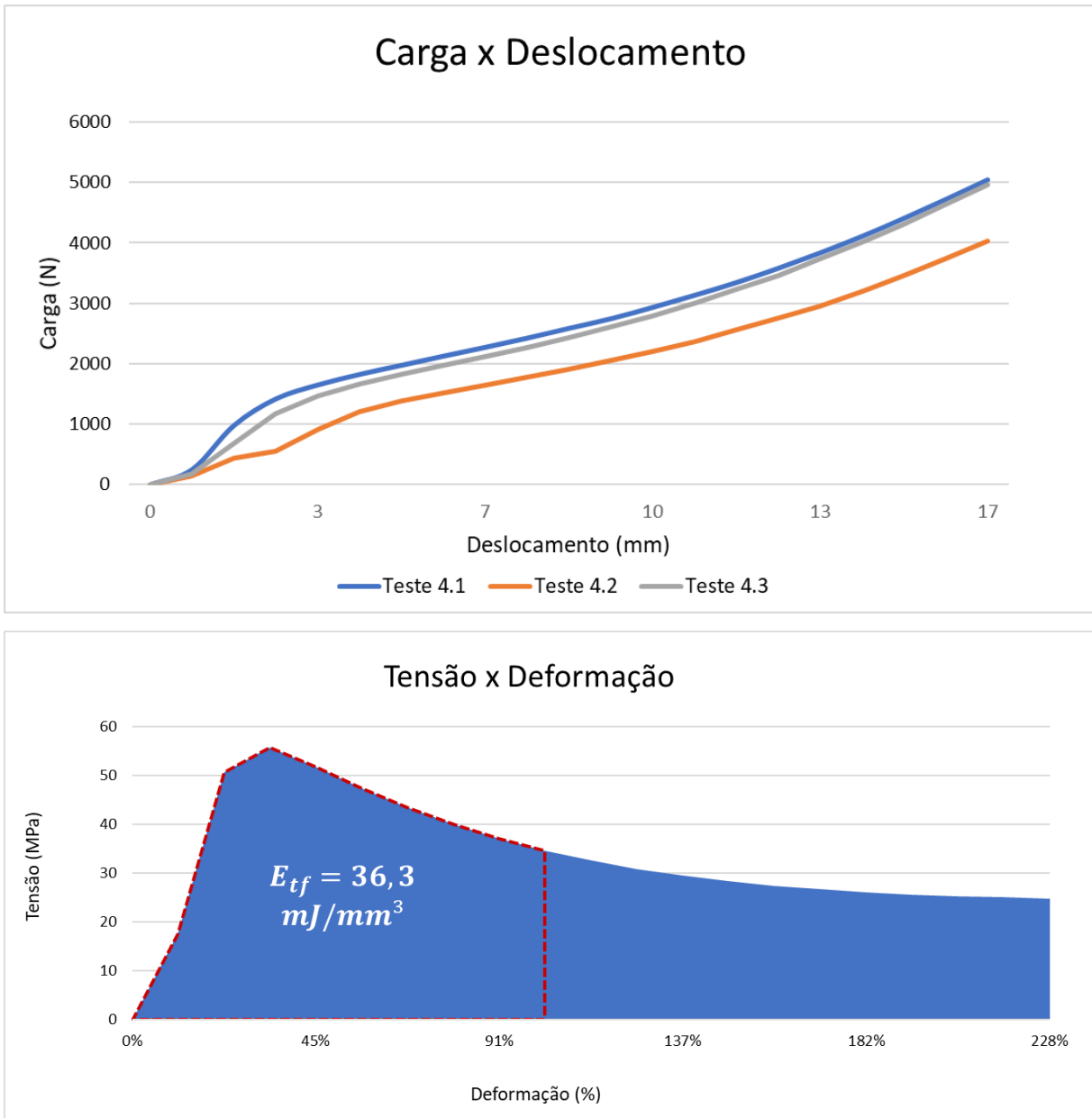
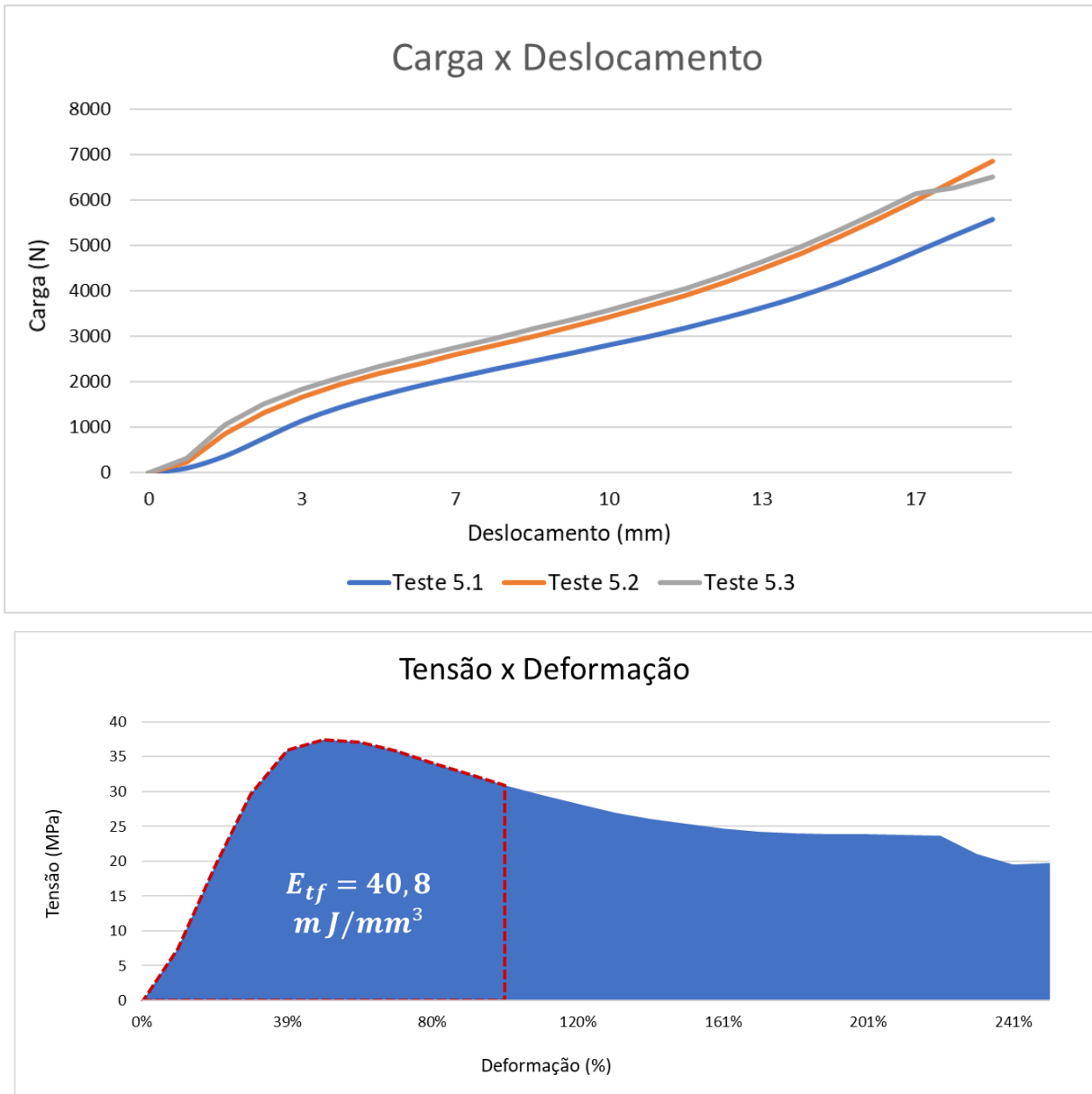


