

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MODELO DE VISCOELASTICIDADE ORTOTRÓPICA:
ESTUDO DE CASO DE UMA PEÇA TERMOPLÁSTICA
INJETADA COM REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL PLACK HAMMES

Florianópolis, dezembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MODELO DE VISCOELASTICIDADE ORTOTRÓPICA:
ESTUDO DE CASO DE UMA PEÇA TERMOPLÁSTICA
INJETADA COM REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO

DANIEL PLACK HAMMES

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

JOSÉ CARLOS PEREIRA, Dr.
Orientador

EDUARDO ALBERTO FANCELLO, D.Sc.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

EDISON DA ROSA, Dr.Eng.
Presidente

MARCELO KRAJNC ALVES, Ph.D.

GEAN VITOR SALMORIA, Dr.

Dedico este trabalho aos
meus pais, Wendelino e Irli.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, pela proteção, bênçãos e oportunidades derramadas em minha vida.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, Prof. José Carlos Pereira, pelo apoio, amizade, paciência e orientações.

Aos meus irmãos Douglas e Rogério e suas famílias.

Aos meus queridos parentes e amigos, por seu amor, dedicação, conselhos, apoio e compreensão despendidos em todas as realizações de minha vida.

Aos meus pais, minha razão de existir.

Ao amigo Armin, responsável pelos ensaios mecânicos, cuja parceria foi fundamental para o sucesso do trabalho.

Aos meus colegas e amigos de laboratório Andresa, Antonio, Augusto, Diego, Dyego, Jakson, Jorge, Juliana, Maicon, Pedro, Ronaldo, pelo excelente convívio e camaradagem.

À todos os professores do GRANTE pelos valiosos conhecimentos repassados.

À Schaeffler, que viabilizou a realização de todos os ensaios desta dissertação.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 – <i>Objetivos Gerais e Específicos</i>	2
1.2 – <i>Motivação do Trabalho</i>	2
1.3 – <i>Apresentação do Trabalho</i>	4
CAPÍTULO 2	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 – <i>Materiais Poliméricos</i>	5
2.1.1 – <i>Materiais Termoplásticos</i>	9
2.1.2 – <i>Materiais Termofixos</i>	10
2.1.3 – <i>Material Viscoelástico</i>	10
2.2 – <i>Materiais Compostos</i>	12
2.2.1 – <i>Materiais Compostos Reforçados com Fibras</i>	15
2.2.1.1 – <i>A Fase Fibra</i>	15
2.2.1.2 – <i>A Fase Matriz</i>	17
2.2.1.3 – <i>Materiais Compostos com Matriz de Polímero</i>	17
2.2.1.3.1 – <i>Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro (GFRP – Glass Fiber-Reinforced Polymer)</i>	18
2.2.1.3.2 – <i>Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP – Carbon Fiber-Reinforced Polymer)</i>	19
2.2.1.3.3 – <i>Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibras de Aramida</i>	19
2.2.1.3.4 – <i>Outros materiais para reforço com fibras</i>	21
2.2.1.3.5 – <i>Outros materiais como matrizes poliméricas</i>	21
CAPÍTULO 3	22
MODELOS DE VISCOELASTICIDADE LINEAR	22
3.1 – <i>Modelo de Viscoelasticidade Linear Isotrópica de Zener</i>	24
3.2 – <i>Modelo de Viscoelasticidade Linear Ortotrópica</i>	26

CAPÍTULO 4	29
ENSAIOS MECÂNICOS EM CORPOS DE PROVA EM MATERIAL POLIMÉRICO	29
4.1 – <i>Corpos de Prova</i>	29
4.2 – <i>Ensaio de Tração</i>	30
4.3 – <i>Ensaio de Fluência</i>	39
4.3.1 – <i>Aparato Experimental para o Ensaio de Fluência</i>	39
4.3.2 – <i>Condições Iniciais e Procedimento de Ensaio</i>	45
4.3.3 – <i>Curvas de Fluência</i>	49
4.3.4 – <i>Ajuste do Modelo de Viscoelasticidade Ortotrópica</i>	54
CAPÍTULO 5	68
ESTUDO DE CASO - GUIA DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO COMANDO DE VÁLVULAS POR CORRENTE	68
5.1 – <i>Apresentação do Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente</i>	68
5.2 – <i>Processo de Injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente</i>	70
5.2.1 – <i>Características do Processo de Injeção</i>	71
5.2.2 – <i>Modelo para a Simulação da Injeção</i>	74
5.3 – <i>Ensaio Mecânico no Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente</i>	79
5.3.1 – <i>Caracterização do Ensaio Mecânico</i>	79
5.3.2 – <i>Avaliação dos Resultados do Ensaio Mecânico</i>	80
5.4 – <i>Simulação Numérica do Ensaio Mecânico na Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente</i>	82
5.4.1 – <i>Simulação na Guia com o Technyl A118 V50</i>	83
5.4.2 – <i>Simulação na Guia com o Technyl A218 V35</i>	86
CAPÍTULO 6	89
AVALIAÇÕES FINAIS	89
6.1 – <i>Conclusões</i>	89
6.2 – <i>Propostas para Trabalhos Futuros</i>	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICE A	94
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA	94
APÊNDICE B	96
IDENTIFICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA	96
APÊNDICE C	123
ENSAIO MECÂNICO DE FLUÊNCIA NO GUIA DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO COMANDO DE VÁLVULAS POR CORRENTE	123

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Guia do sistema de acionamento do comando de válvulas por corrente.</i>	3
<i>Figura 1.2 – Componentes da bomba de óleo.</i>	3
<i>Figura 1.3 – Rolamento de embreagem.</i>	3
<i>Figura 2.1 - Cadeia de polietileno.</i>	5
<i>Figura 2.2 - Cadeia de polibutadieno.</i>	5
<i>Figura 2.3 - Cadeia de nylon.</i>	5
<i>Figura 2.4 - Cadeia de policarbonato.</i>	6
<i>Figura 2.5 - Microestrutura amorfa.</i>	7
<i>Figura 2.6 - Microestrutura cristalina.</i>	7
<i>Figura 2.7 - Polímeros semicristalinos</i>	8
<i>Figura 2.8 – Volume específico vs. temperatura.</i>	9
<i>Figura 2.9 –Manifestações físicas do comportamento viscoelástico em materiais estruturais, como demonstrado pelos vários tipos de carregamento aplicados a uma barra viscoelástica.</i>	11
<i>Figura 2.10 – Representação esquemática de características geométricas e espaciais de partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos materiais compostos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.</i>	13
<i>Figura 2.11 – Esquema de classificação para vários tipos de materiais compostos.</i>	14
<i>Figura 2.12 - Configuração de um elemento com fibras unidirecionais.</i>	14
<i>Figura 3.1 – Fenômenos de fluência e relaxação em materiais viscoelásticos.</i>	22
<i>Figura 4.1 – Dimensões principais dos corpos de prova Tipo I.</i>	30
<i>Figura 4.2 – Diagrama tensão x deformação para o material Technyl A118 V50.</i>	30
<i>Figura 4.3 – Corpos de prova: (a) com inserto em fibras e (b) sem inserto em fibras.</i>	31
<i>Figura 4.4 – Máquina de ensaio de tração padrão Emic DL3000.</i>	31
<i>Figura 4.5 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A118 V50: (a) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{11}$), (b) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{22}$) e (c) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{30^\circ}$).</i>	33
<i>Figura 4.6 – Formato de corpos de prova em material ortotrópico para a obtenção das constantes elásticas.</i>	34
<i>Figura 4.7 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A218 V35: (a) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{11}$), (b) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{22}$) e (c) ($\sigma_{11} \times \epsilon_{30^\circ}$).</i>	36

Figura 4.8 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A118: (a) ($\sigma_{11} \times \varepsilon_{11}$), (b) ($\sigma_{11} \times \varepsilon_{22}$).	37
Figura 4.9 – Unidade de ensaio de fluência.	40
Figura 4.10 - Dispositivo de fixação do corpo de prova.	41
Figura 4.11 - Dispositivo de carregamento.	42
Figura 4.12 – Strain gage de formato Roseta 0° /90°.	42
Figura 4.13 – Representações da ponte de Wheatstone.	43
Figura 4.14 – Deformações medidas nos corpos de prova.	44
Figura 4.15 - Placas para completar a ponte de Wheatstone.	44
Figura 4.16 – Componentes de um ensaio de fluência.	45
Figura 4.17 – Diagrama do sistema de medição para extensômetros elétricos.	45
Figura 4.18 – Evolução da temperatura ao longo do ensaio em função.	47
Figura 4.19 - Corpos de prova instrumentados sendo ensaiados com o compensador de deformação térmica “dummy”.	47
Figura 4.20 – Evolução da deformação do “dummy” em função da variação de temperatura ao longo do ensaio de fluência.	48
Figura 4.21 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	49
Figura 4.22 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	50
Figura 4.23 – Evolução da deformação diagonal $\varepsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A118 V50.	50
Figura 4.24 – Módulo de fluência $J(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa – Technyl A118 V50.	51
Figura 4.25 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	52
Figura 4.26 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	52
Figura 4.27 – Evolução da deformação diagonal $\varepsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A218 V35.	53
Figura 4.28 – Módulo de fluência $J(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	53
Figura 4.29 – Relação entre os parâmetros a serem ajustados na fluência.	54
Figura 4.30 – Identificação dos eixos de ortotropia no modelo de corpo de prova.	55
Figura 4.31 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	56

Figura 4.32 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	56
Figura 4.33 – Evolução da deformação diagonal $\varepsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A118 V50.	57
Figura 4.34 – Zoom da evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ nos instantes iniciais de aplicação das tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	57
Figura 4.35 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	58
Figura 4.36 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A118 V50.	59
Figura 4.37 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A118 V50.	59
Figura 4.38 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A118 V50.	60
Figura 4.39 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A118 V50.	60
Figura 4.40 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A118 V50.	61
Figura 4.41 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	62
Figura 4.42 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	62
Figura 4.43 – Evolução da deformação diagonal $\varepsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A218 V35.	63
Figura 4.44 – Zoom da evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ nos instantes iniciais de aplicação das tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	63
Figura 4.45 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	64
Figura 4.46 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4 \cdot 10^6$ s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A218 V35.	65
Figura 4.47 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A218 V35.	65
Figura 4.48 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4 \cdot 10^6$ s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A218 V35.	66
Figura 4.49 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A218 V35.	66
Figura 4.50 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4 \cdot 10^6$ s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A218 V35.	67

<i>Figura 5.1 – Sistema de corrente para o sincronismo do comando de válvulas com o virabrequim.</i>	68
<i>Figura 5.2 – Componentes do sistema de transmissão de um automóvel.</i>	69
<i>Figura 5.3 – Guia Tensionadora de Corrente do Sistema de Transmissão.</i>	70
<i>Figura 5.4 – Processo de injeção de peça em material polimérico (fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding#Equipment)</i>	71
<i>Figura 5.5 – Orientação das fibras: a) posição do corte 1 na Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) zoom de 86 vezes da região indicada e d) zoom de 473 vezes da região indicada.</i>	72
<i>Figura 5.6 – Orientação das fibras: a) posição do corte 2 na Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) zoom de 225 vezes da região indicada e d) zoom de 110 vezes da região indicada.</i>	73
<i>Figura 5.7 – Modelo para simulação da injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	74
<i>Figura 5.8 – Distribuição das tensões residuais σ_{11} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	75
<i>Figura 5.9 – Distribuição das tensões residuais σ_{22} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	75
<i>Figura 5.10 – Distribuição das tensões residuais σ_{33} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	76
<i>Figura 5.11 – Orientação das fibras ao final do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	76
<i>Figura 5.12 – Orientação das fibras: a) posição do corte 1 no Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) detalhe ampliado da região indicada e d) detalhe ampliado da região indicada.</i>	77
<i>Figura 5.13 – Orientação das fibras: a) posição do corte 2 no Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) detalhe ampliado da região indicada e d) detalhe ampliado da região indicada.</i>	78
<i>Figura 5.14 – Configuração do ensaio mecânico na Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.</i>	79
<i>Figura 5.15 – Posição dos extensômetros para a medição das deformações.</i>	80
<i>Figura 5.16 – Resultados do ensaio de fluência na Guia.</i>	81
<i>Figura 5.17 – Evolução do deslocamento do ponto A.</i>	81
<i>Figura 5.18 – Modelo da Guia com a orientação das fibras alinhadas ao eixo longitudinal.</i>	82
<i>Figura 5.19 – Modelo da Guia com a carga e as restrições aplicadas.</i>	83
<i>Figura 5.20 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° obtidas com o modelo numérico - Technyl A118 V50.</i>	84
<i>Figura 5.21 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° nos instantes iniciais - Technyl A118 V50.</i>	84
<i>Figura 5.22 – Evolução do deslocamento do ponto A - Technyl A118 V50.</i>	85
<i>Figura 5.23 – Evolução do deslocamento instantâneo do ponto A - Technyl A118 V50.</i>	85

<i>Figura 5.24 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45^0 obtidas com o modelo numérico - Technyl A218 V35.</i>	87
<i>Figura 5.25 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45^0 nos instantes iniciais - Technyl A218 V35.</i>	87
<i>Figura 5.26 – Evolução do deslocamento do ponto A - Technyl A218 V35.</i>	88
<i>Figura 5.27 – Evolução do deslocamento instantâneo do ponto A - Technyl A218 V35.</i>	88

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Características mecânicas dos materiais das fibras.</i>	16
<i>Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais compostos com matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas, de vidro, carbono e aramida nas direções longitudinais e transversais.</i>	20
<i>Tabela 4.1 – Constantes elásticas dos materiais denominados Technyl.</i>	38
<i>Tabela 4.2 – Distribuição das direções das deformações para os três níveis de tensões.</i>	46
<i>Tabela 4.3 – Constantes elásticas dos materiais denominados Technyl A118 V50.</i>	55
<i>Tabela 4.4 – Constantes elásticas dos materiais denominados Technyl A218 V35.</i>	61
<i>Tabela 5.1 – Constantes elásticas do material Technyl A118 V50 para simulação da Guia.</i>	83
<i>Tabela 5.2 – Comparação dos resultados obtidos com o modelo numérico com os resultados do ensaio mecânico.</i>	86
<i>Tabela 5.3 – Constantes elásticas do material Technyl A118 V35 para simulação da Guia.</i>	86

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

E_0 – módulo de elasticidade no instante $t = 0$,

E_1 – módulo de elasticidade na direção 1 do sistema de eixos de ortotropia,

E_2 – módulo de elasticidade na direção 2 do sistema de eixos de ortotropia,

E_m – módulo de elasticidade da matriz,

G_{12} – módulo de cisalhamento no plano 1-2,

G_m – módulo de cisalhamento da matriz,

$J(t)$ – módulo de fluência,

q_0 , p_1 e q_1 – constantes relacionadas às propriedades das molas e dos amortecedores nos modelos de Maxwell e de Kelvin.

$Y(t)$ – módulo de relaxação,

t – tempo,

V_1 – Tensão de excitação da ponte de Wheastone,

V_2 – Tensão de saída da ponte de Wheastone,

R – Valor da resistência elétrica dos resistores e/ou strain-gage na ponte de Wheastone,

V_2/V_1 – Desequilíbrio da ponte,

S – Gage Factor do strain-gage.

ALFABETO GREGO

δ_{ij} – delta de Kronecker,

ν_{12} – coeficiente de Poisson (carga aplicada na direção 1 e deformação medida na direção 2),

λ_1 e μ_1 – constantes elásticas de Lamé na direção 1 do sistema de eixos de ortotropia,

λ_2 e μ_2 – constantes elásticas de Lamé na direção 2 do sistema de eixos de ortotropia,

ν_1 , λ_1 e μ_1 – constantes de Lamé na direção 1 do sistema de eixos de ortotropia associadas às taxas de tensão e deformação,

ν_2 , λ_2 e μ_2 – constantes de Lamé na direção 2 do sistema de eixos de ortotropia associadas às taxas de tensão e deformação,

σ_0 – tensão inicial aplicada,

σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} – tensões normais no sistema de eixos x , y e z ,

σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} – tensões cisalhantes no sistema de eixos x , y e z ,

ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} – deformações normais no sistema de eixos x , y e z ,

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – deformações cisalhantes no sistema de eixos x, y e z,
 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ – tensões normais no sistema de eixos de ortotropia,
 $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ – deformações normais no sistema de eixos de ortotropia,
 $\dot{\sigma}_{xx}, \dot{\sigma}_{yy}, \dot{\sigma}_{zz}$ – taxa de tensão,
 $\dot{\varepsilon}_{xy}, \dot{\varepsilon}_{yz}, \dot{\varepsilon}_{zx}$ – taxa de deformação,
 ε_v – deformação volumétrica,
 $\varepsilon(t)$ – evolução da deformação no tempo,
 $\sigma(t)$ – evolução da tensão no tempo,

RESUMO

Com o surgimento de novos materiais para aplicação em produtos inovadores, a engenharia se vê diante de questões a serem solucionadas em praticamente todas as etapas do seu desenvolvimento. Nas etapas de projeto conceitual, preliminar e detalhado do produto, aspectos como processo produtivo e simulação de desempenho mecânico devem ser avaliados com muita atenção de forma que os requisitos técnicos e econômicos sejam atendidos concomitantemente. Neste sentido, os materiais compostos, que estão constantemente em evolução para serem adaptados às novas demandas da engenharia, necessitam de modelos matemáticos aperfeiçoados, de forma que seu comportamento seja compreendido e o desempenho mecânico de produtos fabricados com estes materiais seja previsto. Sendo a injeção um processo produtivo comumente utilizado para fabricar peças em material polimérico, é importante simular não somente seu desempenho mecânico, mas também o processo de injeção. Parâmetros como ponto de injeção, temperatura e pressão de injeção, tensões residuais, são aspectos importantes a serem avaliados nesse momento. Se ao material polimérico forem adicionadas fibras curtas ainda no processo de injeção, de forma a reforçar mecanicamente essa peça, o parâmetro orientação das fibras passa a ter um papel importante nessa avaliação de desempenho, além do fato do material se tornar ortotrópico, tendo propriedades mecânicas diferentes em três eixos ortogonais. Em razão do exposto acima, este trabalho tem como objetivo, desenvolver um modelo matemático para a viscoelasticidade linear ortotrópica para empregá-lo em materiais compostos feitos com uma matriz polimérica com insertos em fibra de vidro curta. Para aplicar este modelo matemático, propõe-se realizar um estudo de caso de uma peça automotiva produzida pela empresa Schaeffler e analisá-la desde o seu processo de injeção até a avaliação do seu desempenho mecânico. Estas duas etapas serão analisadas numericamente fazendo uso de dois softwares que se integram e posteriormente por meio de microscopia eletrônica e ensaio mecânico. Ensaio mecânicos de tração e de fluência em corpos de prova serão realizados de forma a alimentar o modelo matemático com as propriedades mecânicas do material empregado para a fabricação da referida peça.

Palavras-chave: Material polimérico, fibras curtas, viscoelasticidade linear, ortotropia, testes de tração simples, testes de fluência, simulação numérica.

ABSTRACT

With the development of new materials for application in innovative products, engineering is in front of questions to be solved in some steps of its design. At the conceitual project, preliminary project and the detailed project of the product, aspects as production process and simulation of the mechanical performance would be analysed in order to technicals and economics requests be met together. So, composites materials which are in constant evolution need advanced mathematical models in order to prevent the mechanical behaviour of components produced with this material. As the injection process is commonly used to produce components in polymeric materials is important to simulate not only the mechanical behavior but also the injection process. Parameters like injection point, temperature and pressure injection and residuals stress are important variables to be analysed. If aditionally short fibers are introduced in the injection process, as a mechanical strengthening to improve the performance of the component, the fiber orientation and the orthotropic properties have to be determined.

So, the objectif of this work is to develop a mathematical model for a linear viscoelasticity in composite materials made with polymeric matrix and short fiber. In order to apply this model, it is proposed a case study in an automotive component produced by Schaeffler Company and investigate its injection process and its mechanical behavior. These two steps will be investigated numerically using two softwares that are integrated. After that, electronic microscopy and mechanical tests will be made. Tensile tests and creep tests will be made in specimes in order to determine elastics constants and time variable data for the mathematical model.

Key-words: Polymeric materials, short fiber, linear viscoelasticity, orthotropy, tensile tests, creep tests and numerical simulation.

CAPÍTULO 1

Introdução

A competitividade entre as empresas que aplicam conceitos de engenharia leva sempre ao desenvolvimento de novos produtos que empregam tecnologias inovadoras. Neste sentido, o desenvolvimento de novos materiais que permitem uma aplicação mais ampla destes produtos, associado a um baixo custo de fabricação, fazem com que os materiais poliméricos sejam amplamente aplicados dentro da engenharia em detrimento aos materiais metálicos. Dentre as áreas da engenharia, aquela que vem gradativamente empregando este tipo de material na linha de produção de seus produtos ou componentes, a área automotiva merece destaque. Cada vez mais nesta área, peças em material metálico estão sendo substituídas por peças em material polimérico, mais especificamente, em material plástico injetado. Esta substituição do material da peça requer não somente conhecimento do seu comportamento mecânico, como também requer mudança do processo de fabricação e tudo o que pode acarretar em decorrência do processo empregado.

Uma das grandes vantagens apresentadas pelos materiais plásticos, quando comparadas com os materiais metálicos, pode ser: o baixo custo da matéria prima, seu baixo peso, capacidade de absorção de vibrações, resistência à ambientes corrosivos e a altas temperaturas, facilidade em produzir peças com geometria complexa, etc. Em algumas situações, o tempo de fabricação das peças pode também ser reduzido, implicando na redução do custo final de produção de um componente. Estes aspectos, podem inclusive refletir positivamente no desempenho de um automóvel quando alguns de seus componentes são produzidos em material plástico como, por exemplo, na relação potência/peso. Em situações onde ocorrem contatos entre alguns de seus elementos, o desgaste pode ser reduzido acarretando num aumento da vida útil, reduzindo, conseqüentemente, o custo de manutenção.

Entretanto, os materiais poliméricos, principalmente os termoplásticos, apresentam um comportamento bastante pronunciado de fluência e relaxação. Estas características devem ser levadas em conta quando peças são solicitadas por esforços durante um certo período de tempo, levando à uma deformação evolutiva no tempo, ou quando são deformadas localmente devido a um acoplamento por interferência, sendo as tensões resultantes reduzidas gradativamente. Além disso, este material apresenta uma instabilidade dimensional importante, principalmente quando operando imerso em um fluido. Esta característica faz com que os projetistas de peças neste material, considerem os efeitos de retração, quando retiradas da matriz, e de higroscopia, pois são materiais porosos que absorvem umidade.

Visto que o emprego deste material tem sido cada vez maior, os engenheiros frequentemente se deparam com situações nas quais soluções inovadoras devem ser usadas. Para utilizar material polimérico na fabricação de peças onde se exige alta rigidez e resistência, opta-se por inserir um reforço, normalmente de fibra de vidro, na direção mais solicitada da mesma. Este reforço é inserido ainda no processo de produção da matéria prima. Este conceito de misturar dois materiais com propriedades distintas, resultando num outro material com propriedades

superiores aos dois anteriores, é conhecido como material composto ou compósito. Maiores detalhes sobre estes materiais estão apresentados na Seção 2.2. O fato de inserir um reforço no material polimérico induz a uma anisotropia do material resultante. Em função da geometria da peça, como também dos pontos de injeção da matéria prima no molde, a orientação dos reforços, é de difícil previsão, o que pode não garantir o reforço da peça nas direções predefinidas. Além disso, nas regiões de mudança de seção, que são geralmente pontos da peça que apresentam grande concentração de tensão, são onde a orientação das fibras é mais aleatória, em razão da turbulência que ocorre no fluxo da matéria prima no momento da sua injeção.

Considerando o aspecto supracitado, referente à anisotropia do material plástico injetado com insertos em fibras de vidro, é importante que se tenha conhecimento das propriedades mecânicas do material de forma mais precisa, para que a previsão do comportamento mecânico de componentes automotivos produzidos neste tipo de material seja mais condizente com a sua real morfologia.

1.1 – Objetivos Gerais e Específicos

Pretende-se neste trabalho de dissertação de mestrado, com o auxílio de ferramentas de simulação numérica, amparadas em ensaios mecânicos em corpos de prova, identificar de forma mais adequada às propriedades mecânicas de dois tipos de material plástico injetado com inserto de fibras de vidro, para conseqüentemente propor modelos matemáticos mais confiáveis para a previsão do comportamento mecânico de peças produzidas com este tipo de material.

Especificamente, pretende-se neste trabalho propor um modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica a ser implementado em um software comercial por meio de uma subrotina do usuário. Propõe-se também realizar ensaios de fluência em corpos de prova de material polimérico com inserto de fibras de vidro curtas, para posteriormente ajustar o modelo proposto. Como uma proposta de aplicação desta metodologia, propõe-se fazer um estudo de caso em uma peça usada como um componente de um motor de automóvel. Esta etapa consistirá em simular numericamente seu processo de injeção de forma a identificar a orientação das fibras. Em seguida, inserir as curvas do material levantadas nos ensaios de fluência nas suas direções de ortotropia, para posteriormente simular uma situação de carregamento fazendo uso do modelo de viscoelasticidade implementado. Esta situação de carregamento será também ensaiada em laboratório e seus resultados serão comparados com os resultados obtidos numericamente.

1.2 – Motivação do Trabalho

O Grupo Schaeffler, proprietário das marcas INA, FAG e LuK, entre outras, atua nas áreas automotiva, industrial e aeroespacial. Na área automotiva, na qual é líder no mercado, o grupo produz componentes para transmissão manual e automática, bem como pacotes de sincronização, conversores de torque, componentes para CVT (Continuous Variable Transmission), componentes para motores, trem de válvula, circuito primário e acessório, como também rolamentos de roda, direção, suspensão e embreagem.

Capítulo 1 - Introdução

Seguindo a tendência do mercado automotivo, o Grupo Schaeffler tem investido no desenvolvimento de peças em material plástico injetado com inserto em fibras de vidro. Dentre os componentes produzidos neste tipo de material estão: o guia do sistema de acionamento do comando de válvulas por corrente, componentes da bomba de óleo e o rolamento de embreagem, conforme apresentado nas Figuras 1.1, 1.2 e 1.3, respectivamente.

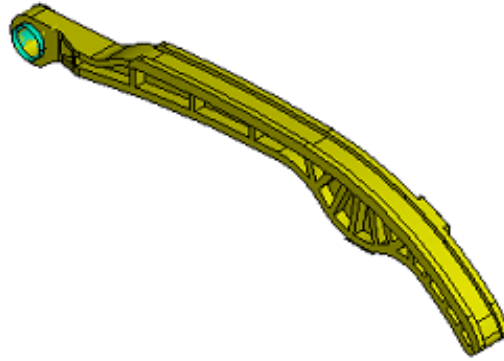


Figura 1.1 – Guia do sistema de acionamento do comando de válvulas por corrente.



Figura 1.2 – Componentes da bomba de óleo.

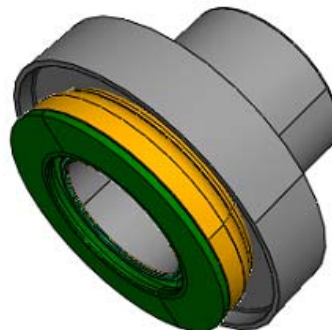


Figura 1.3 – Rolamento de embreagem.

Estes componentes podem operar dentro de uma faixa grande de temperatura, de -40°C a 150°C para o rolamento de embreagem ; em ambientes úmidos, como bomba de óleo; e serem solicitados termo-mecanicamente por cargas cíclicas.

O Grupo Schaeffler pretende com este trabalho adquirir maior experiência no desenvolvimento de peças em material plástico injetado com inserto de fibras de vidro, com base em conceitos tecnicamente confiáveis, de forma que se possa definir critérios de aceitação de projeto de seus produtos.

De forma a aplicar a metodologia relatada nos objetivos deste trabalho, o componente denominado guia de acionamento do comando de válvulas por corrente foi escolhido para se fazer um estudo de caso. A apresentação deste componente é feita de uma forma mais detalhada no Capítulo 5.

1.3 – Apresentação do Trabalho

A apresentação deste trabalho está dividida em 5 capítulos. O Capítulo 1 é reservado à sua introdução, a apresentação dos objetivos e à sua motivação. No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre os materiais poliméricos e os materiais compostos. No Capítulo 3 é apresentado o modelo de viscoelasticidade linear isotrópica de Zener, o qual foi tomado como referência para o desenvolvimento posterior do modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica para ser aplicado em materiais compostos com matriz polimérica reforçados com fibras curtas. No Capítulo 4 são feitos os ensaios mecânicos de tração e de fluência em corpos de prova de mesmo material a ser usado no componente automotivo usado como estudo de caso. No Capítulo 5 é apresentado o componente automotivo: sua aplicação, seu processo de fabricação e a simulação desse processo, e a análise estrutural, cujos resultados são comparados com resultados experimentais. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros. Nos Apêndices A, B e C são mostrados o método de resolução numérica da equação diferencial de viscoelasticidade ortotrópica, imagens de microscopia eletrônica e os resultados do ensaio mecânico de fluência no componente automotivo.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 – Materiais Poliméricos

Um polímero é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas e simples unidades ou cadeias químicas, chamadas de monômeros, ligadas covalentemente, conforme (Lucas, E., 2001) e (Ashby, 1998). Dentre os polímeros incluem-se os materiais plásticos comumente conhecidos e os materiais emborrachados. A maioria dos polímeros são compostos orgânicos que em sua essência contém na sua cadeia química carbono, hidrogênio e outros elementos não metálicos, conforme mostrado na Figura 2.1. Estes compostos têm longas cadeias moleculares e massa relativa grande, resultantes de reações químicas de polimerização. Nas Figuras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 são ilustrados exemplos destas cadeias. As principais características dos polímeros são a baixa densidade e a possibilidade de serem extremamente flexíveis.

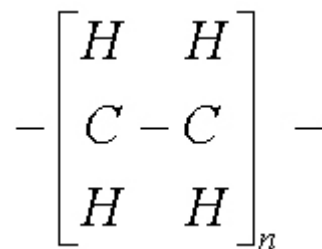


Figura 2.1 - Cadeia de polietileno.

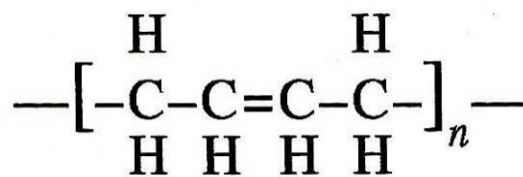


Figura 2.2 - Cadeia de polibutadieno.

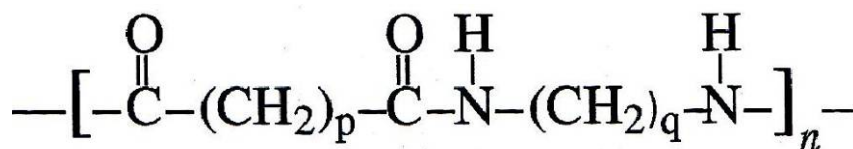


Figura 2.3 - Cadeia de nylon.

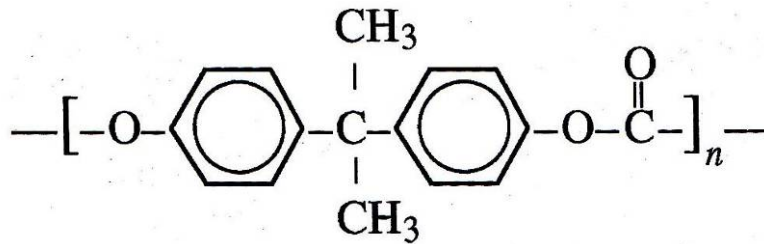


Figura 2.4 - Cadeia de policarbonato.

Distinguem-se qualitativamente os polímeros em dois tipos: os com ligações cruzadas e os com ligações não cruzadas. Nos materiais poliméricos com ligações cruzadas a união das longas cadeias é feita por entrelaces e por pontes químicas entre as moléculas. Diferentemente dos polímeros com ligações cruzadas, nos com ligações não cruzadas as moléculas são unidas somente por entrelaces. Dentre os polímeros que possuem somente ligações não cruzadas há ainda a possibilidade de classificá-los como *fluidos viscoelásticos*, desde que, enquanto uma força for aplicada nestas cadeias, a deformação continue indefinidamente. Já os polímeros que possuem somente ligações cruzadas podem ser chamados de *sólido viscoelástico* desde que estas ligações produzam forças de equilíbrio quando as deformações excederem um certo valor (Lucas, E., 2001).

Incomparável na diversidade das propriedades, polímeros como algodão, lã, borracha, teflon e os plásticos são usados em quase toda indústria. Podem ser produzidos polímeros naturais e sintéticos com uma gama extensa de dureza, rigidez e resistência mecânica, resistência ao calor, densidade e até mesmo preço. Dentre os polímeros naturais tem-se a celulose, o algodão, a lã, a seda e a borracha. O acrílico, o isopor, o teflon e o PVC são exemplos de materiais poliméricos sintéticos. Com a pesquisa continuada na ciência dos polímeros, estes materiais assumem um papel de grande importância na busca da melhor solução na seleção de materiais nas mais diversas aplicações na engenharia.

O desenvolvimento científico elevou o número de polímeros para atender às mais diversas áreas de aplicações. É possível listar uma série deles, agrupados de acordo com uma determinada classificação. A literatura especializada apresenta várias formas de classificação dos polímeros, como pode ser observado em (Callister Jr., 1999), (Canevarolo Jr., 2002), (van der Vegt, 2002) e (Ashby, 1998). Pode-se classificá-los quanto à estrutura química, quanto ao método de preparação, quanto ao comportamento e ao desempenho mecânico. Na classificação quanto ao comportamento mecânico têm-se uma divisão em três grandes grupos: plásticos, elastômeros e fibras.

Os plásticos têm a característica de serem sólidos na temperatura ambiente e sua estrutura química ser baseada em cadeias poliméricas que possuem componentes adicionais com o propósito de fornecer-lhes características especiais. Podem ser subdivididos em termoplásticos e termofixos, ou termoresistentes, os quais serão melhores descritos adiante. Os elastômeros possuem cadeias flexíveis ligadas umas às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Como exemplo típico de elastômero, pode-se citar a borracha. Essas cadeias fazem com que esses polímeros aceitem grandes deformações, mantendo bons a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, e após a retirada do esforço há uma recuperação rápida e total da deformação. Já as fibras são um tipo de termoplástico orientado que têm a razão entre o comprimento e o diâmetro efetivo da seção transversal do seu corpo

maior ou igual a 100. Elas têm alta resistência mecânica e à abrasão, alto grau de cristalinidade e de módulo de elasticidade além de um elevado peso molecular. Alguns exemplos são o poliéster e o nylon.

Os materiais poliméricos são formados pelos estados, amorfo e cristalino, como mostram as Figuras 2.5 e 2.6. A microestrutura do tipo amorfa consiste de arranjos em três dimensões de emaranhados aleatórios de longas cadeias de moléculas poliméricas que são frequentemente caracterizadas por analogia a uma “bola de espaguete”. Por outro lado, a microestrutura cristalina consiste de regulares e ordenados arranjos de átomos cristalinos.

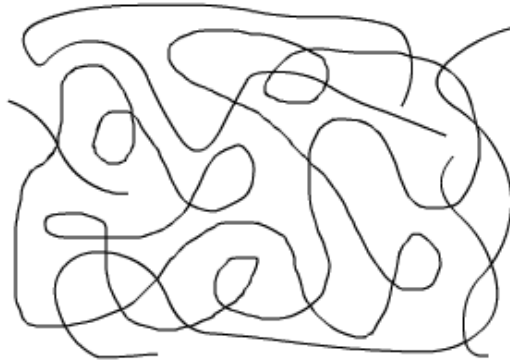


Figura 2.5 - Microestrutura amorfa.

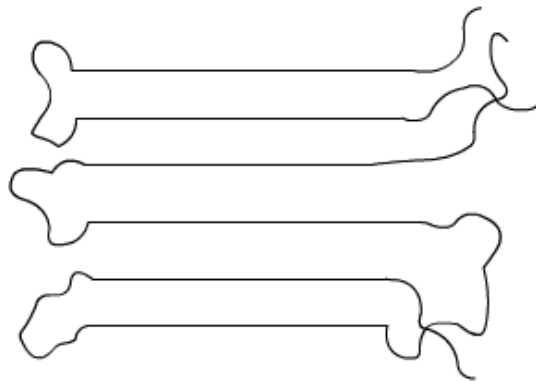


Figura 2.6 - Microestrutura cristalina.

Alguns polímeros têm componentes amorfos e cristalinos em sua microestrutura, e alguns polímeros são puramente amorfos. Sólidos poliméricos são, em sua maioria, referenciados como semicristalinos, pois em qualquer região ocupada pelas cadeias poliméricas ou parte delas, um arranjo ordenado e regular irá coexistir com regiões desordenadas, ver Figura 2.7. Polímeros com microestruturas amorfas tendem a ser mais viscoelásticos que aqueles com microestruturas cristalinas.