Figura 78: Polímero 4

**Figura 79:** Polímero 5

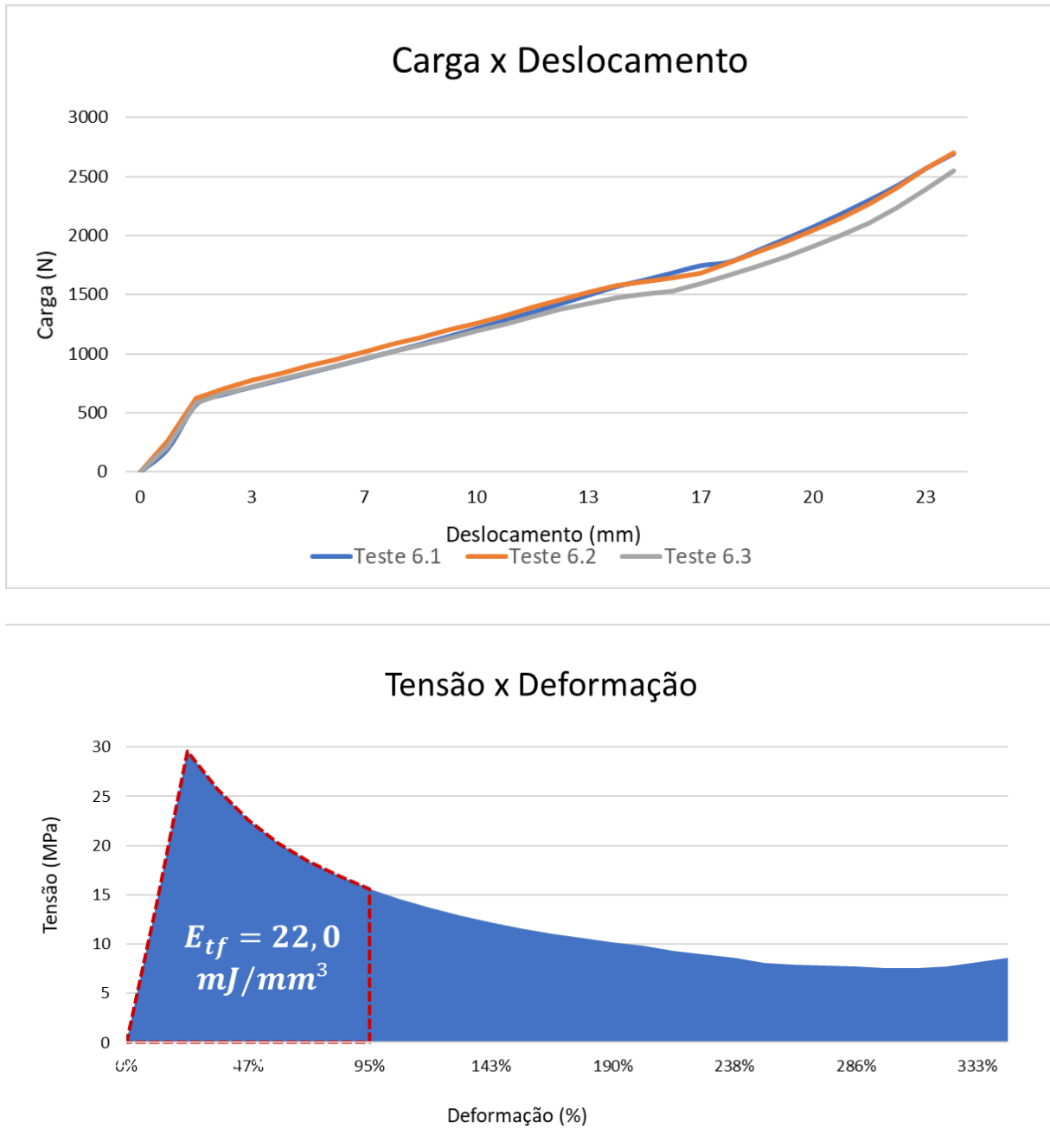


Figura 80: Polímero 6

7.1.2 Testes a 50 mm/min

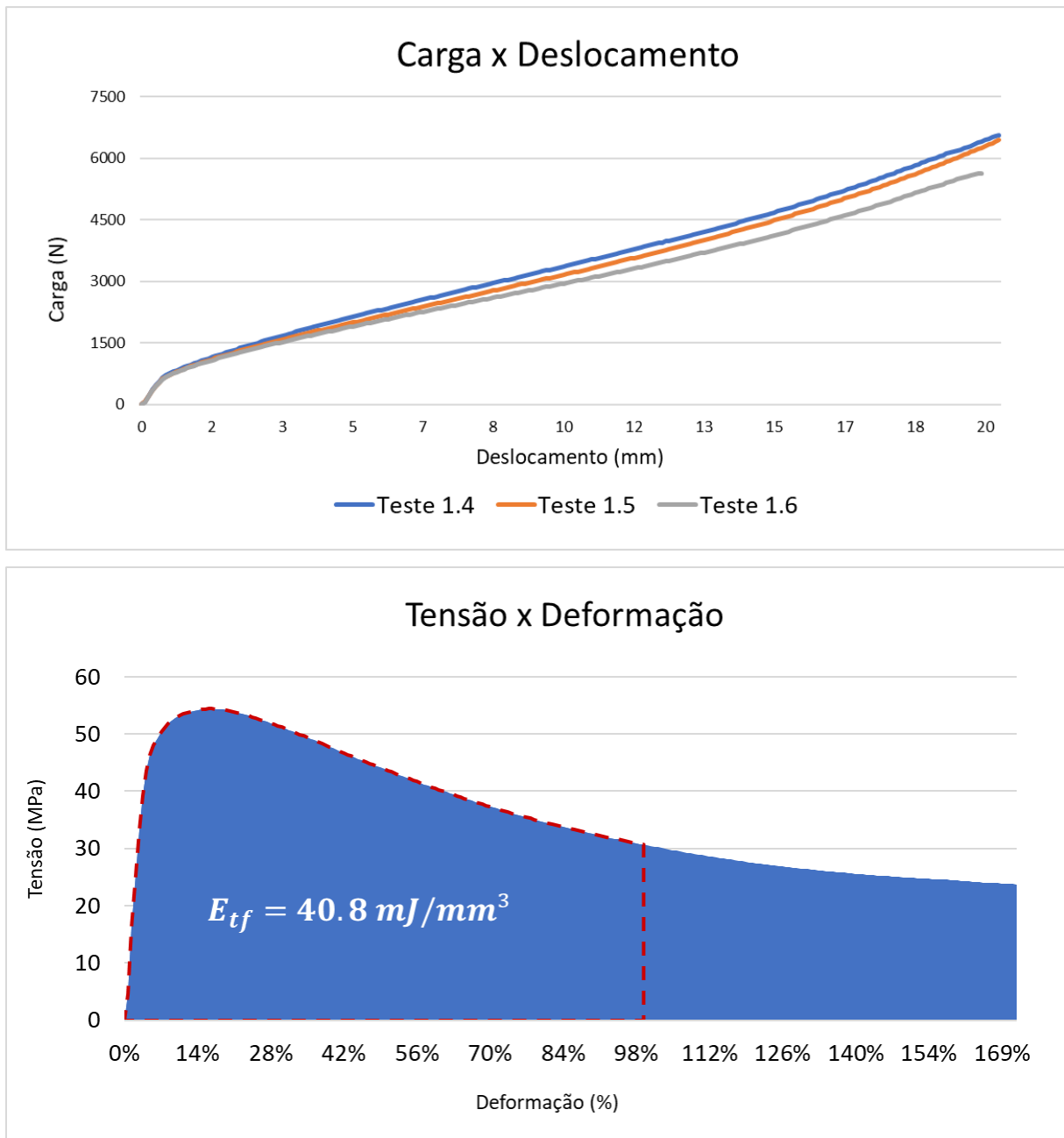


Figura 81: Polímero 1

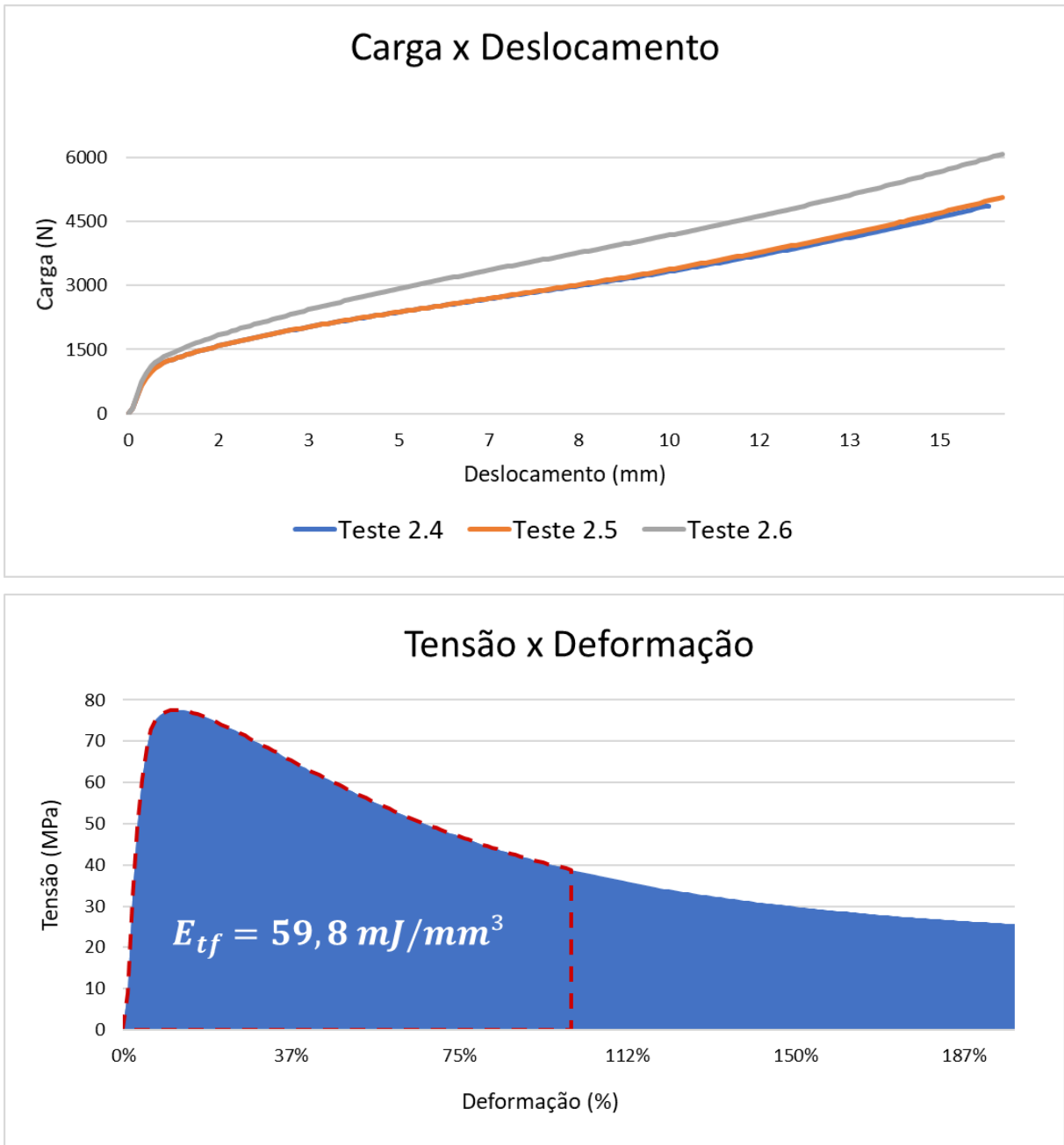


Figura 82: Polímero 2

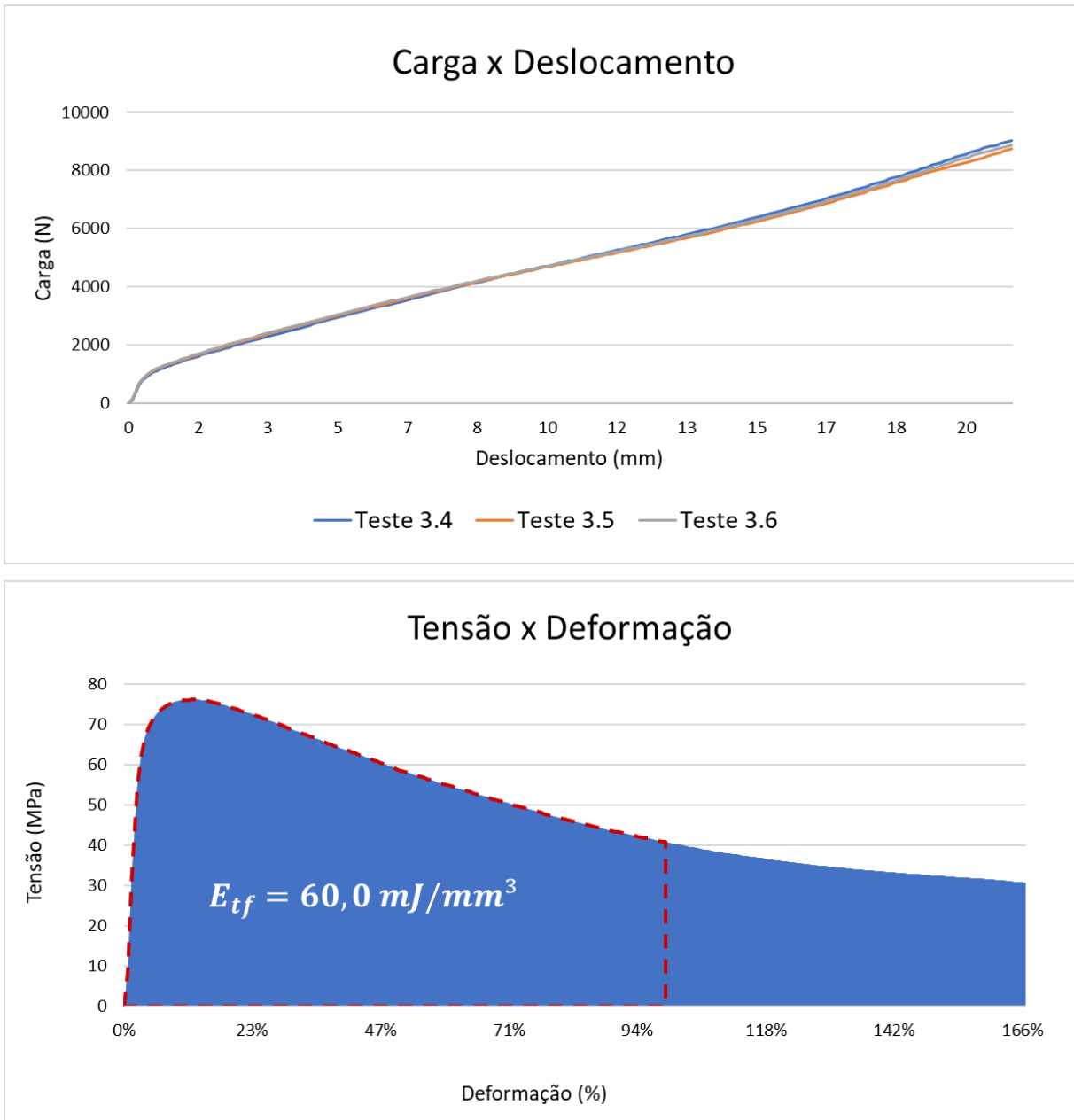


Figura 83: Polímero 3

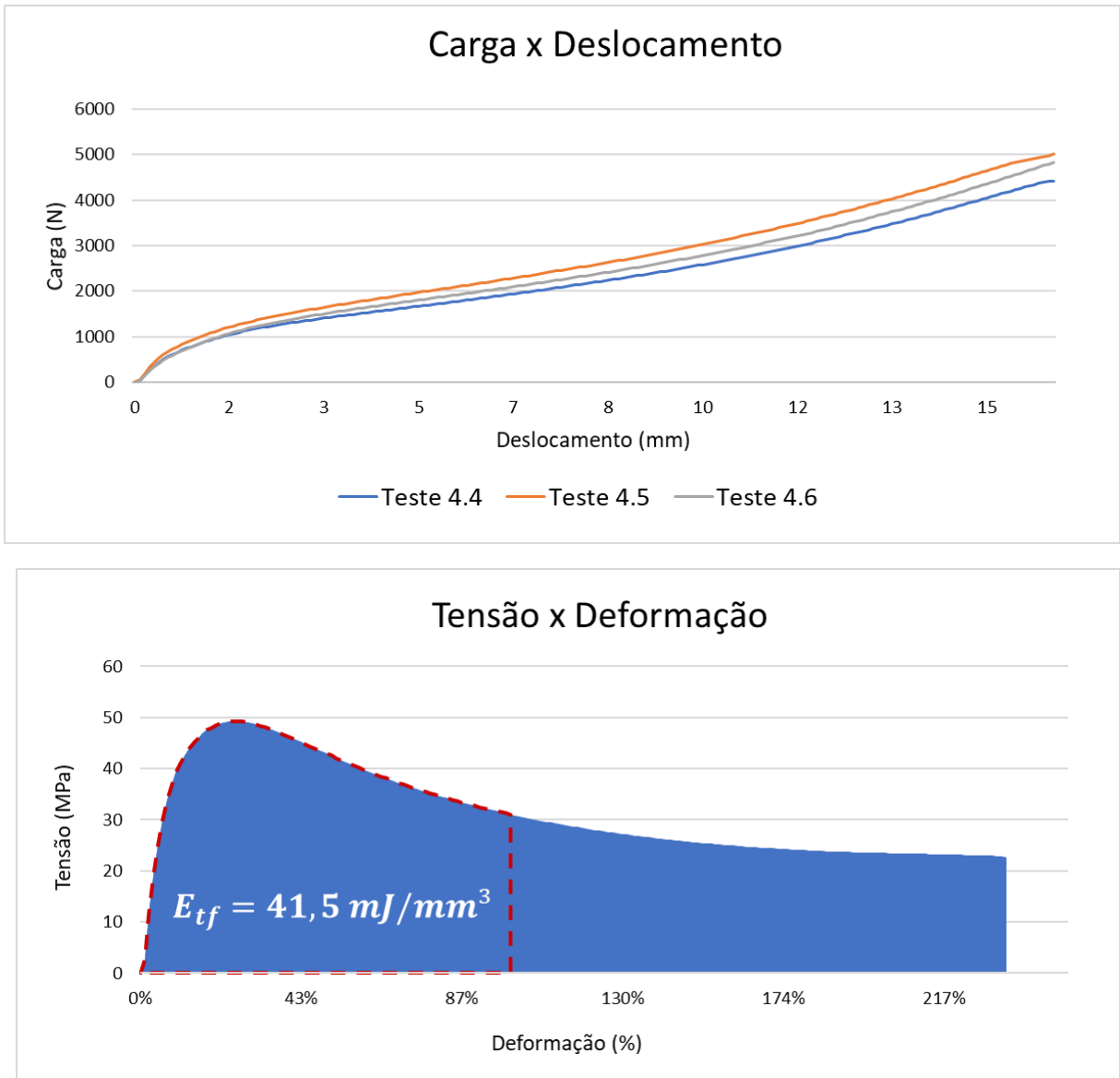


Figura 84: Polímero 4

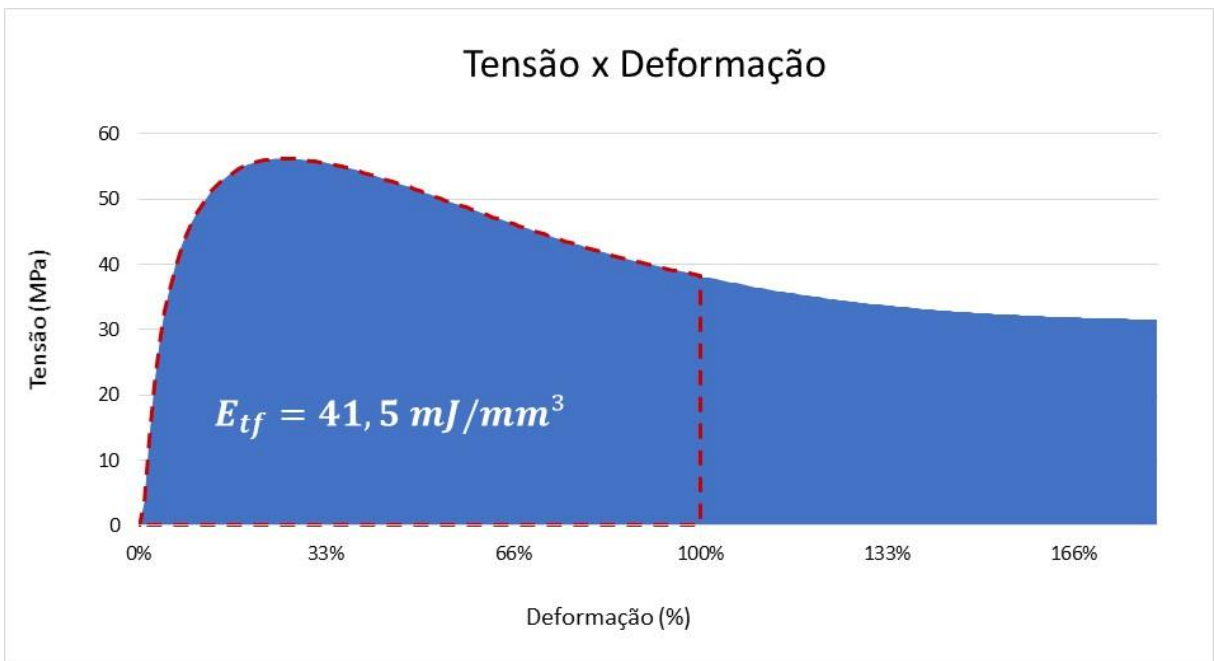
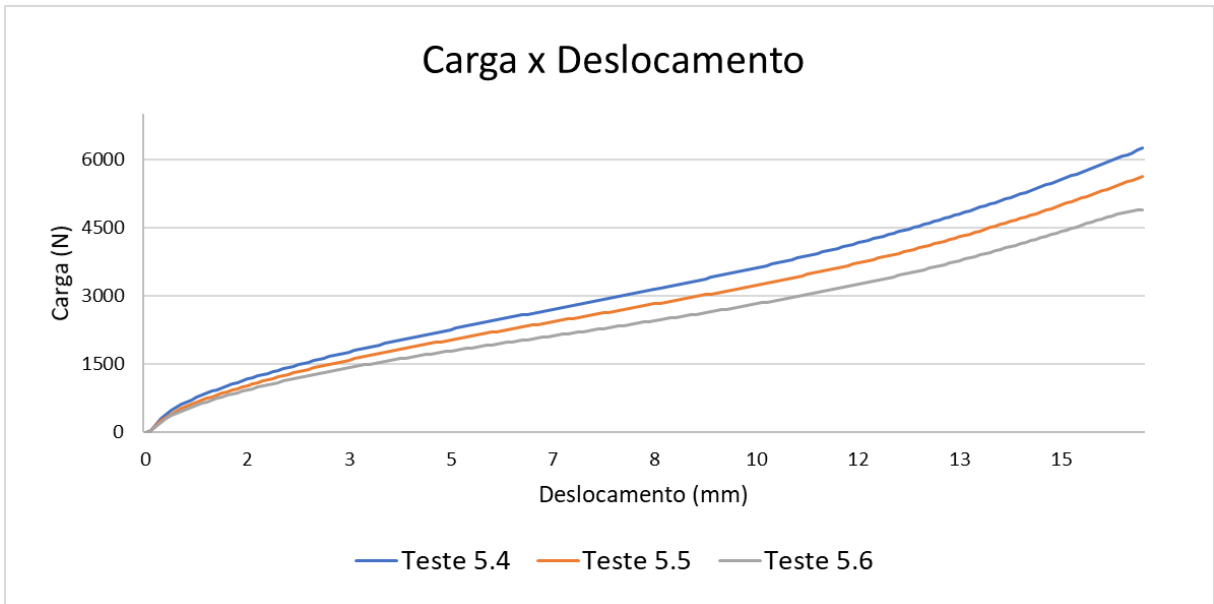


Figura 85: Polímero 5

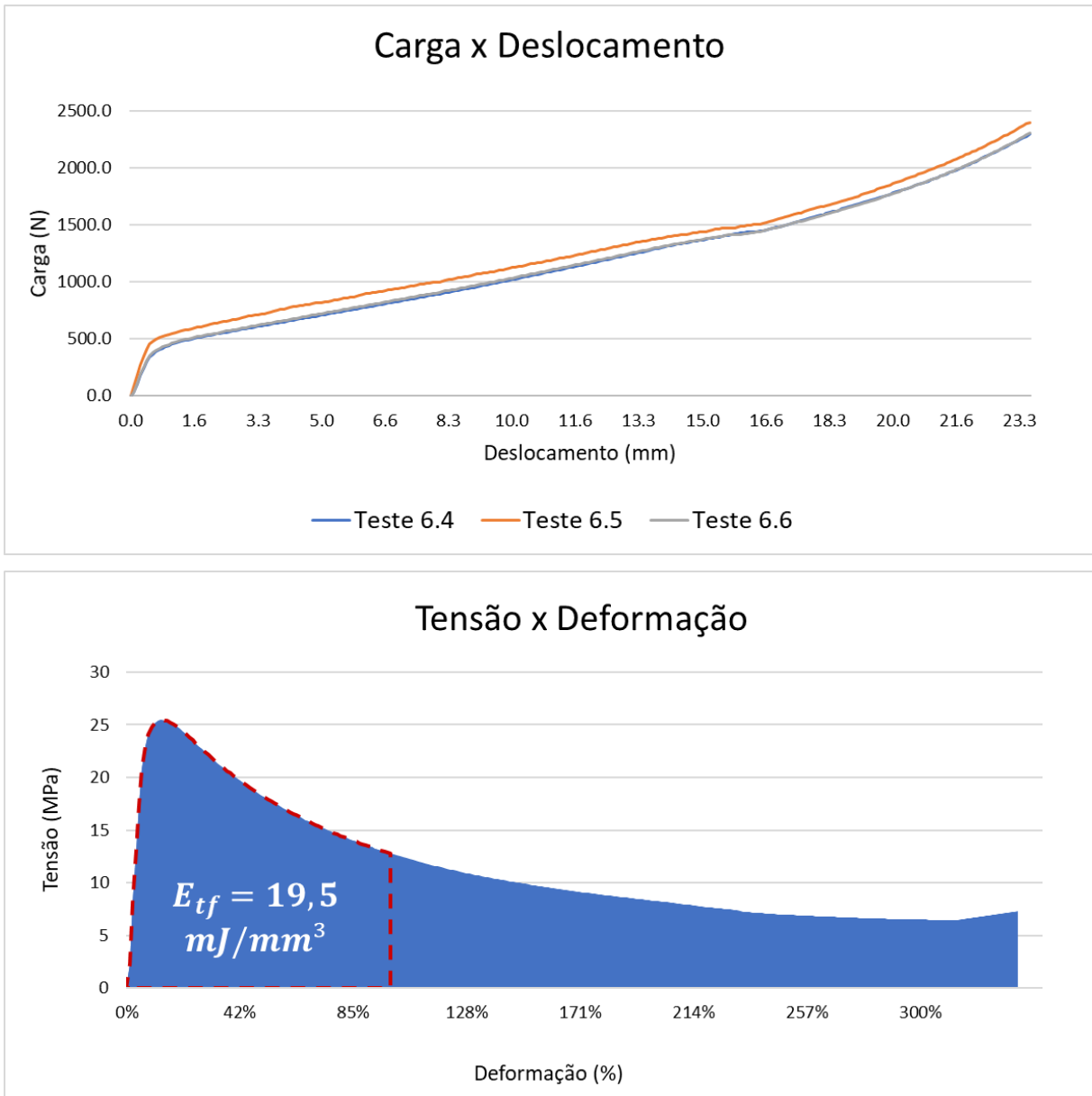


Figura 86: Polímero 6

7.1.3 Resultados Compilados

A maioria dos testes realizados para qualificação de dutos flexíveis é padronizada por normas regulamentadoras do American Petroleum Institute (API), entretanto, nenhuma norma encontrada especifica procedimentos de teste para perfuração em camadas poliméricas. Tais normas especificam que o procedimento de teste deve ser feito com corpos de prova de geometria também padronizada para que os resultados possam ser comparáveis.

No teste de perfuração, as amostras foram retiradas de dutos reais e não fabricadas exclusivamente para a realização do teste, visando a reprodutibilidade da realidade. Além disso, estas foram extraídas de dutos com diferentes estruturas e por isso têm diferentes espessuras. Nota-se nos resultados mostrados nas Seções 7.1.1 e 7.1.2 que espessuras maiores de um mesmo material, ofereceriam uma maior área abaixo do gráfico Tensão x Deformação e consequentemente um maior valor de Energia de Perfuração.

Para normalizar os resultados obtidos, foi decidido que adotar-se-ia um método de padronização por figuras de mérito. Deste modo, os valores de Energia de Perfuração encontrados nos testes foram divididos por suas respectivas espessuras, encontrando Energias de Perfuração Normalizadas em MPa/mm. Vale ressaltar que os valores normalizados encontrados não têm um sentido físico, mas sim servem como medida comparativa de energia absorvida por milímetro de espessura. Na Tabela 24, constam os resultados das Energias normalizadas para os testes realizados a 500 mm/min e na Tab. 25 constam os resultados para os testes realizados a 50 mm/min.

Tabela 24: Resultados de Energia de Perfuração a 500 mm/min

Resultados - 500 mm/min					
Material	Teste#	Energia de Perfuração (MPa)	Espessura (mm)	Energia Normalizada (MPa/mm)	Média (MPa/mm)
Polímero 1	1.1	42.1	11.00	3.8	3.83
	1.2	42.9	11.70	3.7	
	1.3	46.9	11.75	4.0	
Polímero 2	2.1	57.0	9.00	6.3	6.19
	2.2	47.0	9.10	5.2	
	2.3	60.1	8.05	7.5	
Polímero 3	3.1	56.1	11.50	4.9	4.89
	3.2	55.2	12.55	4.4	
	3.3	67.9	12.60	5.4	
Polímero 4	4.1	43.5	7.30	6.0	4.93
	4.2	26.1	7.10	3.7	
	4.3	39.3	7.60	5.2	
Polímero 5	5.1	29.7	8.30	3.6	4.72
	5.2	44.3	8.75	5.1	
	5.3	48.6	8.80	5.5	
Polímero 6	6.1	21.4	7.00	3.1	3.15
	6.2	23.3	7.00	3.3	
	6.3	21.5	7.00	3.1	

Tabela 25: Resultados de Energia de Perfuração a 50 mm/min

Resultados - 50 mm/min					
Material	Teste#	Energia de Perfuração (MPa)	Espessura (mm)	Energia Normalizada (MPa/mm)	Média (MPa/mm)
Polímero 1	1.4	42.3	11.85	3.6	3.64
	1.5	40.6	11.30	3.6	
	1.6	39.5	10.55	3.7	
Polímero 2	2.4	57.1	8.00	7.1	7.07
	2.5	57.2	8.00	7.1	
	2.6	65.1	9.40	6.9	
Polímero 3	3.4	58.2	12.67	4.6	4.94
	3.5	60.6	11.95	5.1	
	3.6	61.3	11.90	5.1	
Polímero 4	4.4	39.3	6.90	5.7	5.61
	4.5	44.9	7.80	5.8	
	4.6	40.4	7.50	5.4	
Polímero 5	5.4	46.8	9.00	5.2	4.54
	5.5	39.7	11.55	3.4	
	5.6	38.1	7.65	5.0	
Polímero 6	6.4	18.2	7.00	2.6	2.78
	6.5	21.7	7.00	3.1	
	6.6	18.5	7.00	2.6	

7.1.4 Amostras após a Perfuração

Nesta seção, são apresentadas imagens das amostras após a perfuração. Podemos observar que a deformação imposta pela indentação é majoritariamente plástica, uma vez que permanece na amostra uma “impressão” do punção em formato cônico, havendo retorno elástico quase nulo. Esta hipótese será confirmada na seção referente à discussão sobre a análise numérica feita. As Figuras 87 a 92 mostram cada polímero perfurado, em vista superior.

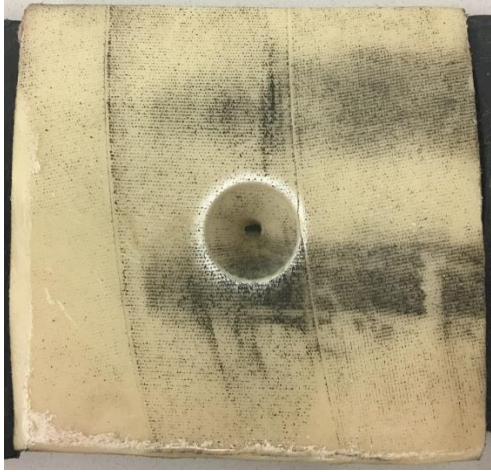


Figura 87: Polímero 1

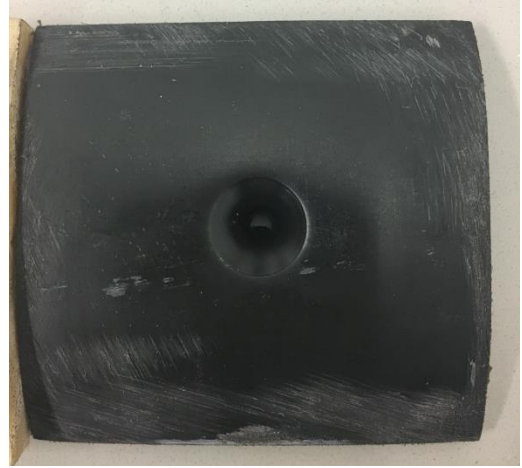


Figura 90: Polímero 4

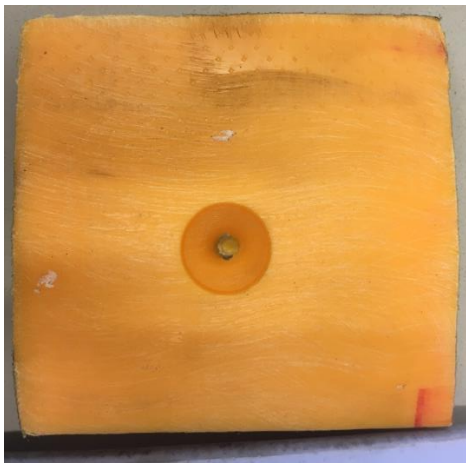


Figura 88: Polímero 2

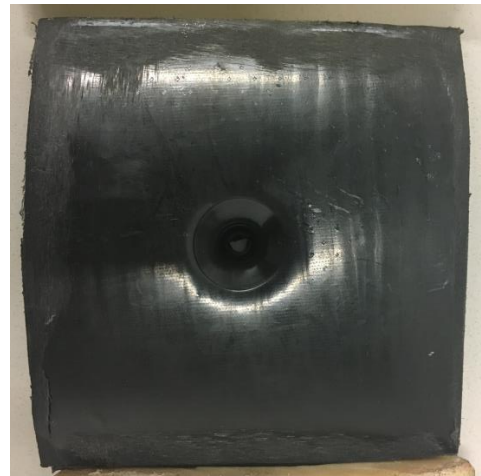


Figura 91: Polímero 5



Figura 89: Polímero 3

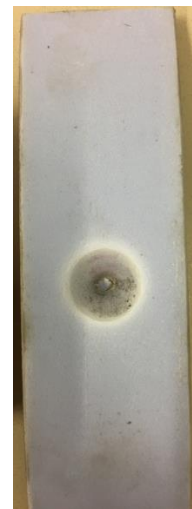


Figura 92: Polímero 6

7.2 Discussão

Nesta seção serão analisados os resultados apresentados na Seção 7.1 com base em diferentes perspectivas.

7.2.1 Discussão Sobre os Resultados dos Testes

De acordo com os resultados apresentados na Seção 7.1 e observando a Fig. 93, pode-se entender que considerando somente o valor de Energia de Perfuração normalizada e analisando-o comparativamente, como proposto desde o início do projeto, o Polímero 2 consegue absorver a maior quantidade de energia por milímetro de espessura dentre os materiais testados em ambas as velocidades, transmitindo assim, menos energia para a capa externa do que os outros materiais testados.

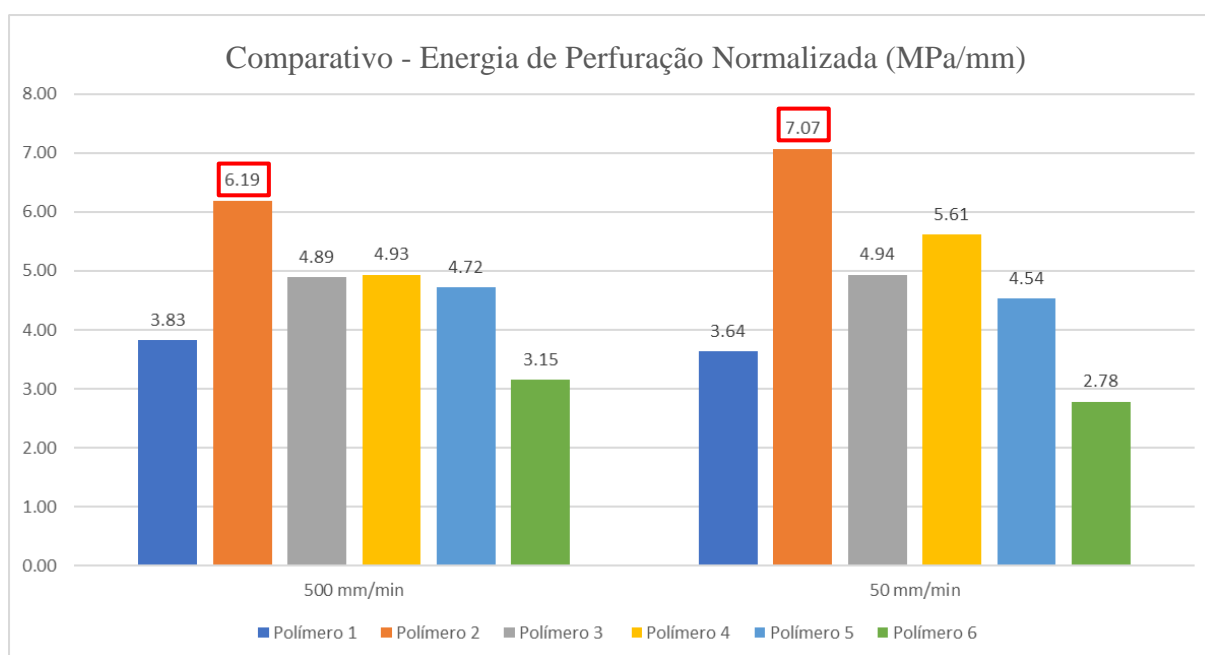


Figura 93: Energia de Perfuração – Estudo comparativo

Portanto, considerando apenas esta propriedade, o Polímero 2 seria o mais adequado para ser utilizado como camada de reforço a capa externa. Entretanto, algumas outras análises devem ser feitas antes dessa conclusão. As Seções 7.2.2 a 7.2.5 abordam algumas outras discussões que podem influenciar na definição do material mais apropriado.

7.2.2 Discussão Comparativa entre Velocidades

Esta seção abordará uma discussão comparativa entre os resultados obtidos em testes realizados a velocidades de uma ordem de grandeza de diferença entre si. Como já dito, as velocidades testadas foram 500 mm/min e 50 mm/min, objetivando entender a influência desse parâmetro na resposta do material. A Figura 94 mostra um estudo comparativo dos resultados de Energia de Perfuração normalizados obtidos nos testes feitos em um mesmo polímero nas duas velocidades diferentes.

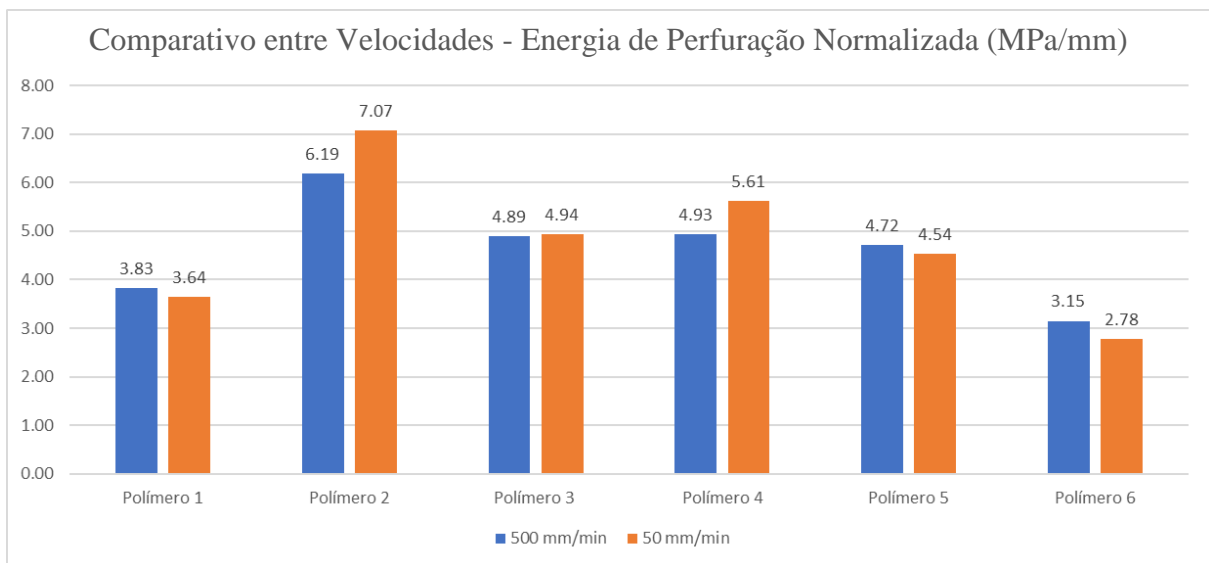


Figura 94: Comparativo da Energia de Perfuração normalizada em diferentes velocidades

Ao observar este gráfico, nota-se que não houve um padrão seguido nos resultados, ou seja, alguns polímeros tiveram maiores valores de Energia de Perfuração a 500 mm/min e outros tiveram maiores valores desta propriedade à 50 mm/min. Deste modo, decidiu-se reanalisar os testes feitos, visando uma melhor compreensão dos resultados obtidos. Assim, foi possível observar que em alguns gráficos de Carga x Deslocamento, nos quais foram plotados os resultados dos 3 testes feitos em cada velocidade, pode ter acontecido uma falha prematura nos materiais resultando em disparidade em um dos testes feitos em um mesmo material em relação aos outros dois, afetando consideravelmente a média das Energias.

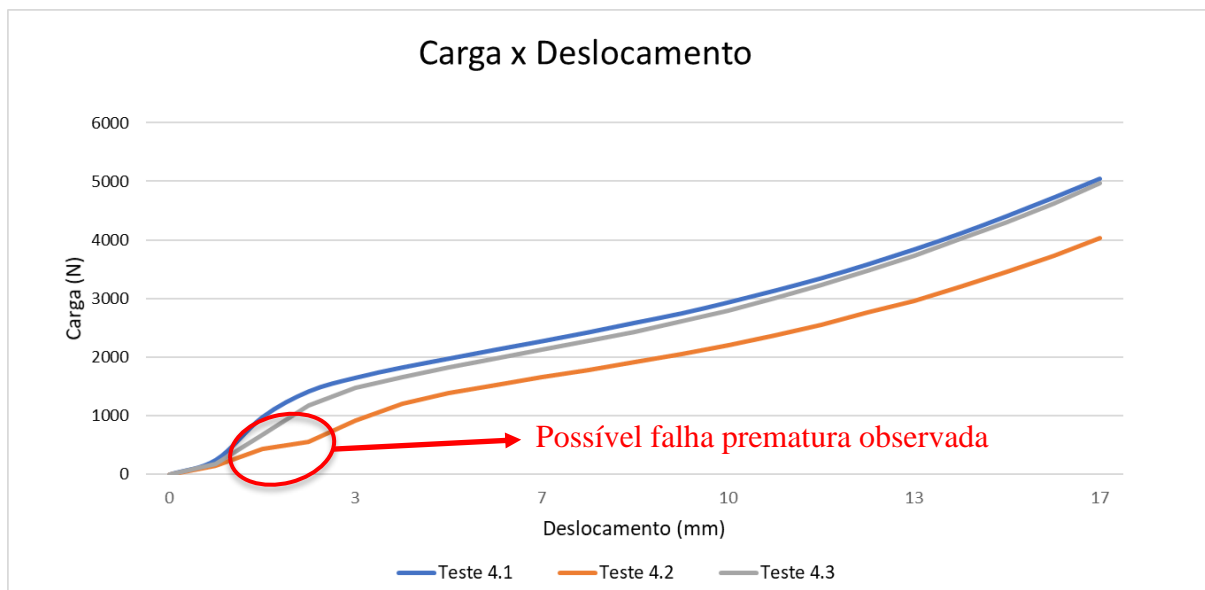


Figura 95: Falha Prematura no Teste 4.2

Para ilustrar a suposição comentada acima, pode-se observar que no gráfico da Fig. 95, é de fácil visualização a disparidade entre o Teste 4.2 e os outros dois testes, o que nos leva a entender que no ponto de deslocamento igual a 1.33 mm pode ter ocorrido uma falha prematura no material. Sendo assim, uma possível abordagem de interpretação dos resultados pode ser feita excluindo, dos 3 testes feitos em cada material, aquele que apresentou um desvio de comportamento em relação aos outros dois. Deste modo, obtemos o resultado da Fig. 96.

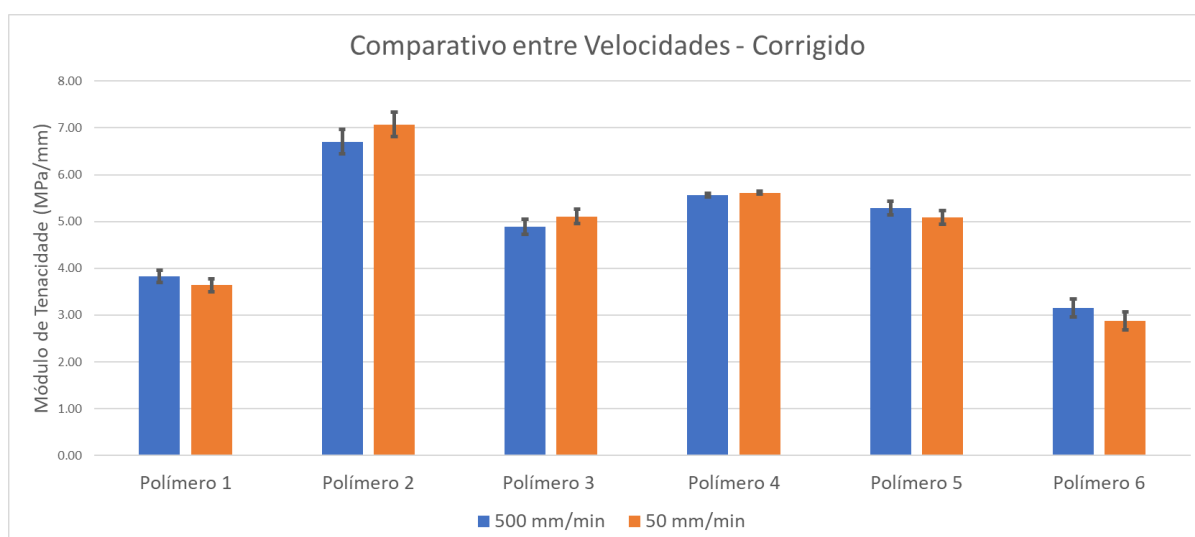


Figura 96: Comparativo da Energia de Perfuração em diferentes velocidades – Corrigido

Analisando os novos resultados corrigidos, observamos que os valores de Energia de Perfuração são pouco maiores a velocidade de 50 mm/min do que estes mesmos valores a 500 mm/min para os Polímeros 2, 3 e 4, enquanto que para os Polímeros 1, 5 e 6, ocorre o contrário.

Além disso, através do cálculo do desvio padrão, representado na Fig. 96 pelos indicadores em preto, é possível observar que as diferenças entre as Energias de Perfuração dos polímeros em diferentes velocidades são mínimas enquanto a velocidade varia em uma ordem de grandeza. Ao analisar o gráfico da Fig. 96, observa-se que o Polímero 2 foi o que apresentou maior desvio padrão com 0.26 MPa/mm (Tab. 26), assim pode-se concluir que a Energia de Perfuração por milímetro de espessura foi praticamente insensível à alteração da velocidade dos testes.

Tabela 26: Desvio padrão entre os resultados de 500 e 50 mm/min

Material	Resultados 500 mm/min (MPa/mm)	Resultados 50 mm/min (MPa/mm)	Desvio Padrão (MPa/mm)
Polímero 1	3.83	3.64	0.14
Polímero 2	6.70	7.07	0.26
Polímero 3	4.89	5.11	0.16
Polímero 4	5.56	5.61	0.04
Polímero 5	5.29	5.09	0.14
Polímero 6	3.15	2.88	0.19

Uma importante consideração a ser feita é que todos os polímeros testados e utilizados na fabricação de dutos flexíveis são termoplásticos (classificação quanto a fusibilidade dos polímeros). Este fato se justifica pela necessidade de moldabilidade durante a extrusão, propriedade característica desta classificação polimérica. De acordo com [36], os polímeros termoplásticos podem sofrer fraturas dúcteis ou frágeis, sendo as fraturas frágeis mais susceptíveis a altas taxas de deformação. Com base nisso, também podemos observar que todos os gráficos apresentados na Seção 7.1.1 (500 mm/min), por terem sido realizados a uma maior taxa de deformação, oferecem menos tempo para que as tensões se distribuam ao longo da estrutura da amostra e como resultado ocorre uma fratura mais frágil. Já os gráficos apresentados na Seção 7.1.2 (50 mm/min), por terem sido feitos a uma velocidade de uma ordem de grandeza menor dão mais tempo para que as tensões se distribuam na estrutura da amostra, resultando em uma fratura mais dúctil.