As propriedades mecânicas dos polímeros são dependentes da temperatura. Considera-se o fenômeno de transição do estado vítreo (glass state $T < T_g$) para o estado borrachoso (rubbery state $T_g < T < T_m$), sendo:

- T_g – temperatura de transição vítrea,
- T_m – temperatura de derretimento.

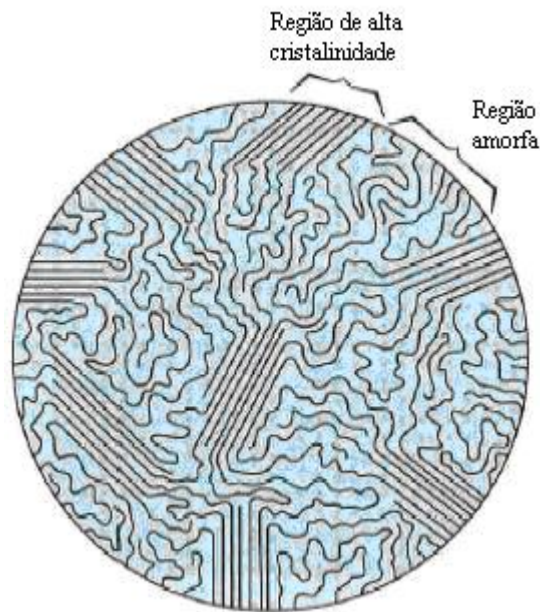


Figura 2.7 - Polímeros semicristalinos

As temperaturas de transição vítrea T_g (temperatura de vitrificação) e T_m (temperatura de derretimento) são determinadas pelo gráfico de temperatura versus volume específico que é mostrado na Figura 2.8. Os polímeros cristalinos, representados pela curva C do gráfico, e os polímeros semicristalinos, representados pela curva B, apresentam uma mudança brusca no seu volume específico quando atingem a temperatura de derretimento, este último de uma forma menos acentuada. Já os polímeros totalmente amorfos, representados pela curva A, apresentam um aumento linear do seu volume específico, mesmo após passar da temperatura de derretimento. Abaixo de T_g o material é considerado um sólido amorfo, e quando tensionado, não apresenta um comportamento viscoelástico até a região próxima a T_g . O comportamento viscoelástico começa a ser bem significativo acima de T_g , onde o material está no estado emborrachado, mais especificamente entre T_g e T_m . Esses valores de T_g e T_m variam para cada polímero e são determinados por fatores como a capacidade das cadeias de formar forças *de van der Waals* (Ashby, 1998) e (Gibson, 1994.), o peso molecular destas cadeias e o processo de fabricação.

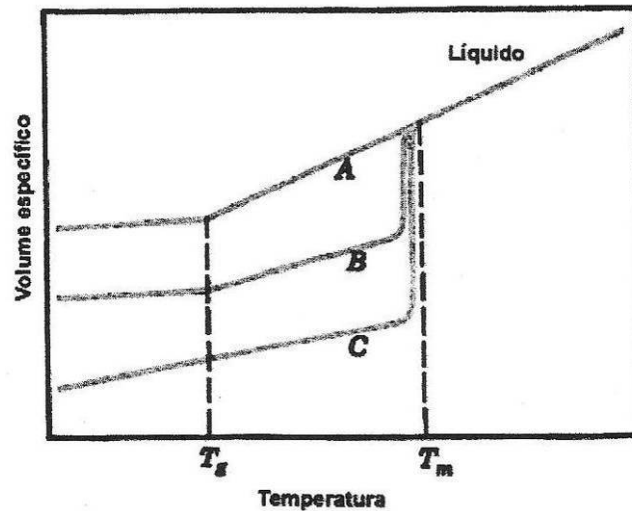


Figura 2.8 – Volume específico vs. temperatura.

A seguir, serão apresentados detalhadamente os diferentes tipos de materiais poliméricos, os termoplásticos e os termofixos, além dos materiais que apresentam um comportamento viscoelástico, apesar deles estarem numa das duas categorias anteriores.

2.1.1 – Materiais Termoplásticos

Os polímeros termoplásticos amolecem quando aquecidos, e eventualmente derretem, e endurecem quando resfriados. Este processo é totalmente reversível e pode ser repetido, o que lhes dá o adjetivo de recicláveis. Quando resfriados, tais polímeros retomam a sua rigidez inicial. Estes materiais possuem ligações não cruzadas e são facilmente remodelados pela aplicação simultânea de calor e pressão, o que faz com que eles possam ser reciclados a partir de rejeitos e refugos. O comportamento deste tipo de polímero viabiliza a produção em larga escala de artefatos através de meios como a extrusão e a moldagem por injeção.

Polímeros termoplásticos são caracterizados por possuírem ligações químicas fracas entre as cadeias, denominadas de forças *van der Waals*, que assim, podem ser facilmente rompidas com a introdução de energia. Dessa forma, quando tais materiais são aquecidos, as ligações são quebradas, permitindo que haja uma maior mobilidade entre as cadeias poliméricas. Em um nível molecular, quando a temperatura cresce, forças secundárias de ligação são reduzidas pelo aumento do movimento molecular, de maneira que o movimento relativo das cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. A capacidade das cadeias de fluir com a aplicação de temperatura garante a esses materiais suas características fundamentais de fácil re-processabilidade.

A degradação irreversível ocorre quando a temperatura de um polímero termoplástico derretido aumenta ao ponto em que as vibrações moleculares se tornam violentas, suficientes para quebrar as ligações covalentes primárias. Em adição, os materiais termoplásticos são relativamente moles e dúcteis. A maioria dos polímeros lineares e aqueles tendo alguma estrutura ramificada com cadeias flexíveis são termoplásticos. Exemplos desse tipo de polímero são o polietileno, o polipropileno, o PVC (PoliCloro de Vinila), o politetrafluoretileno (Teflon®) e o Nylon®.

2.1.2 – Materiais Termofixos

Os polímeros termofixos, ou termoresistentes, se tornam permanentemente sólidos quando lhe é aplicado calor e não amolecem com a aplicação de calor posterior. Por essa razão, uma vez produzidos, não podem ser reprocessados. Para esse tipo de polímero, uma elevação contínua da temperatura leva à degradação do material antes que qualquer alteração mais dramática nas propriedades mecânicas ocorra. Sendo assim, tais materiais são de difícil reciclagem e após terem adquirido sua forma final, apenas etapas de processamento via usinagem são possíveis.

Durante a aplicação do calor inicial, ligações cruzadas covalentes são formadas entre cadeias moleculares adjacentes. Este vínculo mantém as cadeias unidas para resistir aos movimentos vibracionais e rotacionais das cadeias em altas temperaturas. Ligações cruzadas são usualmente extensas, visto que, de 10 a 50% das cadeias unitárias são ligações cruzadas. Somente o aquecimento a temperaturas excessivas irá causar a separação deste vínculo nas ligações cruzadas, e levar, conseqüentemente, à degradação destes polímeros. Materiais termofixos são geralmente mais duros, porém frágeis, e tem uma melhor estabilidade dimensional que os termoplásticos. A maior parte dos polímeros com ligações cruzadas, que incluem borrachas vulcanizadas, resina epóxi, resina fenólica e resina de poliéster são termofixos.

2.1.3 – Material Viscoelástico

A palavra viscoelástico é empregada na engenharia para descrever materiais que exibem características de fluidos viscosos e sólidos elásticos, como mostra (Gibson, 1994.). Materiais poliméricos, que são conhecidos como sendo viscoelásticos, podem se comportar como fluidos ou sólidos, dependendo da escala do tempo e/ou da temperatura. Por exemplo, o policarboneto, um polímero termoplástico, é um líquido durante a moldagem nas temperaturas de processamento, mas é um sólido cristalino na temperatura de serviço ou temperatura ambiente. Ele se deforma como uma borracha nas temperaturas acima da temperatura de transição para sólido, T_g . Nas temperaturas abaixo de T_g , entretanto, ele irá deformar em grande quantidade e da mesma forma se o tempo de ensaio for longo o suficiente.

Sabe-se que sólidos elásticos ideais são capazes de armazenar energia durante o carregamento, mas não dissipar energia, enquanto que, os fluidos newtonianos ideais sob a ação de tensões hidrostáticas são capazes de dissipar energia, mas não de armazená-la. Materiais viscoelásticos, são capazes de armazenar e dissipar energia gerada durante um carregamento. Outra característica dos materiais viscoelásticos é a memória. Enquanto os sólidos perfeitamente elásticos têm somente “memória simples” porque estes relembram somente o estado indeformado, e as deformações atuais dependem somente das tensões atuais, os materiais viscoelásticos, têm o que é frequentemente chamado de “memória passageira”, porque estes relembram o passado de tal maneira que as deformações atuais dependem mais fortemente da história recente do que da história mais distante de tempo-tensão.

Há quatro importantes manifestações físicas do comportamento viscoelástico (Gibson, 1994), em materiais aplicados com fins estruturais, como ilustrado pelas condições de carregamento uniaxial em uma barra viscoelástica, Figura 2.9:

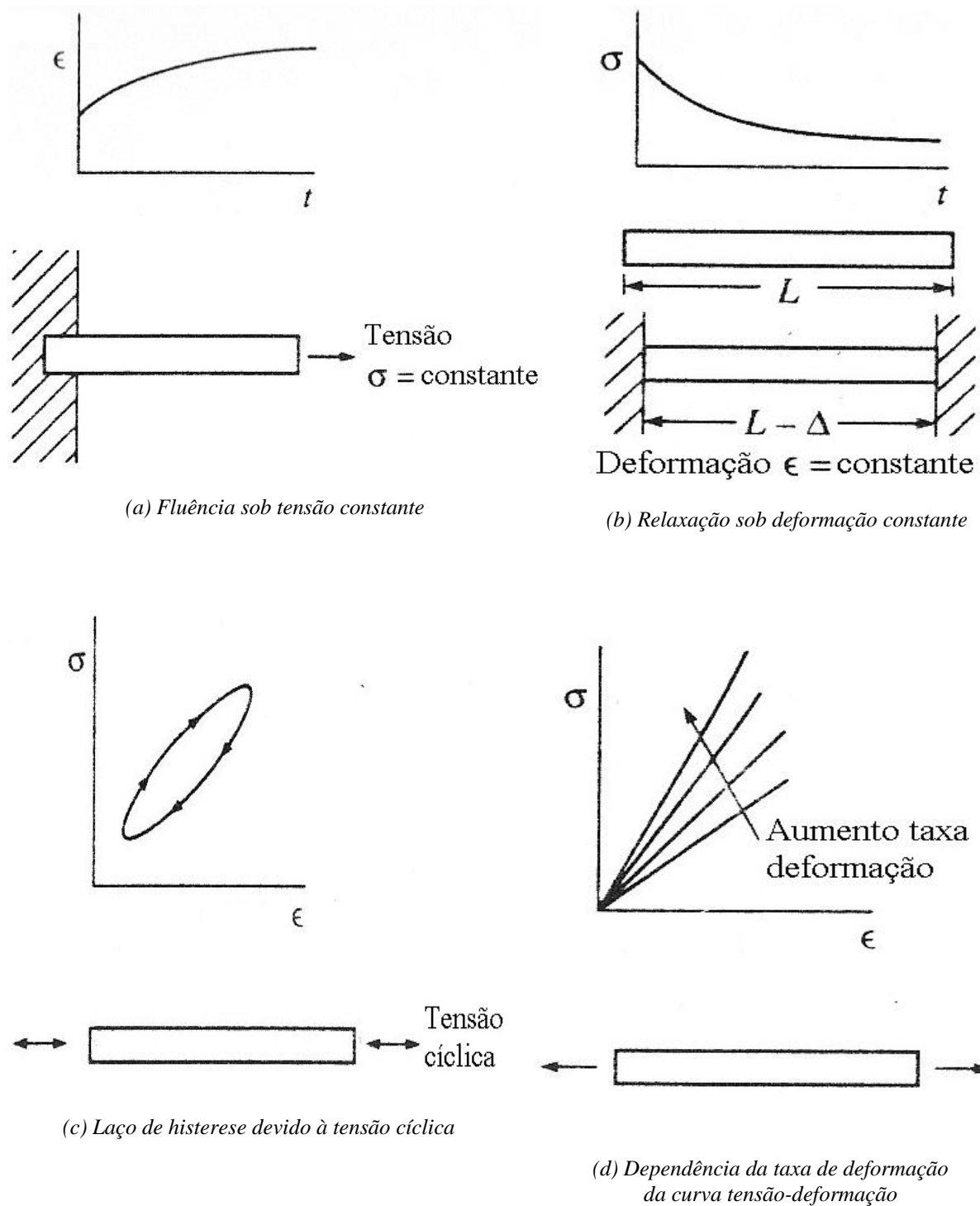


Figura 2.9 – Manifestações físicas do comportamento viscoelástico em materiais estruturais, como demonstrado pelos vários tipos de carregamento aplicados a uma barra viscoelástica.

- 1) Se a barra está sujeita a uma tensão constante σ em um intervalo de tempo t , a deformação resultante irá exibir uma evolução crescente com o tempo, fenômeno denominado de fluência, como mostra a Figura 2.9(a). As deformações de fluência dependentes do tempo são sobrepostas às deformações elásticas iniciais ϵ_0 .
- 2) Se a barra está sujeita a uma deformação ϵ ou deslocamento constante em um intervalo de tempo t , a tensão resultante irá exibir uma evolução com o tempo,

fenômeno denominado de relaxação, como mostra a Figura 2.9(b). Neste caso, as tensões relaxam, decrescem, das tensões elásticas iniciais σ_0 .

- 3) Se a barra está sujeita a um carregamento oscilante, a curva tensão-deformação resultante irá descrever um “laço de histerese”, como mostra a Figura 2.9(c). A área incluída pelo laço de histerese é uma medida de amortecimento ou dissipação de energia no material.
- 4) Se a barra é carregada através de várias taxas de deformação, as curvas tensão-deformação irão exibir uma dependência da taxa de deformação, como mostra a Figura 2.9(d). Isto é, as tensões correspondentes a uma dada deformação dependerão das taxas de deformação. Um material elástico ideal não exibe nenhuma das características citadas acima.

Todos os materiais estruturais exibem algum degrau de viscoelasticidade, e o grau de tal comportamento frequentemente depende das condições do meio ambiente como a temperatura. Enquanto um aço estrutural ou alumínio pode ser essencialmente elástico na temperatura ambiente, efeitos viscoelásticos ficam aparentes em temperaturas elevadas, aproximando-se da metade da temperatura de fusão. Já os materiais poliméricos são viscoelásticos na temperatura ambiente, e os efeitos viscoelásticos ficam mais pronunciados nas temperaturas próximas a temperatura de transição cristalina ($T_g < T < T_m$). A região de transição vítrea é a região de transição entre o comportamento vítreo e o comportamento elástico e é uma região caracterizada pelo começo do comportamento viscoelástico mais pronunciado.

A previsão do comportamento mecânico de componentes e peças produzidas com este tipo de material passa pelo desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o comportamento apresentado pelas curvas na Figuras 2.9. Este trabalho não tem a intenção de apresentar os modelos matemáticos básicos e já consagrados desenvolvidos por Maxwell e Kelvin. Recomenda-se a leitura de referências, tais como (Flügge, 1975) e (Tsai, 1980), para os interessados em rever estes modelos.

2.2 – Materiais Compostos

Em muitas das aplicações tecnologicamente inovadoras em engenharia, exige-se materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, pelas cerâmicas ou pelos materiais poliméricos convencionais. Isso é especialmente verdadeiro para os materiais necessários para aplicações nas áreas aeroespacial, subaquática e de transporte, (Callister Jr., 1999). Por exemplo, os engenheiros da indústria aeronáutica estão cada vez mais buscando materiais estruturais que possuam baixa densidade, elevada rigidez, elevada resistência mecânica, resistência a abrasão, resistência a corrosão e resistência ao impacto. Esta combinação de características especiais em algumas aplicações faz com que a ciência dos materiais esteja em constante evolução. Neste contexto, os materiais compostos, ou compósitos, que combinam materiais, ou fases, com diferentes propriedades, gerando um material resultante com características vantajosas quando comparados aos materiais analisados separadamente, tem uma papel relevante. Este aspecto agrega aos materiais compostos algumas características importantes no momento da escolha de um material para uma aplicação específica.

Considerando que um material composto, de uma forma mais ampla, pode ser considerado aquele material resultante de dois ou mais materiais, ou fases, distintas entre si, estes materiais podem ser naturalmente ou artificialmente produzidos. Como um exemplo de material composto naturalmente produzido pode-se citar:

- Os aços perlíticos possuem uma microestrutura que consiste de camadas alternadas de ferrita e cementita. A fase ferrita é mole e dúctil, enquanto a cementita é dura e muito frágil. As características mecânicas combinadas da perlita, que apresenta ductilidade e resistência razoavelmente altas, são superiores àquelas de ambas as fases constituintes,
- A madeira consiste de fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas e mantidas unidas por meio de um material mais rígido chamado de lignina.
- Os ossos são constituídos por uma proteína forte, porém mole, conhecida por colágeno, juntamente com o duro e frágil mineral denominado de apatita.

Um material composto, no presente contexto, consiste em um material multifásico produzido artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta. Dessa forma, a maioria das ligas metálicas, além dos materiais cerâmicos, não se enquadra nessa definição, pois as suas múltiplas fases são formadas como consequência de fenômenos naturais.

Os materiais compostos são constituídos por apenas duas fases: uma chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada freqüentemente de fase dispersa. As propriedades dos materiais compostos são função das propriedades individuais das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Nesse contexto, por geometria da fase dispersa subte-se como a sua forma, seu tamanho, sua distribuição e sua orientação. Essas características estão representadas na Figura 2.10.

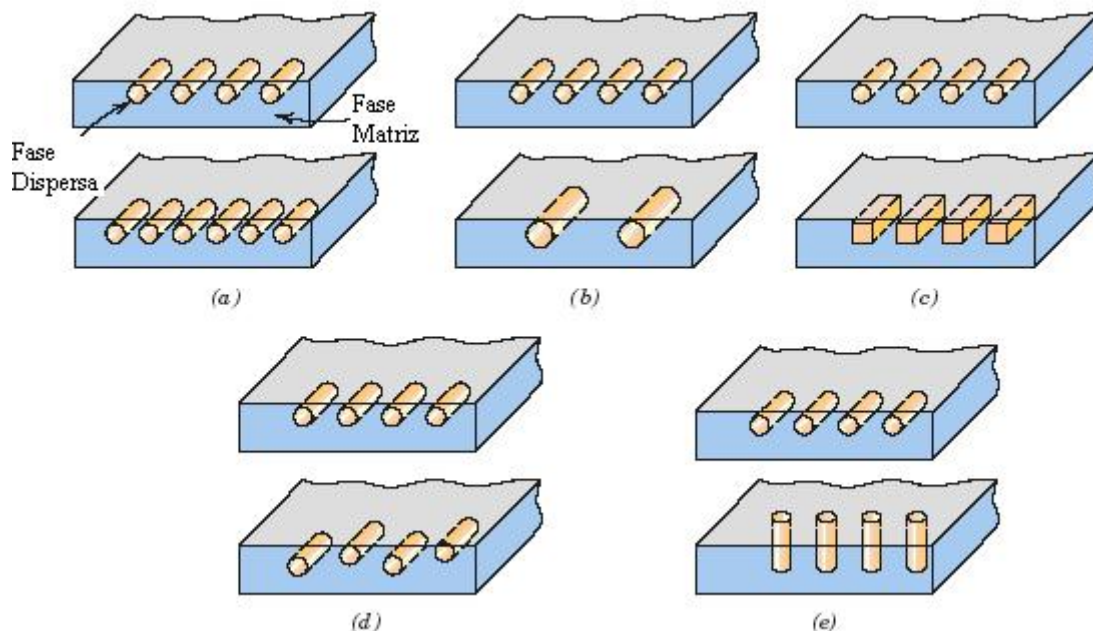


Figura 2.10 – Representação esquemática de características geométricas e espaciais de partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos materiais compostos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.

Um esquema simples para a classificação dos materiais compostos está mostrado na Figura 2.11. Esse esquema consiste em três divisões principais, que são os compostos reforçados com partículas, os compostos reforçados com fibras e os compostos estruturais, (Callister Jr., 1999).

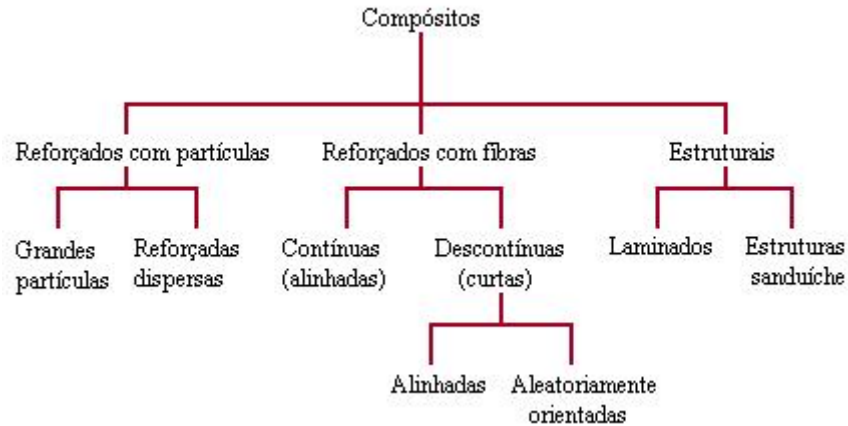


Figura 2.11 – Esquema de classificação para vários tipos de materiais compostos.

Em peças de material plástico injetado com inserções em fibras de vidro, são necessários modelos mais elaborados para representar a sua anisotropia na previsão de seu comportamento mecânico. A anisotropia dos materiais compostos, no entanto, pode ser mais facilmente trabalhada do que na maioria dos materiais anisotrópicos, visto que suas propriedades podem ser consideradas constantes em três direções ortogonais entre si. O sistema de eixos dentro do qual as propriedades mecânicas dos materiais compostos são definidas é chamado de sistema de eixos de ortotropia (1, 2 e 3), ilustrado na Figura 2.12. Sendo o eixo um paralelo à direção das fibras, e as direções dois e três ortogonais ao eixo 1.

Para os materiais poliméricos injetados com insertos em fibras, supõe-se que em certas regiões da peças, em razão de sua geometria ou dos pontos de injeção no molde, as fibras possam estar orientadas numa direção preferencial, em razão do escoamento do material dentro do molde da peça. A Figura 2.13 mostra a seção transversal de uma peça injetada, tendo como matéria prima uma matriz termoplástica reforçada por fibras, vista a partir de um Microscópio Eletrônico de Varredura.

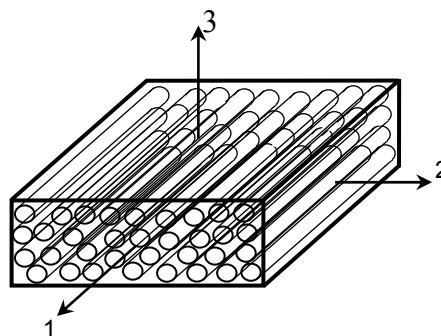
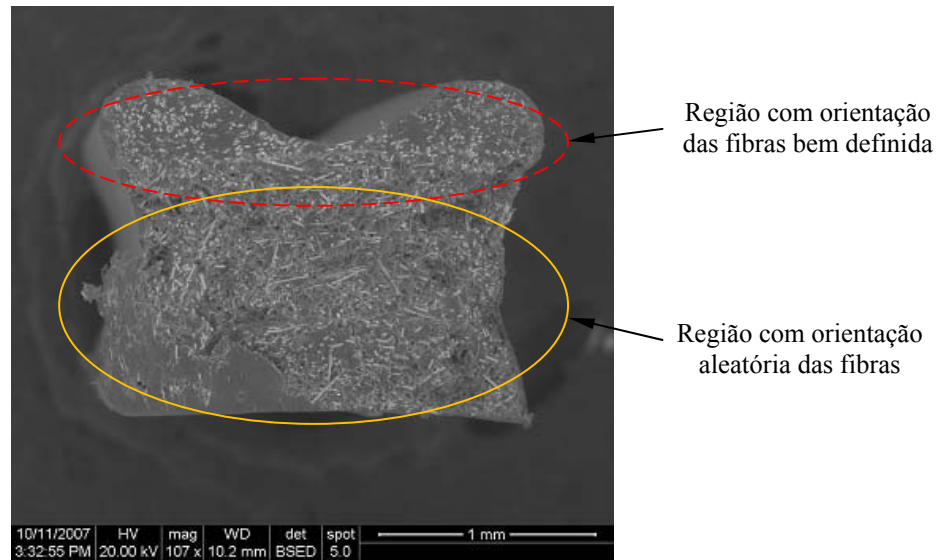
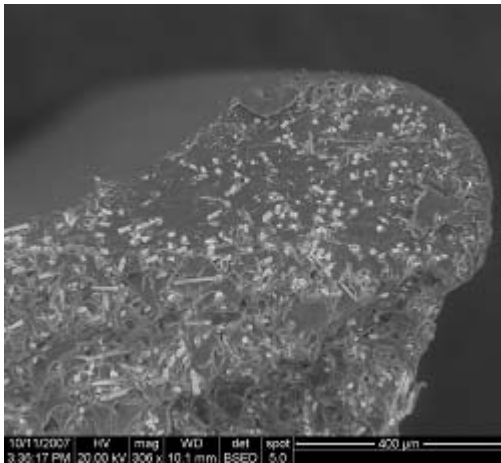


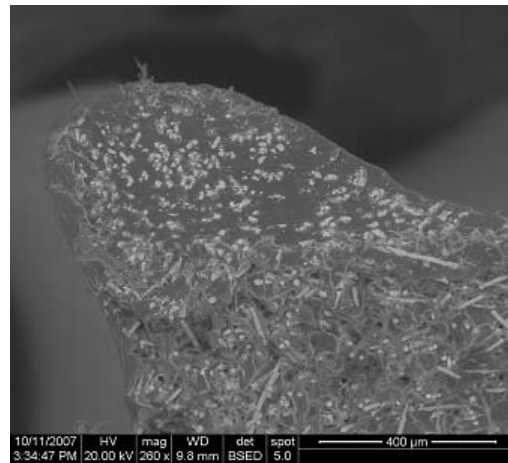
Figura 2.12 - Configuração de um elemento com fibras unidirecionais.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica em peça injetada com inserções em fibra de vidro.

Em se considerando esta orientação das fibras, o material pode então ser considerado como sendo um material composto. Neste caso específico, em razão da matriz ser um material polimérico termoplástico, este seria um material viscoelástico. Sendo assim, para representar o comportamento deste suposto material composto com matriz viscoelástica, é necessário a realização de ensaios nas três direções ortogonais (1, 2 e 3) para a caracterização de suas propriedades.

2.2.1 – Materiais Compostos Reforçados com Fibras

2.2.1.1 – A Fase Fibra

Uma característica importante da maioria dos materiais, especialmente daqueles que são frágeis, é que uma fibra com pequeno diâmetro é muito mais forte e resistente do que o material bruto. A probabilidade de haver presente um defeito crítico de superfície que seja capaz de levar a uma fratura diminui com a redução no volume da amostra, e essa característica é usada com vantagens nos materiais compostos reforçados com fibras. Ainda, os materiais usados com fibras de reforço possuem elevados limites de resistência à tração.

Em relação ao diâmetro e à natureza, as fibras são agrupadas em três classificações diferentes: uísqueres, fibras e arames. Os uísqueres consistem em monocristais muito finos que possuem razões comprimento/diâmetro extremamente grandes. Como consequência de suas pequenas dimensões, eles possuem um elevado grau de perfeição cristalina e são virtualmente isentos de defeitos, o que é responsável pelas suas resistências excepcionalmente elevadas. Estes são os materiais mais resistentes que se conhece. Apesar dessas altas resistências, os uísqueres não são amplamente utilizados como meio de reforço, pois são extremamente caros. Além disso, é difícil e frequentemente impraticável incorporar uísqueres no interior de uma matriz. Os materiais de uísquer compreendem a grafita, o carbetto de silício, o nitreto de silício e o óxido de alumínio; algumas características mecânicas desses materiais são dadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características mecânicas dos materiais das fibras.

Material	Densidade Específica	Resistência à tração (GPa)	Resistência específica (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo específico (GPa)
		Whiskers			
Grafite	2.2	20	9.1	700	318
Nitreto de silício	3.2	5-7	1.56-2.2	350-380	109-118
Óxido de alumínio	4.0	10-20	2.5-5.0	700-1500	175-375
Carbetto de silício	3.2	20	6.25	480	150
		Fibras			
Óxido de alumínio	3.95	1.38	0.35	379	96
Aramida (Kevlar® 49)	1.44	3.6-4.1	2.5-2.85	131	91
Carbono	1.78-2.15	1.5-4.8	0.70-2.70	228-724	106-407
Vidro	2.58	3.45	1.34	72.5	28.1
Boro	2.57	3.6	1.40	400	156
Carbetto de silício	3.0	3.9	1.30	400	133
UHMWPE (Spectra® 900)	0.97	2.6	2.68	117	121
		Arames Metálicos			
Aço de alta resistência	7.9	2.39	0.30	210	26.6
Molibdênio	10.2	2.2	0.22	324	31.8
Tungstênio	19.3	2.89	0.15	407	21.1

Os materiais que são classificados como fibras são materiais policristalinos ou amorfos, e possuem diâmetros pequenos. Os materiais fibrosos são geralmente polímeros ou cerâmicas, como por exemplo, a aramida, o vidro, o carbono, o boro, o óxido de alumínio e o carbetto de silício. A Tabela 2.1 também apresenta alguns materiais usados na forma de fibras.

Os arames finos possuem diâmetros relativamente grandes. Dentre os materiais típicos que compõem essa classe estão incluídos o aço, o molibdênio e o tungstênio. Os arames são utilizados como um reforço radial de aço nos pneus de automóveis, nas carcaças de motores a jato enroladas com filamentos, e em mangueiras de alta pressão enroladas com arame.

2.2.1.2 – A Fase Matriz

A fase matriz dos materiais compostos com reforço em fibras pode ser feita a partir de metais, polímeros ou cerâmicas. Em geral, os metais e os polímeros são usados como materiais da matriz, pois é desejável alguma ductilidade. No caso dos materiais compostos com matriz à base de cerâmica, o componente de reforço é adicionado para melhorar a tenacidade à fratura.

Nos materiais compostos reforçados com fibras, a fase matriz tem várias funções, (Callister Jr., 1999):

- 1) Ela liga as fibras umas às outras e atua como o meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras. Apenas uma proporção muito pequena da carga aplicada é suportada pela fase matriz. Além disso, o material da matriz deve ser dúctil, e o módulo de elasticidade da fibra deve ser muito maior do que o apresentado pela matriz.
- 2) A matriz tem a função de proteger as fibras individuais contra danos superficiais, como resultado da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir defeitos de superfície capazes de formar trincas, as quais podem levar a falhas, mesmo sob baixos níveis de tensão de tração.
- 3) A matriz separa as fibras umas das outras e, em virtude da sua relativa suavidade e plasticidade, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que, por sua vez, poderia resultar em uma falha catastrófica. Em outras palavras, a fase matriz serve como uma barreira contra a propagação de trincas. Embora algumas das fibras individuais possam eventualmente falhar, a fratura total do material composto não irá ocorrer até que um grande número de fibras adjacentes tenha falhado, formando em consequência disso, um aglomerado com dimensões críticas.

É essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, com o objetivo de minimizar a extração das fibras. De fato, a força de ligação é uma consideração importante na escolha de uma combinação matriz/fibra. A resistência final do material composto depende em grande parte da magnitude dessa ligação. Uma ligação adequada é essencial para maximizar a transmissão da tensão de uma matriz fraca para as fibras mais fortes.

2.2.1.3 – Materiais Compostos com Matriz de Polímero

Os materiais compostos com matriz polimérica (PMC – Polymer-Matrix Composites) consistem de uma resina polimérica como a fase matriz e fibras como meio de reforço. São os mais usados dos materiais compostos e possuem uma grande diversidade de aplicação, devido as suas propriedades à temperatura ambiente, ao seu custo e a sua facilidade de fabricação. Neste trabalho, as várias classificações dos PMC são discutidas de acordo com o tipo do reforço, vidro, carbono ou aramida, juntamente com suas aplicações e as várias resinas poliméricas que são empregadas, (Callister Jr., 1999).

2.2.1.3.1 – Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro (GFRP – Glass Fiber-Reinforced Polymer)

A fibra de vidro é simplesmente um material composto que consiste em fibras de vidro, contínuas ou descontínuas, contidas no interior de uma matriz polimérica. O diâmetro das fibras de vidro variam normalmente entre 3 e 20 μm . A fibra de vidro é muito popular como um material de reforço com fibras por diversas razões:

- É facilmente estirado na forma de fibras de alta resistência a partir do seu estado fundido.
- É um material amplamente disponível e pode ser fabricado economicamente para formar um plástico reforçado com vidro, empregando-se uma ampla variedade de técnicas de fabricação de materiais compostos.
- Como uma fibra, ele é relativamente forte, e quando se encontra no interior de uma matriz de plástico produz um material composto que possui resistência específica muito alta.
- Quando associado com diferentes plásticos, ele possui uma inércia química que torna o material composto útil para aplicação em meio a uma variedade de ambientes corrosivos.

As características de superfície das fibras de vidro são extremamente importantes, pois mesmo diminutos defeitos de superfície podem afetar de maneira negativa as propriedades de tração. Defeitos de superfície são facilmente introduzidos pelo atrito ou abrasão da superfície com outro material duro. Ainda, as superfícies de vidro que foram expostas à atmosfera normal, mesmo que durante apenas curtos períodos de tempo, geralmente possuem uma camada de superfície enfraquecida que interfere na ligação com a matriz. As fibras que acabam de ser estiradas são geralmente revestidas durante a etapa de estiramento com uma “capa”, ou seja, uma fina camada de uma substância que protege a superfície da fibra contra danos e interações ambientais indesejáveis. Essa “capa” é normalmente removida antes da fabricação do material composto, sendo substituída por um agente de acoplamento ou acabamento, que promove melhor ligação entre a fibra e a matriz.

Existem várias limitações a esse grupo de materiais. Apesar de possuírem resistências elevadas, eles não são muito rígidos e não exibem a rigidez necessária para algumas aplicações, como por exemplo, como elementos estruturais para aviões e pontes. A maioria dos materiais com reforço de fibra de vidro está limitada a aplicações com temperaturas de serviço abaixo de 200°C (400°F). Em temperaturas mais elevadas, a maioria dos polímeros começa a escoar ou a se deteriorar. As temperaturas de serviço podem ser estendidas até aproximadamente 300°C (575°F) pelo uso de sílica fundida de alta pureza para as fibras, e de polímeros de alta temperatura, tais como as resinas poli-imidas, conforme apresentado em (Callister Jr., 1999).

Muitas aplicações das fibras de vidro são bastante familiares, mesmo para aqueles que não têm uma formação de engenheiro: carcaças de meios de transporte automotivos e marítimos, tubulações de plástico, recipientes para armazenamento e pisos industriais. As indústrias de transporte estão utilizando quantidades cada vez maiores de plásticos reforçados com fibras de vidro em um esforço para reduzir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis. Muitas novas aplicações da fibra de vidro estão ocorrendo ou se encontram atualmente sob investigação pela indústria automotiva.

2.2.1.3.2 – Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP – Carbon Fiber-Reinforced Polymer)

O carbono é um material de fibra de alto desempenho, e é o reforço mais comumente utilizado em materiais compostos avançados com matriz polimérica. As razões para tal são as seguintes:

- As fibras de carbono possuem os maiores módulos específicos e as maiores resistências específicas dentre todos os materiais fibrosos de reforço.
- Elas retêm seu elevado módulo de elasticidade e sua grande resistência, mesmo a temperaturas elevadas. Porém, a oxidação a temperaturas elevadas, pode ser um problema.
- À temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por uma ampla variedade de solventes, ácidos e bases.
- Essas fibras exibem múltiplas características físicas e mecânicas, permitindo que os materiais compostos que incorporam essas fibras tenham propriedades especificamente elaboradas.
- Foram desenvolvidos, recentemente, novos processos de fabricação para as fibras de carbono, tornando-as relativamente baratas e de boa relação custo/benefício.

O uso do termo “fibra de carbono” pode parecer surpreendente, uma vez que o carbono é um elemento e, a forma estável do carbono cristalino nas condições ambientais é a grafita. As fibras de carbono não são totalmente cristalinas, mas são compostas por regiões grafíticas e regiões não-cristalinas. Essas áreas de não-cristalinidade estão desprovidas do arranjo ordenado tridimensional de redes hexagonais de carbono que é característico da grafita.