Estes modos de falha podem ser observados na Fig. 97, que compara os gráficos Tensão x Deformação nas duas velocidades para o Polímero 2.

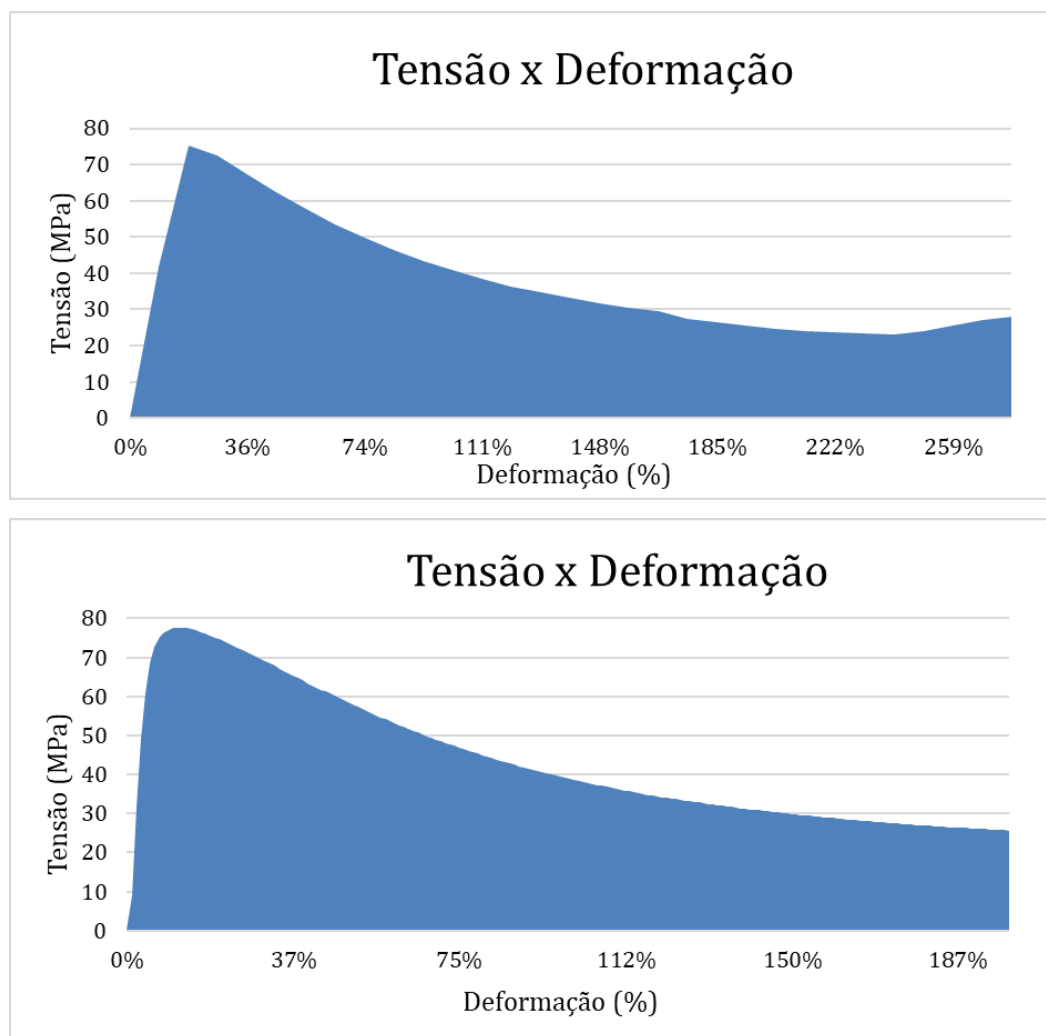


Figura 97: Gráficos Tensão x Deformação do Polímero 2 em diferentes taxas de deformação, 500 mm/min (imagem superior) e 50 mm/min (imagem inferior)

O gráfico de 500 mm/min apresenta um pico de tensão, enquanto o gráfico de 50 mm/min mostra uma transição suave no momento de tensão máxima. Segundo [54], este pico se explica pelo comportamento vítreo de materiais poliméricos a baixas temperaturas e altas taxas de deformação. A Figura 98 mostra a influência desses fatores na curva Tensão x Deformação de polímeros.

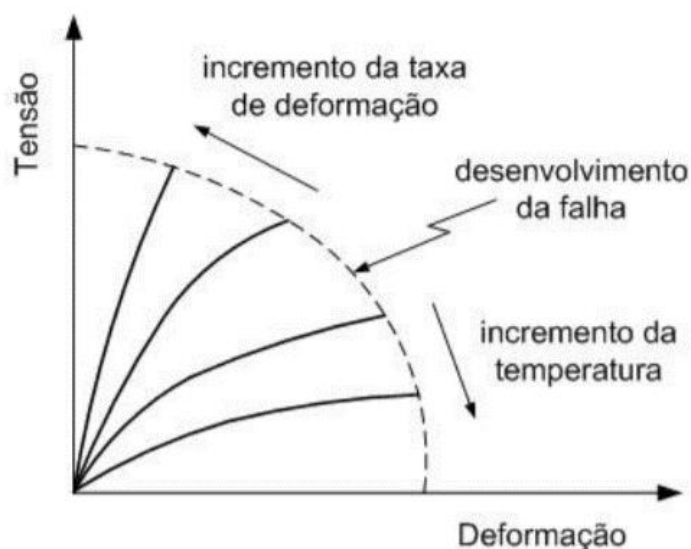


Figura 98: Possíveis variações na curva Tensão x Deformação [54]

7.2.3 Discussão Sobre o Modo de Falha

Nesta seção será abordada a discussão sobre o modo de falha que gerou falhas microscópicas na estrutura polimérica de um dos materiais testados. Este mecanismo ocorreu em 3 etapas: o deslocamento de planos microscópicos devido ao rompimento de partes amorfas que os sustentam em posição paralela entre si, o posterior escoamento destes planos e por fim sua fratura também em regiões amorfas, de menor resistência. A Figura 99 mostra o gráfico Tensão x Deformação verdadeira para diferentes classificações de polímeros quanto ao seu comportamento mecânico. Ao compará-la com a Fig. 100, podemos observar que a curva Tensão x Deformação verdadeira do Polímero 2 é típica de plásticos flexíveis termoplásticos. Para a obtenção da curva Tensão x Deformação verdadeira do teste realizado no Polímero 2 é necessário considerar a deformação que ocorre de forma incremental, atualizando a área da secção transversal em função do alongamento do material. Para isso, convertamos a curva deste polímero em Tensão Verdadeira (σ_t) x Deformação Logarítmica (ϵ_l), através das Eq. 29 e 30 [36].

$$\epsilon_l = \ln(1 + \epsilon) \quad (29)$$

$$\sigma_t = \sigma(1 + \epsilon) \quad (30)$$

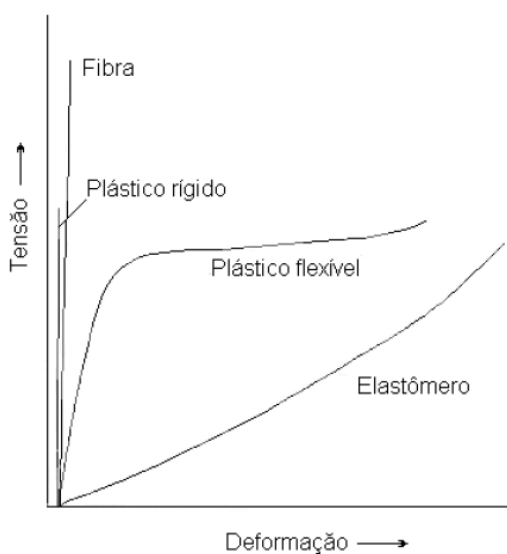


Figura 99: Curva Tensão x Deformação Verdadeira para diferentes comportamentos mecânicos [37]

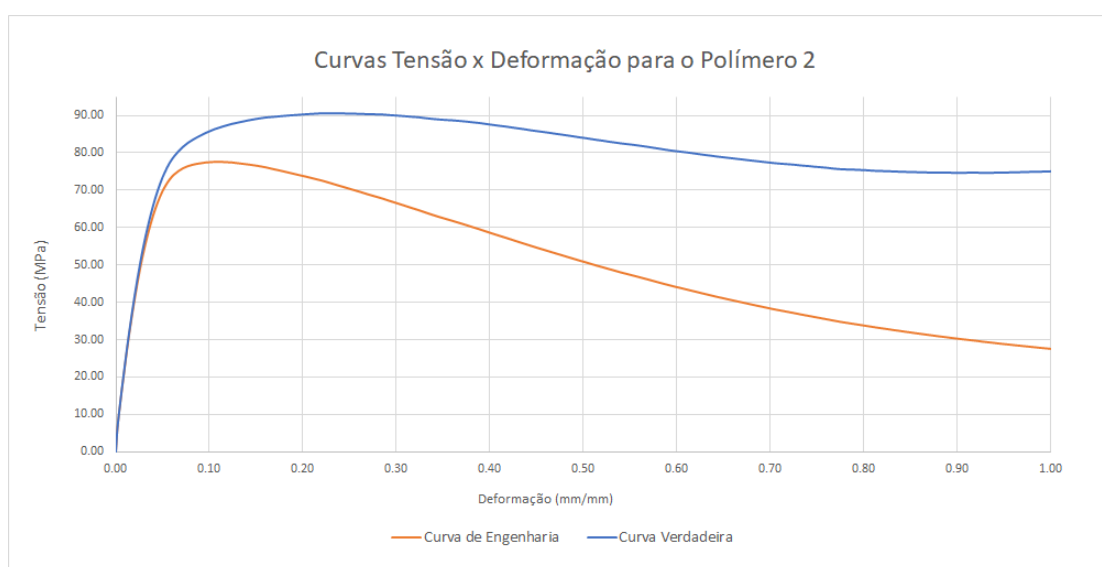


Figura 100: Curvas Tensão x Deformação para o Polímero 2 (Teste 2.4)

7.2.3.1 Discussão Microestrutural

Visando a melhor compreensão do modo de falha obtido no teste, foi decidido eleger um dos materiais para a realização de uma análise microestrutural utilizando um Microscópio Eletrônico por Varredura (MEV). O Polímero 2 foi o escolhido para a realização dessa análise por ter sido o material que mais absorveu energia por unidade de volume durante sua deformação, se tornando um forte candidato a material de reforço para a capa externa. As Figuras 101 a 107 ilustram os registros microestruturais obtidos pelo MEV nas respectivas ampliações: tamanho real da amostra, 27X, 50X, 100X, 300X, 500X e 1000X.

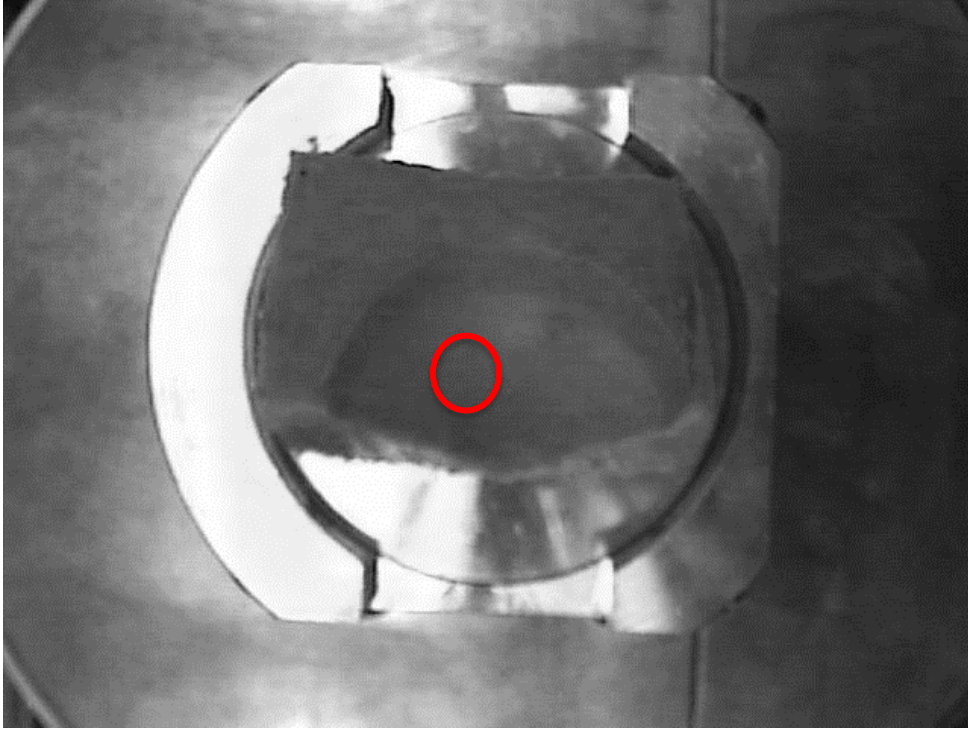


Figura 101: Tamanho real da amostra e indicação da área analisada

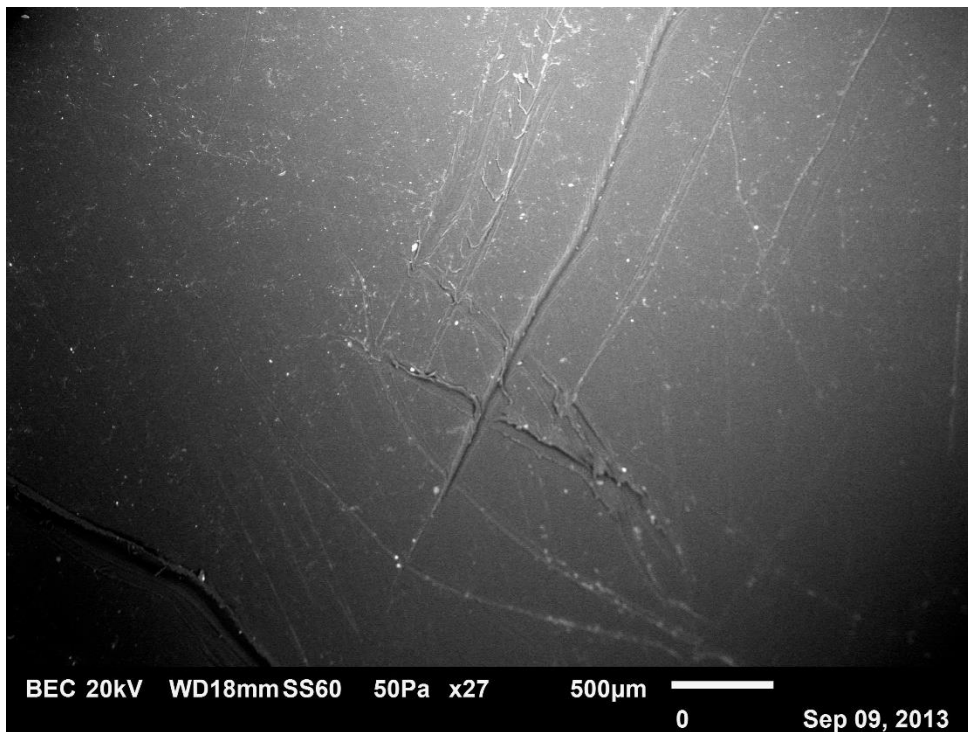


Figura 102: Ampliação de 27X

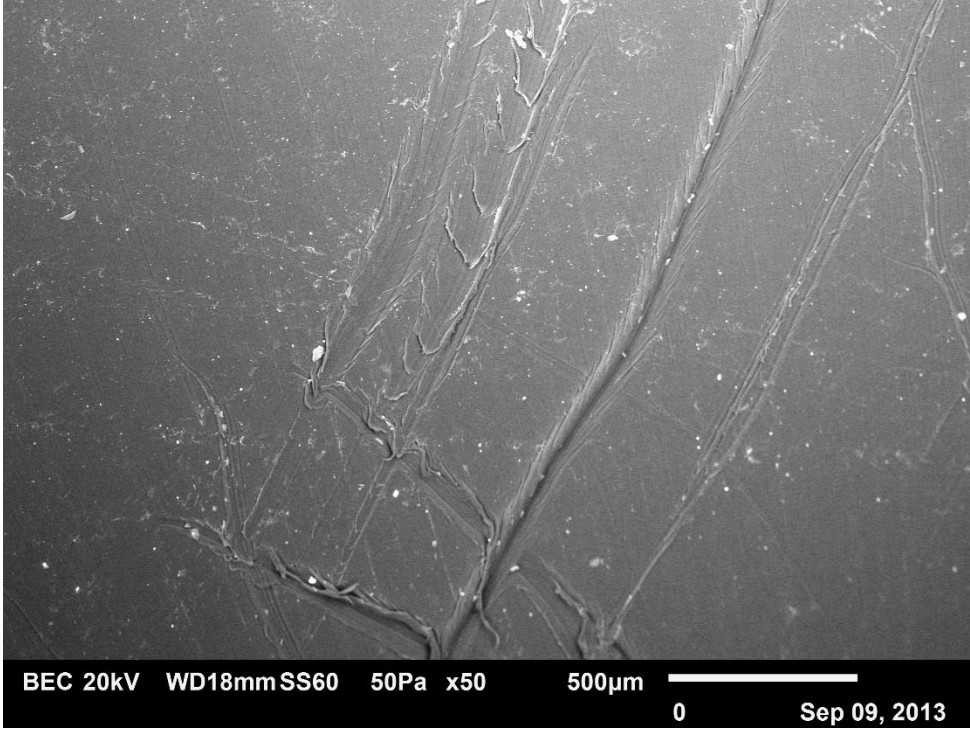


Figura 103: Ampliação de 50X

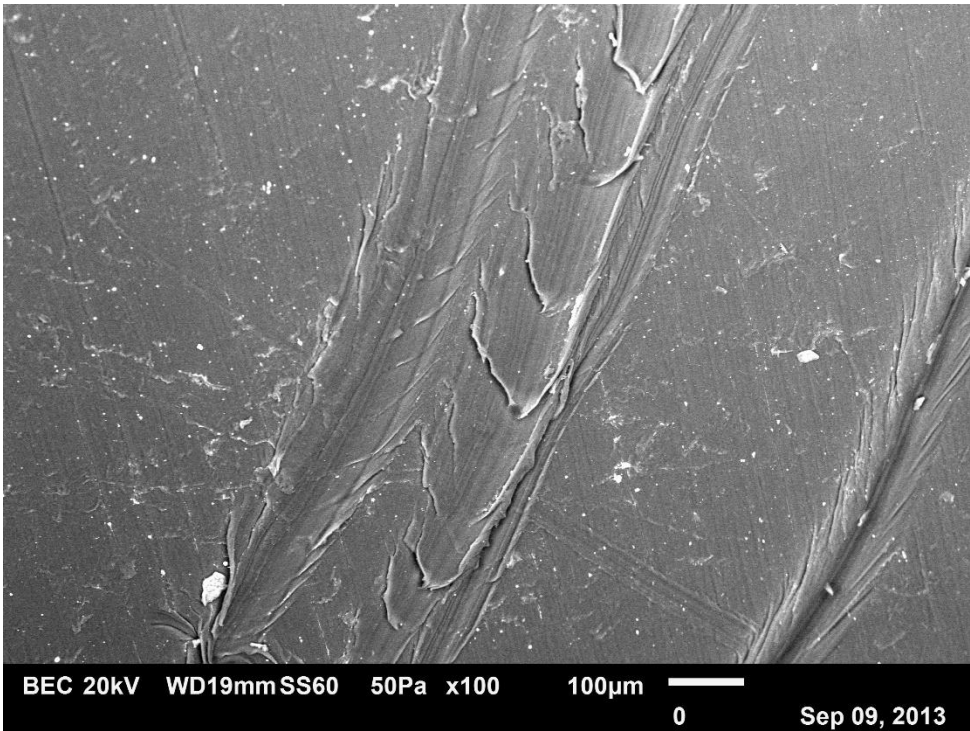


Figura 104: Ampliação de 100X

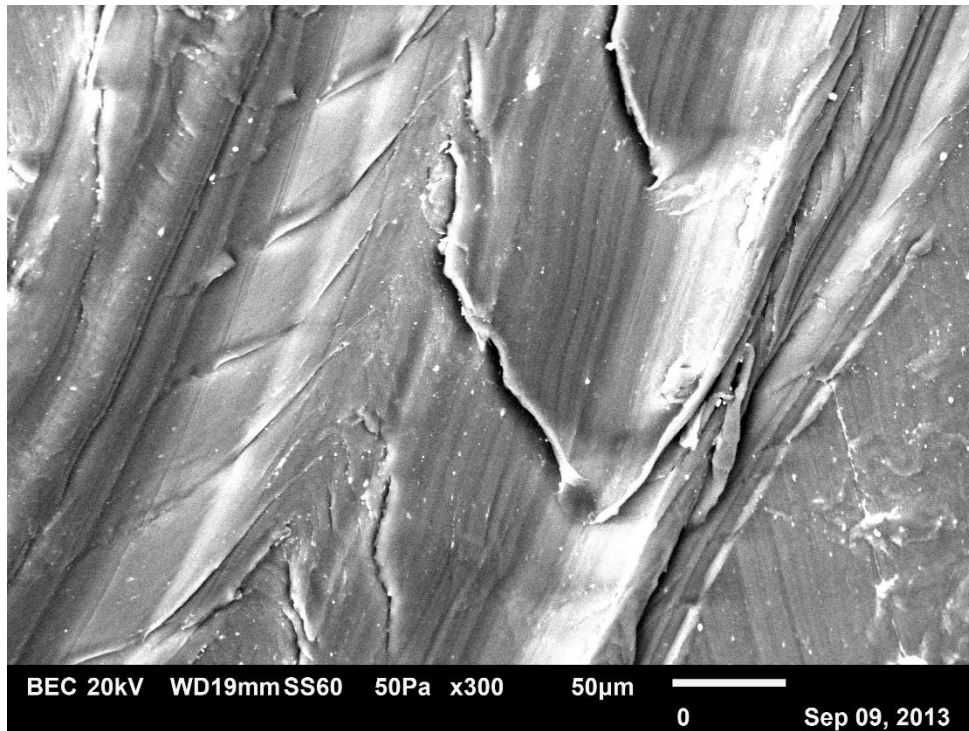


Figura 105: Ampliação de 300X

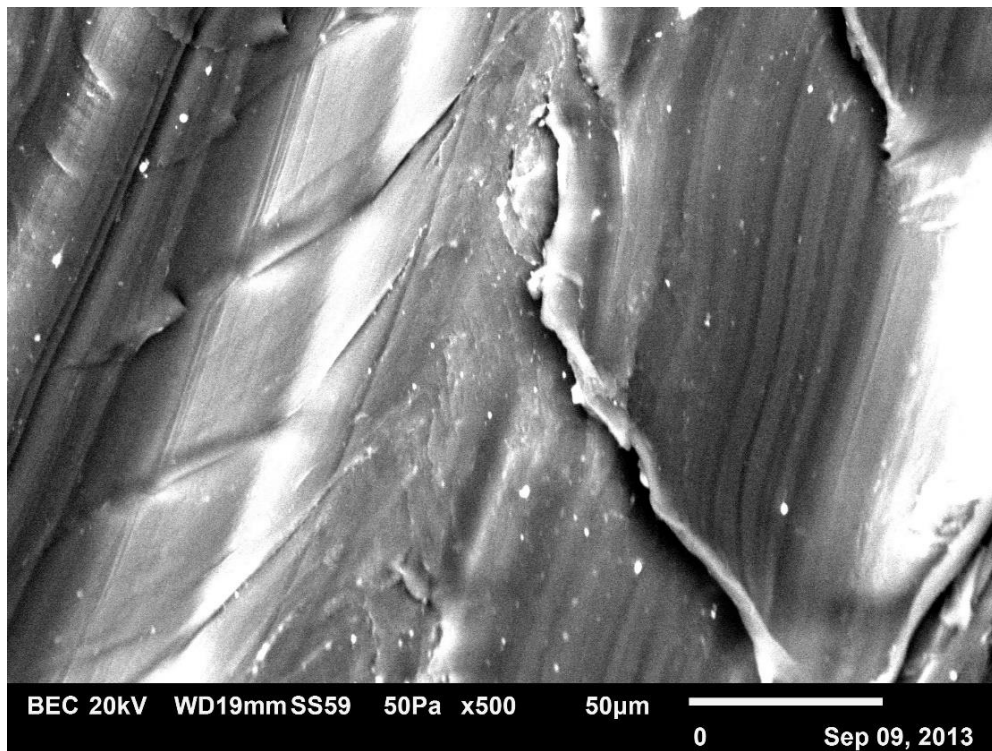


Figura 106: Ampliação de 500X

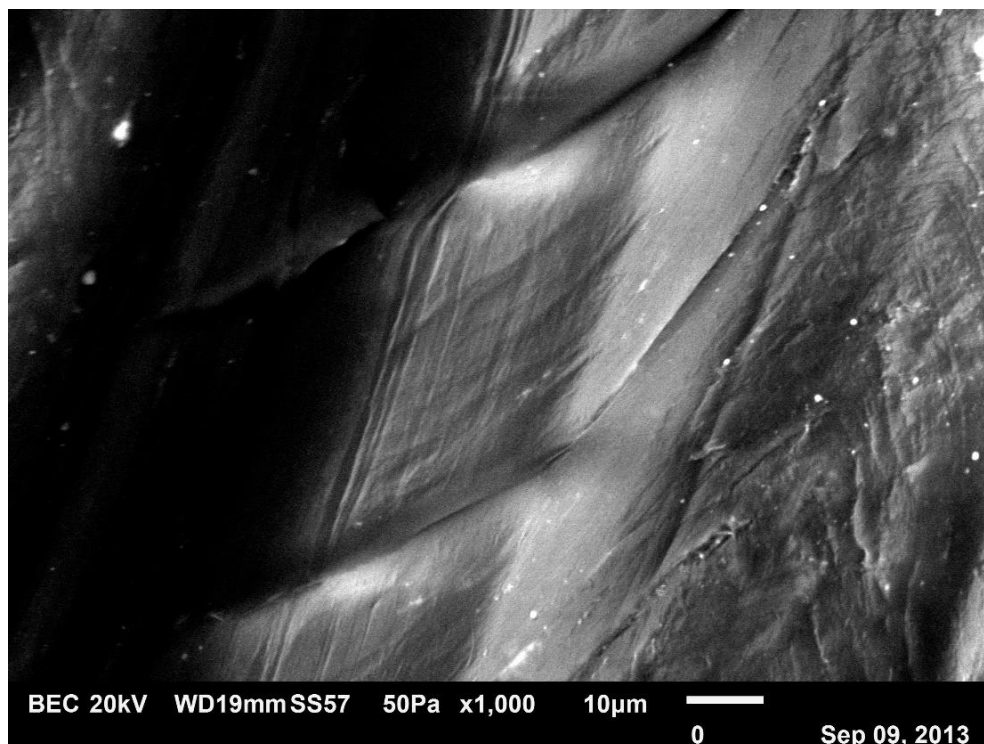


Figura 107: Ampliação de 1000X

Segundo [36], as esferulites (citadas na Seção 4.3.1.2) são análogas aos grãos em materiais metálicos. Cada esferulite é composta por inúmeros cristais lamelares diferentes imersos em material amorfo. Além disso [36] também afirma que os Polímeros 2, 3, 4 e 5 formam este tipo de estrutura quando se cristalizam a partir de uma massa fundida, como é feito na extrusão. Vale ressaltar que as lamelas se conectam através de cadeias de ligação que passam através das regiões amorfas citadas e que o deslizamento de planos ocorre justamente pelo rompimento dessas regiões de menor resistência.

7.2.3.1.1 Possível Falha Observada na Micrografia – Deslizamento de Planos Subsequentes

Segundo [36] o mecanismo de deformação plástica para uma estrutura lamelar consiste no deslizamento destas e seu alinhamento na direção do carregamento aplicado. Este pode ser observado na indicação em vermelho na Fig. 108. Isso faz com que as fitas lamelares deslizem entre si à medida que as cadeias das regiões amorfas se alongam, como pode ser observado na Fig. 109 que exhibe um carregamento de tração e a microestrutura sendo deformada de a) até e). A Figura 110 destaca o possível deslocamento de planos que foi citado acima, culminando em uma possível fratura em uma região amorfa.

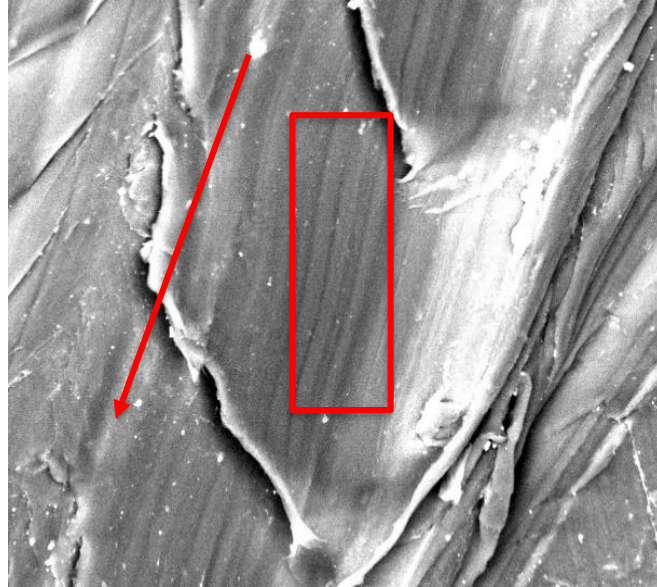


Figura 108: Indicação da direção da tensão aplicada e do escoamento de planos nesta direção

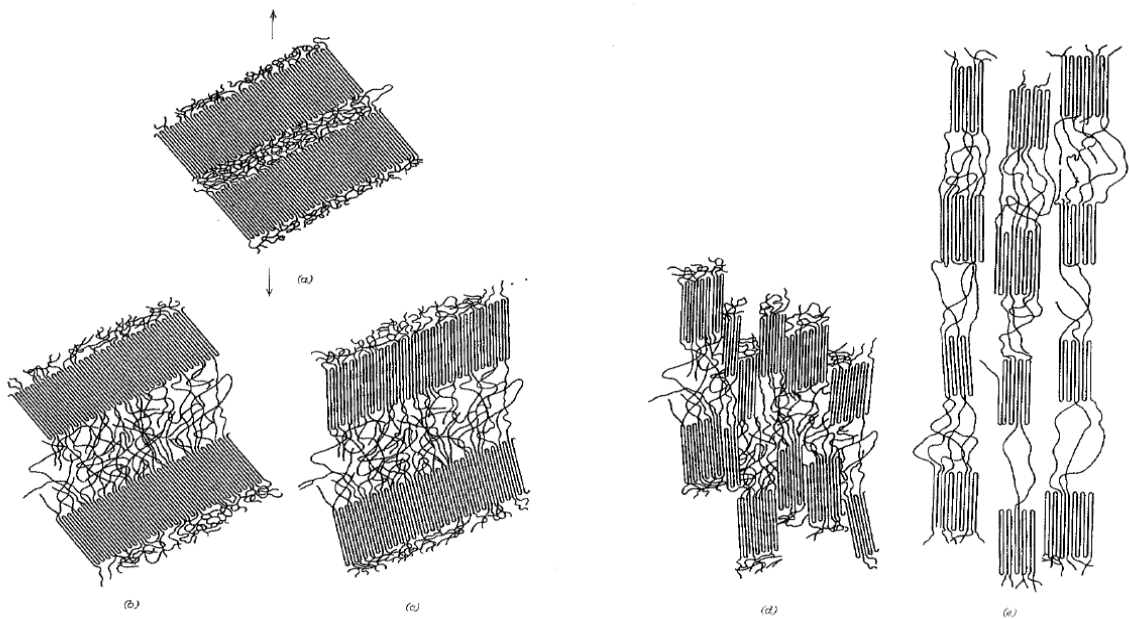


Figura 109: Carregamento de tração e deslizamento entre lamelas de a) até e) [36]

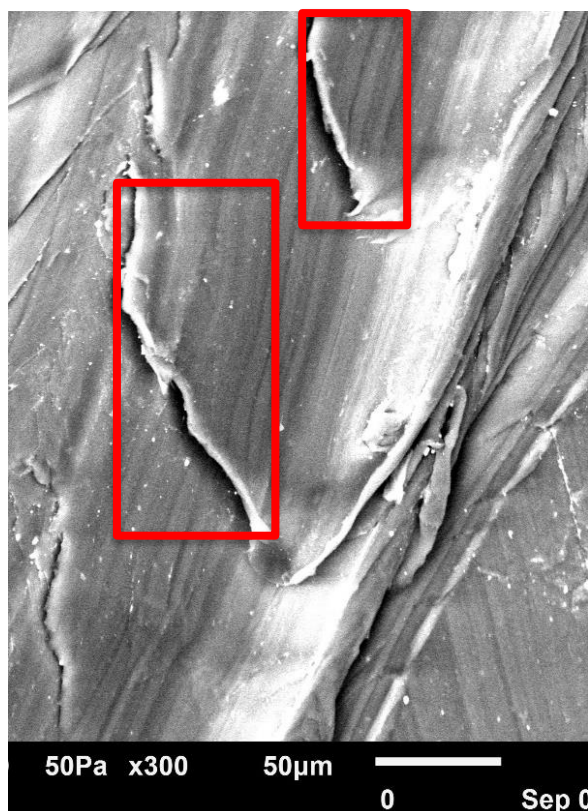


Figura 110: Deslocamento de planos

7.2.3.1.2 Possível Falha Observada na Micrografia – Fendilhamento

Nesta seção, abordaremos um possível fenômeno que precede a formação de trincas envolvida no modo de falha do Polímero 2. De acordo com [36], os polímeros termoplásticos podem sofrer fraturas dúcteis ou frágeis. Como abordado na Seção 7.2.2, a taxa de deformação e por consequência a velocidade do teste, influenciam diretamente no modo de falha do polímero. Como também comentado nesta seção, a Fig. 97, nos permite assumir que o modo de falha nos testes a 500 mm/min foi mais frágil do que a 50 mm/min. Deste modo, pode-se entender que o material pode sofrer uma transição dúctil-frágil com o aumento da velocidade do teste. Este possível tipo de falha pode ser observado na Fig. 111, onde ocorre escoamento plástico antes da fratura [36].

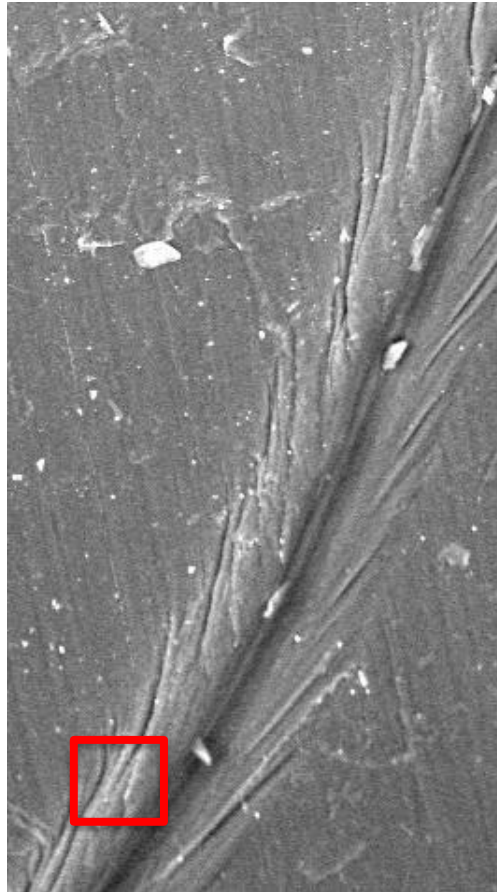


Figura 111: Escoamento plástico antes da fratura

Este tipo de escoamento localizado é característico de um fenômeno que precede a fratura em polímeros termoplásticos vítreos, o fendilhamento (formação de trincas) [36]. Este escoamento localizado pode dar origem a microvazios interligados que coalescem à medida que a tensão aumenta. Entre estes, pode-se observar na Fig. 112 a formação de pontes fibrilares [36].

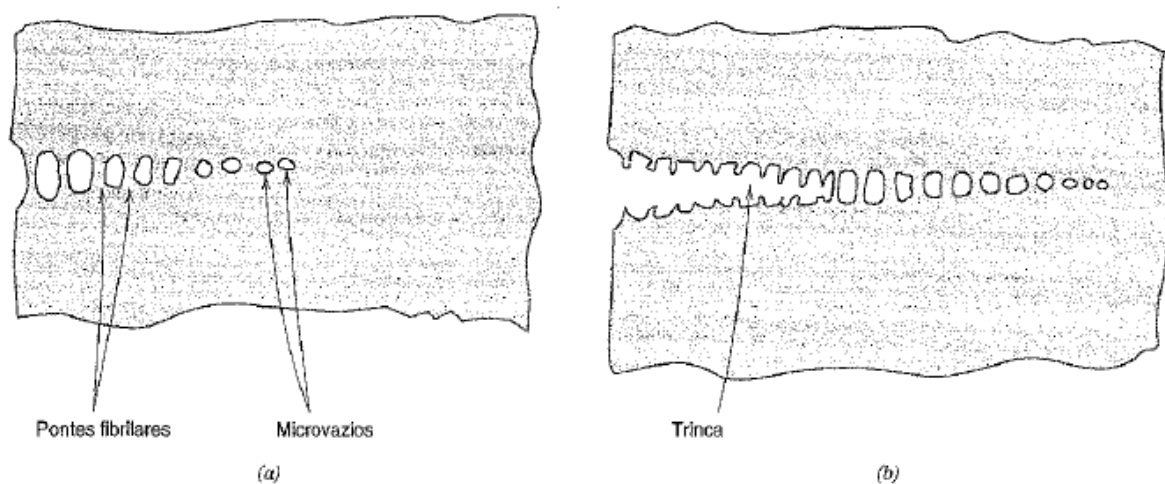


Figura 112: Microvazios e Fibrilas orientadas na direção da tensão aplicada [36]

No caso da micrografia obtida, mostrada na Fig. 113, o fendilhamento não ocorre por tração, como na Fig. 112, mas por atrito entre a borda do punção e a lateral da indentação cônica promovida na amostra. Assim é possível que as pontes fibrilares fiquem orientadas não no sentido da tensão trativa mas sim na direção do fendilhamento.