As técnicas de fabricação para produção de fibras de carbono são relativamente complexas. Contudo, três materiais orgânicos precursores diferentes são utilizados na sua fabricação, quais sejam: o raíom, a poliacrilonitrila (PAN) e o piche. A técnica de processamento varia de acordo com o precursor, da mesma forma como irão variar as características da fibra resultante.

Um esquema de classificação para as fibras de carbono é feito de acordo com o módulo de elasticidade. Com base nisso, as quatro classes para as fibras de carbono são as de módulo padrão, intermediário, alto e ultra-alto. Ainda, os diâmetros das fibras variam normalmente entre 4 e 10 μm . As formas contínua e curta estão disponíveis. Além disso, as fibras de carbono são revestidas normalmente com uma “capa” protetora de epóxi, que também melhora a adesão com a matriz polimérica.

Atualmente, os materiais compostos poliméricos reforçados com carbono estão sendo largamente empregados em equipamentos esportivos e de recreação, como varas de pescar, tacos de golfe, em carcaças de motores a jato enroladas com filamentos, em vasos de pressão, em componentes estruturais de aeronaves, tanto militares como comerciais, como por exemplo, componentes da asa, da fuselagem, do estabilizador e da pá do leme de helicópteros.

2.2.1.3.3 – Materiais Compostos Poliméricos Reforçados com Fibras de Aramida

As fibras de aramida são materiais de alta resistência e com alto módulo de elasticidade que foram introduzidas no início da década de 1970. Elas são especialmente desejáveis devido às suas excepcionais relações resistência/peso, que são superiores às das

apresentadas pelos metais. Quimicamente, esse grupo de material é conhecido como poli-parafenileno-tereftalamida. Existe uma variedade de fibras de aramida, sendo os nomes comerciais para dois dos mais comuns desses materiais o Kevlar® e o Nomex®. Para o primeiro, existem várias classes, quais sejam: o Kevlar 29, o Kevlar 49 e Kevlar 149, que apresentam diferentes comportamentos mecânicos.

Durante a síntese destas fibras, as moléculas rígidas são alinhadas na direção do eixo das fibras, como domínios de cristal líquido. Mecanicamente, essas fibras possuem módulo de elasticidade e resistência à tração longitudinal que são maiores do que os de outros materiais fibrosos poliméricos, conforme mostra a Tabela 2.2. Entretanto, eles são relativamente fracos quando submetidos à compressão. Além disso, esse material é conhecido pela sua tenacidade, resistência ao impacto e resistência à fluência e à falha por fadiga. Embora a aramida seja um material termoplástico, ela é, todavia, resistente à combustão e estáveis até temperaturas relativamente elevadas. A faixa de temperatura ao longo da qual ela mantém as suas elevadas propriedades mecânicas se situa entre -200 e 200°C (-330 e 390°F). Quimicamente, ela é suscetível à degradação por ácidos e bases fortes, mas são relativamente inertes frente a outros solventes e produtos químicos.

As fibras de aramida são utilizadas mais frequentemente em materiais compostos que possuem matrizes poliméricas. Materiais comuns para as matrizes são o epóxi e o poliéster. Uma vez que as fibras são relativamente flexíveis e de certa forma dúcteis, esses materiais podem ser processados de acordo com as operações têxteis mais comuns. As aplicações típicas desses materiais compostos com fibra de aramida incluem produtos balísticos, como coletes à prova de balas, artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis, vasos de pressão, como substituto para o amianto em freios automotivos, e em revestimentos de embreagens e gaxetas.

As propriedades dos materiais compostos com matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de vidro, carbono e aramida estão incluídas na Tabela 2.2. Dessa forma, pode ser feita uma comparação entre as características mecânicas desses três materiais, tanto para a direção longitudinal como para a direção transversal.

Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais compostos com matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas, de vidro, carbono e aramida nas direções longitudinais e transversais.

Propriedade	Vidro (E-glass)	Carbono (Alta Resistência)	Aramida (Kevlar 49)
Densidade Específica	2.1	1.6	1.4
Módulo de Elasticidade			
Longitudinal (GPa)	45	145	76
Transversal (GPa)	12	10	5.5
Resistência à tração			
Longitudinal (MPa)	1020	1240	1380
Transversal (MPa)	40	41	30
Tensão deformação última			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transversal	0.4	0.4	0.5

2.2.1.3.4 – Outros materiais para reforço com fibras

O vidro, o carbono e a aramida são os reforços em forma de fibra mais comuns incorporados em matrizes poliméricas. No entanto, outros materiais fibrosos usados em menor intensidade podem ser encontrados, sendo eles o boro, o carbeto de silício e o óxido de alumínio. Propriedades de materiais compostos com estas fibras, como o módulo de elasticidade, a resistência à tração, resistências específicas, e módulos específicos desses materiais quando na forma de fibras são apresentados na Tabela 2.1. Os materiais compostos poliméricos reforçados em fibras de boro têm sido utilizados em componentes de aeronaves militares, em lâminas de rotores de helicópteros e em alguns artigos esportivos. As fibras em carbeto de silício e de alumina são utilizadas em raquetes de tênis, em placas de circuitos, e nos difusores de motores de foguetes.

2.2.1.3.5 – Outros materiais como matrizes poliméricas

O papel desempenhado pela matriz polimérica foi apresentado de forma resumida anteriormente. Além disso, freqüentemente, a matriz determina a máxima temperatura de serviço, uma vez que ela normalmente amolece, se funde ou se degrada a uma temperatura muito mais baixa do que a fibra de reforço.

As resinas poliméricas mais amplamente utilizadas e mais baratas são os poliésteres e os vinis ésteres. Esses materiais de matrizes são usados principalmente para compor os materiais compostos reforçados com fibras de vidro. Um grande número de formulações de resinas proporciona uma ampla variedade de propriedades para esses polímeros. As resinas epóxi são mais caras e, além das aplicações comerciais, também são muito utilizadas em PMC para aplicações aeroespaciais. Elas possuem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à umidade do que os poliésteres e as resinas vinílicas. Para aplicações a altas temperaturas, são empregadas as resinas poli-imidas. Seu limite superior de temperatura para utilização em regime contínuo é de aproximadamente 230°C (450°F). Finalmente, as resinas termoplásticas para altas temperaturas oferecem o potencial para serem usadas em futuras aplicações aeroespaciais. Tais materiais incluem a poliéter-éter-cetona (PEEK – Polyetheretherketone), o sulfeto de polifenileno (PPS – Polyphenylene sulfide), e a polieterimida (PEI – Polyetherimide).

CAPÍTULO 3

Modelos de Viscoelasticidade Linear

De acordo com o comentado na Seção 2.1.1.3, os materiais poliméricos apresentam um comportamento viscoelástico, podendo se comportar como fluidos viscosos ou como sólidos elásticos. A previsão do comportamento mecânico de peças produzidas com materiais com estas características depende do desenvolvimento de modelos matemáticos que bem o representem. Os primeiros modelos matemáticos desenvolvidos com esta intenção foram os modelos de Maxwell e de Kelvin. Tais modelos eram compostos por um amortecedor, para representar o comportamento de um fluido viscoso, e por uma mola, para representar o comportamento de um sólido elástico. Enquanto o modelo de Maxwell é composto por uma mola e um amortecedor em série, o modelo de Kelvin é composto por uma mola e um amortecedor em paralelo. Na previsão por estes dois modelos do comportamento de fluência e de relaxação, conforme ilustrado pela Figura 3.1, percebe-se que, (Flügge, 1975) e (Christensen R. M., 1982).

- O modelo de Kelvin consegue bem caracterizar a fluência, porém não muito bem o de relaxação,
- O modelo de Maxwell consegue bem caracterizar a relaxação, porém não muito bem o de fluência.

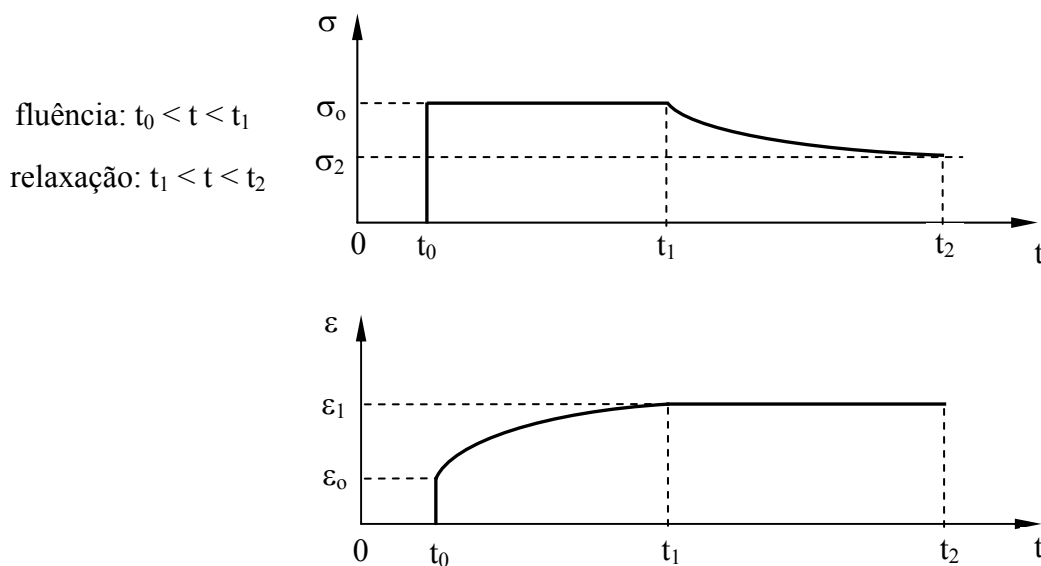


Figura 3.1 – Fenômenos de fluência e relaxação em materiais viscoelásticos.

Enquanto a relação constitutiva uniaxial, para materiais que não apresentam um comportamento viscoelástico, é da forma:

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (3.1)$$

onde a solução de um problema estrutural cujo material apresenta este comportamento é simples, a relação constitutiva para materiais representados pelos modelos de viscoelasticidade de Maxwell e de Kelvin é dada por uma equação diferencial dependente do tempo.

A equação diferencial uniaxial que representa o comportamento de um material viscoelástico descrito pelo modelo de Maxwell é da forma (Flügge, 1975):

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_1 \dot{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Sendo $\dot{\sigma}$ e $\dot{\varepsilon}$ as taxas de tensão e de deformação, e p_1 e q_1 constantes relacionadas às propriedades da mola e do amortecedor. A solução diferencial da eq. (3.2) são as eqs. (3.3) e (3.4), para representar a fluência e a relaxação, respectivamente:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(E_0 + \frac{t}{q_1} \right) \quad t_0 < t < t_1 \quad (\text{não representativo para a fluência}) \quad (3.3)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-(t-t_1)/\lambda_1} \quad t > t_1 \quad (\text{representativo para a relaxação}) \quad (3.4)$$

sendo E_0 o módulo de elasticidade do material para $t \leq t_0$, σ_0 a tensão inicial aplicada, e λ_1 o tempo de relaxação, ou o tempo necessário para a tensão reduzir para 1/e do seu valor inicial, dado pela relação entre as propriedades da mola e do amortecedor.

As eqs. (3.3) e (3.4) podem também serem colocadas da seguinte forma:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \left(E_0 + \frac{t}{q_1} \right) \quad t_0 < t < t_1 \quad (\text{não representativo para a fluência}) \quad (3.5)$$

$$Y(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E_0 e^{-(t-t_1)/\lambda_1} \quad t > t_1 \quad (\text{representativo para a relaxação}) \quad (3.6)$$

Sendo as funções $J(t)$ e $Y(t)$ os módulos de fluência e de relaxação para o modelo de Maxwell.

A relação constitutiva uniaxial representada pelo modelo de Kelvin é dada por uma equação diferencial da forma, (Flügge, 1975):

$$\sigma = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (3.7)$$

A solução da eq. (3.7) são as eqs. (3.8) e (3.9), para representar a fluência e a relaxação, respectivamente:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{q_0} \left(1 - e^{-t/\rho_1} \right) \quad t_0 < t < t_1 \quad (\text{representativo para a fluência}) \quad (3.8)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left(1 - e^{-(t-t_1)/\lambda_1}\right) \quad t > t_1 \quad (\text{n\~{a}o representativo para a relaxa\~{c}o\~{a}o}) \quad (3.9)$$

sendo q_0 a constante relacionada à propriedade da mola e $\rho_1 = q_1/q_0$ o tempo de fluência.

As eqs. (3.8) e (3.9) podem também serem colocadas da seguinte forma:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{q_0} \left(1 - e^{-t/\rho_1}\right) \quad t_0 < t < t_1 \quad (\text{representativo para a flu\~{e}ncia}) \quad (3.10)$$

$$Y(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E_0 \left(1 - e^{-(t-t_1)/\lambda_1}\right) \quad t > t_1 \quad (\text{n\~{a}o representativo para a relaxa\~{c}o\~{a}o}) \quad (3.11)$$

Sendo as funções $J(t)$ e $Y(t)$ os módulos de fluência e de relaxação para o modelo de Kelvin.

3.1 – Modelo de Viscoelasticidade Linear Isotrópica de Zener

Para melhor representar o comportamento dos materiais viscoelásticos na fluência e também na relaxação, outros modelos matemáticos foram desenvolvidos além daqueles mencionados anteriormente, (Flügge, 1975). Neste sentido, o modelo de Zener, que é uma combinação dos modelos de Maxwell e de Kelvin, é representado por um conjunto de molas e amortecedor colocados em série e em paralelo, conforme apresentado na Figura 3.2.

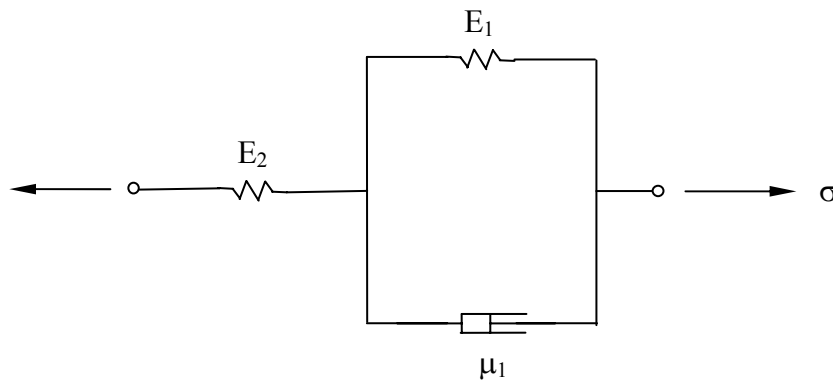


Figura 3.2– Modelo de viscoelasticidade de Zener.

A equação diferencial uniaxial para o modelo de viscoelasticidade de Zener tem a forma (Flügge, 1975):

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Sendo p_1 , q_0 e q_1 constantes associadas às propriedades das molas E_1 e E_2 e do amortecedor μ_1 da forma:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\mu_1}{(E_1 + E_2)} \\
 q_0 &= \frac{\mu_1}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)} \\
 q_1 &= \frac{\mu_1}{\left(1 + \frac{E_1}{E_2}\right)}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

O modelo de Zener pode também ser formulado para um sólido isotrópico, podendo a equação diferencial triaxial no tempo ser colocada da forma matricial como segue:

$$[\sigma] + P_1 [\dot{\sigma}] = Q_0 [\varepsilon] + Q_1 [\dot{\varepsilon}] \tag{3.14}$$

Sendo $[\sigma]$ e $[\varepsilon]$ os tensores tensão e deformação, $[\dot{\sigma}]$ e $[\dot{\varepsilon}]$ as taxas dos tensores de tensão e deformação, e P_1 , Q_0 e Q_1 termos associados às molas e aos amortecedores nos três eixos ortogonais.

Conforme apresentado na referência (Malvern, 1960), o tensor de tensões pode ser apresentado sob a forma da soma de duas parcelas: uma volumétrica, relacionada à variação do volume, e outra deviatórica, relacionada ao cisalhamento. Esta segunda parcela é frequentemente associada ao amortecimento do material. Sendo assim, o tensor de tensões pode ser colocado também como:

$$[\sigma] = \lambda [\sigma_{kk}] \delta_{ij} + 2\mu [\sigma_{ij}] \quad k, i, j = 1, 2, 3 \tag{3.15}$$

Sendo λ e μ as constantes elásticas de Lamé e δ_{ij} o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, para $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$, para $i \neq j$). Para materiais isotrópicos, as constantes elásticas de Lamé, λ e μ , são da forma:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\
 \mu &= \frac{E}{2(1 + \nu)}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Fazendo uso da eq. (3.15), o modelo de Zener triaxial apresentado pela eq. (3.14) pode ser agora colocado de uma outra forma:

$$[\sigma_{ij}] + \bar{\nu} [\dot{\sigma}_{ij}] = \lambda \varepsilon_v [I] + 2\mu [\varepsilon_{ij}] + \bar{\lambda} \dot{\varepsilon}_v [I] + 2\bar{\mu} [\dot{\varepsilon}_{kk}] \quad i, j = 1, 2, 3 \tag{3.17}$$

Sendo ε_v a deformação volumétrica dada por:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \tag{3.18}$$

De forma análoga a apresentada na eq. (3.15), $\bar{\nu}$, $\bar{\lambda}$ e $\bar{\mu}$ podem ser consideradas como constantes de Lamé associadas às taxas de tensão e de deformação. Enquanto as constantes elásticas de Lamé λ e μ podem obtidas realizando ensaios de tração simples em corpos de prova do material, as constantes $\bar{\nu}$, $\bar{\lambda}$ e $\bar{\mu}$ podem ser obtidas realizando ensaios de fluência.

Com a intenção de evidenciar a diferença do modelo de viscoelasticidade linear isotrópica apresentada pelo modelo de Zener, com o modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica a ser desenvolvido para materiais compostos com matriz polimérica, a ser apresentado na Seção 3.2, a eq. (3.17) será mostrada na sua forma matricial, conforme segue:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} + \bar{\nu} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{xx} & \dot{\sigma}_{xy} & \dot{\sigma}_{xz} \\ \dot{\sigma}_{yx} & \dot{\sigma}_{yy} & \dot{\sigma}_{yz} \\ \dot{\sigma}_{zx} & \dot{\sigma}_{zy} & \dot{\sigma}_{zz} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \varepsilon_v & & \\ & \varepsilon_v & \\ & & \varepsilon_v \end{bmatrix} + 2\mu \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$+ \bar{\lambda} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_v & & \\ & \dot{\varepsilon}_v & \\ & & \dot{\varepsilon}_v \end{bmatrix} + 2\bar{\mu} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} & \dot{\varepsilon}_{xy} & \dot{\varepsilon}_{xz} \\ \dot{\varepsilon}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} & \dot{\varepsilon}_{yz} \\ \dot{\varepsilon}_{zx} & \dot{\varepsilon}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{bmatrix}$$

Sendo x, y e z um sistema de eixos cartesianos, podendo este ser o sistema de eixos global, ou um sistema de eixos local.

A solução da equação diferencial (3.18) pode ser feita numericamente por meio de métodos integrais já conhecidos como diferenças finitas, Houbolt, Wilson θ , Newmark, Newton-Cotes, etc., encontrados em Bathe (1996) e Zienkiewicz (1991), entre outros. Este modelo de viscoelasticidade linear está disponível no software comercial de análise por elementos finitos Abaqus[®] para ser usada como uma subrotina do usuário. No Apêndice B se encontra o método de integração empregado pelo Abaqus[®] para a resolução da equação diferencial da eq. (3.18).

3.2 – Modelo de Viscoelasticidade Linear Ortotrópica

Como uma proposta de desenvolver um modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica, pretende-se tomar o modelo Zener para viscoelasticidade linear isotrópica apresentado na Seção 3.1, e modificá-lo de forma a considerar a diferença de propriedades no sistema de eixos de ortotropia (1, 2 e 3), conforme apresentado na Figura 2.12. Neste contexto, propõe-se modificar a eq. (3.18) vista anteriormente, de forma a considerar a ortotropia do material com matriz polimérica em razão da inserção de fibras na direção 1. Esta proposta de modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica é dada pela eq. (3.19):

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \text{sim} & & \sigma_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{11} & \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{12} & \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{13} \\ & \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{22} & \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{23} \\ \text{sim} & & \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{33} \end{bmatrix} = \lambda_1 \varepsilon_1 + \lambda_2 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \\
 & + 2 \begin{bmatrix} \mu_1 \varepsilon_{11} & \mu_1 \varepsilon_{12} & \mu_1 \varepsilon_{13} \\ & \mu_2 \varepsilon_{22} & \mu_2 \varepsilon_{23} \\ \text{sim} & & \mu_2 \varepsilon_{33} \end{bmatrix} + \bar{\lambda}_1 \dot{\varepsilon}_1 + \bar{\lambda}_2 (\dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3) \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} \bar{\mu}_1 \dot{\varepsilon}_{11} & \bar{\mu}_1 \dot{\varepsilon}_{12} & \bar{\mu}_1 \dot{\varepsilon}_{13} \\ & \bar{\mu}_2 \dot{\varepsilon}_{22} & \bar{\mu}_2 \dot{\varepsilon}_{23} \\ \text{sim} & & \bar{\mu}_2 \dot{\varepsilon}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

Supõe-se que o material composto resultante será isotrópico nos eixos transversos 2 e 3. Desta forma, as propriedades na direção 3 serão iguais as propriedades na direção 2. Assim, λ_1 e μ_1 , e λ_2 e μ_2 podem ser chamadas de constantes elásticas de Lamé, e \bar{v}_1 , $\bar{\lambda}_1$ e $\bar{\mu}_1$, e \bar{v}_2 , $\bar{\lambda}_2$ e $\bar{\mu}_2$ podem ser consideradas como constantes de Lamé associadas às taxas de tensão e de deformação associadas aos eixos de ortotropia dos materiais compostos.

As relações entre as constantes elásticas de Lamé e as constantes elásticas do material, dadas pelas eqs. (3.16) não podem ser empregadas para materiais compostos. Sendo assim, as constantes elásticas de Lamé para materiais compostos são propostas como sendo:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= C_1 \frac{\nu_{12} E_1}{(1 + \nu_{12})(1 - 2\nu_{12})} \\
 \lambda_2 &= C_2 \frac{\nu_{21} E_2}{(1 + \nu_{21})(1 - 2\nu_{21})} \\
 \mu_1 &= C_3 \cdot G_{12} \\
 \mu_2 &= C_4 \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

As constantes elásticas do material E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} , G_{12} e ν_{23} , conseqüentemente, as constantes elásticas de Lamé, dadas pelas eqs. (3.20), e as constantes de Lamé associadas às taxas de tensão e de deformação para materiais compostos, serão obtidas por meio de ensaios de tração e de fluência, que serão apresentados no Capítulo 4. C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são constantes a serem determinadas por um procedimento de ajuste do modelo numérico com os resultados dos ensaios realizados. Acredita-se que, assim como as constantes de Lamé foram obtidas para materiais isotrópicos, conforme apresentado nas eqs. (3.16) e em (Malvern, 1960), que seja possível demonstrar matematicamente as constantes de Lamé para materiais ortotrópicos. Este, no entanto, não é objetivo deste presente trabalho.

A eq. (3.19) pode também ser colocada de uma forma vetorial, onde as matrizes constitutivas associada ao efeito elástico e ao efeito viscoso do material, podem ser identificadas:

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{11} \\ \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{22} \\ \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{33} \\ \bar{v}_2 \dot{\sigma}_{23} \\ \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{13} \\ \bar{v}_1 \dot{\sigma}_{12} \end{Bmatrix} = & \begin{bmatrix} \lambda_1 + 2\mu_1 & \lambda_2 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_2 + 2\mu_2 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_2 + 2\mu_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 + 2\bar{\mu}_1 & \bar{\lambda}_2 & \bar{\lambda}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\lambda}_1 & \bar{\lambda}_2 + 2\bar{\mu}_2 & \bar{\lambda}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\lambda}_1 & \bar{\lambda}_2 & \bar{\lambda}_2 + 2\bar{\mu}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\mu}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\mu}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\mu}_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} \\ \dot{\varepsilon}_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{33} \\ \dot{\gamma}_{23} \\ \dot{\gamma}_{13} \\ \dot{\gamma}_{12} \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

A eq. (3.21) é a equação diferencial representativa do comportamento viscoelástico para materiais ortotrópicos com isotropia transversa. A resolução desta equação diferencial é feita a cada instante de tempo Δt e está apresentado no Apêndice A.

CAPÍTULO 4

Ensaaios Mecânicos em Corpos de Prova em Material Polimérico

Para o levantamento das constantes elásticas de Lamé, λ_1 , μ_1 , λ_2 e μ_2 , e das constantes de Lamé associadas às taxas de tensão e de deformação para materiais compostos, $\bar{\nu}_1$, $\bar{\lambda}_1$, $\bar{\mu}_1$, $\bar{\nu}_2$, $\bar{\lambda}_2$ e $\bar{\mu}_1$, que serão inseridas no modelo proposto de viscoelasticidade linear ortotrópica, apresentado na Seção 3.2, ensaios mecânicos em corpos de prova padrão tipo I serão realizados. Como a Schaeffler produz componentes automotivos com materiais compostos distintos, ensaios mecânicos de tração simples e de fluência serão realizados em corpos de prova produzidos pela empresa Rhodia, denominados:

- Technyl A118 V50 – com matriz em poliamida 6.6 com 50% do volume em fibra de vidro,
- Technyl A 218 V35 – com matriz em poliamida 6.6 com 35% do volume em fibra de vidro,
- e Technyl A118 – com somente matriz em poliamida 6.6.

Os ensaios mecânicos foram realizados segundo recomendações das seguintes normas para ensaios mecânicos:

- ANSI/ASTM D 638 – 03, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2004, Annual Book of ASTM Standards, Part 35, (ANSI/ASTM D 638 – 03, 2004).
- ANSI/ASTM D 2990 – 01, Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics, 2001, Annual Book of ASTM Standards, Part 35, (ANSI/ASTM D 2990 – 01, 2001).

4.1– Corpos de Prova

Os corpos de prova adotados para os ensaios de tração e de fluência são do Tipo I, como especificado pela norma D638-03 (ANSI/ASTM D 638 – 03, 2004), sendo confeccionados através do processo de moldagem por injeção. A Figura 4.1 apresenta as dimensões principais deste tipo de corpo de prova. A norma D 2990-01 (ANSI/ASTM D 2990 – 01, 2001) recomenda que o corpo de prova deva ser pré-condicionado no ambiente do ensaio por um período mínimo de 48 horas antecedendo o início do ensaio.

Para o cálculo da tensão devido ao carregamento, é necessário a determinação da área média inicial da seção transversal de cada corpo de prova. A espessura e a largura do corpo de prova devem ser medidas à temperatura ambiente, utilizando um micrômetro, em cinco ou mais pontos distintos do corpo de prova.

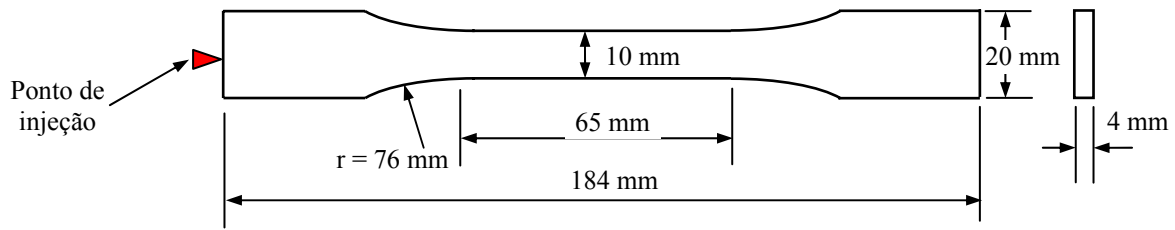


Figura 4.1 – Dimensões principais dos corpos de prova Tipo I.

4.2 – Ensaio de Tração

Para a determinação dos módulos de elasticidade e do coeficiente de Poisson elástico necessários para a determinação das constantes elásticas de Lamé, λ_1 , μ_1 , λ_2 e μ_2 , conforme apresentado pelas eqs. (3.20), foram realizados ensaios de tração simples. Como efeito de caracterização do material tracionou-se dois corpos de prova do material Technyl A118 V50 até atingirem a ruptura, conforme mostra a Figura 4.2. Nos corpos de prova com inserto em fibra, Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35, foram medidas as deformações longitudinal (ϵ_{11}), transversal (ϵ_{22}), e defasada de 30° do eixo longitudinal (ϵ_{30°), conforme apresentado na Figura 4.3(a). Nos corpos de prova sem inserto de fibras, Technyl A118, foram medidas as deformações longitudinal (ϵ_{xx}) e transversal (ϵ_{yy}), conforme apresentado na Figura 4.3(b). Foram realizados ensaios de tração em três amostras para cada um dos materiais supracitados.

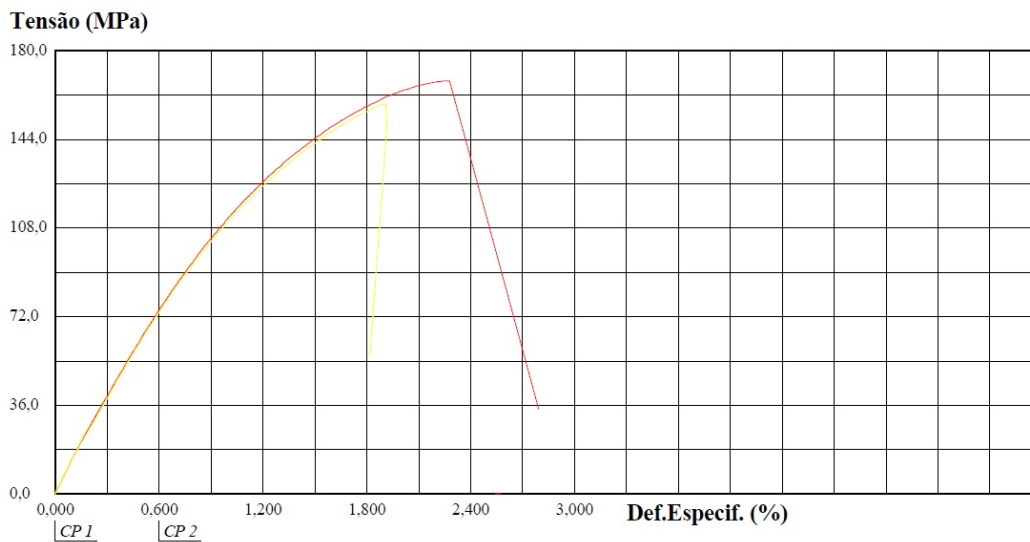


Figura 4.2 – Diagrama tensão x deformação para o material Technyl A118 V50.

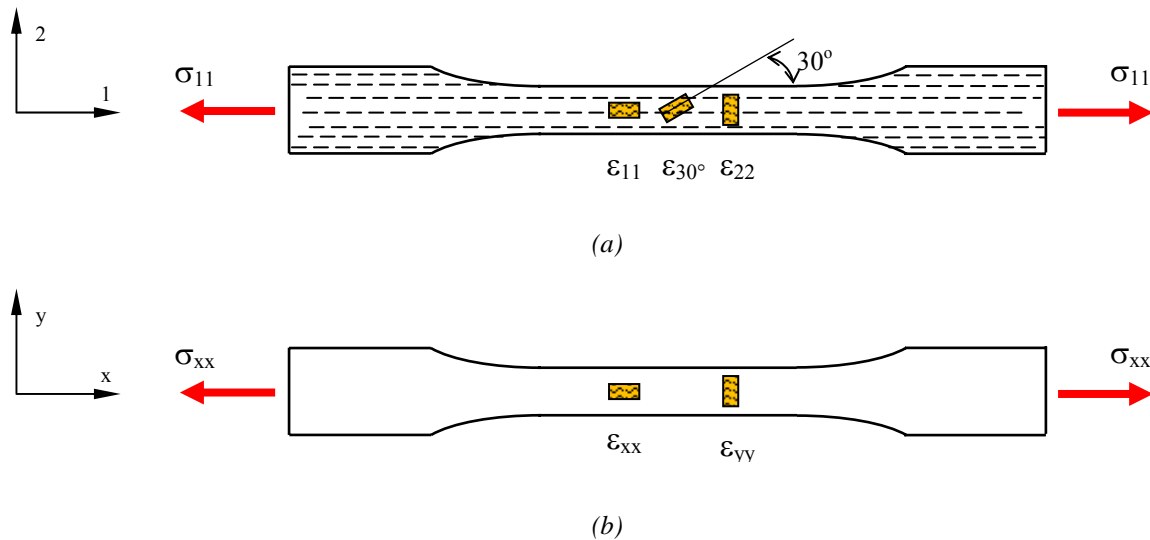


Figura 4.3 – Corpos de prova: (a) com inserto em fibras e (b) sem inserto em fibras.

Os ensaios foram realizados em uma máquina padrão de ensaio de tração Emic DL3000, apresentada na Figura 4.4, com monitoramento contínuo do carregamento e das deformações. Neste ensaio, não houve controle de temperatura. Em cada ensaio, o corpo de prova fixado em garras apropriadas e inicialmente descarregado, foi submetido a uma taxa de carga de tração durante um período de tempo de 5s. Em função da área da seção transversal do corpo de prova e da força aplicada produziu-se uma taxa de tensão de 10 MPa a cada passo de tempo para os corpos de prova sem fibra (Technyl A118) e 25 MPa para os corpos de prova com inserto em fibra de vidro (Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35).

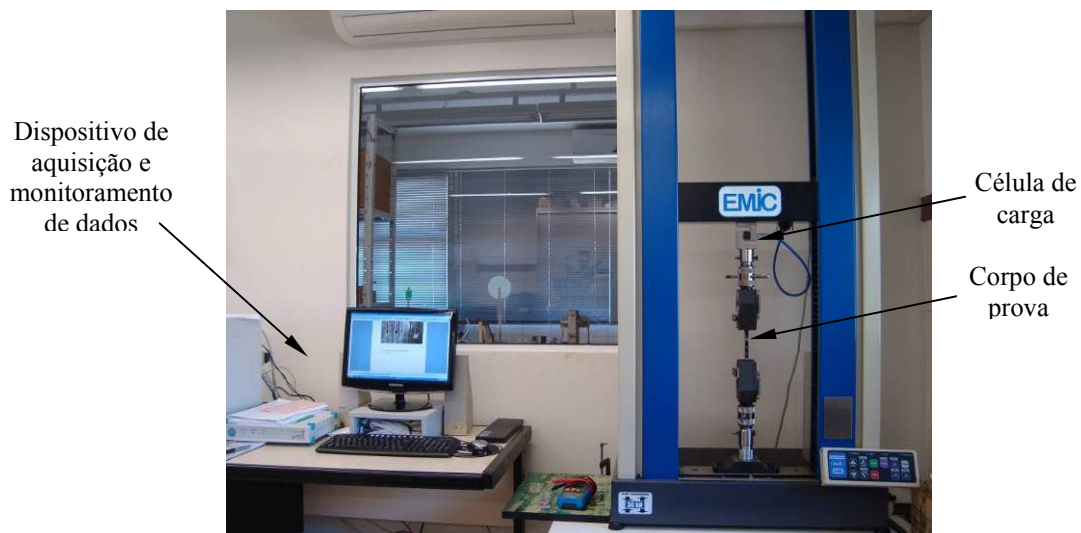
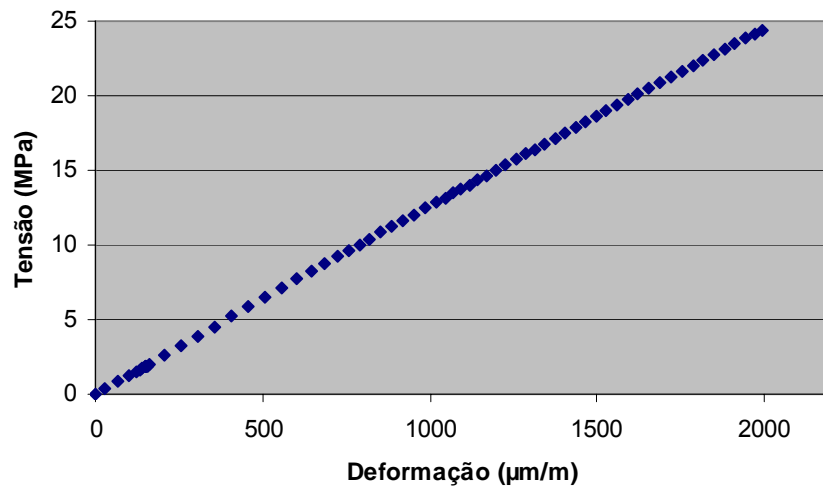


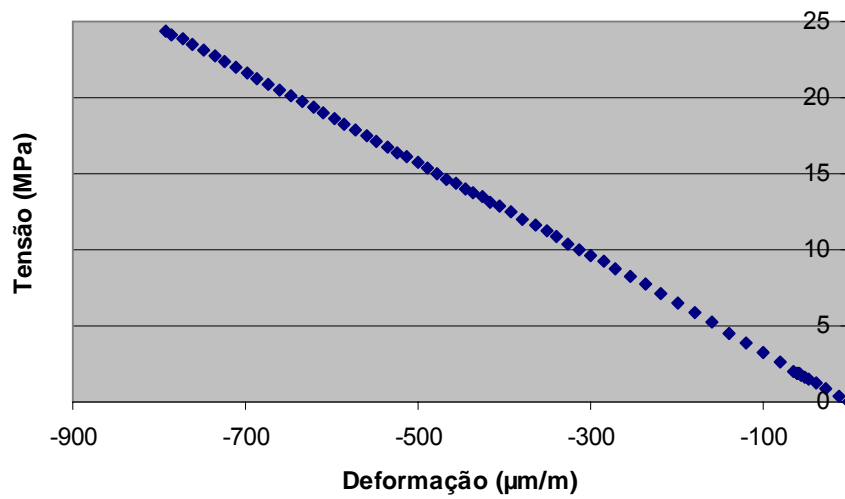
Figura 4.4 – Máquina de ensaio de tração padrão Emic DL3000.