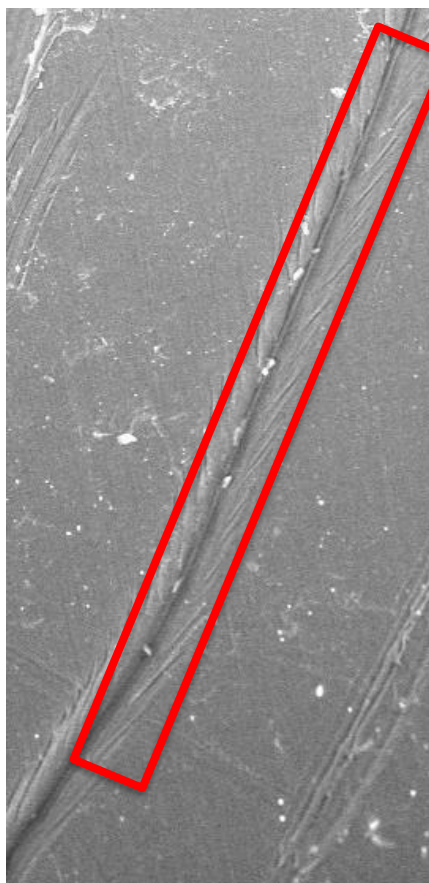


Figura 113: Fibrilas orientadas na direção do fendilhamento

O processo de crescimento do fendilhamento citado absorve mais energia antes da fratura, aumentando a tenacidade à fratura do material [36], fato este de suma importância para que o Polímero 2 se torne um candidato ainda mais adequado para reforçar a capa externa.

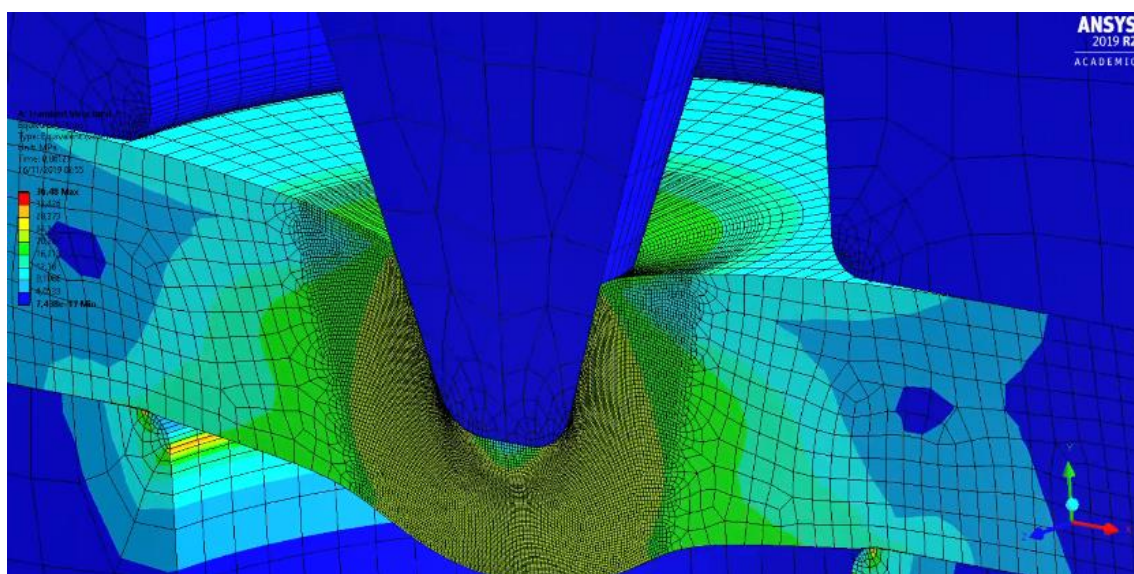
7.2.4 Análise dos Resultados do Método de Elementos Finitos

Nesta seção será abordada uma discussão sobre os resultados obtidos no modelo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Para validar o modelo e verificar se os resultados obtidos apresentam dependência da malha gerada, foi realizada uma análise de convergência, refinando a região da amostra onde há maiores deformações. Na Tabela 27, estão dispostos os valores de tensão máxima equivalente e força vertical máxima.

Tabela 27: Análise de Convergência

Análise de convergência					
N° de Elementos	N° de nós	Tensão Equivalente Máxima (MPa)	Desvio (%)	Força Vertical Máxima (N)	Desvio (%)
1013	1165	22.8	-	2296.1	-
1028	1183	23.0	1.0%	2480.5	7.4%
1078	1236	23.3	1.2%	2456.3	1.0%
1196	1362	23.2	0.3%	2379.8	3.2%
1314	1486	23.8	2.3%	2366.5	0.6%
1581	1760	24.8	4.3%	2378.4	0.5%
1828	2013	25.1	1.0%	2359.0	0.8%
2301	2494	25.0	0.4%	2365.9	0.3%

Os resultados obtidos demonstram que o modelo não apresenta grandes variações com a variação da malha, obtendo um desvio menor que 10% para todos os valores testados. Na Figura 114 pode-se observar o contorno da distribuição da Tensão equivalente na amostra no momento final da simulação

**Figura 114** - Contorno de tensão equivalente na amostra (projecção em 180°).

No pós-processamento da análise, as superfícies foram projetadas em 180°, apenas para fins de visualização dos resultados. Primeiramente, foi observada a deformação plástica da amostra polimérica referente ao Teste 4.3, no momento em que o punção chega ao final de sua espessura, como ilustra a Fig. 115.

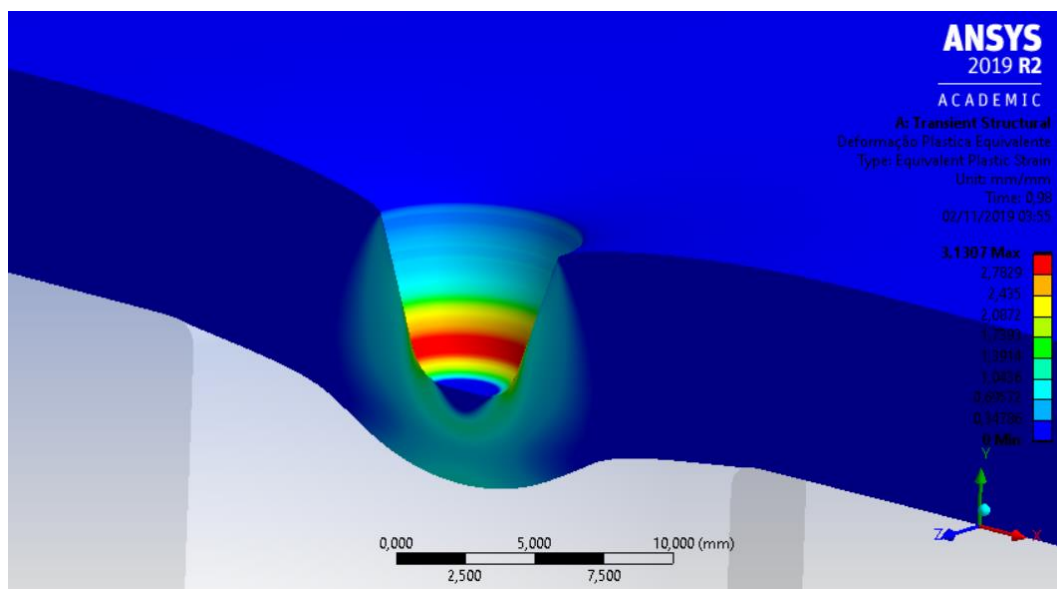


Figura 115: Contorno de deformação da amostra referente ao Teste 4.3 (projeção em 180°)

Como esperado, a amostra obteve uma taxa considerável de deformação plástica, sendo deixada uma “impressão” do punção na mesma, de forma semelhante ao resultado do teste experimental (Seção 7.1.4).

Com o objetivo de realizar uma comparação entre o teste experimental e a análise numérica, foi decidido desenvolver ambos os cálculos através da mesma metodologia analítica, apresentada na Seção 4.2. Sendo assim, os dados de saída obtidos através do MEF foram o deslocamento do punção e a força necessária para deformar a amostra até o fim de sua espessura. Na Figura 116 pode-se observar o resultado da curva Carga x Deslocamento obtida pela análise para o Polímero 4.

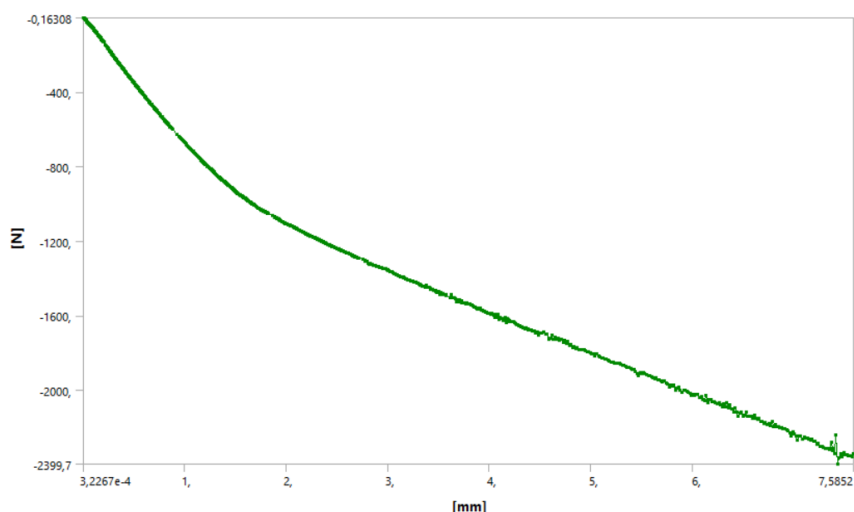


Figura 116: Curva Força x Deslocamento do Polímero 4

As curvas comparativas de Carga x Deslocamento e Tensão x Deformação, entre os Testes 2.3 e 4.3 e os modelos numéricos para os Polímeros 2 e 4 estão dispostas nas Fig. 117 e 118.

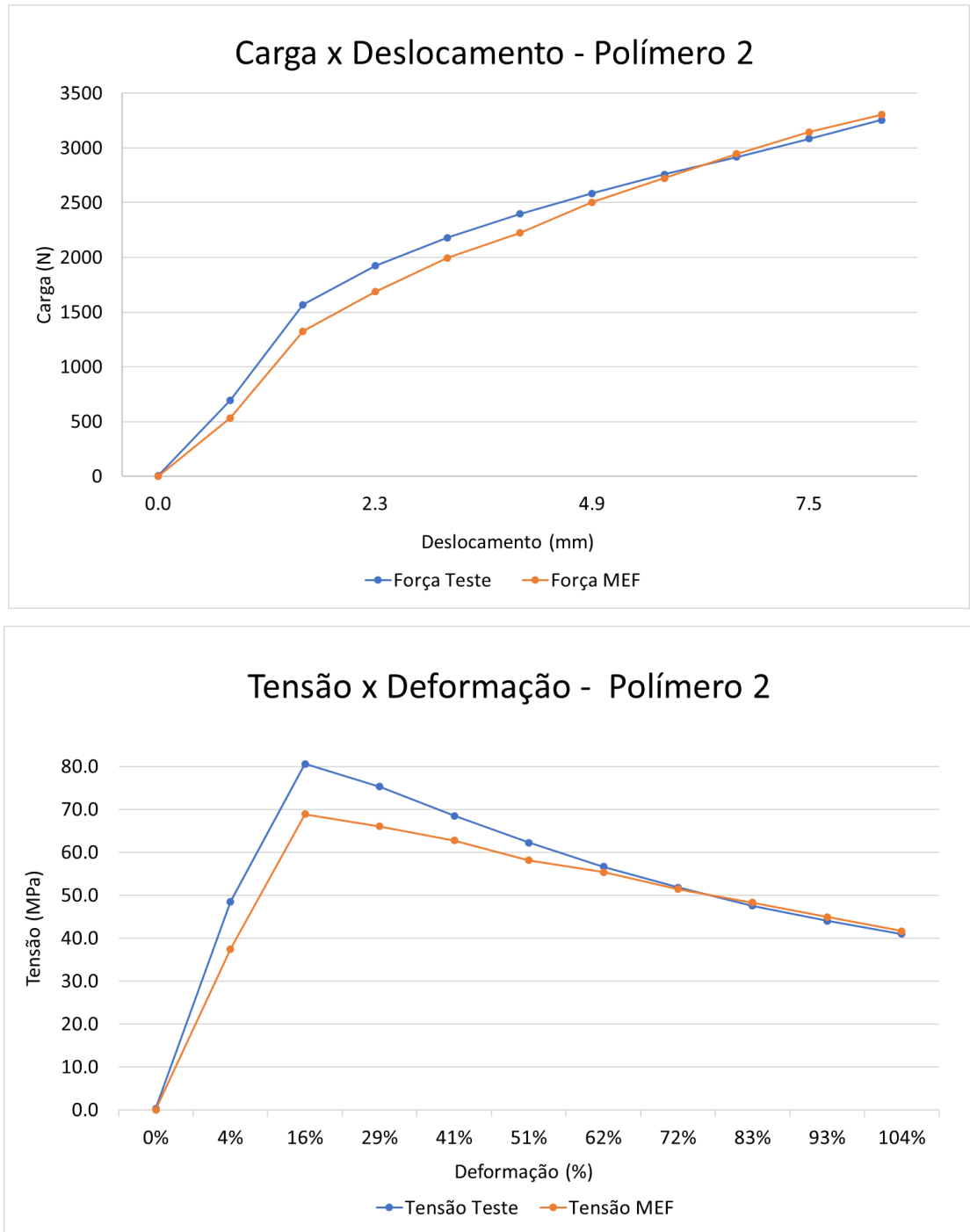


Figura 117: Comparativo MEF x Teste – Polímero 2

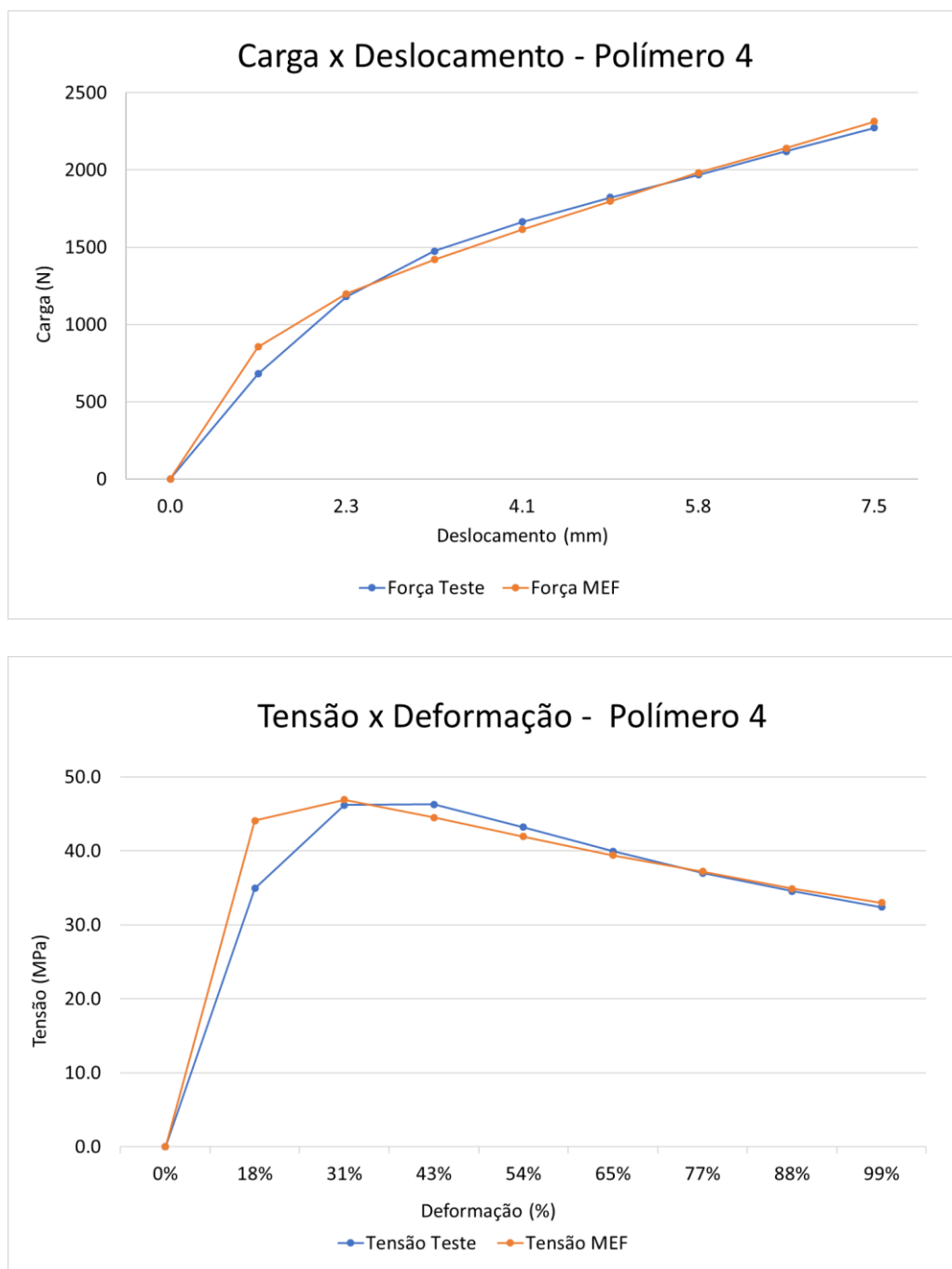


Figura 118: Comparativo MEF x Teste (Tensão) – Polímero 4

Ao observar os gráficos, nota-se um comportamento semelhante entre as curvas do teste experimental e o modelo de elementos finitos. A curva Carga x Deslocamento representa a força total necessária para deformar a amostra até o final de sua espessura, uma vez que este foi o modo de falha determinado para o teste. Pode-se observar que as curvas do modelo de elementos finitos conseguiram descrever de forma bastante precisa a carga necessária para deformar a amostra ao longo de sua espessura, conseqüentemente, obtendo uma boa resposta para a curva Tensão x Deformação. Nas Tabelas 28 a 34, mostra-se os dados obtidos nos modelos numéricos

e nos testes experimentais ponto a ponto, assim como os valores de Energia de Perfuração em caráter comparativo.