As figuras a seguir apresentam a média em três corpos de prova dos diagramas tensão x deformação para os materiais Technyl A118 V50, Technyl A218 V35 e Technyl A118, respectivamente.

a) Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A118 V50.



(a) $(\sigma_{11} \times \epsilon_{11})$



(b) $(\sigma_{11} \times \epsilon_{22})$

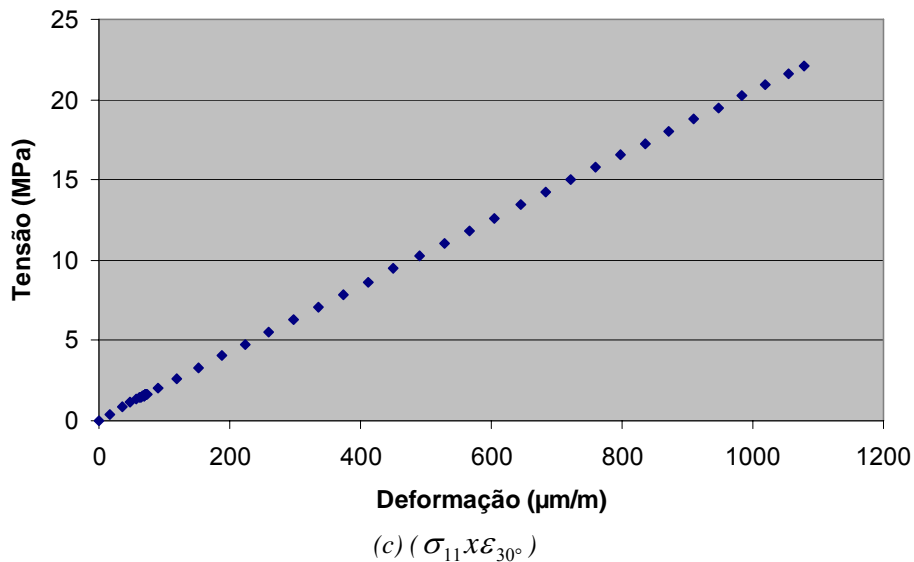


Figura 4.5 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A118 V50: (a) ($\sigma_{11} \times \varepsilon_{11}$), (b) ($\sigma_{11} \times \varepsilon_{22}$) e (c) ($\sigma_{11} \times \varepsilon_{30^\circ}$).

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 4.4(a), o módulo de elasticidade E_1 do material Technyl A118 V50 é:

$$E_1 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = 12,4 \text{ GPa} \quad (4.1)$$

E, da relação entre as deformações transversal (ε_{22}) e longitudinal (ε_{11}), Figuras 4.4(b) e 4.4(a), respectivamente, o coeficiente de Poisson ν_{12} deste mesmo material é:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = 0,41 \quad (4.2)$$

Pelo fato da Rhodia, fornecedor de matéria prima da Schaeffler, produzir os corpos de prova pelo processo de injeção, onde a direção as fibras são predefinidas (ver Figuras 4.1 e 4.3(a)), e não recortados a partir de uma placa, onde é possível escolher a direção do carregamento com relação à direção das fibras, é necessário fazer uso da regra das misturas, (Tsai S. W., 1992), para obter propriedades restantes do material ortotrópico. A Figura 4.6 ilustra o comentário anterior.

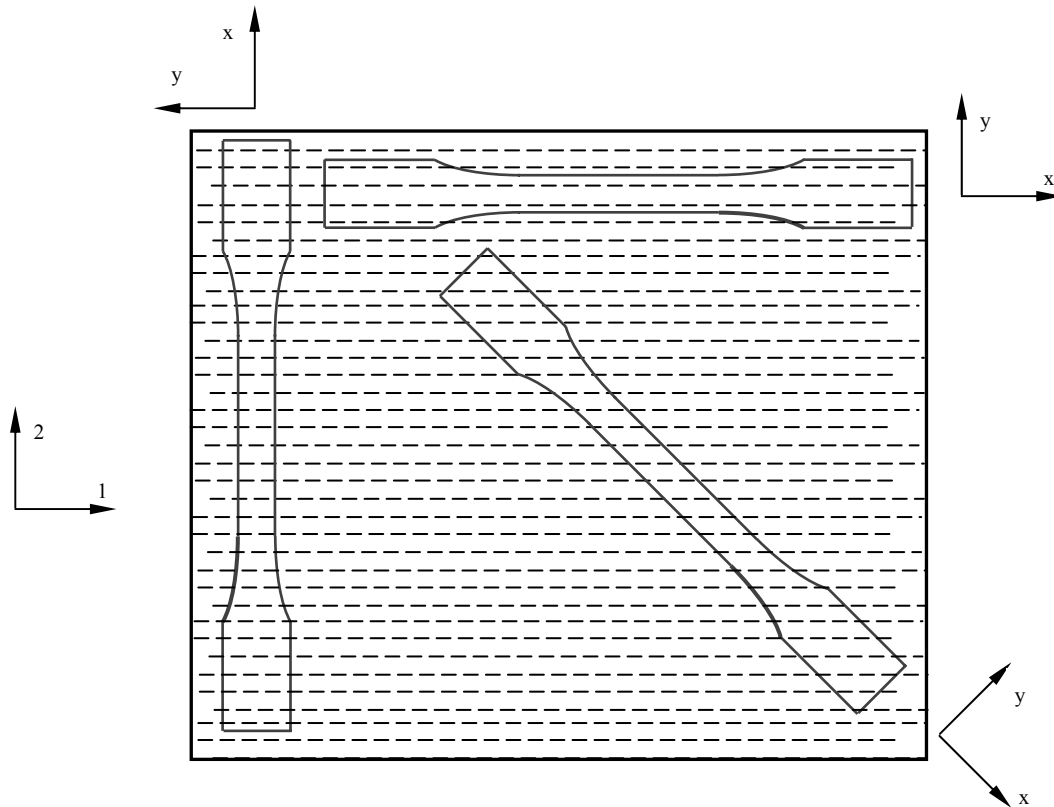


Figura 4.6 – Formato de corpos de prova em material ortotrópico para a obtenção das constantes elásticas.

Pela regra das misturas, (Tsai S. W., 1992), o módulo de elasticidade E_2 e o módulo de cisalhamento G_{12} podem ser determinados da forma:

$$E_2 = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{ft}} V_f} \right] \quad (4.3)$$

$$G_{12} = G_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_{ft}} V_f} \right] \quad (4.4)$$

Sendo:

- E_m = módulo de elasticidade da matriz,
- E_{ft} = módulo de elasticidade transversal da fibra,
- V_f = porcentagem do volume em fibra,
- G_m = módulo de cisalhamento da matriz,
- G_{ft} = módulo de cisalhamento transversal da fibra.

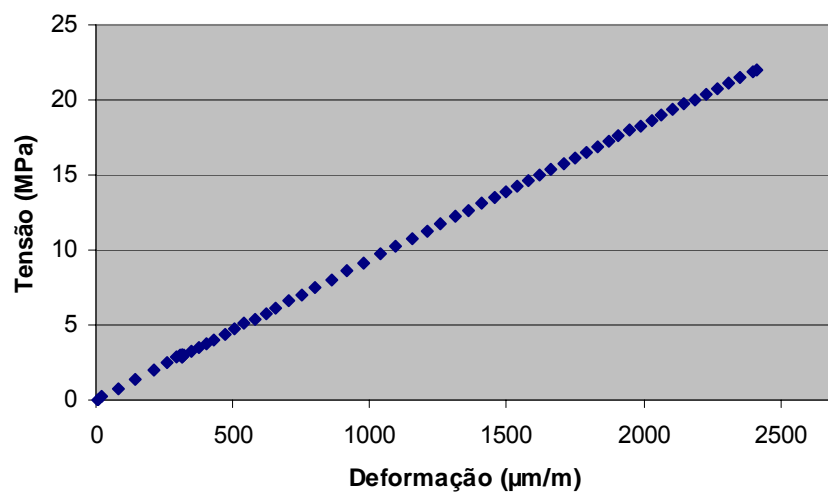
Segundo a Rhodia, fabricante das fibras, o módulo de elasticidade transverso da fibra e o módulo de cisalhamento transverso da fibra valem (Gay, 1991):

$$E_{ft} = 74,00 \text{ GPa} \quad (4.5)$$

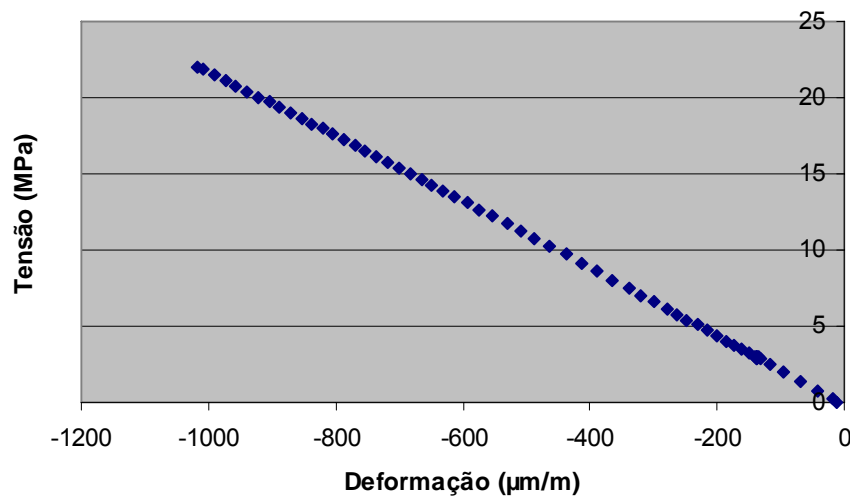
$$G_{ft} = 30,00 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Os valores de rigidez da fibra apresentados nas eqs. (4.5) e (4.6) serão usados para a obtenção das rigidezes E_2 e de G_{12} do Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35, obtidas com as eqs. (4.3) e (4.4), após a determinação das rigidezes da matriz E_m e de G_m , a serem apresentadas posteriormente.

b) Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A218 V35.



(a) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{11})$



(b) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{22})$

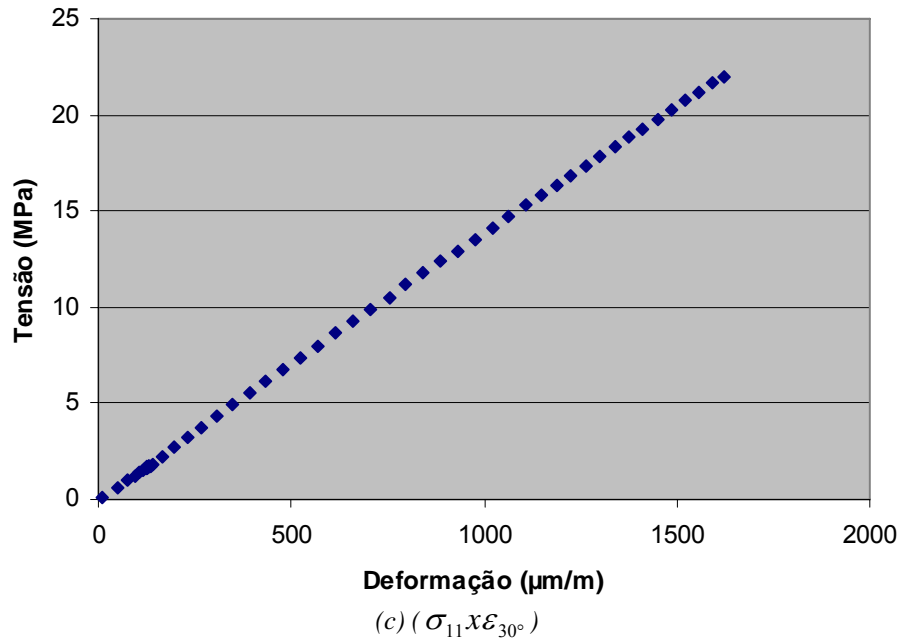


Figura 4.7 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A218 V35: (a) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{11})$, (b) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{22})$ e (c) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{30^\circ})$.

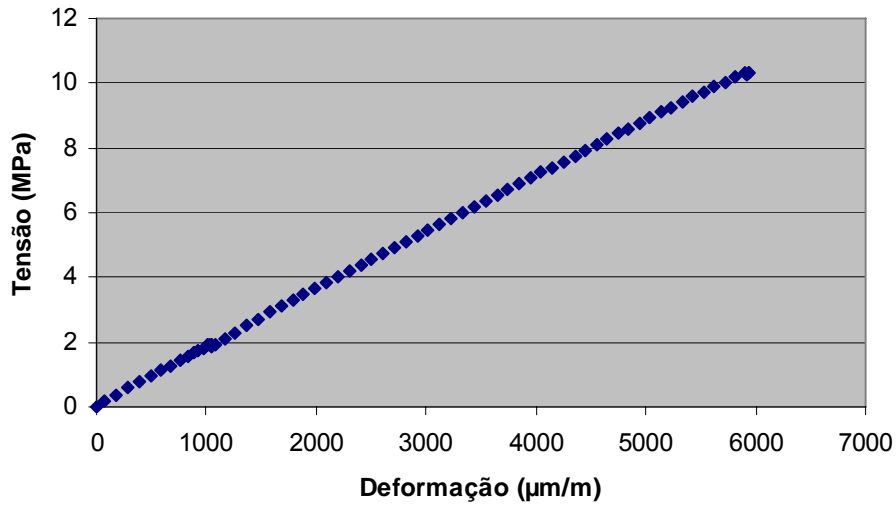
De acordo com o diagrama apresentado na Figura 4.7(a), o módulo de elasticidade E_1 do material Technyl A218 V35 é:

$$E_1 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = 9,2 \text{ GPa} \quad (4.7)$$

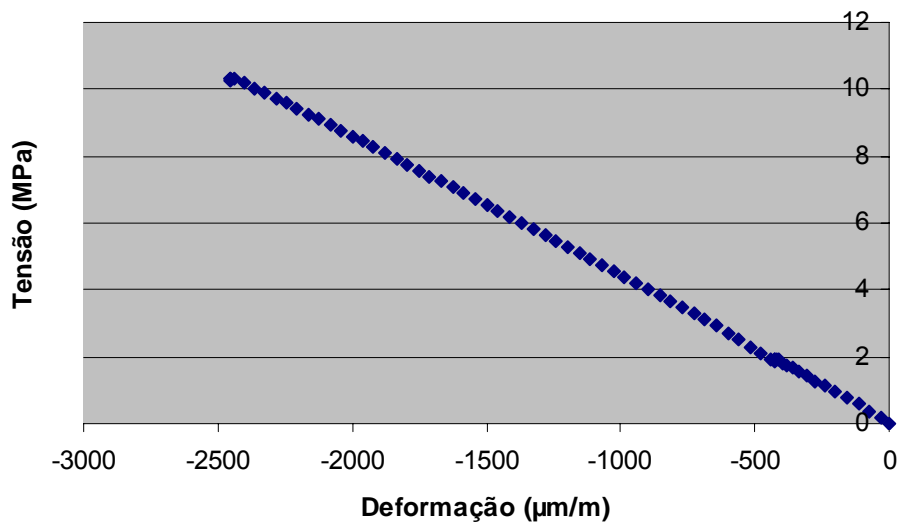
E, da relação entre as deformações transversal (ε_{22}), e longitudinal (ε_{11}), Figuras 4.7(b) e 4.7(a), respectivamente, o coeficiente de Poisson ν_{12} deste mesmo material é:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = 0,41 \quad (4.8)$$

c) Diagramas tensão x deformações para o material Technyl A118.



(a) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{11})$



(b) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{22})$

Figura 4.8 – Diagramas tensão x deformação para o material Technyl A118: (a) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{11})$, (b) $(\sigma_{11} \times \varepsilon_{22})$.

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 4.8(a), o módulo de elasticidade E_m do material Technyl A118 é:

$$E_m = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} = 1,77 \text{ GPa} \quad (4.9)$$

E, da relação entre as deformações transversal (ϵ_{22}), e longitudinal (ϵ_{11}), Figuras 4.8(b) e 4.8(a), respectivamente, o coeficiente de Poisson ν_m deste mesmo material é:

$$\nu_m = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} = 0,41 \quad (4.10)$$

O módulo de cisalhamento pode ser obtido da forma:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} = 0,63 \text{ GPa} \quad (4.11)$$

A partir das eqs. (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.9) e (4.11) é possível obter os módulos de elasticidade E_2 e de cisalhamento G_{12} dos materiais Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35. A Tabela 4.1 apresenta todas as constantes elásticas obtidas por meio dos ensaios de tração simples e da regra das misturas. Deve ser ressaltado que será considerada a isotropia transversa no plano 2–3:

Tabela 4.1 – Constantes elásticas dos materiais denominados Technyl.

	E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)
Technyl A118 V50	12,4	3,46	0,41	1,23	0,63 a 1,27
Technyl A218 V35	9,2	2,69	0,41	0,97	0,63 a 0,97
	E_m (GPa)		ν	G_m (GPa)	
Technyl A118	1,77		0,41	0,63	

Da comparação das constantes elásticas apresentadas na Tabela 4.1, observa-se que a inserção de 50% em volume de fibra aumenta em aproximadamente 600% o módulo de elasticidade na direção 1 para o material Technyl A118 V50, e a inserção de 35% em volume de fibra aumenta em aproximadamente 420% o módulo de elasticidade na direção 1 para o material Technyl A218 V35. Observa-se, no entanto que, a inserção de fibras não altera o coeficiente de Poisson do material composto resultante. Isso pode vir do fato das fibras serem curtas, não causando nenhuma alteração do comportamento da deformação transversa à direção do carregamento, além da causada pela matriz.

Fazendo uso das eqs. (3.20), as constantes elásticas de Lamé para o Technyl A118 V50 podem ser obtidas:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= C_1 \cdot 20,03 \text{ GPa} \\ \lambda_2 &= C_2 \cdot 5,59 \text{ GPa} \\ \mu_1 &= C_3 \cdot 1,23 \text{ GPa} \\ \mu_2 &= \text{de } C_4 \cdot 0,63 \text{ a } C_4 \cdot 1,27 \text{ GPa} \end{aligned} \quad (4.12)$$

E as constantes elásticas de Lamé para o Technyl A218 V35 são:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= C_1.14,86 \text{ GPa} \\ \lambda_2 &= C_2.4,35 \text{ GPa} \\ \mu_1 &= C_3.0,97 \text{ GPa} \\ \mu_2 &= \text{de } C_4.0,63 \text{ a } C_4.0,97 \text{ GPa}\end{aligned}\tag{4.13}$$

4.3 – Ensaio de Fluência

Os ensaios de fluência em materiais que apresentam um comportamento viscoelástico são necessários, pois com os seus dados define-se o módulo de fluência, assim como as constantes do modelo de um material sob carregamento de longa duração. O ensaio de fluência consiste em medir a deformação ao longo do tempo, de um corpo de prova sujeito a uma carga constante, em uma determinada temperatura.

Para a realização dos ensaios de fluência, é necessário dispor de um aparato de ensaio, o qual deve atender a certos requisitos para produzir resultados válidos. A norma ASTM D 2990-01 (ANSI/ASTM D 2990 - 01, 2001) empregada neste ensaio, estabelece requisitos para a construção do aparato e indicações sobre o procedimento experimental.

No ensaio de fluência em uma única temperatura, é necessário um número mínimo de três corpos de prova para cada nível de tensão, se menos de quatro níveis de tensão são utilizados. Neste trabalho foram realizados ensaios de fluência em três corpos de prova para cada nível de tensão, e três níveis de tensão foram aplicados, totalizando nove corpos de prova para cada um dos materiais: Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35.

4.3.1 Aparato Experimental para o Ensaio de Fluência

A seguir é feita uma descrição dos principais dispositivos que compõem o aparato experimental do ensaio de fluência:

- Os corpos de prova e os pesos que aplicam as cargas nestes corpos de prova são montados em um suporte tubular, formando uma unidade de ensaio de fluência. Cada unidade de ensaio pode receber simultaneamente doze corpos de prova, conforme mostra a Figura 4.9. O local e a unidade de ensaio devem assegurar isolamento dos corpos de prova contra vibrações. As garras superiores são conectadas através de uma haste, a um dispositivo situado no topo do suporte tubular, restringindo o movimento vertical das garras superiores. Na parte intermediária do suporte, há um dispositivo que permite o pivotamento do braço de alavanca do dispositivo de aplicação de carga. Na base do suporte, tem-se o dispositivo de aplicação de carga, que é acionado manualmente através de um sistema de um eixo com excêntrico;

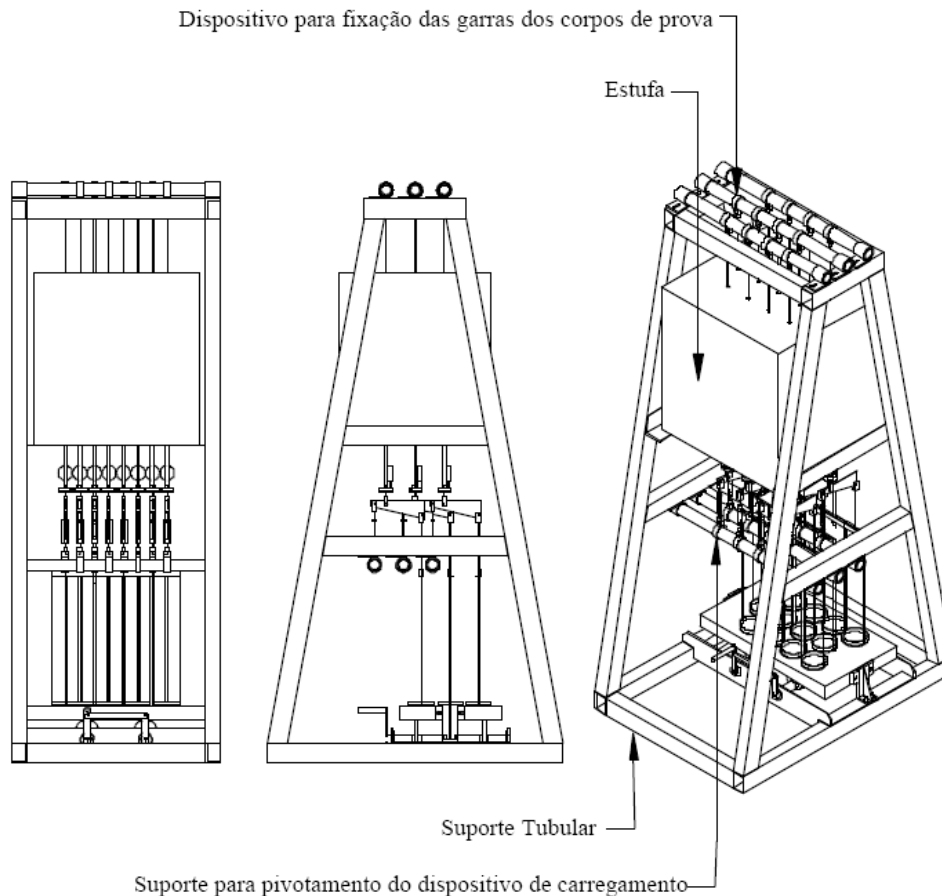


Figura 4.9 – Unidade de ensaio de fluência.

- O dispositivo de fixação do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 4.10, consiste de garras unidas por parafusos que devem impedir o escorregamento das extremidades do corpo de prova durante o período em que o mesmo está sob carregamento. Com o intuito de impedir este escorregamento colocam-se arruelas de pressão nas uniões por parafusos que mantêm as garras pressionando constantemente as extremidades do corpo de prova. O dispositivo de fixação do corpo de prova deve minimizar a excentricidade do carregamento. Para isso, adota-se uma articulação que permite o alinhamento do corpo de prova antes da aplicação da carga;
- O sistema de carregamento deve impedir oscilações maiores que $\pm 1\%$ da carga aplicada no corpo de prova. O dispositivo de aplicação de carga, apresentado na Figura 4.11, foi desenvolvido para a aplicação de uma carga constante no corpo de prova através de um mecanismo de braço de alavanca. Este braço de alavanca é pivotado, o qual amplifica a carga quatro vezes, devido à distância da posição de aplicação da força peso de uma massa em relação à posição do corpo de prova. Com este mecanismo é possível aplicar uma carga elevada a partir de uma pequena massa. Para a aplicação do carregamento, a base que suporta as massas é acionada manualmente através de um eixo com excêntrico, que permite uma aplicação rápida e uniforme do carregamento, onde é possível uma montagem com vários dispositivos que irão solicitar todos os corpos de prova simultaneamente;

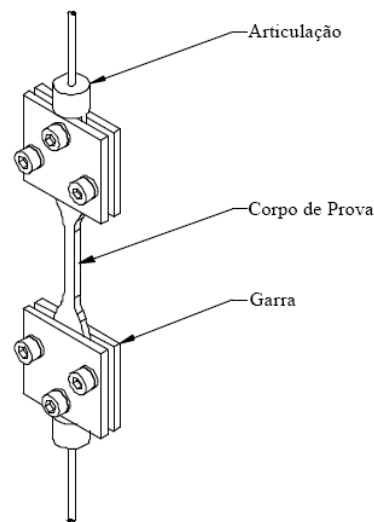


Figura 4.10 - Dispositivo de fixação do corpo de prova.

- Neste dispositivo, têm-se incertezas no valor do carregamento devido à medição das massas e ao comprimento do braço de alavanca. As massas são medidas em balança com faixa de medição de 0,25g a 5000g, com resolução correspondente a um incremento digital de 0,1g. Além da força devido à massa suspensa, atua sobre o corpo de prova a força que corresponde ao peso próprio do dispositivo. No comprimento do braço de alavanca a incerteza deve-se ao processo de fabricação do dispositivo, assumindo-se a tolerância de projeto estabelecida em $\pm 0,01\text{mm}$;
- O dispositivo utilizado para medir a extensão do comprimento útil do corpo de prova sob carga não pode influenciar no comportamento do mesmo, seja por efeito mecânico (deformação não desejada, entalhe, etc.), seja por efeito físico (aquecimento do corpo de prova, etc.), seja por efeito químico. As medições das deformações dos corpos de prova foram feitas utilizando técnicas de extensometria, conforme será apresentado a seguir;
- O extensômetro utilizado nesse ensaio foi o strain-gage de 350Ω com formato de roseta $0/90^\circ$ mostrado na Figura 4.12, que é um sensor de resistência elétrica que converte deformação mecânica em variação do valor da sua resistência inicial;

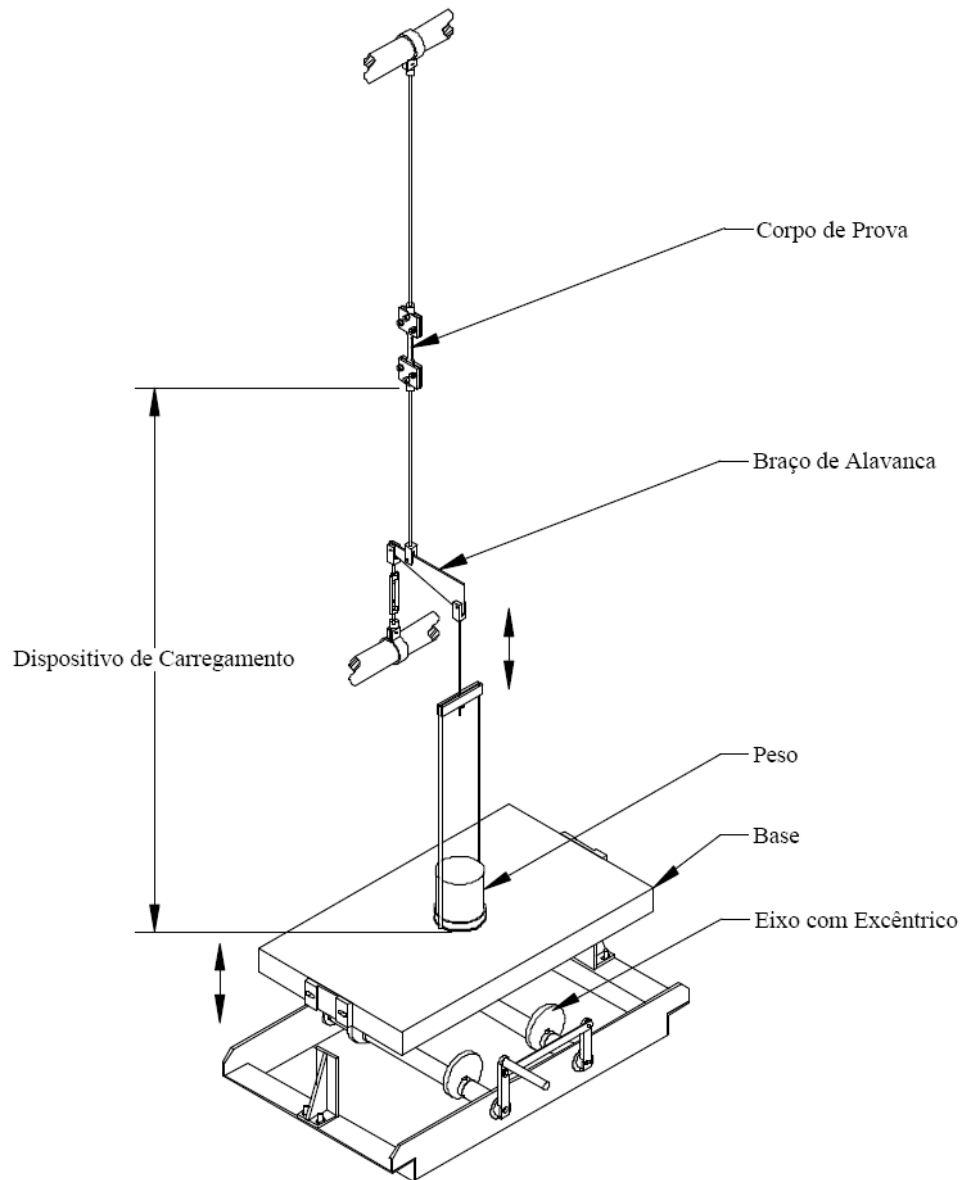


Figura 4.11 - Dispositivo de carregamento.

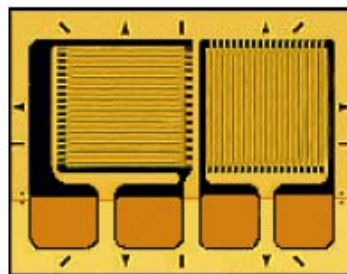


Figura 4.12 – Strain gage de formato Roseta 0°/90°.

- É montado um circuito de duplo ¼ de ponte ativo com dois strain-gages, utilizando dois resistores de precisão de $350,0 (\pm 0,1)\Omega$ para completar a ponte de Wheatstone para cada canal de deformação. Como o strain-gage é do tipo roseta, ele apresenta leituras de deformação em 0° e 90° , então para cada leitura é montado um circuito para completar a ponte, como pode ser visto na Figura 4.13;

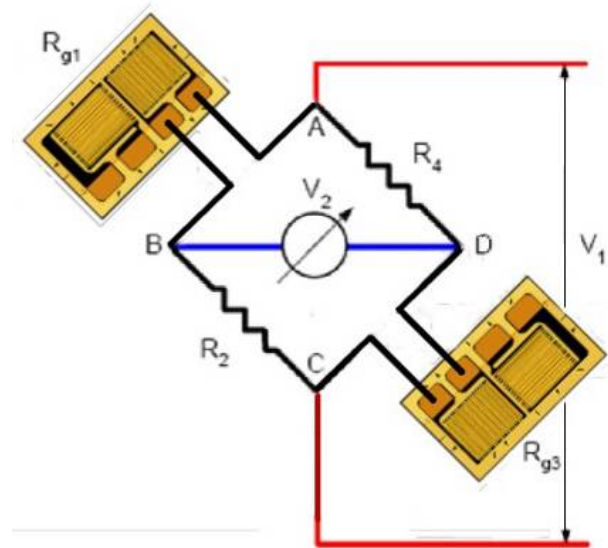


Figura 4.13 – Representações da ponte de Wheatstone.

Conforme apresentado na Figura 4.13, uma ponte de Wheatstone completa é composta por dois strain-gages ativos ligados em duplo ¼ de ponte, e por dois resistores elétricos.

Sendo:

V_1 = Tensão de excitação da ponte;

V_2 = Tensão de saída da ponte,

R = Valor da resistência elétrica dos resistores e/ou strain-gage,

V_2/V_1 = Desequilíbrio da ponte,

S = Gage Factor do strain-gage.

A razão entre a tensão de excitação e de saída da ponte é dada pela expressão:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) / 4 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = S \cdot \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (4.2)$$

- Cada canal mede as deformações em uma direção do corpo de prova, sendo elas a 0° , 45° e 90° em relação ao eixo longitudinal do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 4.14,

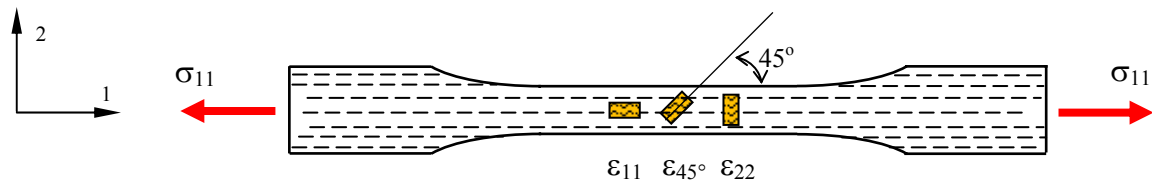


Figura 4.14 – Deformações medidas nos corpos de prova.

- A Figura 4.15 mostra as placas de complemento de ponte. Cada placa possibilita a ligação de quatro canais, sendo que cada canal necessita de duas resistências fixas para completar a ponte de Wheatstone dos dois strain-gages de uma determinada direção de deformação do corpo de prova. O circuito dessa placa está configurado de maneira que a ligação seja do tipo “duplo ¼ de ponte ativo”, ou seja, os strain-gages estão ligados opostos um do outro na ponte de wheatstone, assim como os resistores.

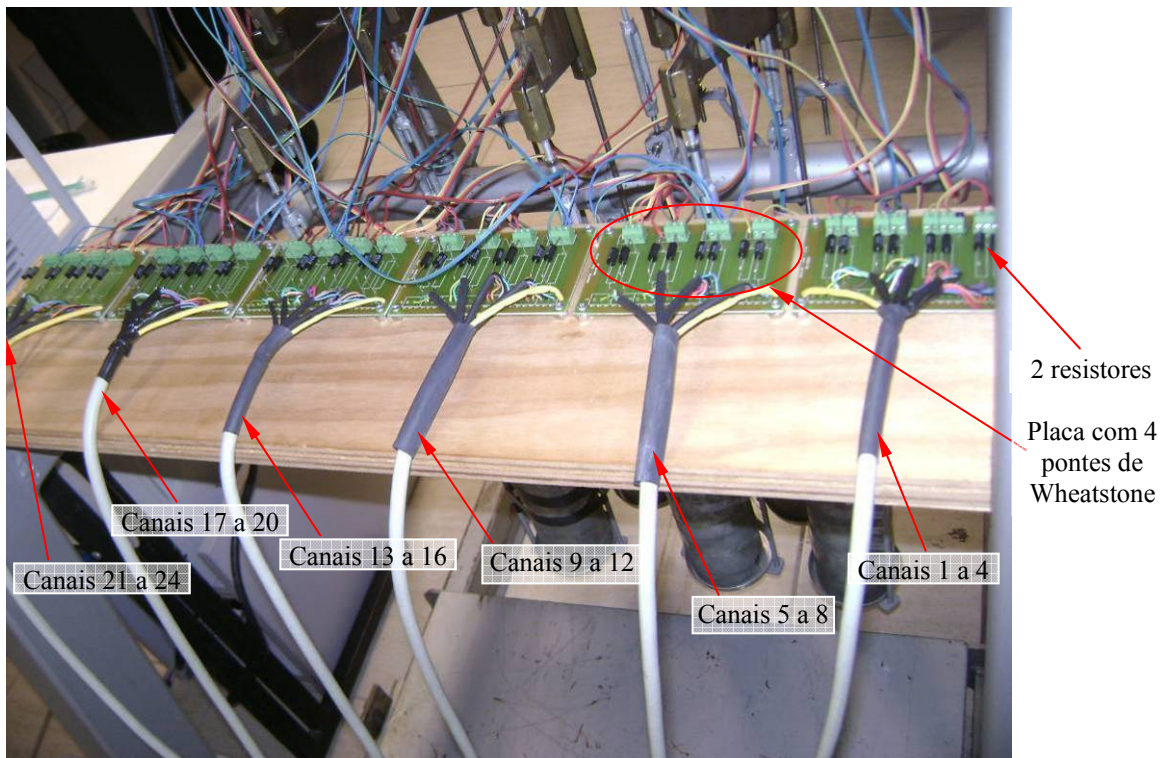


Figura 4.15 - Placas para completar a ponte de Wheatstone.

- A Figura 4.16 mostra todos os componentes de um ensaio de fluência que podem ser representado pelo diagrama na Figura 4.17. O primeiro bloco do diagrama representa dois strain-gages de mesma direção colados no corpo de prova, o circuito representa a placa eletrônica que completa a ponte de Wheatstone com os resistores. O bloco do Amplificador Conversor corresponde ao aparelho de aquisição de dados. Nestes ensaios foi utilizado um MGCplus da marca HBM, que é alimentado por um sistema de fonte de energia ininterrupta. O aparelho de aquisição possui interface com computador que grava os dados do ensaio e também indica em tempo real os valores medidos.

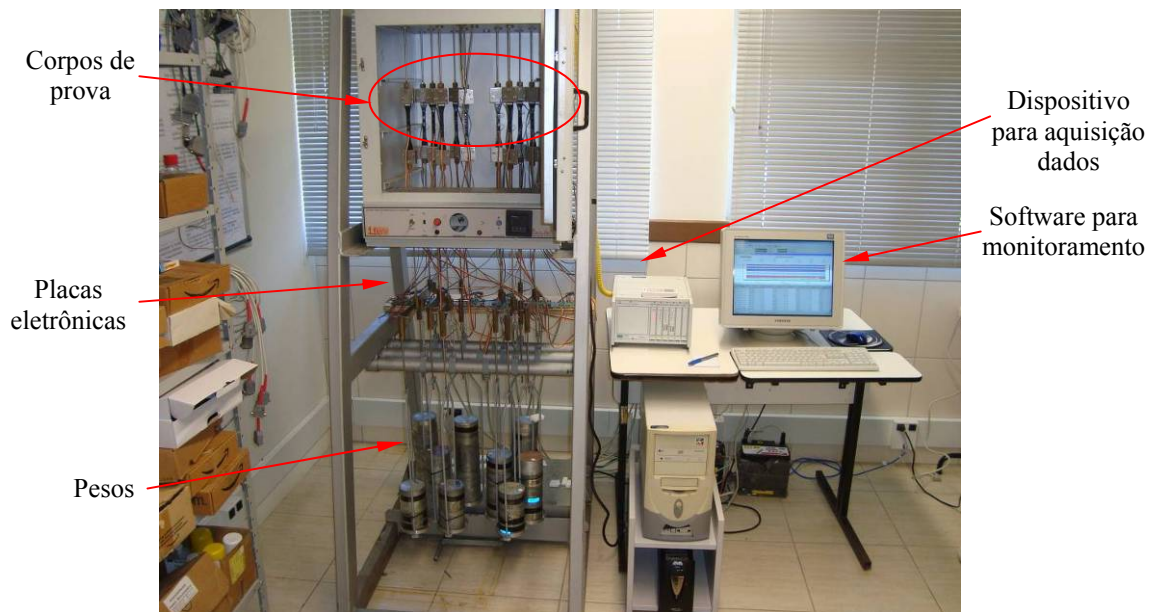


Figura 4.16 – Componentes de um ensaio de fluência.

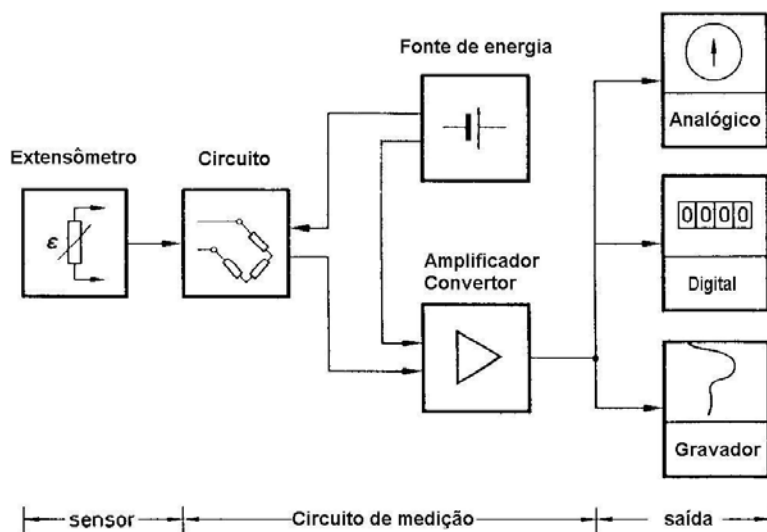


Figura 4.17 – Diagrama do sistema de medição para extensômetros elétricos.

4.3.2 – Condições Iniciais e Procedimento de Ensaio

Foram realizados ensaios de fluência para dois tipos de materiais, Technyl A118 V50 e Technyl A218 V35, com tempos de duração de 55 dias (4.752.000 segundos) e 46 dias (4.000.000 segundos), respectivamente. Os ensaios foram realizados na temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Em cada ensaio três níveis de tensão diferentes foram selecionados e para cada nível de tensão utilizou-se três corpos de prova. Cada conjunto de três corpos de prova foi submetido a carregamentos devido às massas de 6,7 kg, 9,6 kg e 12,8 kg, respectivamente. Sobre estes valores deve ser adicionado o peso próprio do dispositivo de aplicação de carga cuja massa é

de 0,4 kg. Sendo assim, as tensões de ensaio obtidas como a média das tensões atuantes nos corpos de prova, correspondem aos valores de 6,8 MPa, 9,6 MPa e 12,7 MPa em ambos os ensaios. De acordo com os ensaios de tração realizados nos corpos em Technyl A118 V50 e em Technyl A218 V35, estas tensões estão dentro do regime elástico-linear do material, conforme observado nos diagrama tensão x deformação apresentados nas Figuras 4.5 e 4.7, respectivamente.

No ensaio de fluência para o Technyl A118 V50 tem-se a seguinte distribuição das tensões: a) para a leitura da deformação longitudinal são ensaiados três corpos de prova para cada um dos três níveis de tensões, b) para a leitura da deformação transversal são ensaiados três corpos de prova para a tensão de 12,7 MPa, três corpos de prova para a tensão de 6,8 MPa, e c) para a leitura da deformação a 45° são ensaiados três corpos de prova para a tensão de 12,7 MPa e três corpos de prova para a tensão de 9,6 MPa, totalizando 21 canais de deformação.

No ensaio de fluência para o Technyl A218 V35 tem-se a seguinte distribuição das tensões: a) para a leitura da deformação longitudinal são ensaiados três corpos de prova para cada um dos três níveis de tensões, b) para a leitura da deformação transversal são ensaiados três corpos de prova para a tensão de 9,6 MPa e três corpos de prova para a tensão de 6,8 MPa e c) para a leitura da deformação a 45° são ensaiados três corpos de prova para a tensão de 12,7 MPa e três corpos de prova para a tensão de 9,6 MPa, totalizando 21 canais de deformação.

Para avaliar o comportamento da temperatura é colocado mais um corpo de prova que não é submetido ao carregamento, mas que está ligado em três canais de deformações, denominado de “dummy”. Esses três canais somados aos 21 canais de deformação descritos acima totalizam 24 canais de deformações, que é o máximo disponível no sistema de aquisição utilizado. Por isso não foram feitas as leituras das três direções de deformações para os três níveis de tensões. A Tabela 4.2 mostra a distribuição das direções das deformações para os três níveis de tensões dos ensaios de fluência para o Technyl A118 V50 e para o Technyl A218 V35.

Tabela 4.2 – Distribuição das direções das deformações para os três níveis de tensões.

		Tensão (MPa)			
		12,7	9,6	6,8	0 (dummy)
Technyl A118 V50	Deformação longitudinal	X	X	X	X
	Deformação transversal	X		X	X
	Deformação a 45°	X	X		X
Technyl A218 V35	Deformação longitudinal	X	X	X	X
	Deformação transversal		X	X	X
	Deformação a 45°	X	X		X

Todos os corpos de prova foram submetidos simultaneamente às mesmas condições de temperatura. A norma estipula que a temperatura no ambiente de realização dos ensaios seja de 23±2°C. Após testes realizados utilizando estufa com resistências elétricas, ar condicionado e a combinação de ambos, concluiu-se que a melhor alternativa seria utilizar apenas o ar condicionado disponível no ambiente em que foi realizado o ensaio ajustado em 24°C no indicador do mesmo. A temperatura foi monitorada com termo-par ligado no sistema de aquisição de dados. Conforme pode ser visto na Figura 4.18, a variação ao longo dos ensaios não ultrapassou ±2°C estipulados pela norma.

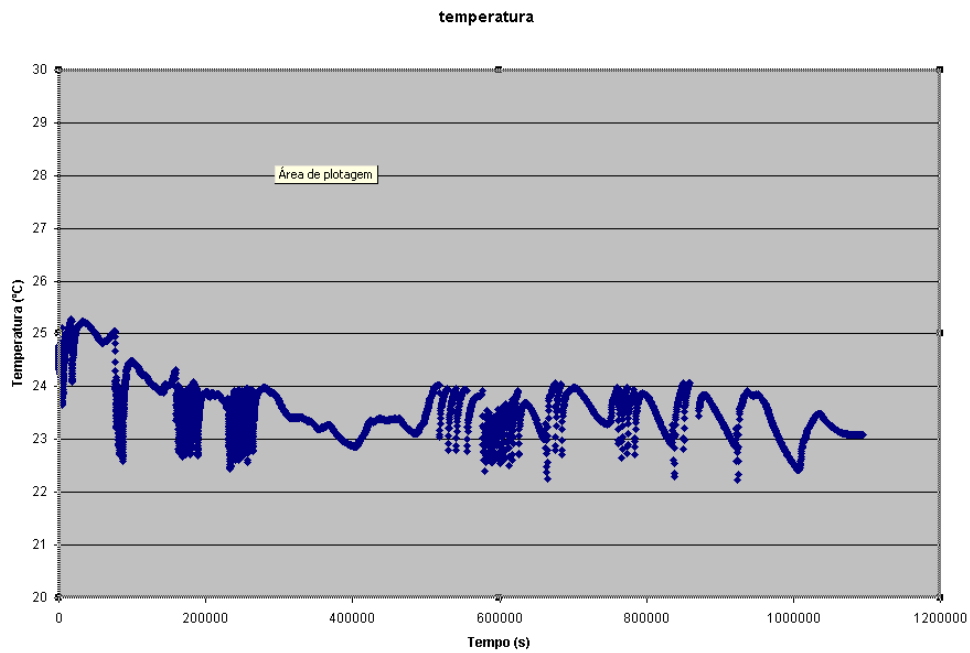


Figura 4.18 – Evolução da temperatura ao longo do ensaio em função.

Na disposição dos extensômetros em duplo $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, conforme relato anterior, não se tem a compensação da indesejada deformação térmica causada pela variação da temperatura. Para isso, um corpo de prova instrumentado sem carga, denominado de “dummy” deve ser posicionado no centro dos demais corpos de prova, conforme ilustração da Figura 4.19, para medir apenas a deformação térmica, e analiticamente fazer a compensação de temperatura. A evolução da deformação no “dummy” ao longo do ensaio pode ser vista na Figura 4.20.

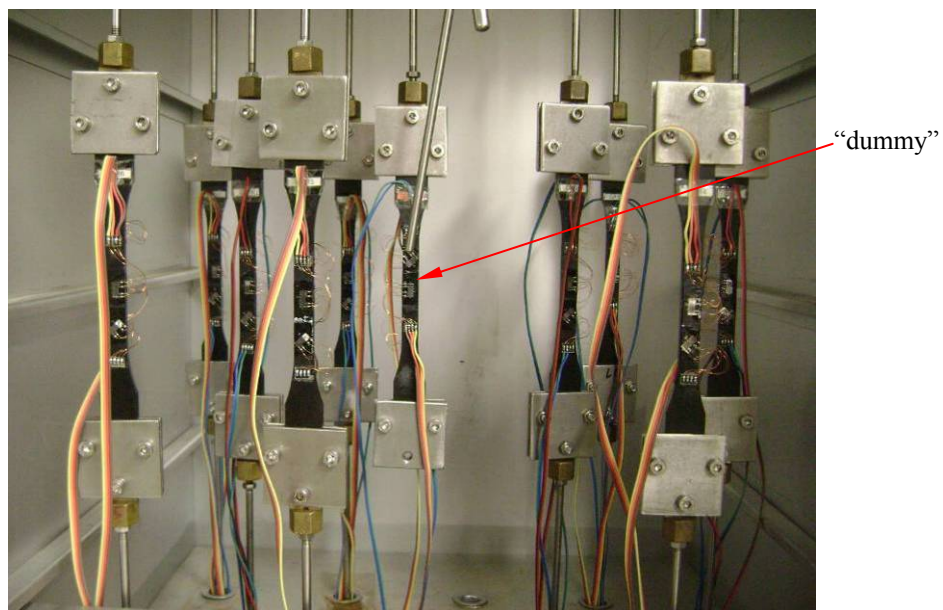


Figura 4.19 - Corpos de prova instrumentados sendo ensaiados com o compensador de deformação térmica “dummy”.

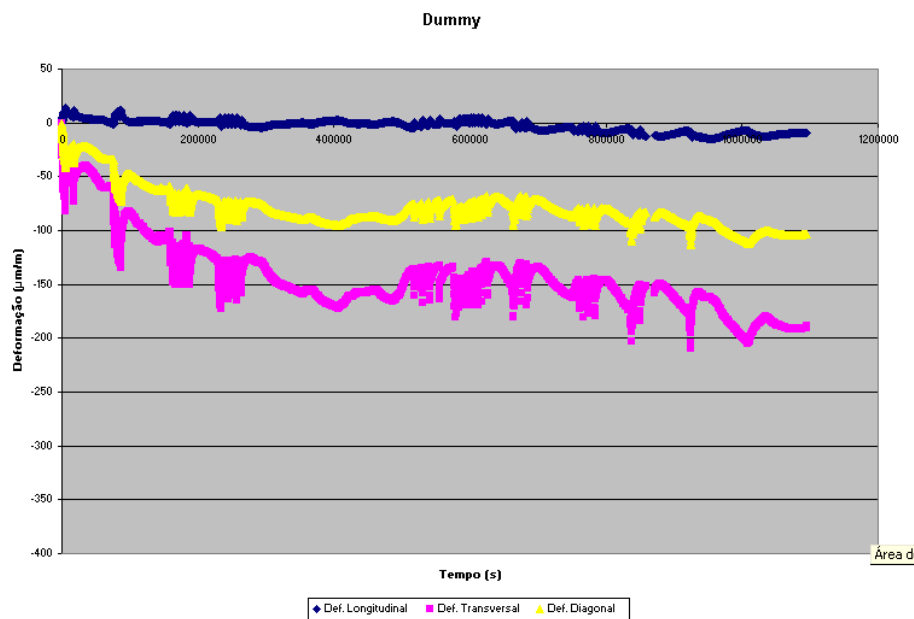


Figura 4.20 – Evolução da deformação do “dummy” em função da variação de temperatura ao longo do ensaio de fluência.

O procedimento de ensaio envolve certo número de passos, listados a seguir:

1. Após fazer a medição da área da seção transversal do corpo de prova ao longo do comprimento útil de medida, monta-se o corpo de prova propriamente condicionado nas garras de fixação;
2. Monta-se o corpo de prova no dispositivo de aplicação de carga, previamente instalado no suporte tubular. Instala-se o dispositivo de medição de deslocamento;
3. Monta-se os pesos no dispositivo de aplicação de carga. A carga deve ser aplicada de forma rápida e uniforme, preferencialmente em um período de tempo de 1 a 5 segundos. A deformação deve se restringir ao limite de pequenas deformações, o que permite assumir uma condição de tensão constante atuando nos corpos de prova durante os ensaios;
4. Com os parâmetros do controlador de temperatura configurado e os corpos de prova montados no ambiente de ensaio, aguarda-se 48h antes de iniciar os ensaios. Através do termopar posicionado no centro dos corpos de prova, é possível monitorar a temperatura continuamente ao longo de todo o período de ensaio;
5. Decorrido o período de condicionamento dos corpos de prova no ambiente de ensaio, ajusta-se para a posição inicial e aplica-se o carregamento acionando manualmente os eixos com excêntricos da base do dispositivo de carga.

6. O início da medição do tempo de ensaio coincide com a aplicação do carregamento. A leitura da deformação dos corpos de prova é feita, através do sistema de aquisição de dados que tem a taxa de leitura variando segundo um cronograma previamente definido.

4.3.3 – Curvas de Fluência

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 as curvas de evolução das deformações no tempo $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$, respectivamente, para o Technyl A118 V50, em três níveis de tensão diferentes, 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa. Para cada nível de tensão são utilizados três corpos de prova, como recomendado pela norma D 2990-01.

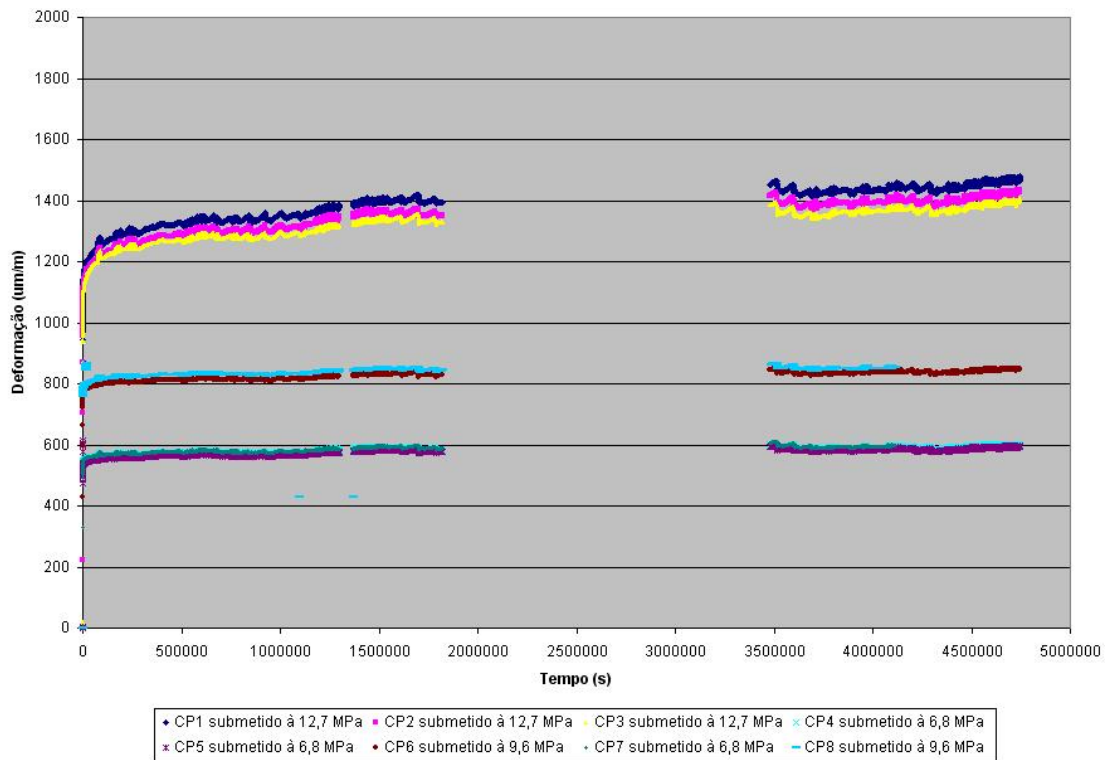


Figura 4.21 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

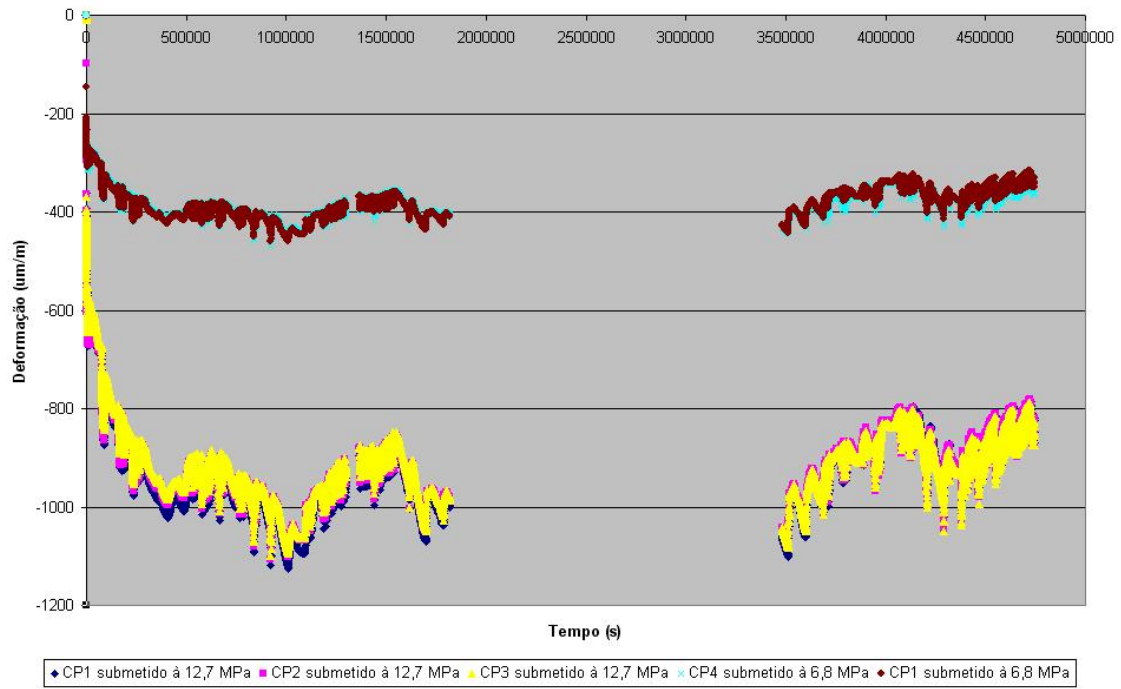


Figura 4.22 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

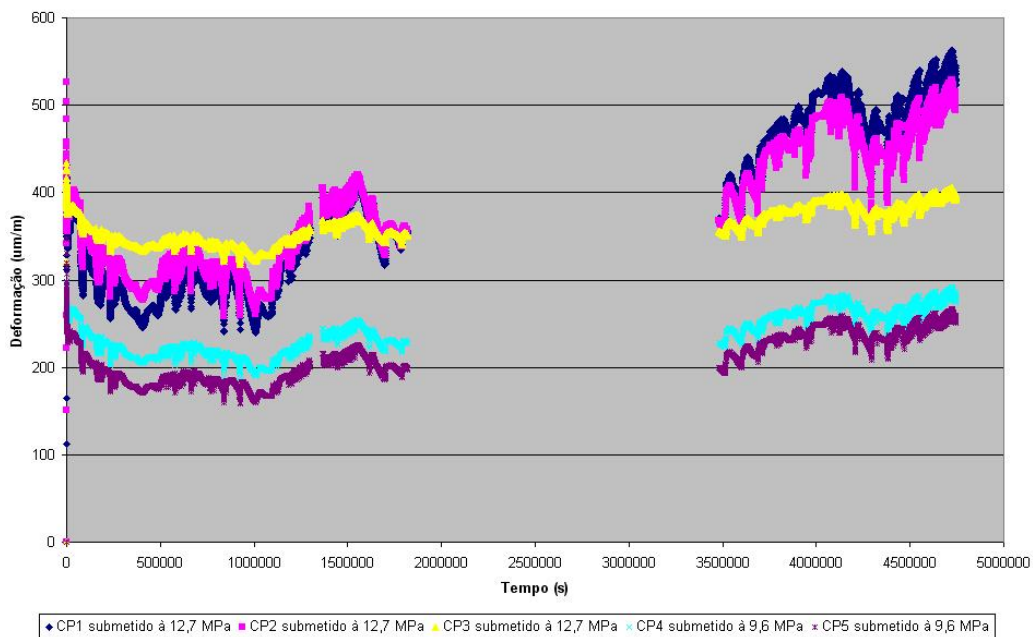


Figura 4.23 – Evolução da deformação diagonal $\varepsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A118 V50.

A interrupção na aquisição de dados entre 18.000.000 e 34.000.000 segundos se deve a uma falha na fonte de alimentação ininterrupta (“nobreak”).

Na Figura 4.24 é apresentado o módulo de fluência $J(t)$, relação entre a evolução da deformação longitudinal pela tensão aplicada, $J(t) = \frac{\varepsilon_{11}(t)}{\sigma_{11}}$, para o Technyl A118 V50.

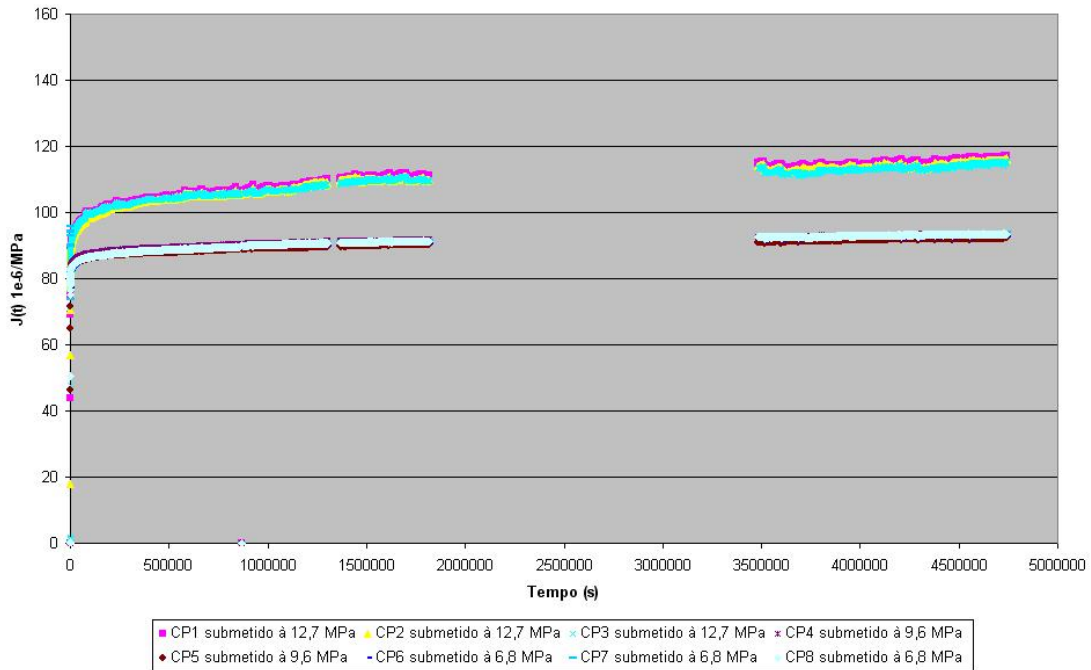


Figura 4.24 – Módulo de fluência $J(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 Mpa e 6,8 Mpa – Technyl A118 V50.

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 as curvas de evolução das deformações no tempo $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ para o Technyl A218 V35, respectivamente.

Capítulo 4 – Ensaio Mecânico em Corpos de Prova em Material Polimérico

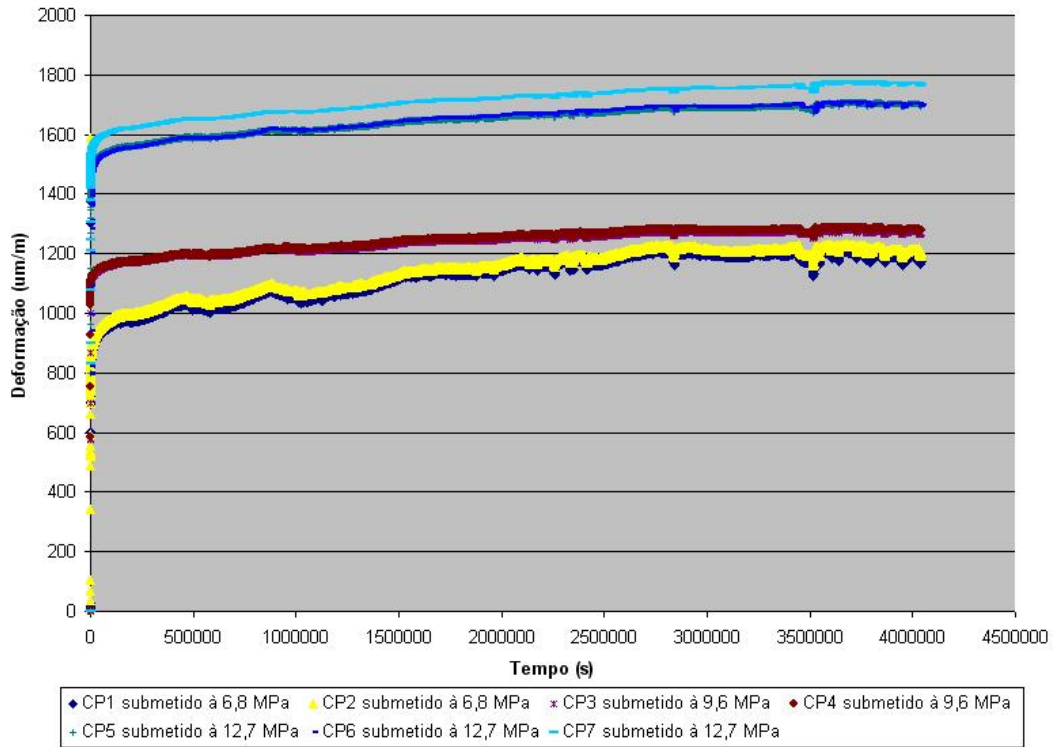


Figura 4.25 – Evolução da deformação longitudinal $\epsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

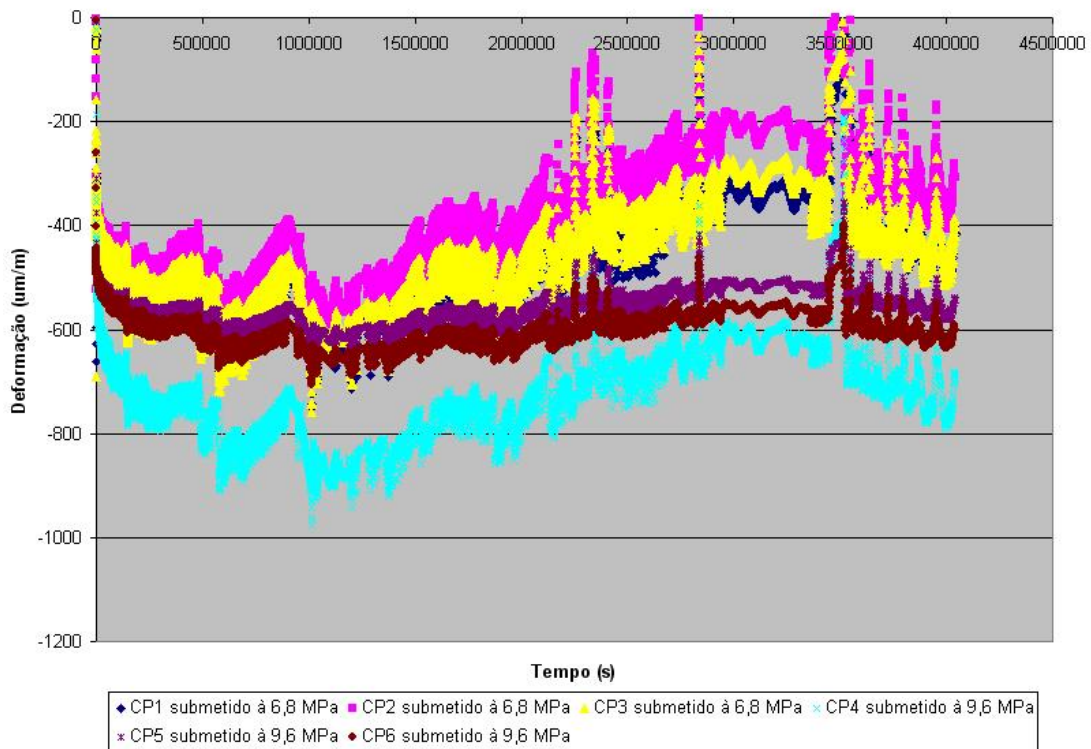


Figura 4.26 – Evolução da deformação transversal $\epsilon_{22}(t)$ para as tensões de 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

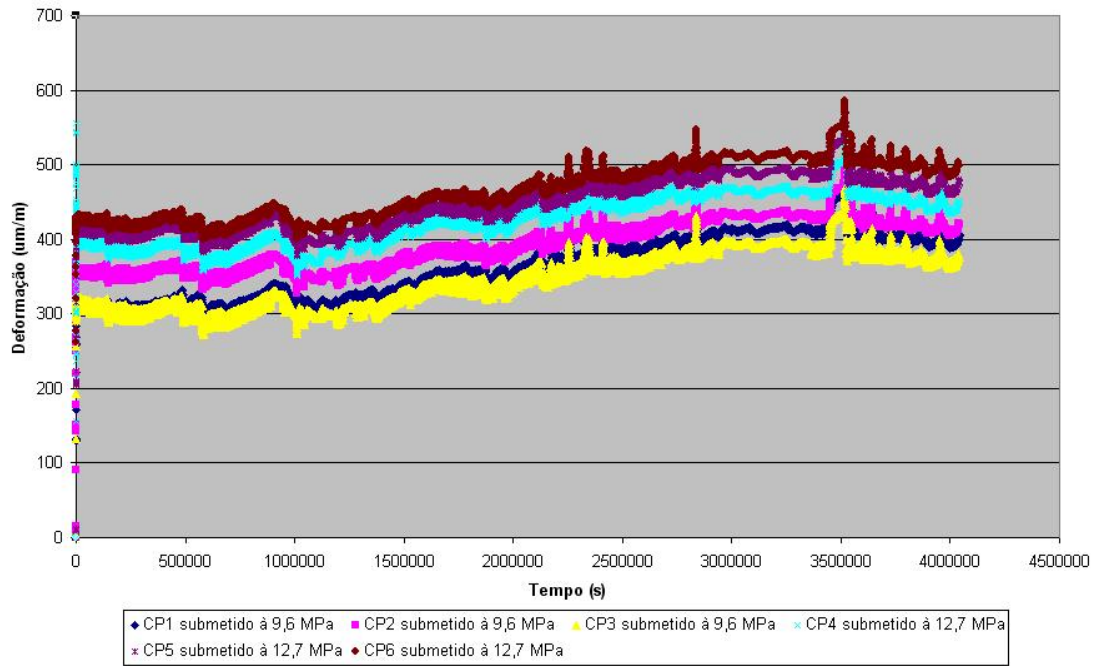


Figura 4.27 – Evolução da deformação diagonal $\epsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A218 V35.

Na Figura 4.28 é apresentado o módulo de fluência $J(t)$, para o Technyl A218 V35.