Tabela 28: Polímero 2 - MEF x Teste (Força)

Comparativo MEF x Teste (Força)		
Força Teste (N)	Força MEF (N)	Desvio (%)
0	0	0%
696	533	23%
1568	1324	16%
1923	1686	12%
2181	1995	9%
2397	2225	7%
2584	2504	3%
2757	2725	1%
2918	2947	1%
3086	3145	2%
3256	3303	1%
Desvio Médio		7%

Tabela 29: Polímero 2 - MEF x Teste (Tensão)

Comparativo MEF x Teste (Tensão)		
Tensão Teste (MPa)	Tensão MEF (MPa)	Desvio (%)
0	0	0
49	38	23%
81	69	15%
75	66	12%
68	63	8%
62	58	7%
57	55	2%
52	51	1%
48	48	2%
44	45	2%
41	42	2%
Desvio Médio		7%

Tabela 30: Polímero 4 - MEF x Teste (Força)

Comparativo MEF x Teste (Força)		
Força Teste (N)	Força MEF (N)	Desvio (%)
0	0	0%
680	856	26%
1180	1198	2%
1475	1419	4%
1663	1615	3%
1823	1797	1%
1969	1981	1%
2121	2141	1%
2272	2313	2%
Desvio Médio		4%

Tabela 31: Polímero 4 - MEF x Teste (Tensão)

Comparativo MEF x Teste (Tensão)		
Tensão Teste (MPa)	Tensão MEF (MPa)	Desvio (%)
0	0	0
35	44	26%
46	47	2%
46	45	4%
43	42	3%
40	39	1%
37	37	1%
35	35	1%
32	33	2%
Desvio Médio		4%

Tabela 32: Polímero 2 - MEF x Teste (Energia de Perfuração)

Comparativo MEF x Teste (Energia de Perfuração)		
Teste (mJ /mm ³)	MEF (mJ /mm ³)	Desvio (%)
60.0	56.0	7%

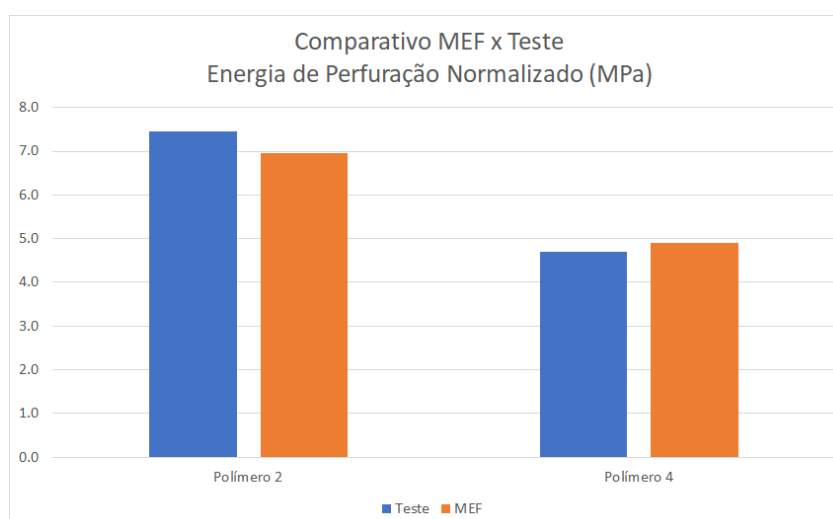
Tabela 33: Polímero 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração)

Comparativo MEF x Teste (Energia de Perfuração)		
Teste (mJ /mm ³)	MEF (mJ /mm ³)	Desvio (%)
35.8	37.3	4%

Tabela 34: Polímeros 2 e 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração Normalizada)

Comparativo MEF x Teste (Energia de Perfuração Normalizada)			
Polímero	Teste	MEF	Desvio
	(MPa/mm)	(MPa/mm)	(%)
Polímero 2	7.5	7.0	7%
Polímero 4	4.7	4.9	4%

Analisando os dados obtidos, nota-se que o desvio entre os modelos e o teste foi bastante baixo, com desvio médio de 7% para o Polímero 2 e 4% para o Polímero 4 em relação aos pontos da curva Carga x Deslocamento. Deste modo, pode-se concluir que de acordo com a Fig. 119 o modelo numérico elaborado consegue descrever o comportamento do teste de perfuração, podendo ser aplicado para outros materiais futuramente.

**Figura 119:** Polímeros 2 e 4 - MEF x Teste (Energia de Perfuração)

Visando realizar uma validação dos resultados obtidos no modelo numérico, bem como do método analítico proposto para obter a Energia de Perfuração da amostra (Seção 4.2), buscou-se obter esse resultado a partir de outra metodologia. Para isso, foi extraído como dado de saída da simulação a energia total de deformação da amostra, no momento final da análise (quando o deslocamento do punção é igual à espessura da amostra). Na Figura 120, está ilustrado o contorno da energia de deformação, assim como os dados da energia total de deformação (mJ).

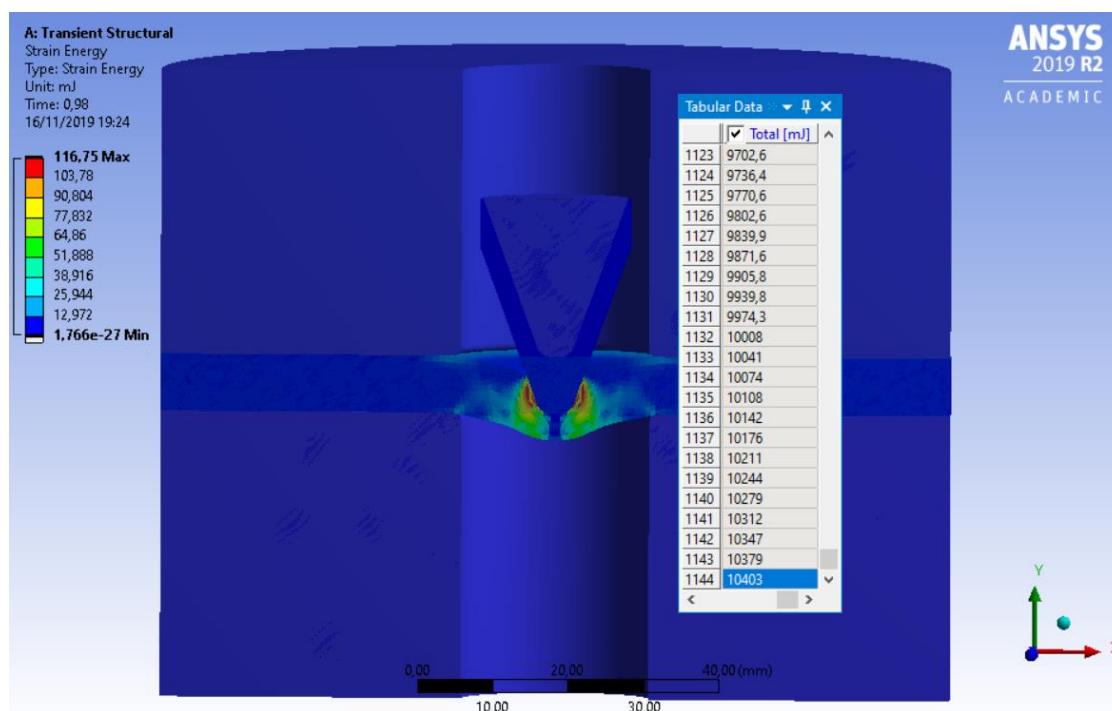


Figura 120 - Energia de deformação do Polímero 4.

No método analítico proposto para calcular a energia de perfuração, é feita a integração da curva de Tensão x Deformação até 100% de deformação da amostra, obtendo a energia por unidade de volume (mJ/mm^3). Deste modo, foi necessário dividir a energia total de deformação pelo volume deslocado pelo punção, que é equivalente ao volume do punção que penetra à amostra. A Equação 31 expressa o volume do tronco de cone do punção função da espessura da amostra.

$$V = \frac{\pi \cdot e}{3} \cdot \{ [\tan(20^\circ) \cdot (e + 5,49)^2] + [\tan(20^\circ) \cdot (e + 5,49) \cdot r] + [r^2] \} \quad (31)$$

A partir desses dados, foi realizado o cálculo da Energia de Perfuração e da Energia de Perfuração Normalizada, descrita na Tab. 35

Tabela 35 - Cálculo da Energia de Perfuração do Polímero 4

Dados de Entrada	
Espessura (mm)	7.6
Energia de Deformação (mJ)	10403
Dados de Saída	
Volume Do Punção (mm³)	289.6
Energia de Perfuração (mJ/mm³)	35.9
Energia de Perfuração Normalizada (MPa/mm)	4.7

Com a Energia de Perfuração normalizada, realizou-se uma comparação entre os resultados obtidos através deste método, com os resultados do Método de Elementos Finitos (MEF) a partir da Metodologia analítica, descritos na Tab. 36.

Tabela 36 - Comparativo entre a Energia de Perfuração Normalizada do Polímero 4

Energia Normalizada (MPa/mm) - Teste 2.3	
Teste - Analítico	4.7
MEF - Analítico	4.9
MEF - Energia Total	4.7

Pode-se observar que os resultados obtidos apresentam uma variação bastante baixa entre as metodologias, concluindo que o modelo analítico proposto foi validado. Além disso, ambos os cálculos realizados a partir do modelo numérico, conseguiram representar de forma bastante precisa a Energia de Perfuração necessária para deformar a amostra até o fim de sua espessura.

7.3 Trabalhos Futuros

Esta seção abordará algumas sugestões de trabalhos futuros, bem como a análise preliminar de testes adicionais executados. A Figura 121 exibe a amostragem total do projeto, incluindo as amostras utilizadas nos três testes adicionais executados, sendo eles: 1 teste de camada dupla no Polímero 6, com 2 camadas de metade da espessura testada anteriormente e 2 testes em uma fita metálica de alto limite de escoamento e alto teor de carbono.



Figura 121: Amostragem total

7.3.1 Análise de Camada Dupla no Polímero 6

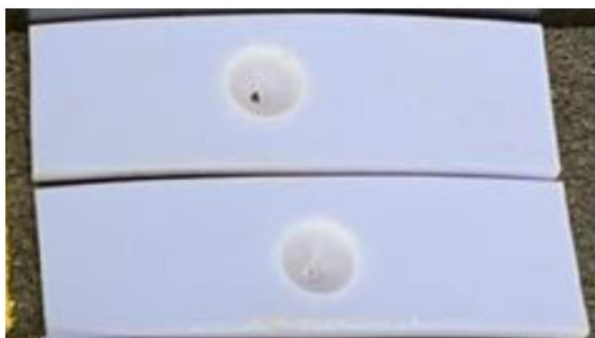
Para ilustrar a finalidade da análise de camada dupla sugere-se a seguinte hipótese: ao cortar uma folha de papel utilizando uma tesoura, o esforço feito pela mão humana é extremamente simples e de baixa magnitude. Entretanto conforme adiciona-se mais folhas de papel ao bloco, estas em conjunto tendem a aumentar a resistência do todo, requerendo cada vez mais esforço para que ocorra a falha.

7.3.1.1 Testes Adicionais – Amostragem e Resultados

Visando melhor entender o comportamento dos polímeros quando perfurados, foi realizado um teste adicional preliminar (a 500 mm/min) com camada dupla de espessura igual a metade da espessura dos Testes 6.1, 6.2 e 6.3 no Polímero 6 (uma vez que este foi o polímero com menor Energia de Perfuração encontrado e assim, para ser cogitado como solução, precisaria de camadas mais espessas, ou até mesmo duplicadas). Assim, será possível entender, bem como no exemplo da folha de papel, qual configuração ofereceria a melhor resistência para a capa externa. Os testes realizados a serem comparados e suas respectivas espessuras estão dispostos na Tab. 37 e na Fig. 122 pode-se observar as amostras de 3.5 mm que foram perfuradas em conjunto.

Tabela 37: Testes no Polímero 6

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
7.1	2 x 3.5	500
6.1/6.2/6.3	1 x 7.0	500

**Figura 122:** Amostras de espessura igual a 3.5 mm do Polímero 6 separadas após a perfuração

Os resultados gráficos do teste preliminar realizado e disposto acima é mostrado na Fig. 123.

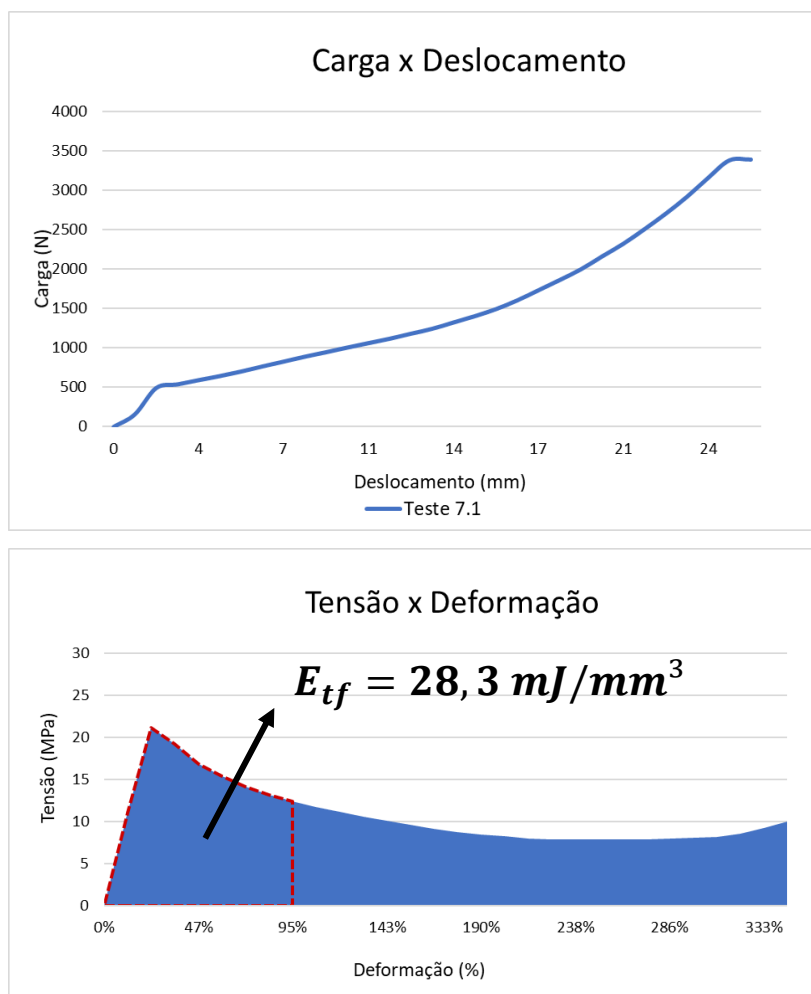


Figura 123: Testes em camada dupla de espessura simples igual a 3.5mm

Na Tabela 38, observa-se os resultados do teste preliminar feito para a análise de camada dupla. Na tabela, foi mostrada a contribuição de cada camada para a Energia de Perfuração do conjunto.

Tabela 38: Comparativo – Camada Dupla x Simples

Nº teste	Polímero	Contribuição da Camada (MPa)	Espessura (mm)	Contribuição da Camada (MPa/mm)
7.1	Polímero 6	15.5	3.5	4.4
	Polímero 6	12.8	3.5	3.7
Total		28.3	7	--

Na Tabela 39, observa-se os resultados comparativos entre a espessura de 7,0 mm com camada simples e dupla. Vale ressaltar que os valores de Energia apresentados na Tab. 37 para a camada única são representativos da média dos Testes 6.1, 6.2 e 6.3.

Tabela 39: Comparativo – Energia de Perfuração dos Testes 6.1, 6.2, 6.3 e 7.1

Nº teste	Polímero	Energia de Perfuração (MPa)	Espessura (mm)	Energia Normalizada (MPa/mm)
7.1	Polímero 6	28.3	7	4.0
6.1/6.2.6.3	Polímero 6	22.0	7	3.1

7.3.1.2 Discussão Sobre os Resultados

Com base nos resultados de contribuição de cada camada contidos na Tab.36, pode-se observar que a Energia de Perfuração Normalizada para a camada superior é maior do que o valor encontrado para a camada inferior. Isso se explica pelo fato de que a camada inferior oferece resistência à deformação da camada superior. Ao realizar o teste com somente uma camada simples, o furo contido na placa matriz permite que a amostra se deforme livremente.

Desse modo, pode-se concluir que, assim como no exemplo do bloco de papel, a adição de mais camadas menos espessas confere ao conjunto uma maior capacidade de absorção de energia do que uma configuração de camada única.

7.3.2 Análise da Perfuração em uma Fita Metálica

Outra solução cogitada para reforço da capa externa, para a qual também foram executados testes adicionais preliminares, foi a utilização de uma fita metálica de alta resistência mecânica e menor espessura, pelo fato de que, por ser metálica, esta adicionaria muito peso a linha como um todo se fosse empregada com espessura comparável a dos polímeros.

7.3.2.1 Testes Adicionais – Amostragem e Resultados

O material elegido para execução dos testes foi um aço de alto limite de escoamento, pois espera-se que por isto, este ofereça melhores condições de reforço à capa externa. Os dados do aço SAE 1075 estão dispostos na Tab. 40 [51].

Tabela 40: Dados do aço SAE 1075 [51]

Propriedades Fita Metálica								
Material	% Carbono	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HB)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Poisson	Tensão Última (MPa)	Tensão Limite de Escoamento (MPa)
SAE 1075	0.75	7.8	220-250	190	11 - 14	0.29	740 - 820	450 - 570

A Tabela 41 mostra os testes adicionais realizados na Fita Metálica e a espessura reduzida escolhida para sua execução e a Fig. 124 mostra a amostra, antes e depois do ensaio.