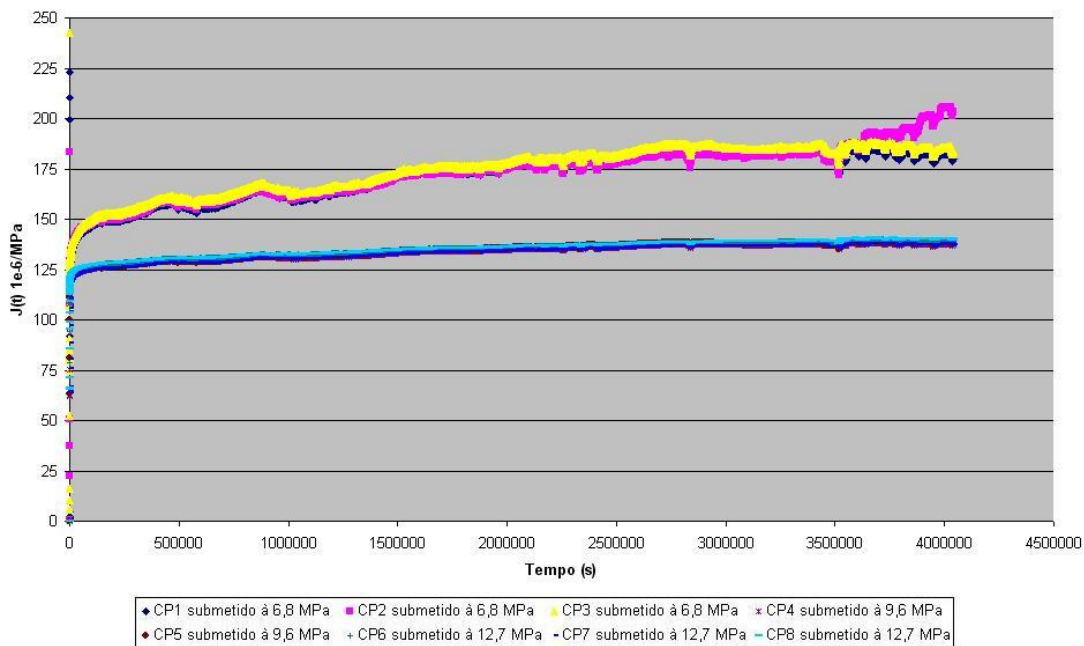


Figura 4.28 – Módulo de fluência $J(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

Da observação das Figuras 4.24 e 4.28, nota-se dois grupos distintos de curvas do módulo de fluência $J(t)$, sendo que para um material viscoelástico linear todas as curvas devem estar próximas uma das outras. O sistema de aquisição utilizado possui três módulos de condicionamento para strain-gage, sendo um módulo do modelo AP815 e dois módulos do

modelo AP815i. Os corpos de prova do grupo que apresenta comportamento distinto estão ligados ao módulo de condicionamento do modelo AP815. Conclui-se que o módulo de condicionamento do modelo AP815 não é compatível com o módulo de condicionamento do modelo AP815i, o que gera a disparidade na leitura dos valores. As curvas de deformações dos corpos de prova ligados a este módulo possuem uma inclinação muito acentuada em relação às demais, como pode ser visto nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.25, 4.26 e 4.27.

4.3.4 – Ajuste do Modelo de Viscoelasticidade Ortotrópica

Conforme mostrado na Seção 3.2, a previsão do comportamento viscoelástico de um material ortotrópico por meio do modelo matemático proposto, depende das constantes elásticas do material e de parâmetros associados às taxas de deformação e de tensão que são determinadas em ensaios de tração e de fluência. De forma a ilustrar este procedimento de ajuste, a Figura 4.29 apresenta de forma ilustrativa um diagrama tensão x deformação onde é possível observar em que instante da fluência os parâmetros a serem ajustados tem maior influência.

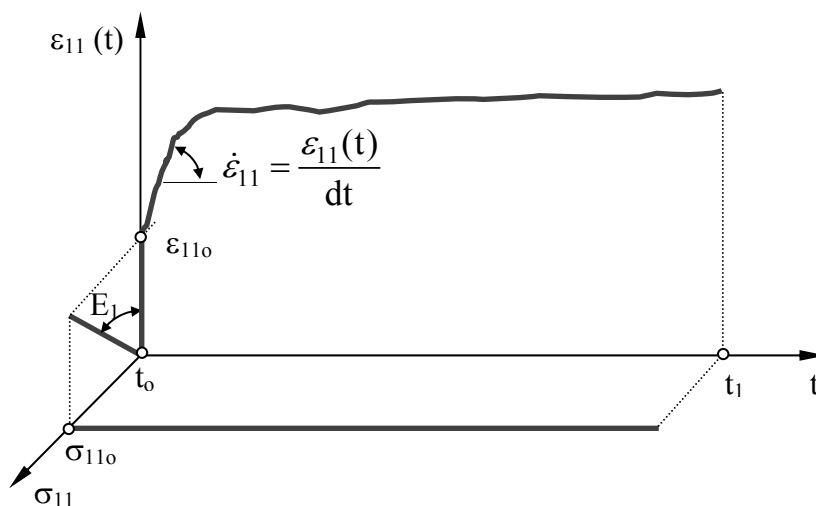


Figura 4.29 – Relação entre os parâmetros a serem ajustados na fluência.

Para realizar o ajuste de parâmetros no modelo de viscoelasticidade proposto a partir dos resultados obtidos nos ensaios de fluência, foram feitas simulações numéricas em um modelo geométrico de corpo de prova, conforme apresentado na Figura 4.30, onde é possível observar a orientação do sistema de eixos de ortotropia.

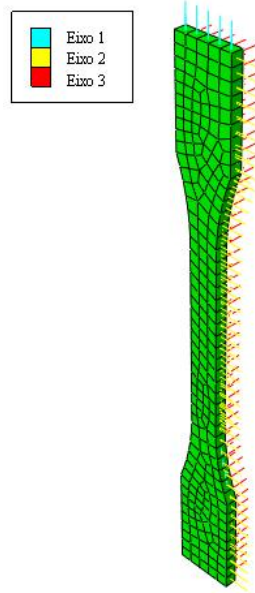


Figura 4.30 – Identificação dos eixos de ortotropia no modelo de corpo de prova.

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 as curvas de evolução das deformações no tempo $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$, respectivamente, para o Technyl A118 V50, obtidas a partir da técnica de ajuste de parâmetros, onde $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 4,85$ na eq. (4.12), como mostra a Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Constantes elásticas do material denominado Technyl A118 V50.

	Direção 1	Direção 2
λ (MPa)	97,1455	27,1115
μ (MPa)	5,9655	3,0555
$\bar{\lambda}$ (MPa)	97,1455	27,1115
$\bar{\mu}$ (MPa)	5,9655	3,0555
$\bar{\nu}$	0,87	0,87

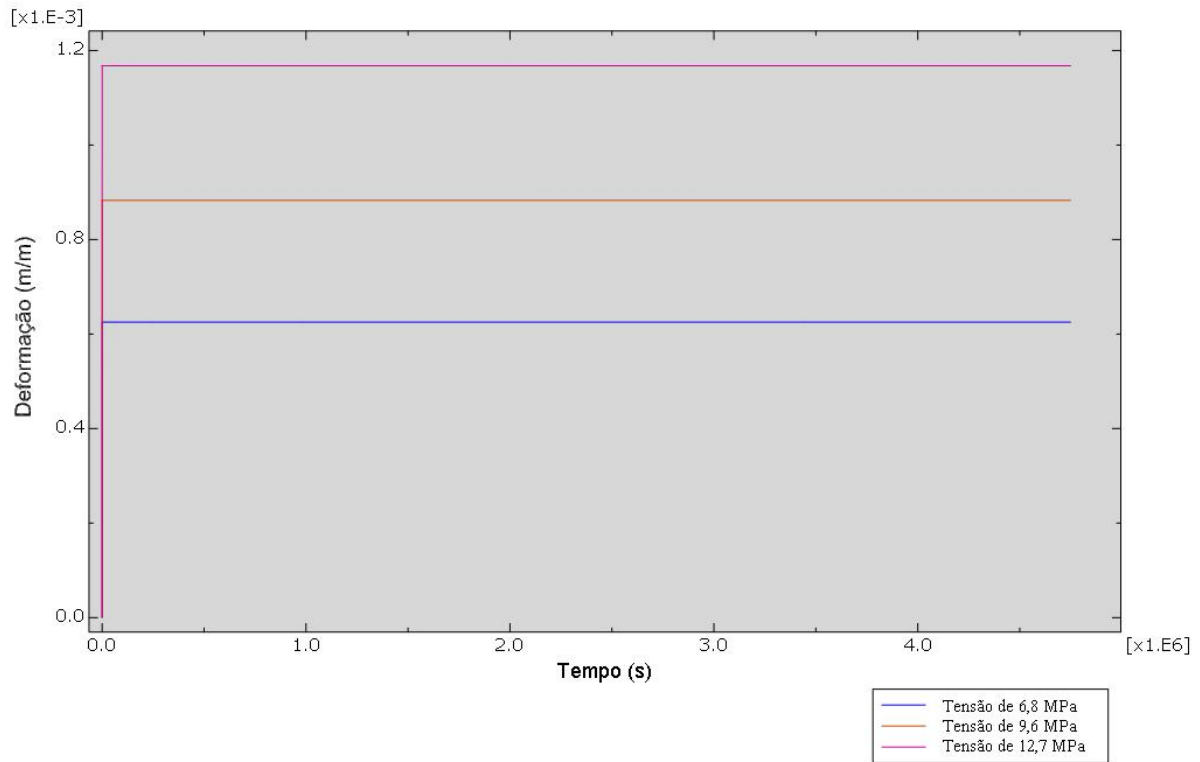


Figura 4.31 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

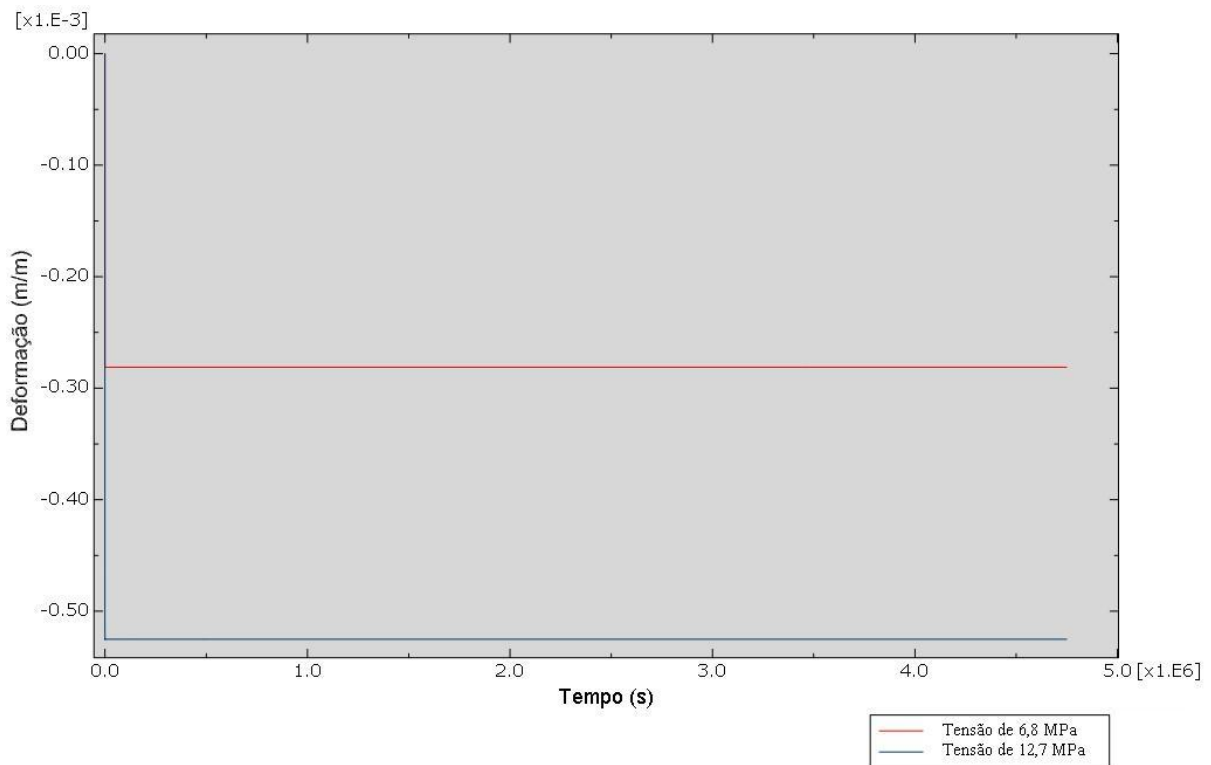


Figura 4.32 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

Capítulo 4 – Ensaio Mecânicos em Corpos de Prova em Material Polimérico

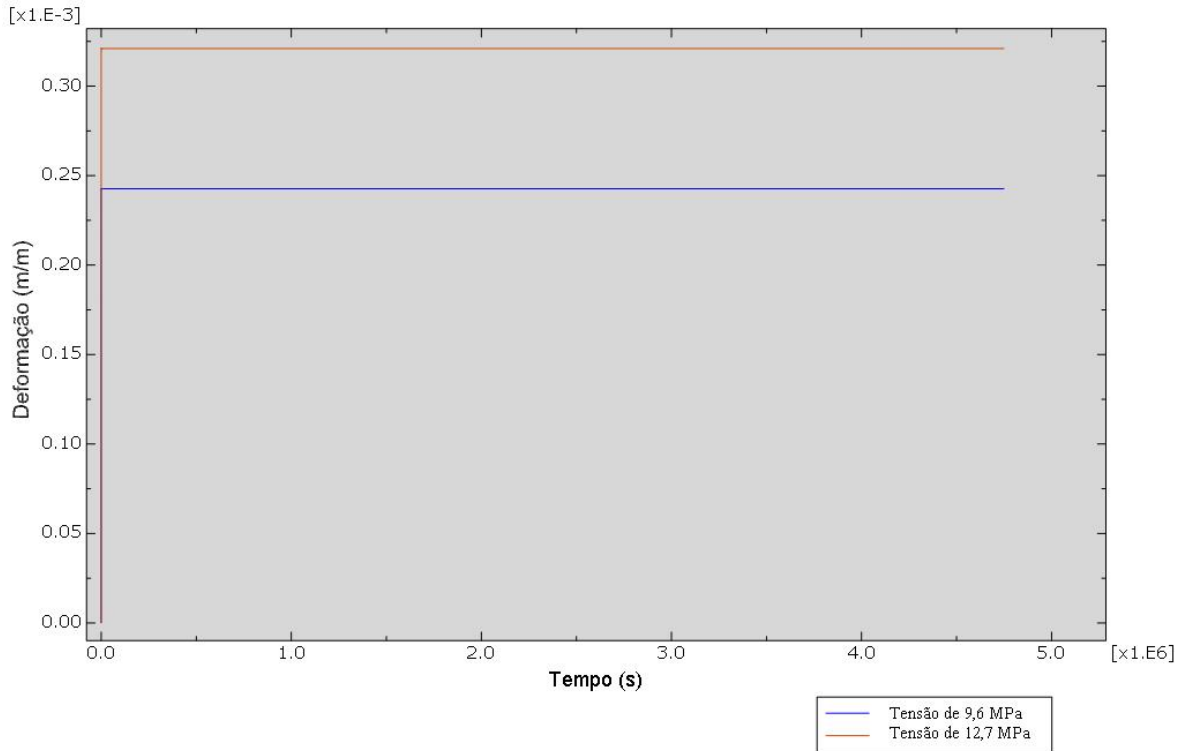


Figura 4.33 – Evolução da deformação diagonal $\epsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A118 V50.

A figura a seguir apresenta a evolução das deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$, respectivamente, para o Technyl A118 V50, nos instantes iniciais de aplicação das tensões.

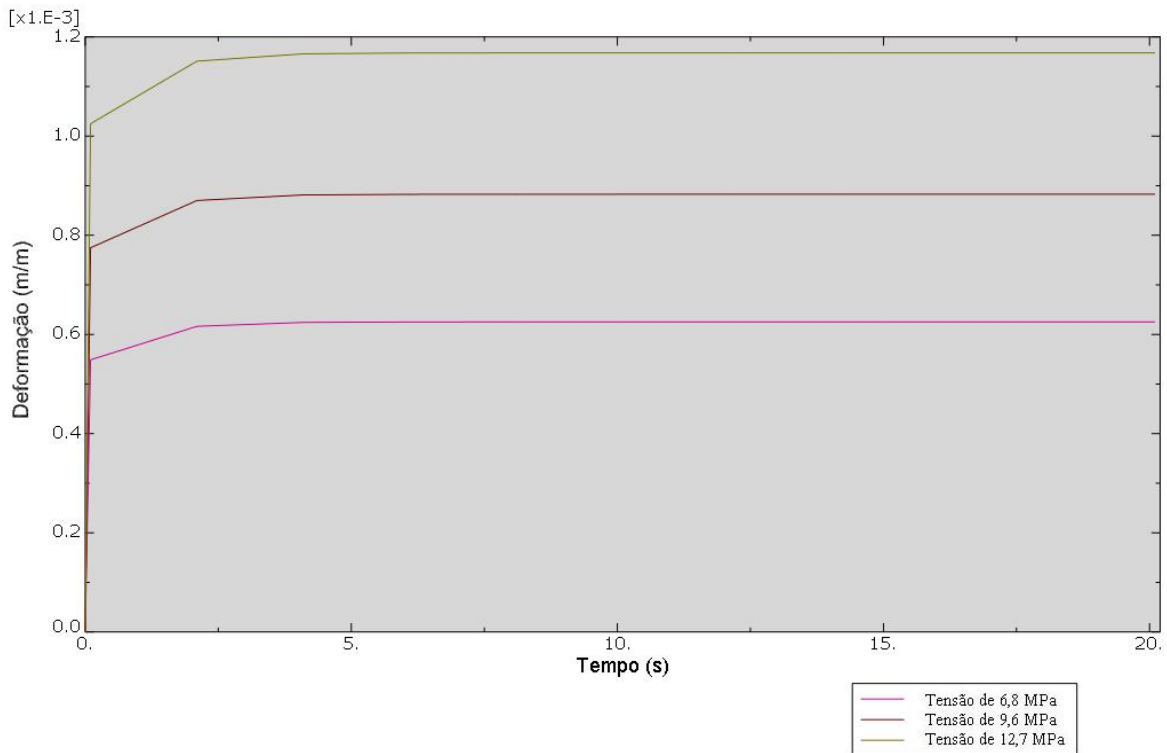


Figura 4.34 – Zoom da evolução da deformação longitudinal $\epsilon_{11}(t)$ nos instantes iniciais de aplicação das tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

Para identificar nas curvas apresentadas anteriormente a deformação elástica instantânea para as três tensões aplicadas, é apresentado na Figura 4.34 as curvas de fluência nos instantes iniciais. A deformação elástica instantânea, ε_{110} , para as três tensões aplicadas pode ser calculada da forma:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{110} &= \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{12,7 \text{ MPa}}{12,4 \text{ GPa}} = 1,02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \\ \varepsilon_{110} &= \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{9,6 \text{ MPa}}{12,4 \text{ GPa}} = 0,774 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \\ \varepsilon_{110} &= \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{6,8 \text{ MPa}}{12,4 \text{ GPa}} = 0,548 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Observando a Figura 4.34, percebe-se que as deformações instantâneas são perfeitamente identificadas.

Para melhor ilustrar a simulação, a seguir são apresentadas as deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45^\circ}(t)$ no modelo do corpo de prova para o instante de 0,1s, que é o instante que prescreve a deformação elástica instantânea e para o instante final do ensaio, $4,75 \cdot 10^6 \text{ s}$ (= 55 dias).

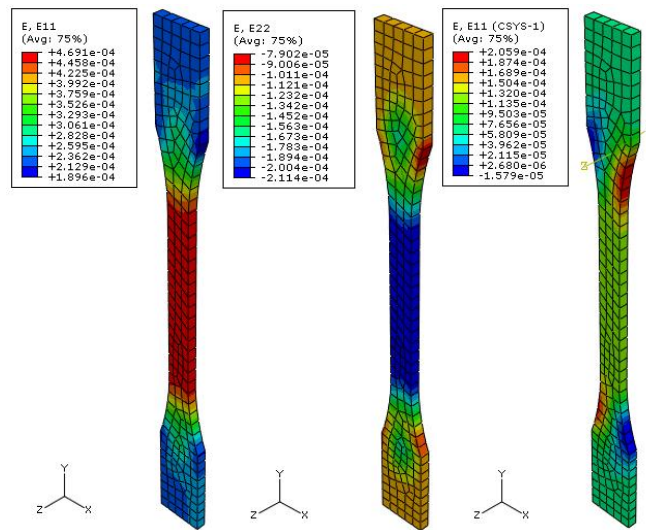


Figura 4.35 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45^\circ}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

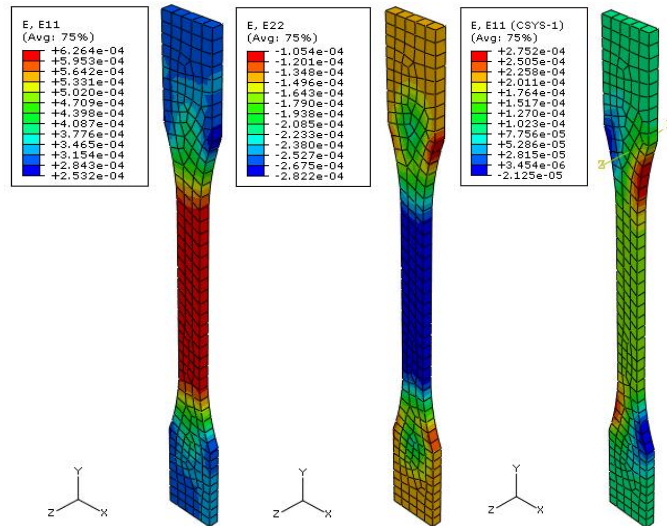


Figura 4.36 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A118 V50.

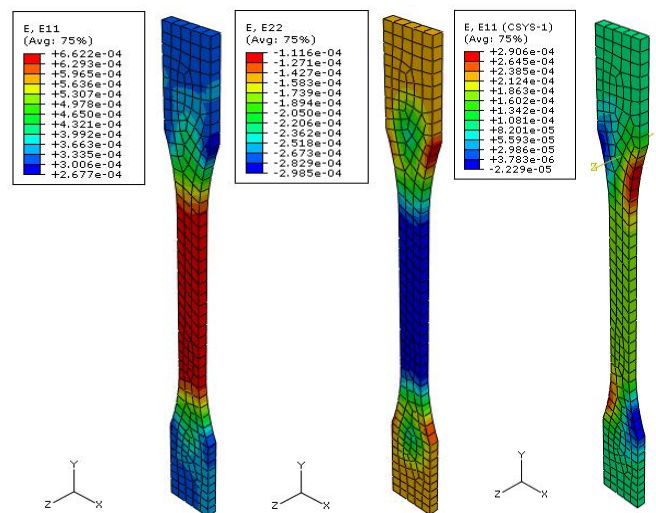


Figura 4.37 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A118 V50.

Capítulo 4 – Ensaio Mecânico em Corpos de Prova em Material Polimérico

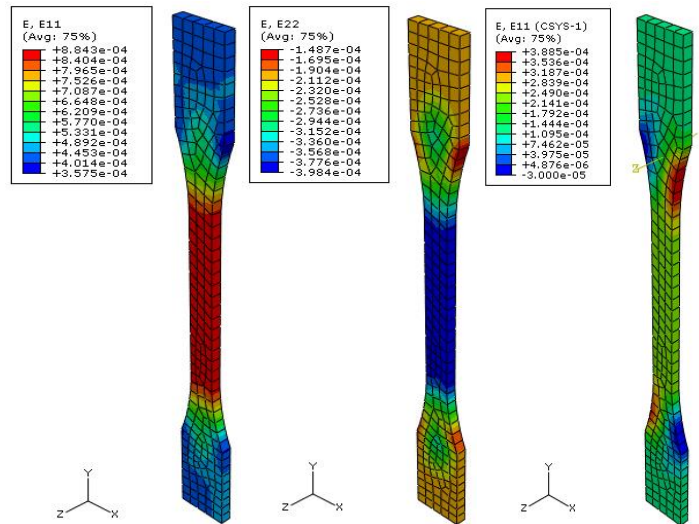


Figura 4.38 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A118 V50.

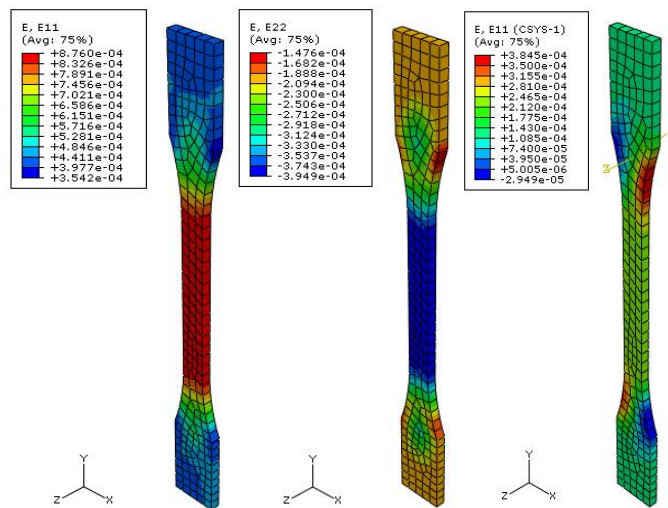


Figura 4.39 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A118 V50.

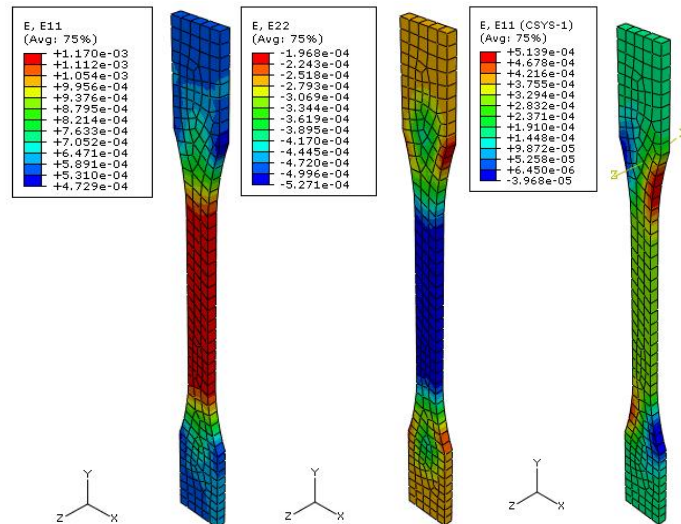


Figura 4.40 – Deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$ no instante de tempo $4,75 \cdot 10^6$ s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A118 V50.

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 as curvas de evolução das deformações no tempo $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$, respectivamente, para o Technyl A218 V35, obtidas a partir da técnica de ajuste de parâmetros, onde $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 3,85$ na eq. (4.13), como mostra a Tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Constantes elásticas do material denominado Technyl A218 V35.

	Direção 1	Direção 2
λ (MPa)	57,211	16,7475
μ (MPa)	3,7345	2,4255
$\bar{\lambda}$ (MPa)	57,211	16,7475
$\bar{\mu}$ (MPa)	3,7345	2,4255
$\bar{\nu}$	0,87	0,87

Capítulo 4 – Ensaio Mecânicos em Corpos de Prova em Material Polimérico

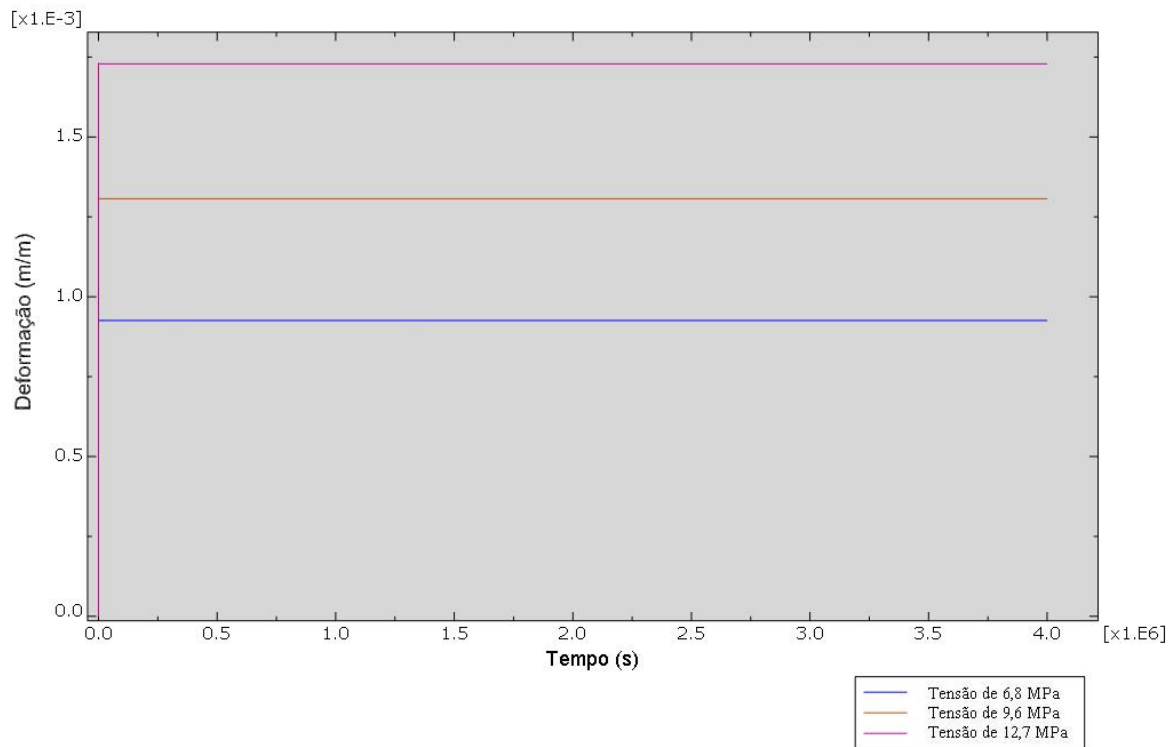


Figura 4.41 – Evolução da deformação longitudinal $\varepsilon_{11}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

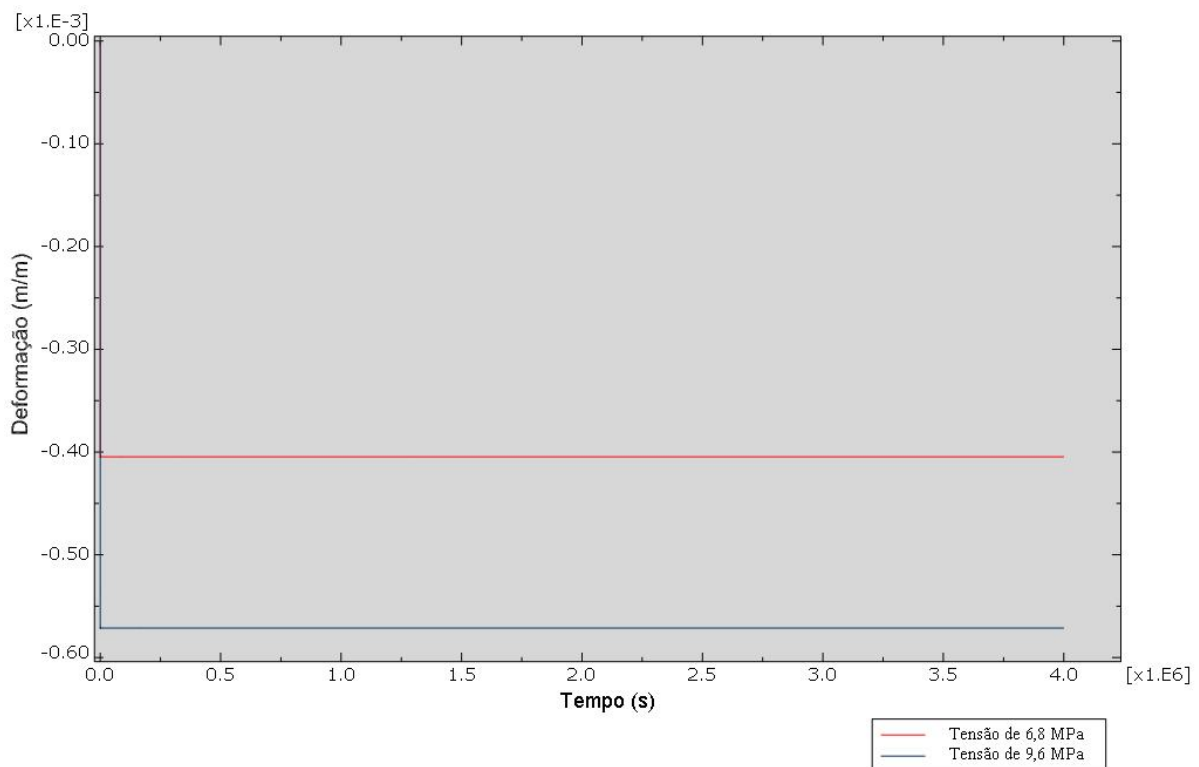


Figura 4.42 – Evolução da deformação transversal $\varepsilon_{22}(t)$ para as tensões de 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

Capítulo 4 – Ensaio Mecânicos em Corpos de Prova em Material Polimérico

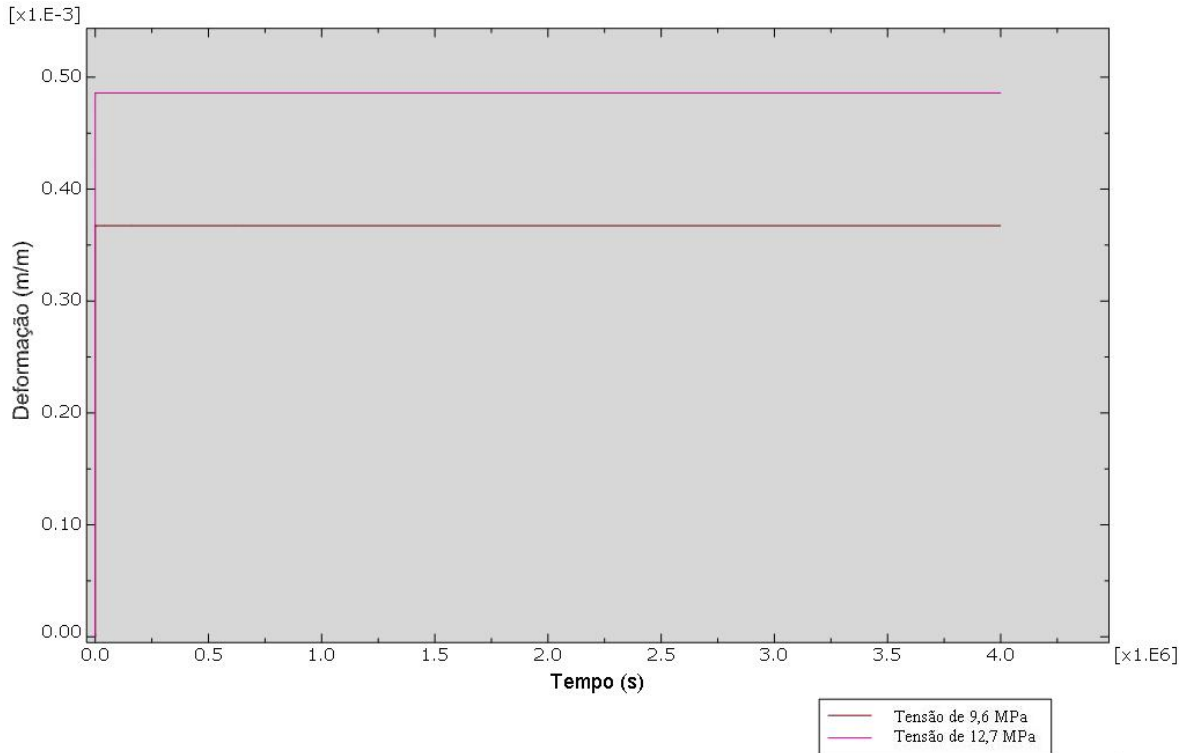


Figura 4.43 – Evolução da deformação diagonal $\epsilon_{45}(t)$ para as tensões de 12,7 MPa e 9,6 MPa - Technyl A218 V35.

A figura a seguir apresenta a evolução das deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$, respectivamente, para o Technyl A218 V35, nos instantes iniciais de aplicação das tensões.

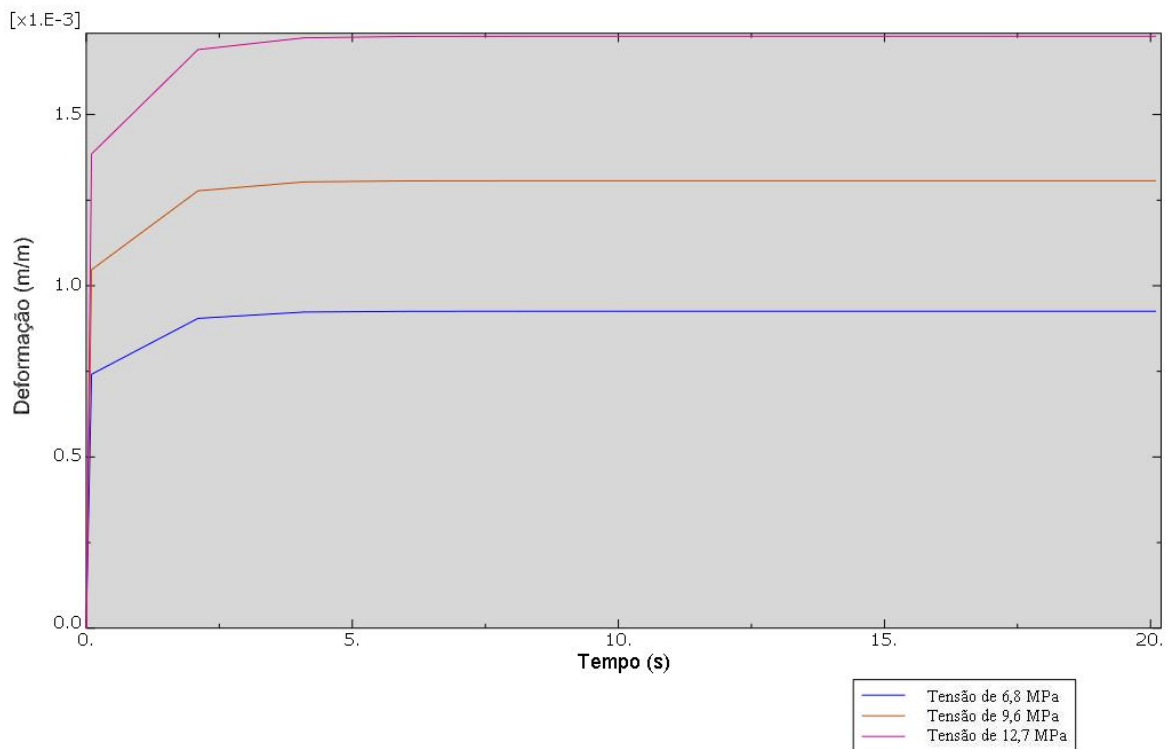


Figura 4.44 – Zoom da evolução da deformação longitudinal $\epsilon_{11}(t)$ nos instantes iniciais de aplicação das tensões de 12,7 MPa, 9,6 MPa e 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

Para identificar nas curvas apresentadas anteriormente a deformação elástica instantânea para as três tensões aplicadas, é apresentada na Figura 4.44 às curvas de fluência nos instantes iniciais. A deformação elástica instantânea, ε_{110} , para as três tensões aplicadas pode ser calculada da forma:

$$\varepsilon_{110} = \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{12,7 \text{ MPa}}{9,2 \text{ GPa}} = 1,38 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$\varepsilon_{110} = \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{9,6 \text{ MPa}}{9,2 \text{ GPa}} = 1,043 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{110} = \frac{\sigma_0}{E_{11}} = \frac{6,8 \text{ MPa}}{9,2 \text{ GPa}} = 0,739 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

Observando a Figura 4.44, percebe-se que as deformações instantâneas são perfeitamente identificadas.

Para melhor ilustrar a simulação, a seguir são apresentadas as deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45^\circ}(t)$ no modelo do corpo de prova para o instante de 0,1s, que é o instante que prescreve a deformação elástica instantânea e para o instante final do ensaio, $4 \cdot 10^6 \text{ s}$ (= 46 dias).

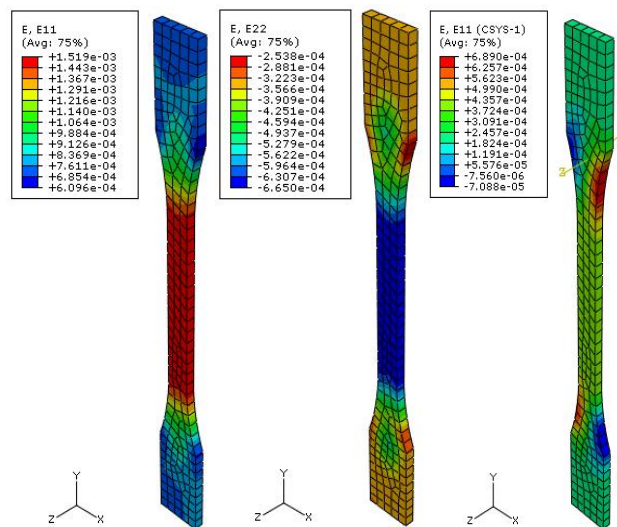


Figura 4.45 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45^\circ}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

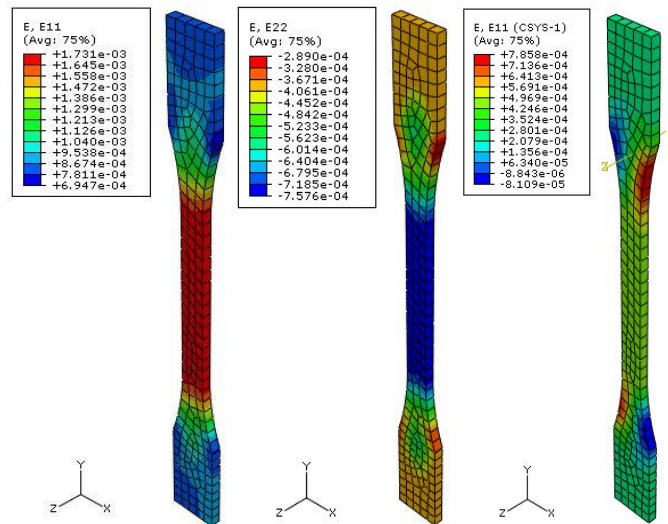


Figura 4.46 – Deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 4.10^6 s para a tensão de 6,8 MPa - Technyl A218 V35.

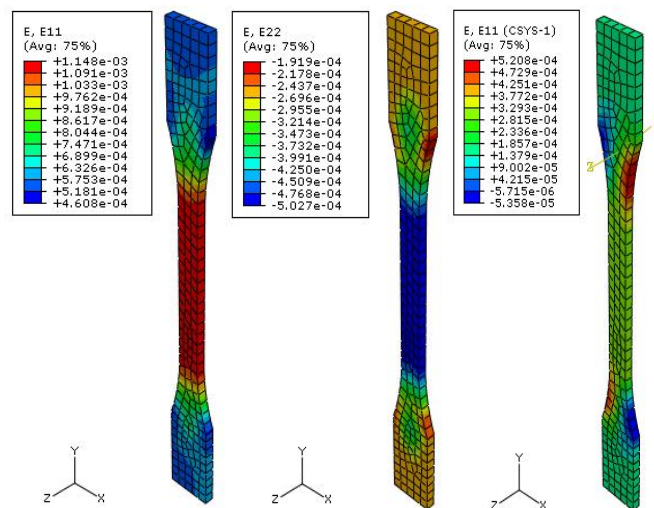


Figura 4.47 – Deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A218 V35.

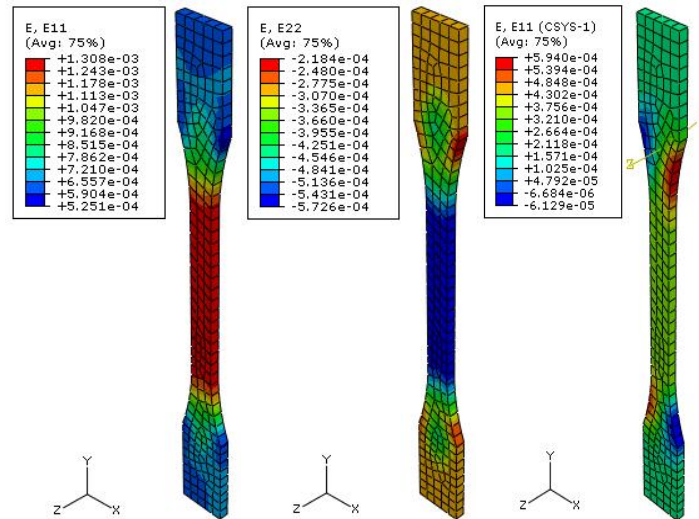


Figura 4.48 – Deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 4.10^6 s para a tensão de 9,6 MPa - Technyl A218 V35.

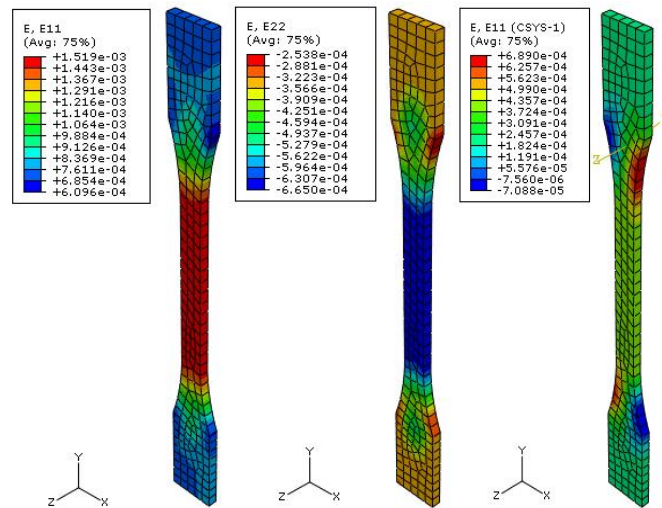


Figura 4.49 – Deformações $\epsilon_{11}(t)$, $\epsilon_{22}(t)$ e $\epsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 0,1s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A218 V35.

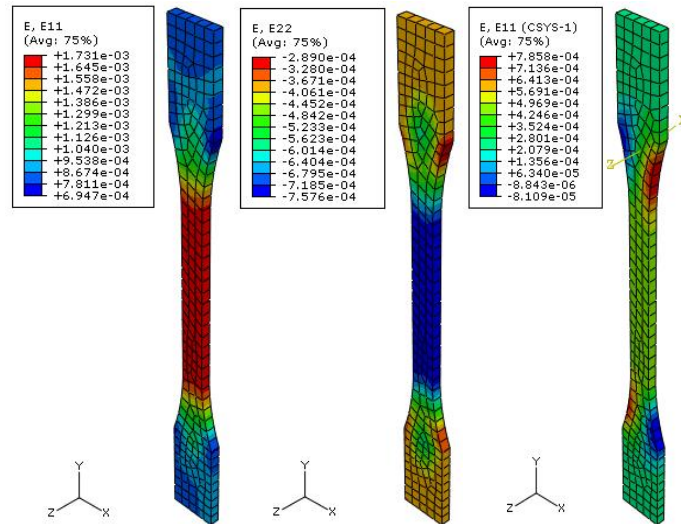


Figura 4.50 – Deformações $\varepsilon_{11}(t)$, $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{45}(t)$ no instante de tempo 4.10^6 s para a tensão de 12,7 MPa - Technyl A218 V35.

CAPÍTULO 5

Estudo de Caso - Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

5.1 – Apresentação do Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

O sincronismo entre o movimento das bielas, a abertura e o fechamento das válvulas de admissão de ar e de escape de gases, e a injeção do combustível na câmara de combustão de um motor automotivo é garantida em muitos dos motores atuais por um sistema de corrente.

Um sistema de corrente é composto por guias, rodas dentadas, corrente e tensionadores, conforme mostrado na Figura 5.1, tem a principal função de manter o sincronismo do eixo do virabrequim com o eixo de comando de válvulas. A qualidade do perfil dos dentes das rodas dentadas, da superfície das sapatas dos guias fixos e a precisão das tolerâncias de folga do tensionador, influenciam diretamente neste sincronismo e na vida útil do sistema, impactando diretamente na vida útil do motor.

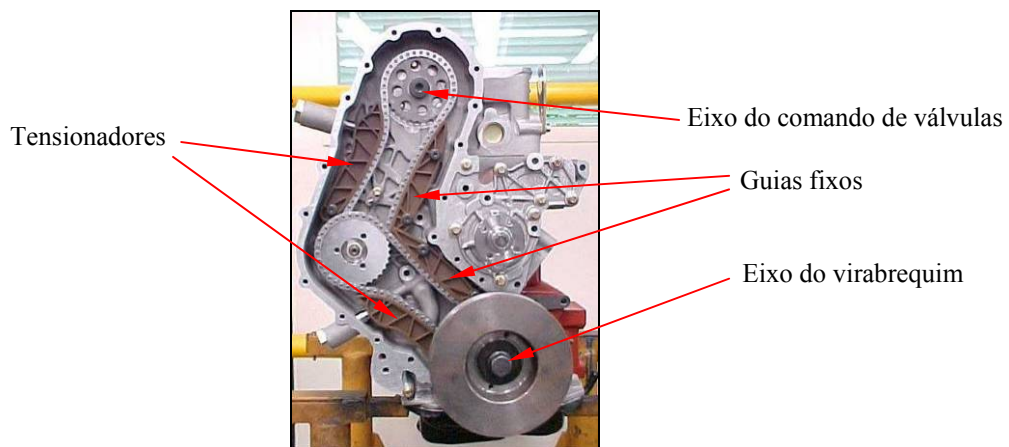


Figura 5.1 – Sistema de corrente para o sincronismo do comando de válvulas com o virabrequim.

As vantagens de um sistema de transmissão nesta concepção são:

- Vida útil longa,
- Sistema protegido do meio ambiente,
- Não requer vedação no eixo de comando de válvulas,
- Baixa necessidade de manutenção.

De forma a se atingir os objetivos fixados acima, a guia tensionadora, denominada de Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente, é fabricada de material composto, sendo a matriz polimérica em poliamida e o reforço em fibra de vidro, conforme apresentado nas Figuras 5.2 e 5.3. Esta concepção, conforme relatado anteriormente dificulta a modelagem de peças como a guia tensionadora para a sua análise estrutural devido ao desconhecimento do comportamento mecânico deste tipo de material. Isso acarreta em resultados menos confiáveis quanto ao estado de tensão e deformação na peça, bem como implica na falta de um critério de avaliação de resistência, dano e funcionalidade do componente.

Modelos estruturais que empregam o método dos elementos finitos para cálculos cinemáticos e dinâmicos contribuem significativamente para a redução do custo do desenvolvimento de um novo produto ainda na etapa de projeto preliminar, reduzindo reprojets e eliminando processos empíricos de tentativa e erro. Porém, testes laboratoriais e veiculares são mesmo assim necessários, e frequentemente intensos, de maneira a garantir os requisitos de funcionalidade e os critérios de durabilidade e confiabilidade exigidos pelas montadoras.

Além das cargas estáticas e dinâmicas atuantes nessas peças, dependendo da sua aplicação e do ambiente de operação, poderão surgir oscilações térmicas, umidade e contaminação, que são fatores que precisam ser considerados no seu dimensionamento. Além disso, o efeito da fluência do material polimérico pode alterar a precisão das tolerâncias de folga do tensionador, visto que as deformações podem evoluir no tempo.

Neste contexto, o componente denominado de Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente será usado como estudo de caso para aplicar a metodologia colocada nos objetivos deste trabalho de dissertação de mestrado.

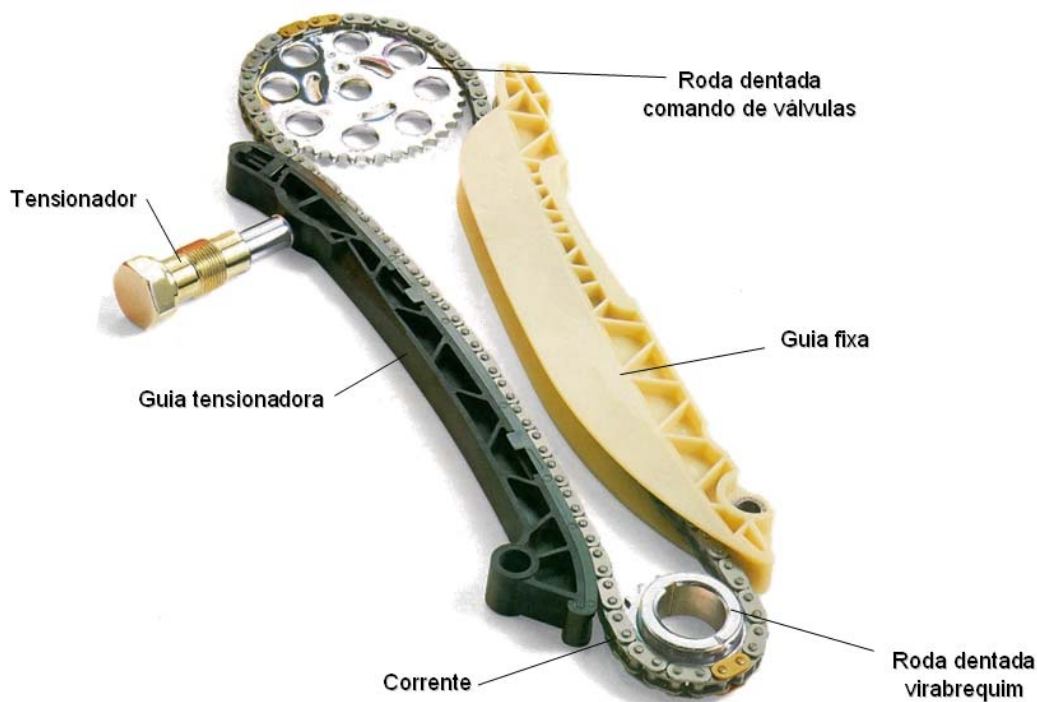


Figura 5.2 – Componentes do sistema de transmissão de um automóvel.



Figura 5.3 – Guia Tensionadora de Corrente do Sistema de Transmissão.

5.2 – Processo de Injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

Peças em material polimérico são frequentemente fabricadas pelo processo de injeção por meio de um equipamento denominado de máquina injetora. Para fins de ilustração deste processo, a Figura 5.4 apresenta alguns de seus componentes básicos:

1. A máquina injetora é alimentada continuamente por grãos de material polimérico que envolvem a fibra curta (*Hopper*);
2. Na sequência, um fuso (*Reciprocating Screw*) pressiona os grãos para dentro da cavidade do molde (*Mold Cavity*), passando antes por um conjunto de resistências (*Heater*) que tem a função de elevar a temperatura do material, facilitando o escoamento da material dentro da cavidade do molde;
3. Um molde (*Mold*) aquecido, acoplado à um dispositivo móvel, aguarda o preenchimento de toda a sua cavidade, para finalmente retrain e expulsar a peça, se reposicionando em seguida para produzir uma nova peça;

Frequentemente, antes da matéria-prima ser inserida no reservatório da máquina injetora (*Hopper*), ela passa por um processo de secagem que tem por objetivo eliminar ou reduzir a sua umidade, evitando com isso a formação de bolhas dentro da peça que podem fragilizá-la mecanicamente.

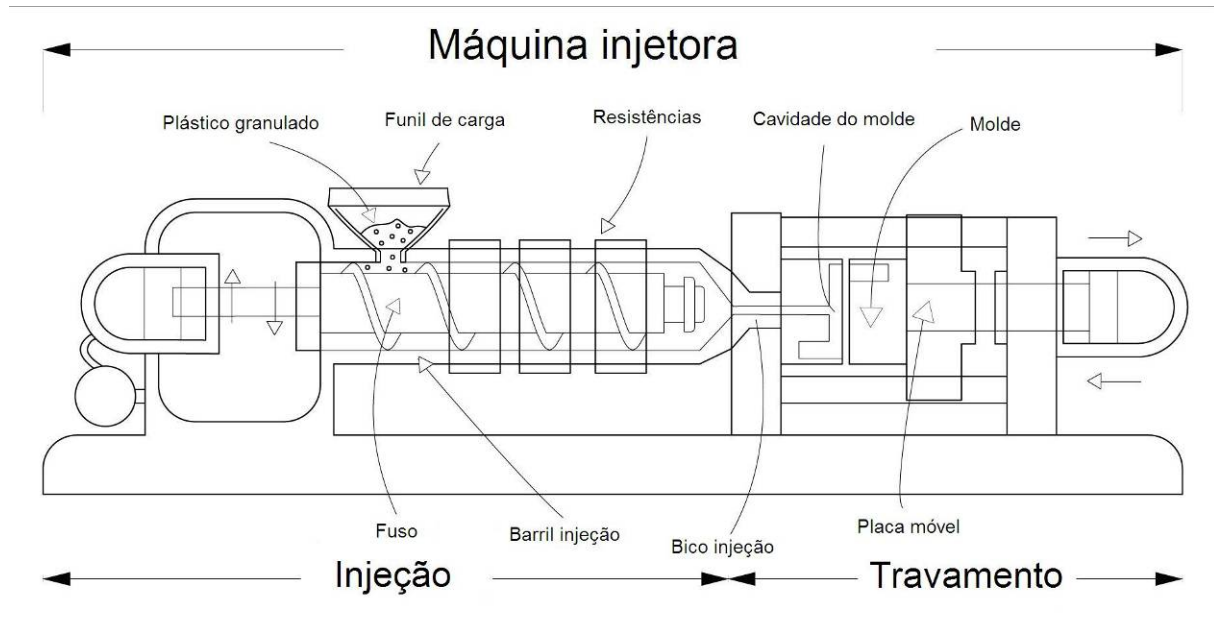


Figura 5.4 – Processo de injeção de peça em material polimérico (fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding#Equipment)

5.2.1 – Características do Processo de Injeção

Na fabricação de peças fazendo uso de uma máquina injetora, alguns parâmetros devem ser ajustados na mesma. Estes parâmetros estão associados com as propriedades da matéria-prima, forma geométrica da peça, produtividade, etc. No caso da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente, os parâmetros de injeção são:

- molde com 2 cavidades;
- aprox. 250 peças/hora;
- tempo de injeção = 1,25 segundos;
- pressão de injeção = 750 bar;
- tempo recalque = 8,5 segundos;
- pressão recalque = 850 bar;
- tempo de resfriamento = 15 segundos;
- temperatura de injeção do material = 285° C;
- temperatura do molde = 80° C.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam imagens obtidas por microscopia eletrônica da seção transversal da Guia em dois cortes realizados. É possível observar a partir das imagens colocadas nas Figuras 5.5(d) e 5.6(c) a seção transversal circular das fibras em maior proporção, indicando claramente que a direção 1 do sistema de eixos de ortotropia é normal a imagem, com exceção da região mais próxima da superfície livre. Nesta região, a orientação das fibras é aleatória, provavelmente em razão da turbulência no escoamento do material injetado gerado pelo cisalhamento dele com a superfície interna do molde. Este efeito deve ter ocorrido pela grande diferença de temperatura entre o material injetado e o molde, fato que pode levar a um grau de rugosidade elevado na superfície externa da peça injetada, gerando desta maneira um ambiente propício ao início de trinca.

No Apêndice B são apresentadas imagens de outras regiões da seção transversal em todos os cortes realizados.

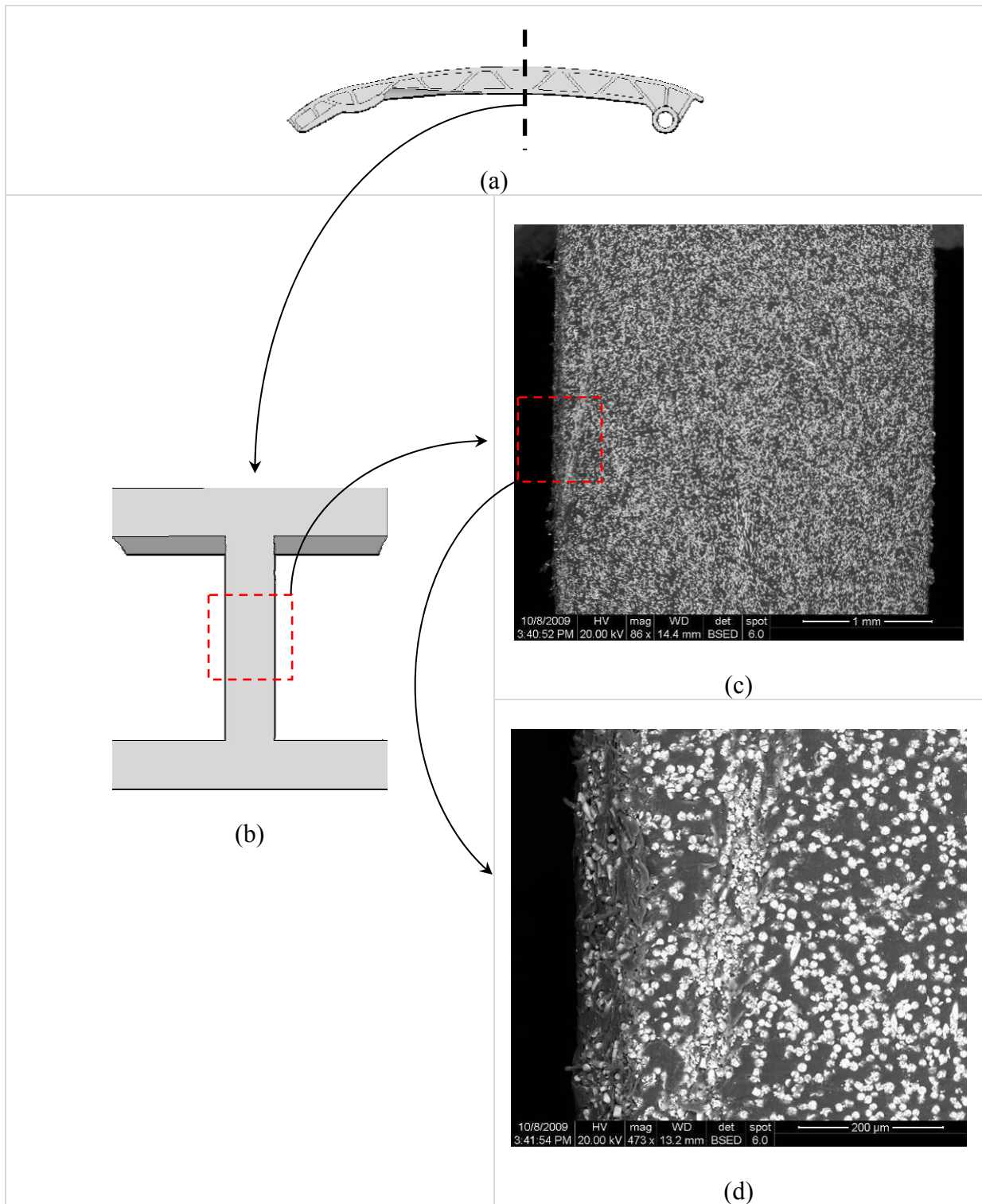


Figura 5.5 – Orientação das fibras: a) posição do corte 1 na Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) zoom de 86 vezes da região indicada e d) zoom de 473 vezes da região indicada.

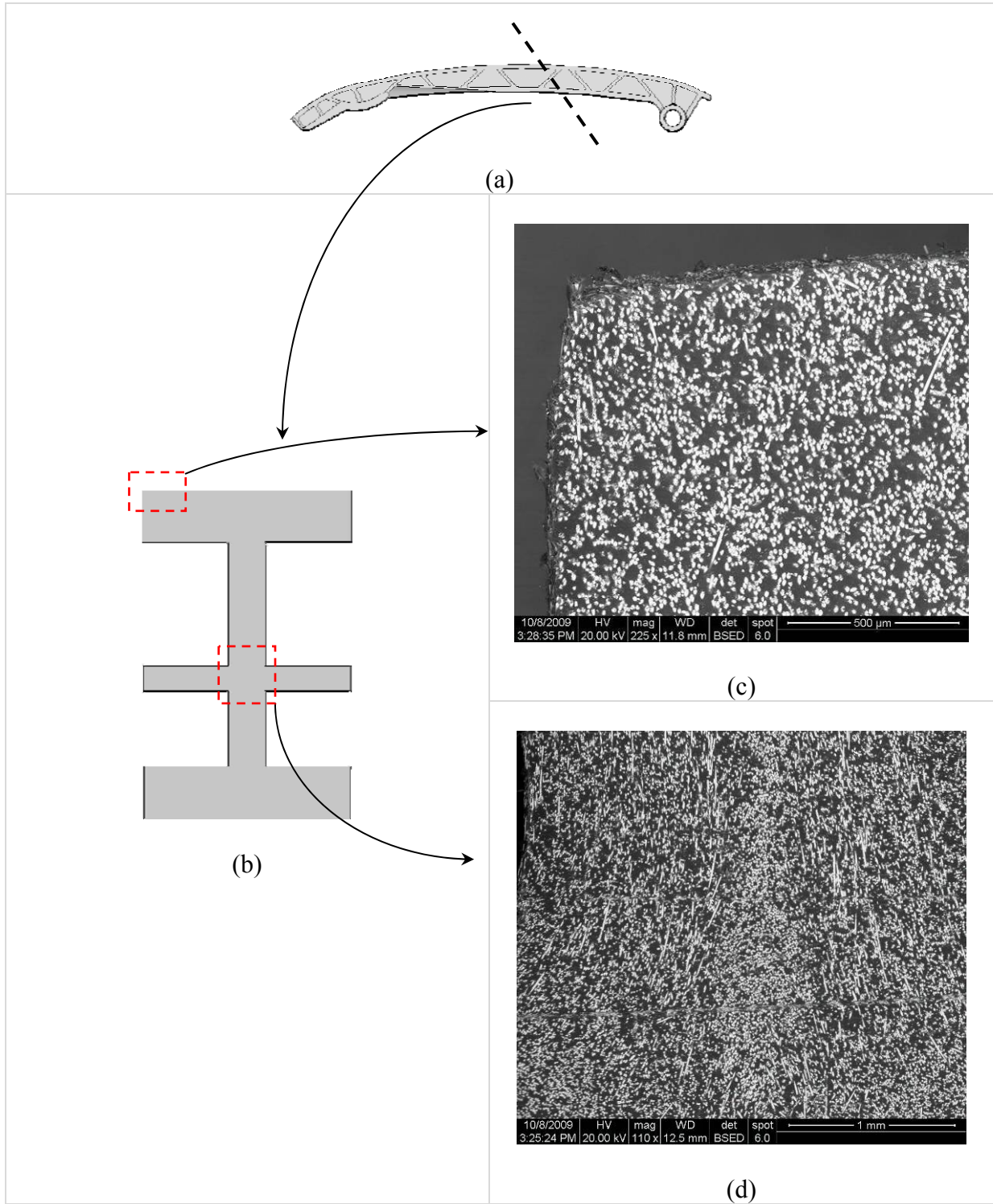


Figura 5.6 – Orientação das fibras: a) posição do corte 2 na Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) zoom de 225 vezes da região indicada e d) zoom de 110 vezes da região indicada.

5.2.2 – Modelo para a Simulação da Injeção

Para simular o processo de injeção na Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente é utilizado o software Moldflow[®]. O modelo da guia é primeiramente importado de um software de modelamento geométrico 3D para o software de simulação de injeção Moldflow[®]. Deve-se em seguida gerar uma malha elementos finitos 3D, conforme apresentado Figura 5.7, ressaltando que quanto mais refinada a malha estiver, melhores serão os resultados, principalmente nas regiões com grandes alterações geométricas. Na interface do Moldflow[®] seleciona-se o material da peça através de uma biblioteca que o próprio fabricante do material fornece e faz-se a escolha dos parâmetros utilizados no processo de injeção como: temperatura do molde, temperatura de injeção e pressão de injeção da matéria-prima, entre outros. Finalmente, define-se o ponto de injeção, como mostra a Figura 5.7, para em seguida executar a simulação do processo de injeção da peça. Como resultados da simulação de um processo de injeção, têm-se entre outros, as tensões residuais, orientações das fibras e as propriedades do material da peça injetada.

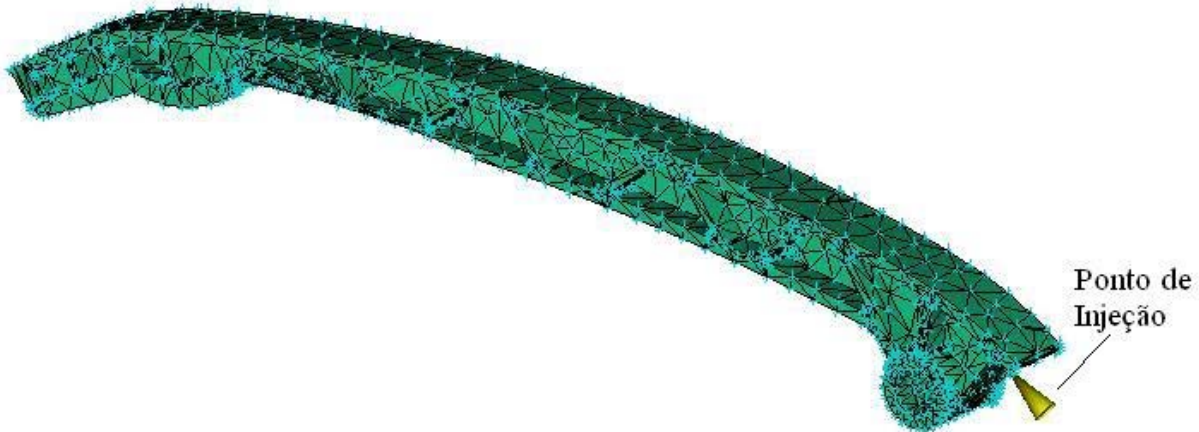


Figura 5.7 – Modelo para simulação da injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam a distribuição das tensões residuais no sistema de eixos de ortotropia (σ_{11} , σ_{22} e σ_{33}) obtidas em Pa, e a Figura 5.11 ilustra a orientação das fibras para os seguintes parâmetros:

- Matéria-prima = Technyl A118 V50
- Temperatura da superfície do molde = 80°C
- Temperatura de fusão = 290°C
- Temperatura de injeção = 210°C
- Tempo de abertura do molde = 5 s
- Tempo de resfriamento = 20 s
- Máxima pressão de injeção da máquina = 180 MPa

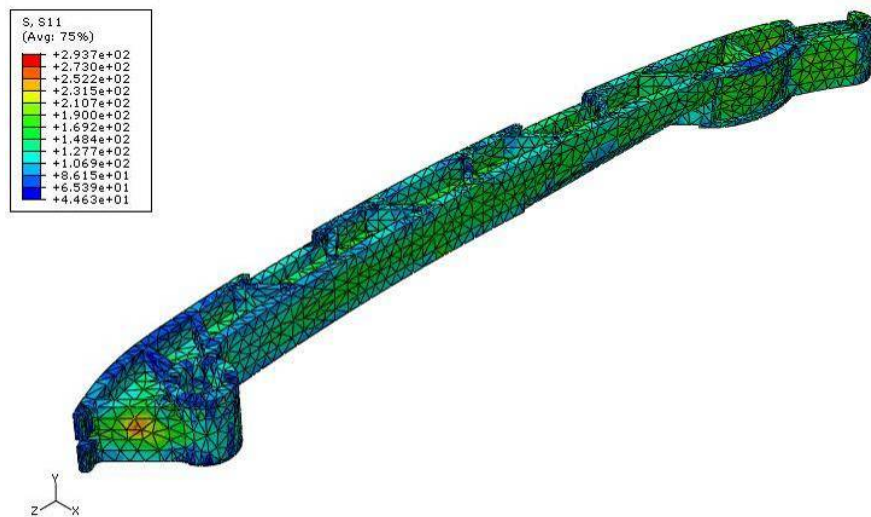


Figura 5.8 – Distribuição das tensões residuais σ_{11} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

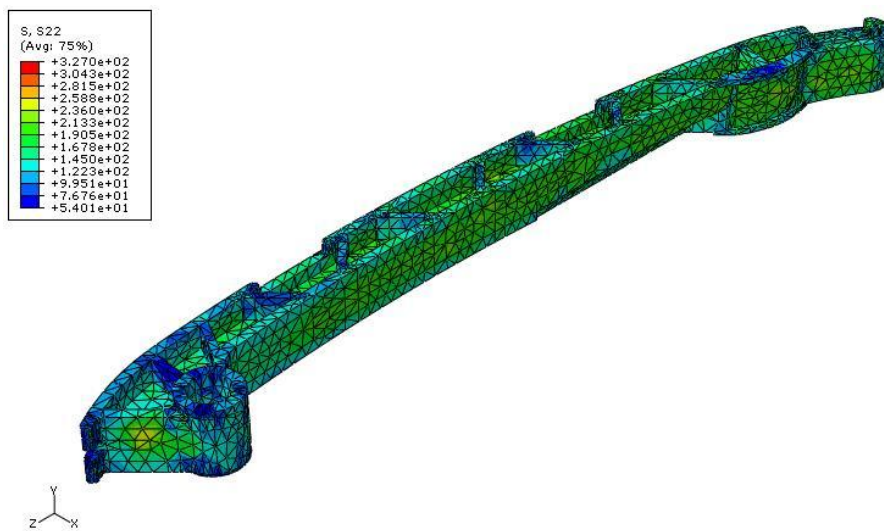


Figura 5.9 – Distribuição das tensões residuais σ_{22} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

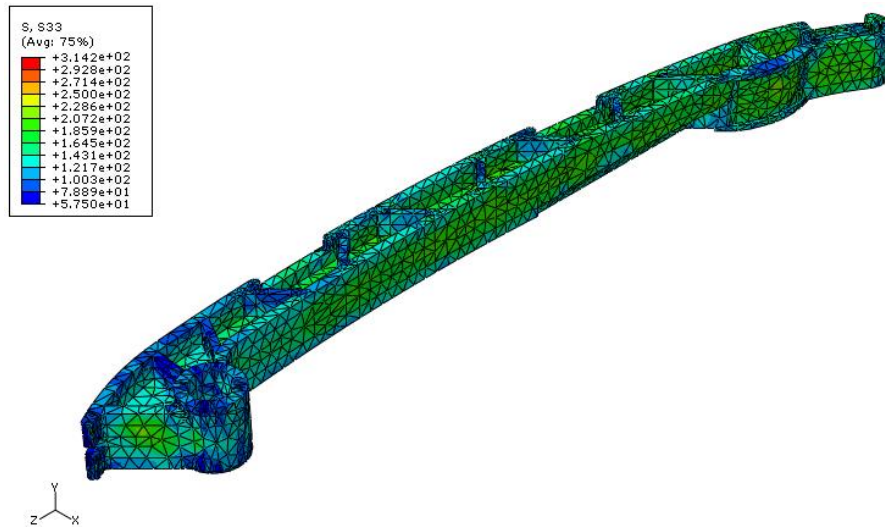


Figura 5.10 – Distribuição das tensões residuais σ_{33} oriundas do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

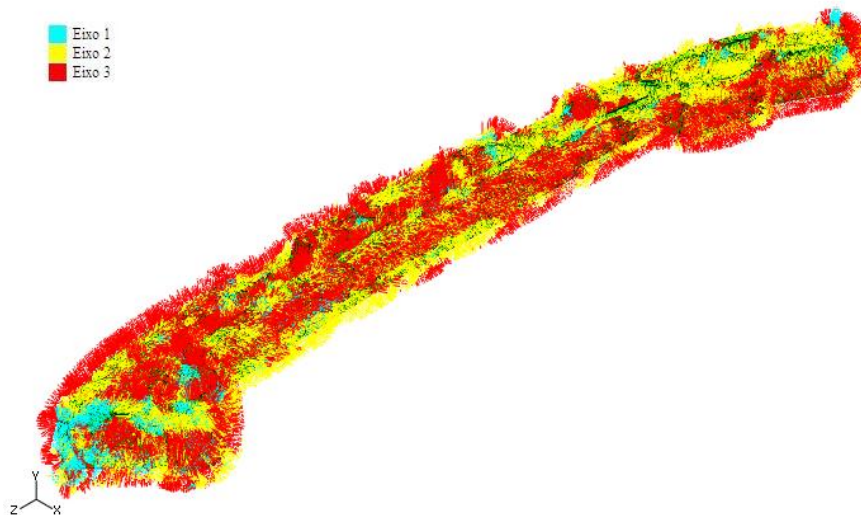


Figura 5.11 – Orientação das fibras ao final do processo de injeção da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

Pode ser observado na Figura 5.11 que os eixos normais à superfície livre da Guia são na sua maioria os eixos 2 (amarelo) e 3 (vermelho), o que demonstra que o eixo 1 (azul) paralelo às fibras é também paralelo ao eixo longitudinal da peça.