Tabela 41: Testes adicionais na Fita Metálica

Teste#	Espessura [mm]	Velocidade [mm/min]
8.1	0.5	500
8.2	0.5	500

**Figura 124:** Fita metálica antes e após a perfuração

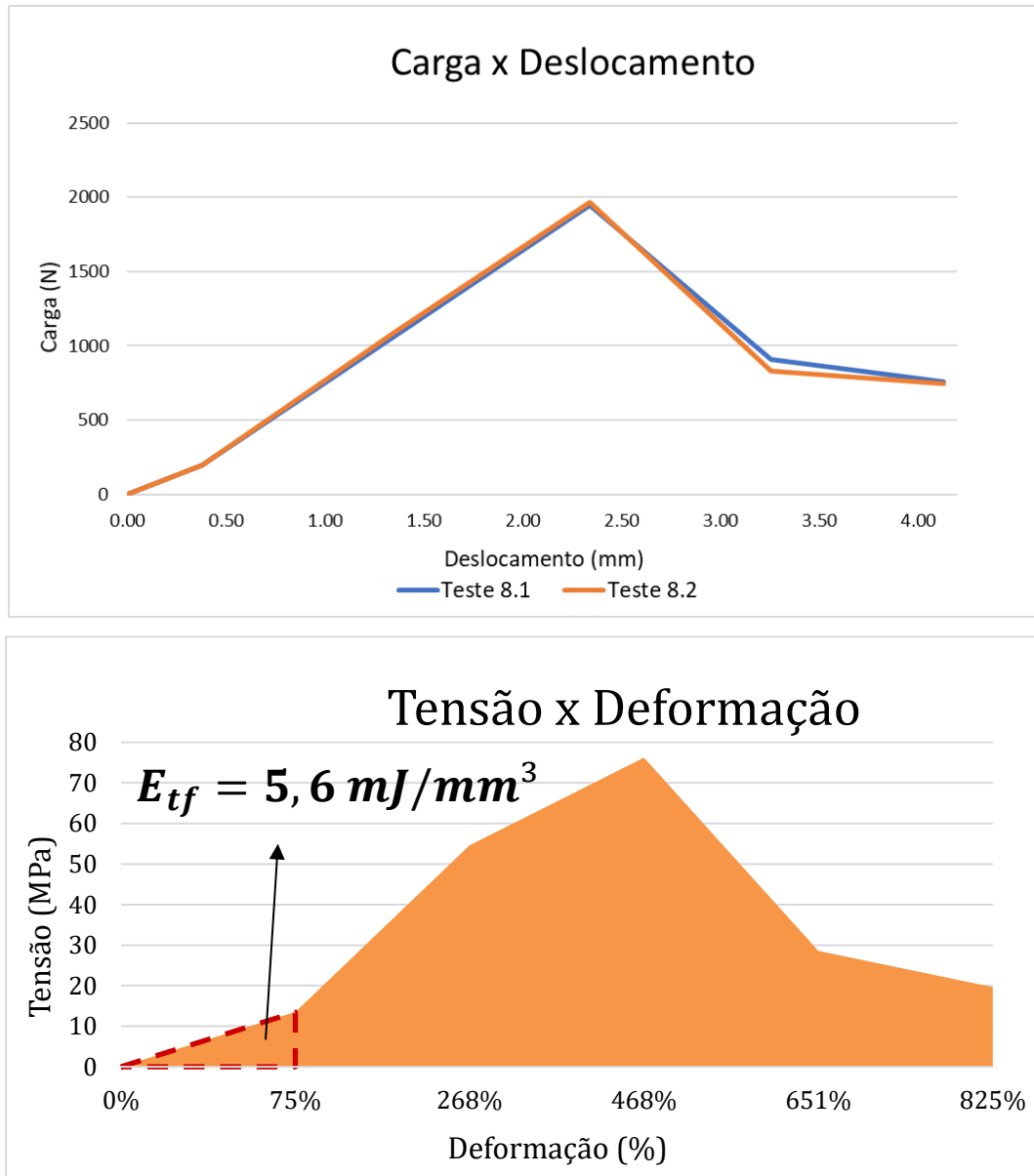


Figura 125: Teste realizado na fita metálica

A Figura 125 mostra a Energia de Perfuração encontrado para a chapa metálica e suas curvas de Força x Deslocamento. Na Tabela 42 observa-se os resultados dos testes preliminares para a análise de perfuração em uma fita metálica de alta resistência mecânica.

Tabela 42: Resultados dos testes preliminares da fita metálica

Material	Nº do Teste	Energia de Perfuração (MPa)	Espessura (mm)	Energia de Perfuração Normalizada (MPa/mm)	Média (MPa/mm)
SAE 1075	8.1	5.50	0.5	11.0	11.10
SAE 1075	8.2	5.60	0.5	11.2	

7.3.2.2 Discussão Sobre os Resultados

O motivo pelo qual foi escolhido o Aço SAE 1075 para realização deste teste é o fato de este ser caracterizado por ter alto teor de carbono e conseqüentemente alta dureza, assim, hipoteticamente falando, este não escoaria, gerando danos a capa externa antes de romper. Tendo em vista que sua espessura é comparativamente pequena em relação às dos polímeros testados, este não poderia escoar, pois qualquer deslocamento desta espessura em direção a capa externa comprimiria a mesma.

No entanto, observando comparativamente o resultado obtido neste teste (baseando-se na mesma premissa de falha adotada para os testes da Seção 7.1, que seria quando o indentador chegasse ao fim da espessura da amostra), pode-se observar que a energia por milímetro absorvida pelo material foi a maior dentre todos os materiais testados. Assim, podemos entender que no que se refere a quantidade de energia de deformação este material poderia ser considerado um bom candidato a camada de reforço. Entretanto, antes de qualquer conclusão, uma análise mais criteriosa deve ser feita visando entender o impacto de mais uma camada metálica no peso da estrutura do flexível, uma vez que este é um dos fatores mais preponderantes da análise de instalação para atingir a Catenária Livre.

Indo além, pode-se observar na Fig. 126 que a perfuração na fita metálica gera rebarbas afiadas e que por tratar-se de um modo de falha repentino é extremamente prejudicial a capa externa, podendo iniciar trincas em sua estrutura, ou mesmo perfurá-la, além de não ser possível a detecção da iniciação da falha em inspeção por ROV (*Remotely Operated Underwater Vehicle*).



Figura 126: Rebarba gerada pela fratura frágil

Capítulo 8

8. Conclusão

Com base nos testes feitos, no tratamento dos dados aquistados, na modelagem analítica implementada, na análise numérica desenvolvida, na análise microestrutural e nas referências dispostas no Capítulo 9, pode-se entender que o Polímero 2 foi o que teve o melhor comportamento diante de todas as discussões propostas, perdendo apenas para o Aço SAE 1075 no que se refere a Energia de Perfuração e Normalizada.

Primeiramente, em relação aos resultados dos testes experimentais propriamente ditos, o Polímero 2 foi o material polimérico que comparativamente apresentou a maior resistência por unidade de espessura à perfuração do punção, assim, este seria o polímero que deixaria menos energia chegar a capa externa, se empregado como reforço. Ainda levando em consideração os resultados dos testes, pode-se observar que o Polímero 2 apresentou o melhor desempenho quando testado em ambas as velocidades. Deste modo, espera-se que o Polímero 2 ainda terá a maior Energia de Perfuração para velocidades superiores, comparáveis a de instalação de dutos.

Esta expectativa também é baseada na discussão sobre o modo de falha apresentado na análise microestrutural com o MEV, a falha por fendilhamento. Como dito, este fenômeno ocorre com mais frequência em maiores velocidades e absorve mais energia por conta de escoamentos localizados antes da falha.

Por fim, também foi sugerida uma discussão sobre os resultados da análise numérica. O objetivo era a calibração de um modelo numérico que fosse preciso a ponto de nos oferecer um baixo erro entre as curvas de Força x Deslocamento e Tensão x Deformação, mas principalmente entre os valores de Energia de Perfuração obtidos no teste e na análise. Os desvios de 4 e 7% obtidos na análise numérica comprovam a possibilidade de reprodutibilidade do teste por métodos computacionais com alta precisão. A análise numérica foi feita para os dois polímeros que apresentaram o melhor desempenho (Polímeros 2 e 4), uma vez que, mediante uma análise de custo e logística, poderia ser vantajosa a utilização do Polímero 4 sem grandes perdas na proteção da capa externa.

Capítulo 9

9. Referências Bibliográficas

- [1] CARVALHO, JF. **O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável**. 2009. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- [2] PEDROSA, O.C.A. **A crise do petróleo e os desafios do pré-sal, Boletim de Conjuntura, FGV Energia**. 2019.
- [3] GALARDO, M.M.R. **Dutos Flexíveis: Passado, Presente e Futuro**. Rio de Janeiro, 2016. 80f. Monografia (Especialização em Engenharia de Sistemas Offshore) - Pós-graduação em Engenharia Naval e Oceânica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [4] THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. ed., Rio de Janeiro**. Editora Iterciência, p.271. 2001.
- [5] SABILLO-LOPEZ, P. Disponível em <<http://www.suapesquisa.com/geografia/petroleo/>>. Acessado em 14 de out. 2019.
- [6] TUNDISI, T. Disponível em <<http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/historia.html>>. Acessado em 26 de ago. 2019.
- [7] LUSTOSA, M.C.J. **Meio ambiente, inovação e competitividade na Indústria Brasileira: a cadeia produtiva do petróleo**. 245 f. 2002. Tese (Doutorado em Economia) -Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [8] IBP. Disponível em <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/maiores-reservas-provadas-de-petroleo-em-2017/>>. Acessado em 29 de ago. 2019.
- [9] MORAIS, J.M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea-Petrobras, 2013.
- [10] INFOGRÁFICO TIPOS DE PLATAFORMAS. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>>. Acessado em 29 de ago. 2019.

- [11] TEIXEIRA, N.A. **Análise de carga de topo de dutos submarinos flexíveis**. Rio de Janeiro: UFRJ/. Escola Politécnica, 2018. XI 93 p. Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Civil, 2018.
- [12] MAXWELL-PUC-RJ. Disponível em <www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18538/18538_2.PDF>. Acessado em 02 de Set. 2019.
- [13] REYES, M.C.T. **Apostila de Tecnologia dos Sistemas Oceânicos**. Versão 02, UFRJ. 2005.
- [14] BALDAN, E. L.; MACHADO, K. C. **Concionamento e Comissionamento de Dutos Flexíveis: da Fabricação à Montagem em Campo**. Trabalho de Fim de Curso, UFES, Vitória, ES, Brasil, 2010.
- [15] LEMOS, C.A.D. **Dutos Flexíveis e Umbilicais / Dutos e Risers**. Notas de Aula MSO 19. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.
- [16] FERGESTAD, D. **Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes**. MARINTEK, NTNU, 4Subsea, 2014.
- [17] API (American Petroleum Institute). **Recommended Practice for Flexible Pipe, API RP 17B**. Third Edition, March 2002.
- [18] LOPES, D. G. **Avaliação das Tensões Residuais na Montagem de Conectores em Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis**. Dissertação de M.Sc., CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil 2012.
- [19] SANTOS, F. P. **Avaliação dos Efeitos da Pressão Parcial de CO₂ no Processo de Corrosão Fadiga em Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis**. Dissertação de M.Sc., CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [20] CHANDWANI, R.; LARSEN, I. **Design of flexible pipes**. Workshop on Subsea Pipelines, COPPE/UFRJ-Federal University of Brazil, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.
- [21] QUEIROZ, D.L. **Influência da Convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [22] API (American Petroleum Institute). **Recommended Practice for Flexible Pipe Ancillary Equipment, API RP 17L2**. First Edition, March 2013.

- [23] API (American Petroleum Institute). **Recommended Practice for Flexible Pipe, API RP 17B**. Fifth Edition, May 2014.
- [24] POLOPONSKY, I.B. **Aspectos Metalúrgicos e de Resistência à Corrosão de Juntas Soldadas com Processo de Soldagem de Topo por Resistência** – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013. XIV, 109. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2013.
- [25] B ISO, B STANDARD. **ISO 13628-2. Petroleum and Natural Gas Industries – Design and operation of subsea production systems**. Part 2, 2nd Ed. 2006.
- [26] API (American Petroleum Institute). **Specification 17J. Specification for Unbonded Flexible Pipe**. Fourth Edition, May 2014.
- [27] INSTRON. Disponível em <<http://www.instron.com.br/-/media/literature-library/products/2018/01/2300-series-brazil-brochure.pdf?la=pt-BR>>. Acessado em 10 de Set. 2019.
- [28] HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 3º Ed, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2000.
- [29] PROVENZA, F. **Estampos I, II, III**, vol. 1, 2, 3 Editora F. Provenza 1976.
- [30] HUGO, G. S.; PEREZ, H. **Projeto de um dispositivo para a aplicação de um campo uniaxial de tensão em placas**. Rio de Janeiro. Monografia – (CEFET/RJ, 2006).
- [31] BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley** - Editora, McGraw Hill Brasil, 2016.
- [32] MANZELLA, A. F. **A Parametric Analysis of the Quase-Static Penetration of Composite Materials**. Tese, 140 p. – University of Delaware, 2010.
- [33] WIKJ, G. **Projectile Penetration and Perforation**. Third Edition. 115 p. – ResearchGate, 2015.
- [34] PILKEY, W. D. **Peterson's Stress Concentration Factors**, Second Edition. 1997.
- [35] STEWART, J. **Calculus**. 7ºed. Tradução: Cyro de Carvalho Patarra et al. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2013.
- [36] CALLISTER, JR.W.D. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. 5ºed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2002.

- [37] BLUMA, E.F.L. **Caracterização de Polímeros. Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica.** 1º edição, 2001.
- [38] NIELSEN, L.; LANDEL, R. F. **Mechanical properties of polymers and composites.** New York: 2.ed. M. Dekker, 557 p. 1994.
- [39] CÁRDENAS, N.O. **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Projeto e Fabricação) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.2007.
- [40] ASTM-A29. **Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought, General Requirements for.** Designation: A 29/A 29M – 05. Second Edition, March 2004.
- [41] AZEVEDO, A.F.M. **Método dos Elementos Finitos** – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Portugal – 1ª Edição Abril 2003.
- [42] ADAMS, V. **A Designer’s Guide to Simulation with Finite Element Analysis** – NAFEMS – International Association For The Engineering Analysis Community, 2008.
- [43] CROCOMBE, A.D. **How To Tackle Non-Linear Finite Element Analysis** – NAFEMS– International Association For The Engineering Analysis Community, 2001.
- [44] RODRIGUES, P.F.N. **Ferramentas Numéricas para a Análise Não-Linear Física e Geométrica de Estruturas Reticuladas Na Exploração de Petróleo Offshore** – Tese, 258 p. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2000.
- [45] GAERTNER, E.L; BORTOLI, M.G.D. **Some Aspects for the Simulation of a Non-Linear Problem with Plasticity and Contact** – EMBRACO S.A. 2006.
- [46] PRÉ-PROCESSAMENTO E CONVERGÊNCIA EM ANÁLISE ESTRUTURAL – Não-Linearidade Estrutural -Conceitos Gerais– ESSS Conference & ANSYS Users Meeting, 2016.
- [47] KONTER, A. **How to Undertake a Contact and Friction Analysis**– NAFEMS - International Association For The Engineering Analysis Community, 2000.
- [48] ANALYSIS PROCEDURES - 2019 - ANSYS, Inc. Disponível em: <<https://ansyshelp.ansys.com / Mechanical APDL 2019 R2>>. Acessado em 22 de Out. 2019.
- [49] ADVANCED ANALYSIS GUIDE - 2019 - ANSYS, INC. Disponível em: <<https://ansyshelp.ansys.com / Mechanical APDL 2019 R2>> Acessado em 28 de Out. 2019.

- [50] STREAMLINE PRE-PROCESSING, MESHING AND MATERIALS data Selection with ANSYS 2019 R2. Disponível em <<https://www.ansys.com/blog/ansys-2019-r2-release>>. Acessado em 14 de out. 2019.
- [51] SAE-AISI 1074 (G10740) CARBON STEEL. Disponível em <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/SAE-AISI-1074-G10740-Carbon-Steel/>>. Acessado em 30 de set. 2019.
- [52] COUTINHO, F. M. B; MELLO, I. L; SANTA MARIA, L. C. **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 13(1): 1-13, 2003.
- [53] KAWAKAME, M.S; BRESSAN, J. D. **Atrito e Desgaste em Polímeros**. Disponível em <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC407-017.pdf>>. Acessado em 16 de out. 2019. Depto. de Engenharia Mecânica - Universidade do Estado de Santa Catarina - Congresso Brasileiro De Engenharia E Ciência Dos Materiais, 14, São Pedro – SP, 2000.
- [54] SUH, N. P.; TURNER, P. L. **Elements of the behavior of solid**. Washington, D. C: McGraw-Hill, 615p. 1985.
- [55] COUTINHO, P. P. **Análise de Sensitividade de Temperatura e Envelhecimento do PA-12**. Tese, 63p. Universidade Federal Fluminense, 2015.
- [56] RILSAMID AESNO P 401 TL. Disponível em: <<https://mypolymer.materialdatacenter.com/pds/en/si/rilsamidaesnop401tl>>. Acessado em 23 de Out. 2019.

APÊNDICE A: Método dos Trapézios Implementado com *Visual Basic for Applications*

Sub Calcula_Area() ‘Cada uma das 3 primeiras Subrotinas deste código têm a função de obter a área abaixo da curva Tensão x Deformação de um dos três testes realizados para cada material contidos no formato da Tabela 12.

‘Nesta parte são dimensionadas as variáveis envolvidas no cálculo da área de um trapézio

```
Dim basemaior As Double
Dim basemenor As Double
Dim altura As Double
Dim areadeumtrapezio As Double
Dim areatotal As Double
```

```
i = 14
j = 8
```

‘Nesta estrutura de repetição, cria-se o *loop* necessário para que sejam somados os valores das áreas até que a deformação atinja 99.5% da espessura da amostra

```
Do Until Cells(i, 9).Value > 0.995
    altura = Cells(i + 1, j + 1).Value - Cells(i, j + 1).Value
    basemenor = Cells(i, j - 1).Value
    basemaior = Cells(i + 1, j - 1).Value
    areadeumtrapezio = ((basemaior + basemenor) * altura) / 2
    areatotal = areatotal + areadeumtrapezio
    i = i + 1
Loop
```

```
Cells(14, 10).Value = areatotal
```

```
End Sub
```

```
Sub Calcula_Area2()
```

```
Dim basemaior As Double
Dim basemenor As Double
Dim altura As Double
Dim areadeumtrapezio As Double
Dim areatotal As Double
```

```
i = 14
j = 28
```

```
Do Until Cells(i, 29).Value > 0.995
    altura = Cells(i + 1, j + 1).Value - Cells(i, j + 1).Value
    basemenor = Cells(i, j - 1).Value
    basemaior = Cells(i + 1, j - 1).Value
```

```

    areadeumtrapezio = ((basemaior + basemenor) * altura) / 2
    areatotal = areatotal + areadeumtrapezio
    i = i + 1
Loop
Cells(14, 30).Value = areatotal

End Sub

```

```
Sub Calcula_Area3()
```

```

Dim basemaior As Double
Dim basemenor As Double
Dim altura As Double
Dim areadeumtrapezio As Double
Dim areatotal As Double

i = 14
j = 48

Do Until Cells(i, 49).Value > 0.995
    altura = Cells(i + 1, j + 1).Value - Cells(i, j + 1).Value
    basemenor = Cells(i, j - 1).Value
    basemaior = Cells(i + 1, j - 1).Value
    areadeumtrapezio = ((basemaior + basemenor) * altura) / 2
    areatotal = areatotal + areadeumtrapezio
    i = i + 1
Loop

Cells(14, 50).Value = areatotal

End Sub

```

Sub Compila() ‘Esta última Subrotina compila as médias dos resultados de Energia de Perfuração obtidos nos 3 testes em cada material em uma tabela de resultados, otimizando um processo que levaria mais tempo.

```
Sheets("Resultados").Cells(3, 3).Value = (Sheets("Polímero 1").Cells(14, 10) +
Sheets("Polímero 1").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 1").Cells(14, 50)) / 3
```

```
Sheets("Resultados").Cells(4, 3).Value = (Sheets("Polímero 2").Cells(14, 10) +
Sheets("Polímero 2").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 2").Cells(14, 50)) / 3
```

```
Sheets("Resultados").Cells(5, 3).Value = (Sheets("Polímero 3").Cells(14, 10) +
Sheets("Polímero 3").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 3").Cells(14, 50)) / 3
```

```
Sheets("Resultados").Cells(6, 3).Value = (Sheets("Polímero 4").Cells(14, 10) +
Sheets("Polímero 4").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 4").Cells(14, 50)) / 3
```

```
Sheets("Resultados").Cells(7, 3).Value = (Sheets("Polímero 5").Cells(14, 10) +  
Sheets("Polímero 5").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 5").Cells(14, 50)) / 3  
Sheets("Resultados").Cells(8, 3).Value = (Sheets("Polímero 6").Cells(14, 10) +  
Sheets("Polímero 6").Cells(14, 30) + Sheets("Polímero 6").Cells(14, 50)) / 3
```

End Sub