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam a orientação das fibras nestas mesmas regiões onde foram feitos os cortes 1 e 2, mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6, obtidas agora a partir do modelo de simulação do processo de injeção.

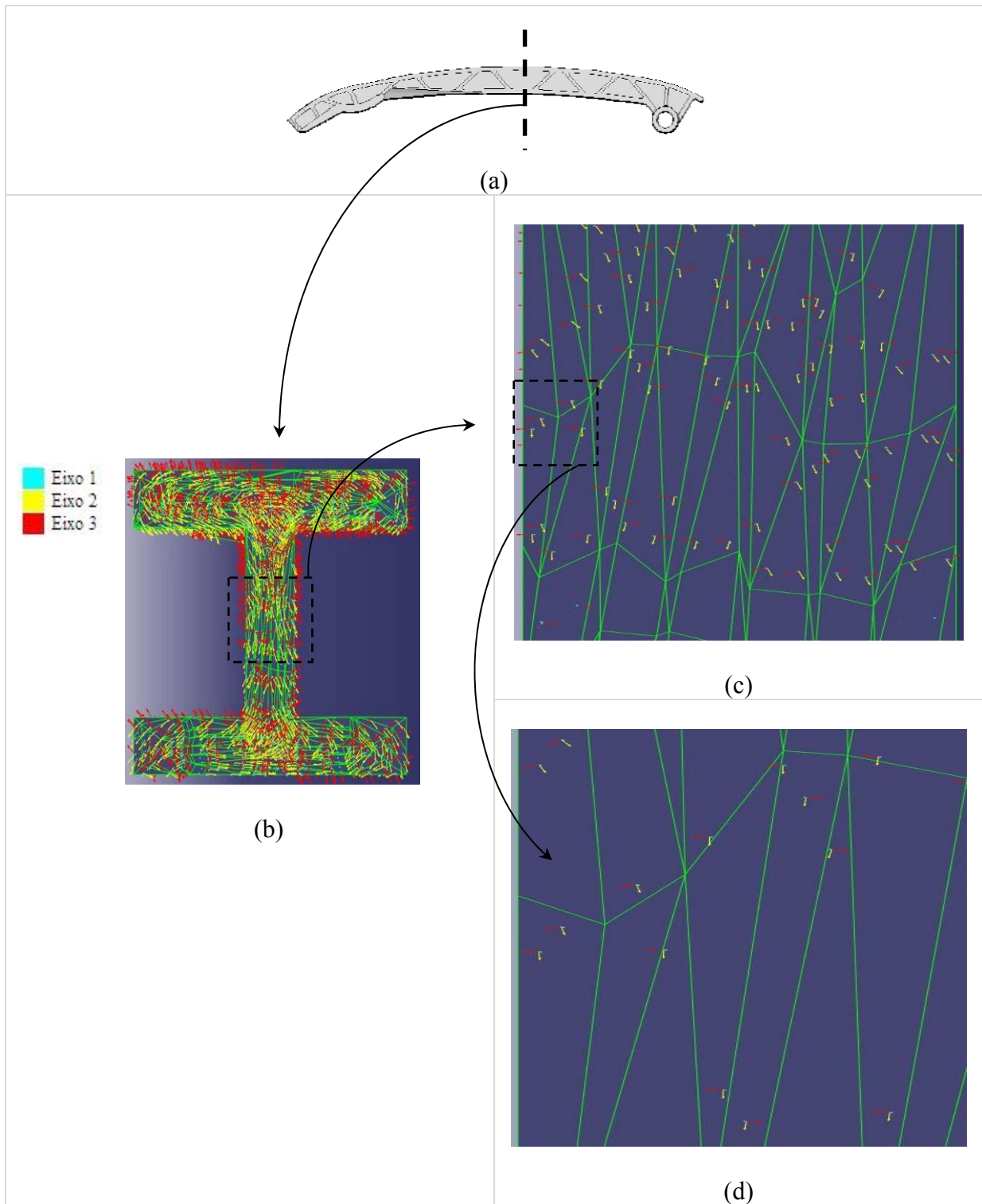


Figura 5.12 – Orientação das fibras: a) posição do corte 1 no Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) detalhe ampliado da região indicada e d) detalhe ampliado da região indicada.

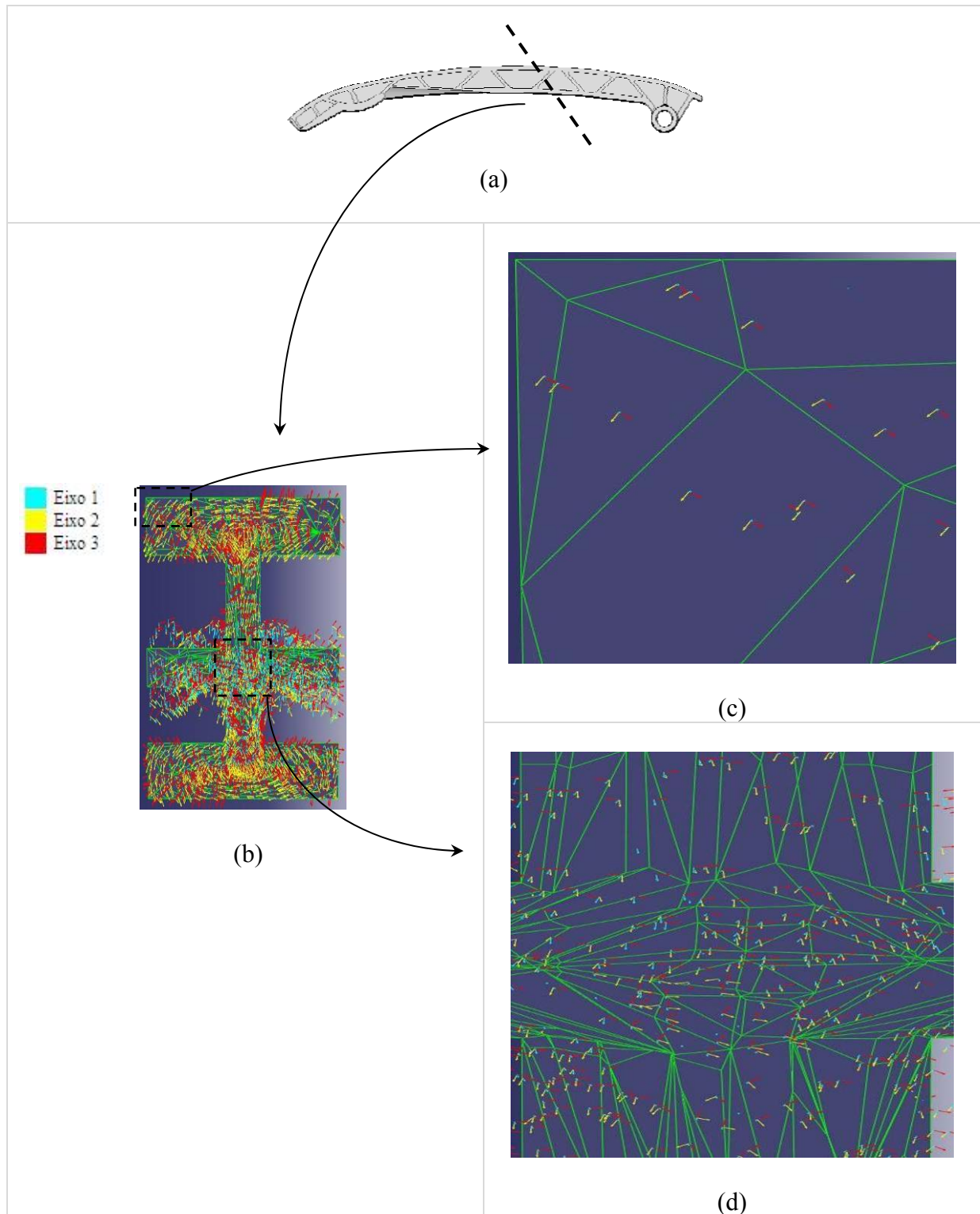


Figura 5.13 – Orientação das fibras: a) posição do corte 2 no Guia, b) seção transversal da Guia na posição do corte, c) detalhe ampliado da região indicada e d) detalhe ampliado da região indicada.

Assim como pôde ser observado na Figura 5.11, nas Figuras 5.12 e 5.13 observa-se também que os eixos de maior comprimento são na sua maioria os eixos 2 (amarelo) e 3 (vermelho), o

que demonstra que o eixo 1 (azul) paralelo às fibras é na sua maioria normal à seção transversal na posição dos cortes.

Neste presente trabalho, o único resultado a ser utilizado na análise estrutural posterior feita no software Abaqus® é a orientação das fibras nos pontos de integração numérica de cada elemento da malha elementos finitos. As tensões residuais serão utilizadas em um trabalho posterior e as propriedades do material da peça injetada não serão utilizadas, já que foram feitos ensaios mecânicos para a identificação das mesmas, conforme apresentado no Capítulo 4.

5.3 – Ensaio Mecânico no Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

De maneira a avaliar o comportamento viscoelástico da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente, foi feito um ensaio mecânico na mesma, conforme relatado nas seções seguintes. O ensaio foi realizado pelo Grupo Schaeffler e tentou-se reproduzir as solicitações e condições da Guia em serviço. A Guia empregada neste ensaio foi produzida em Technyl A118 V50.

5.3.1 – Caracterização do Ensaio Mecânico

De acordo com o ilustrado na Figura 5.2, a Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente é articulada em uma extremidade e na extremidade oposta é aplicada uma carga pelo tensionador. O contato entre a Guia e a corrente produz uma pressão reativa que conduz, ao longo de um certo tempo, a uma folga entre a Guia e a corrente devido ao efeito viscoelástico do material da Guia. De maneira a observar este comportamento realizou-se um ensaio mecânico com a Guia conforme apresentado na Figura 5.14.

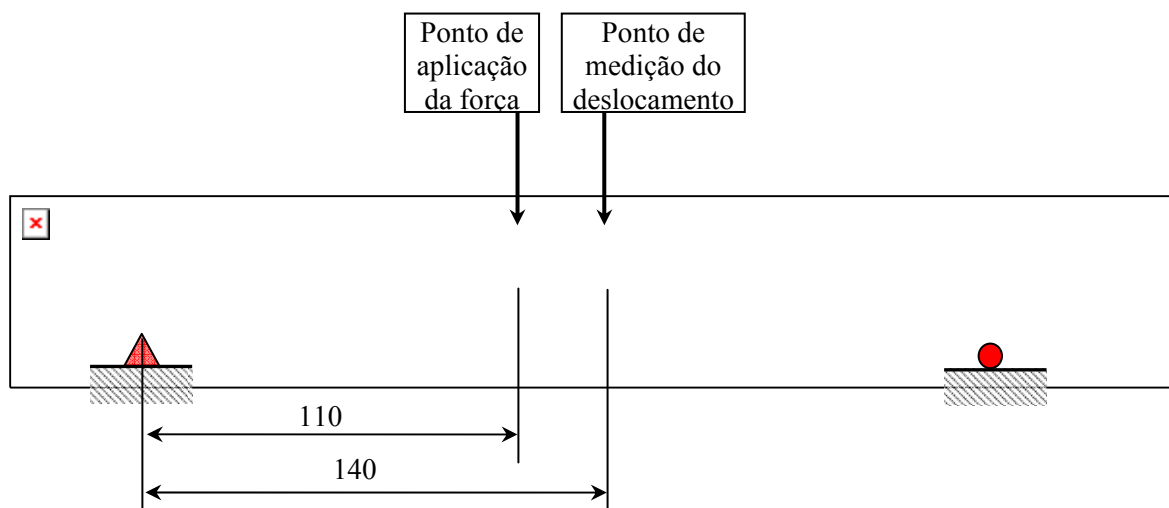


Figura 5.14 – Configuração do ensaio mecânico na Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

Uma força média de 221 N foi aplicada por um cilindro hidráulico, mantida constante por pouco mais de 6 horas. O deslocamento do ponto A situado na parte superior da Guia foi medido por um dispositivo do tipo LVDT e deformações foram medidas com extensômetros na parte inferior em três direções: direção 1 no plano de flexão da Guia, direção 2 ortogonal ao plano de flexão da Guia, e direção 3 a 45° das direções 1 e 2. A Figura 5.15 apresenta a posição de instalação desses extensômetros. As cotas apresentadas nas Figuras 5.14 e 5.15 estão em milímetros.

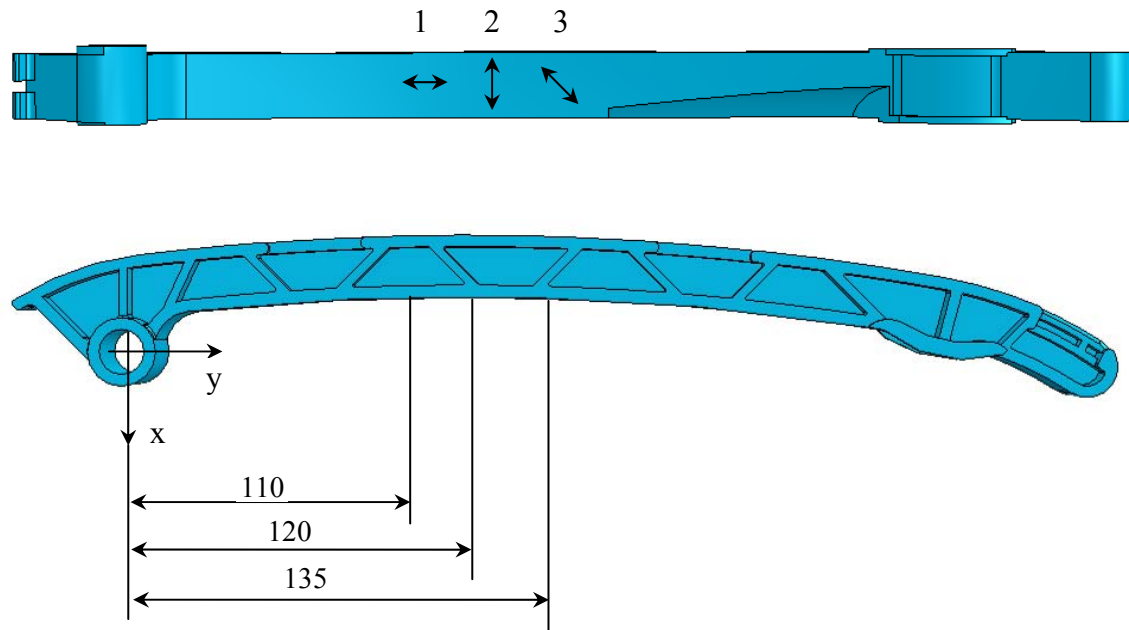


Figura 5.15 – Posição dos extensômetros para a medição das deformações.

5.3.2 – Avaliação dos Resultados do Ensaio Mecânico

A Figura 5.16 apresenta a evolução das deformações no tempo nos pontos indicados na Figura 5.15, sendo a curva superior a deformação $\varepsilon_1(t)$, a curva inferior a deformação $\varepsilon_2(t)$ e a curva intermediária a deformação $\varepsilon_3(t)$. Observa-se também na Figura 5.16 que, em razão da carga ter sido aplicada por um cilindro hidráulico, houve uma flutuação da mesma, sendo seu valor médio 221 N. Pode-se observar também na Figura 5.16, que o aumento de temperatura foi de aproximadamente 2° C, valor recomendado para a realização de ensaios de fluência em corpos de prova Tipo I de amostras de material.

A Figura 5.17 apresenta a evolução do deslocamento do ponto A medido na parte superior da Guia.

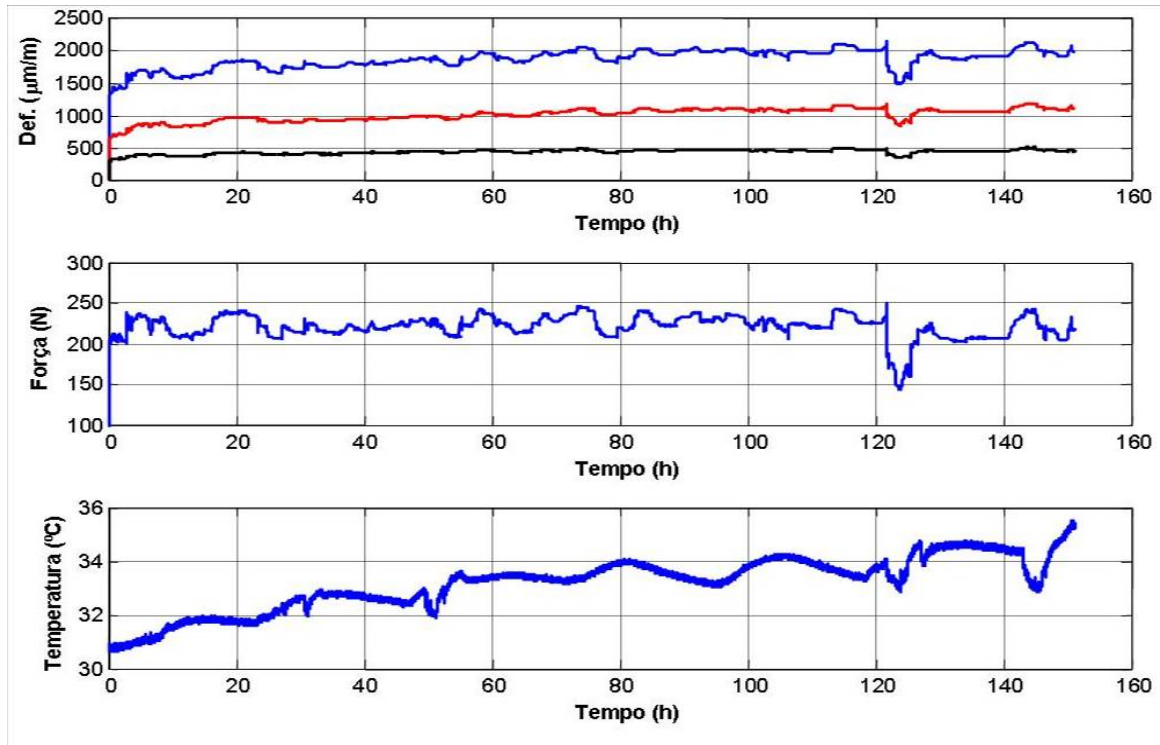


Figura 5.16 – Resultados do ensaio de fluência na Guia.

Deslocamento Ponto A

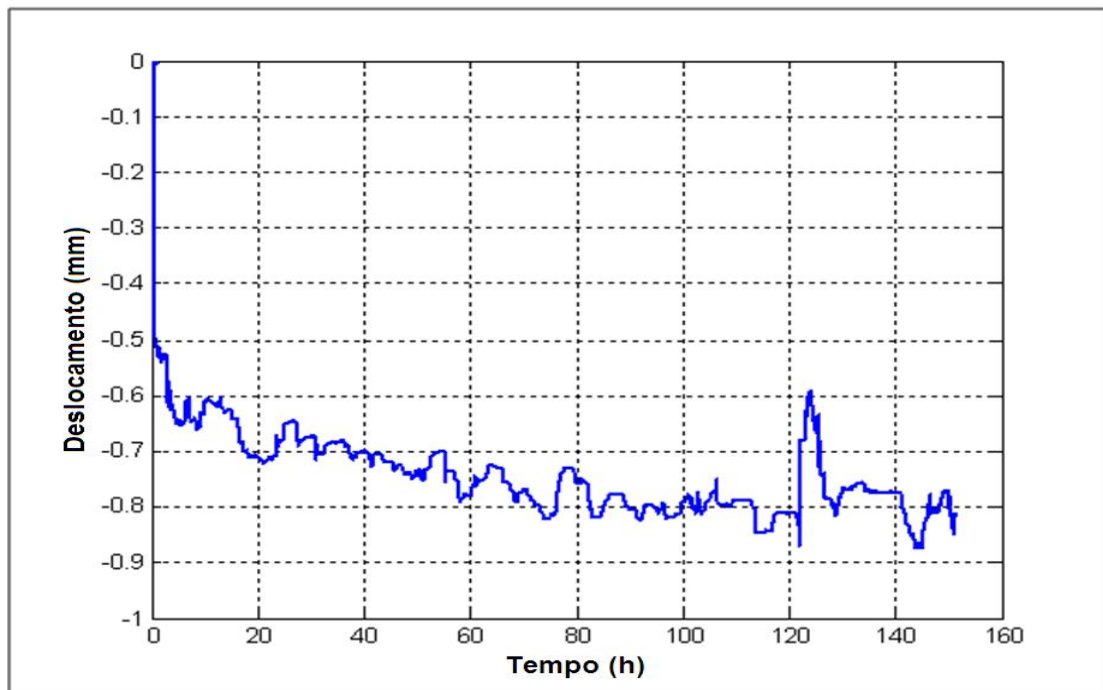


Figura 5.17 – Evolução do deslocamento do ponto A.

No Apêndice C é apresentado de maneira mais detalhada todos os procedimentos feitos para a realização do ensaio de fluência da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de

Válvulas por Corrente, assim como os resultados das deformações $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ e $\varepsilon_3(t)$, apresentados em outra escala.

5.4 – Simulação Numérica do Ensaio Mecânico na Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo de viscoelasticidade ortotrópica proposto no presente trabalho, será feita a simulação numérica do Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente nas mesmas condições de ensaio colocadas na Seção 5.3. Em um primeiro momento, no modelo da Guia serão inseridas as propriedades do Technyl A118 V50 e comparados seus resultados com o ensaio mecânico, em seguida serão inseridas as propriedades do Technyl A218 V35.

Conforme mencionado anteriormente, a simulação numérica do comportamento mecânico da Guia será feita no software Abaqus[®]. O objetivo inicialmente era importar a orientação das fibras obtidas a partir da simulação do processo de injeção realizada no Moldlow[®], conforme apresentado na Figura 5.10. No entanto, encontrou-se dificuldades na execução deste modelo no Abaqus[®] em razão do fato de ser necessária a leitura de dois arquivos externos, uma com a orientação das fibras, e outra com a subrotina do modelo de viscoelasticidade ortotrópica proposto. Este problema foi contornado criando um sistema de eixos de ortotropia no Abaqus[®] que representasse aproximadamente a orientação das fibras a partir da simulação de injeção pelo Moldlow[®] e das observações feitas por microscopia eletrônica apresentadas nas Figuras 5.11 a 5.13. A Figura 5.18 ilustra a orientação das fibras geradas no Abaqus[®].

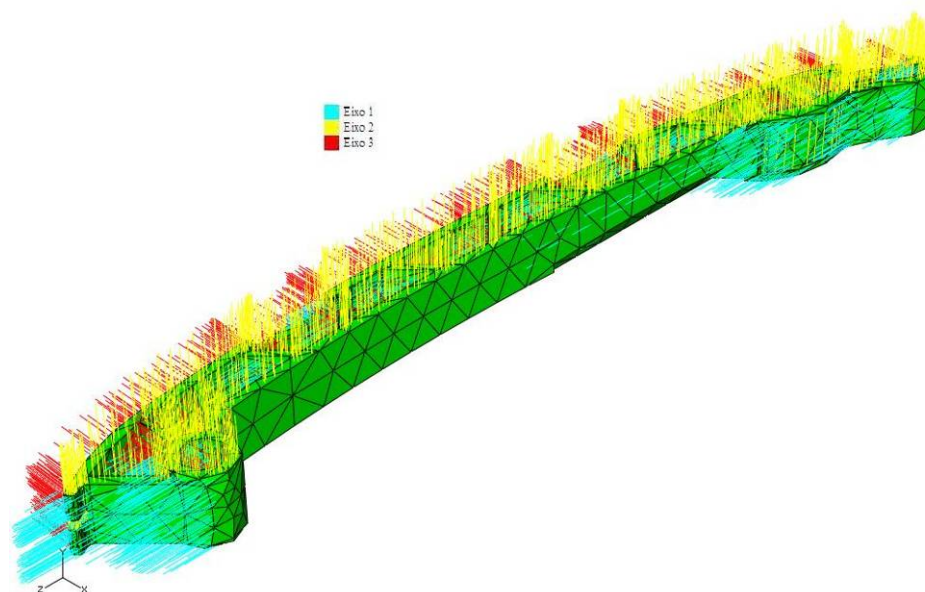


Figura 5.18 – Modelo da Guia com a orientação das fibras alinhadas ao eixo longitudinal.

A Figura 5.19 apresenta o modelo da Guia sobre o qual são aplicadas as condições de contorno e a carga aplicada. De maneira a representar as mesmas condições do ensaio

mecânico realizado na Guia, foram aplicadas restrições de deslocamento nas três direções no furo e a restrição de deslocamento vertical na outra extremidade. A carga aplicada foi 221 N.

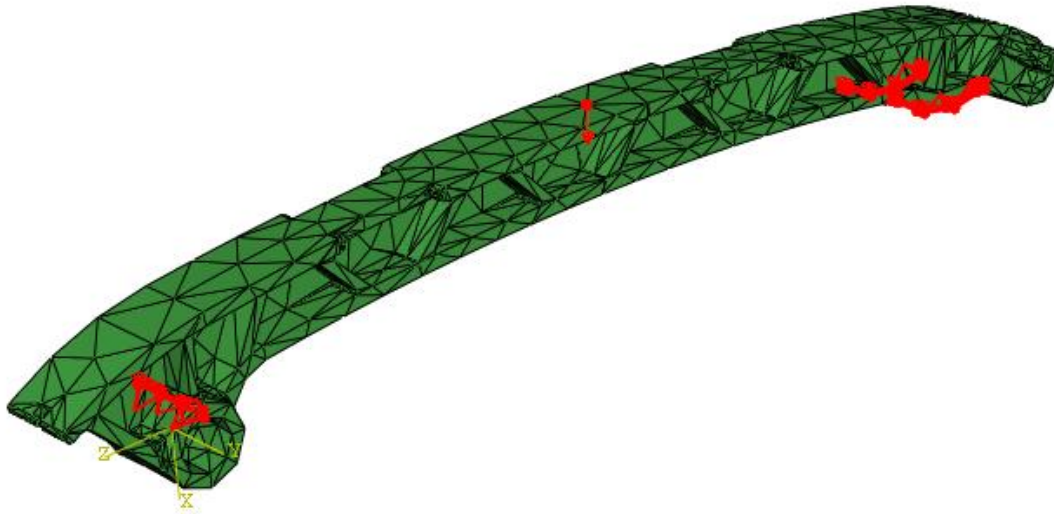


Figura 5.19 – Modelo da Guia com a carga e as restrições aplicadas.

5.4.1 – Simulação na Guia com o Technyl A118 V50

Aplicando no modelo da Guia as propriedades do Technyl A118 V50 apresentadas na Tabela 5.1, onde $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0,9$ na eq. (4.12), obtem-se a evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45°, conforme mostra a Figura 5.20.

Tabela 5.1 – Constantes elásticas do material Technyl A118 V50 para simulação da Guia.

	Direção 1	Direção 2
λ (MPa)	18,027	5,031
μ (MPa)	1,107	1,143
$\bar{\lambda}$ (MPa)	18,027	5,031
$\bar{\mu}$ (MPa)	1,107	1,143
$\bar{\nu}$	0,7	0,7

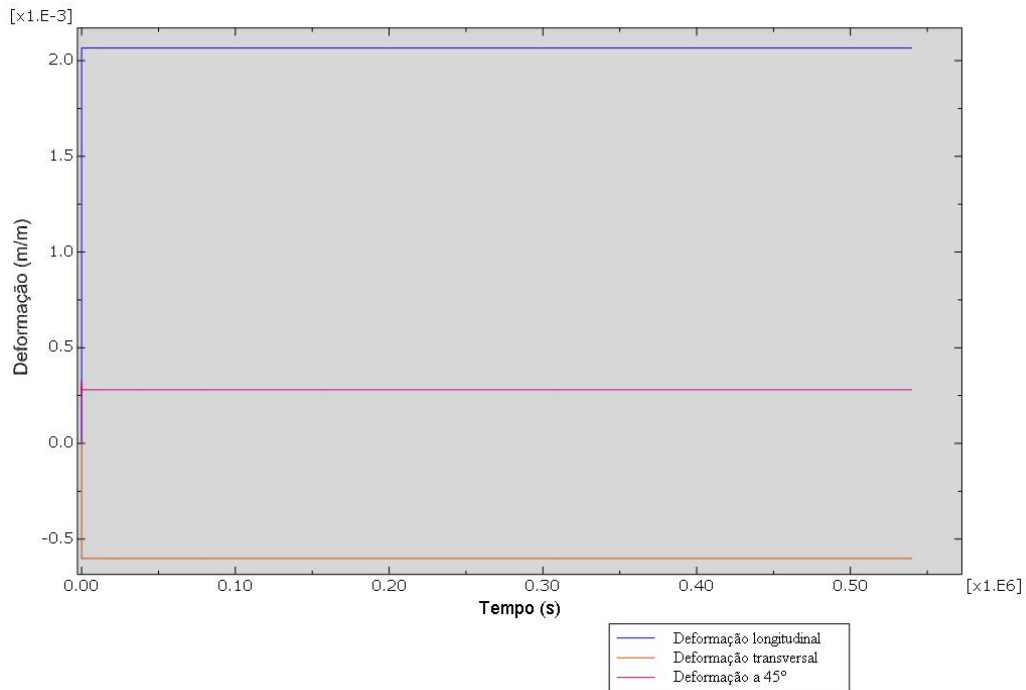


Figura 5.20 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° obtidas com o modelo numérico - Technyl A118 V50.

A deformação elástica instantânea é identificada traçando as curvas de fluência nos instantes iniciais, conforme mostra a Figura 5.21.

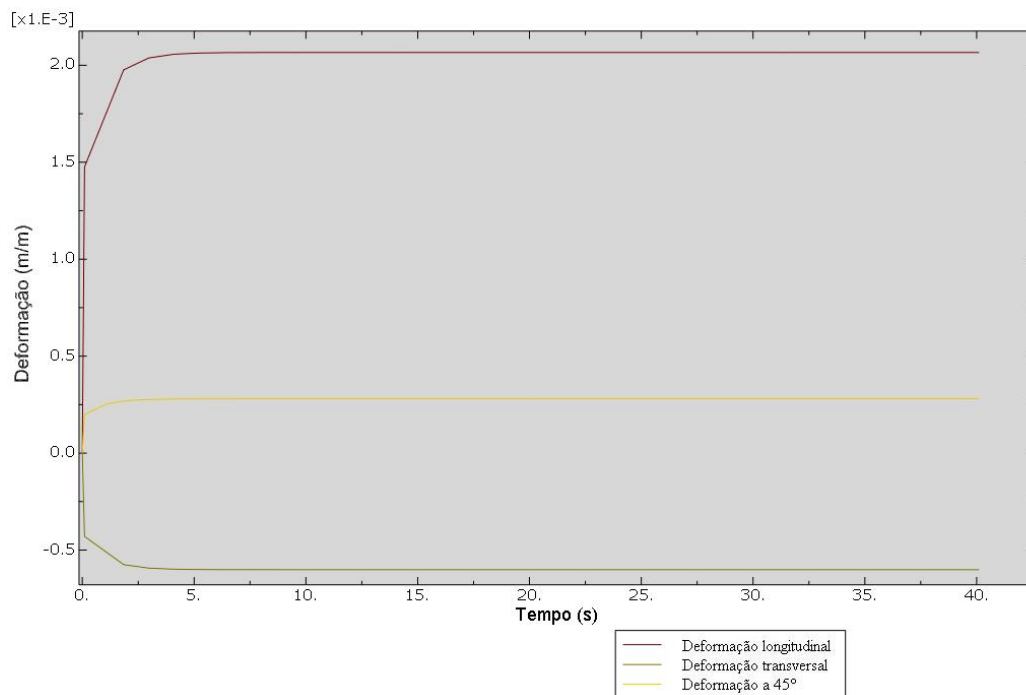


Figura 5.21 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° nos instantes iniciais - Technyl A118 V50.

A Figura 5.22 apresenta a evolução do deslocamento do ponto situado a 140 mm e a Figura 5.23 mostra o deslocamento instantâneo neste mesmo ponto.

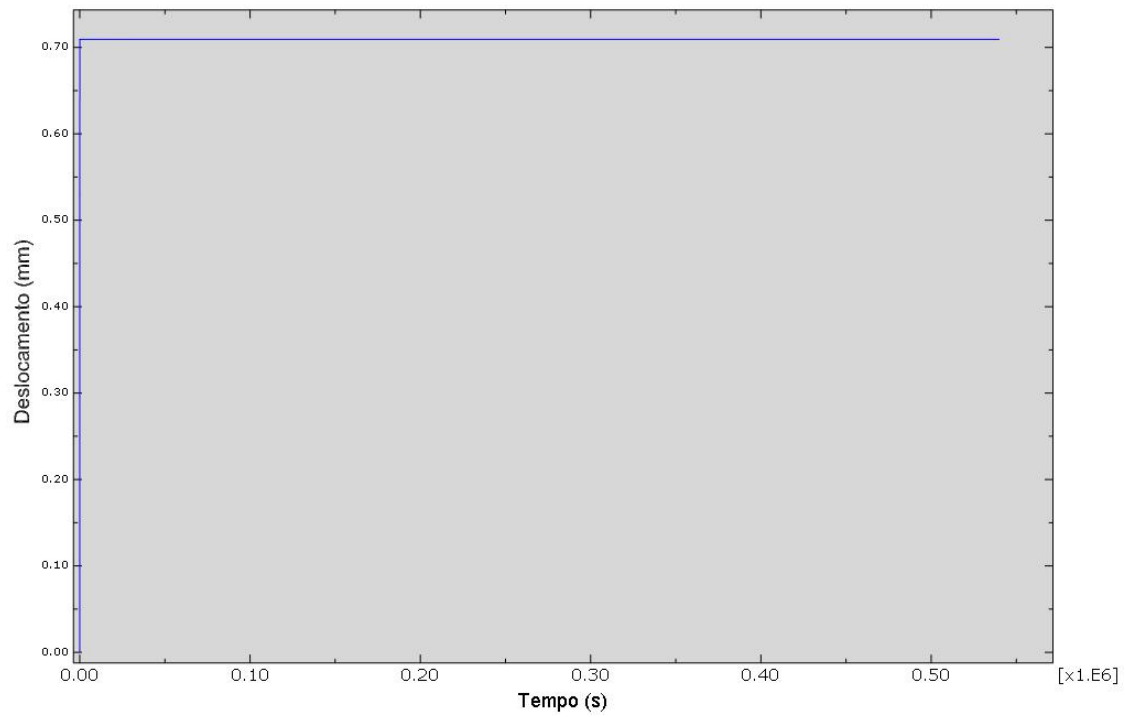


Figura 5.22 – Evolução do deslocamento do ponto A - Technyl A118 V50.

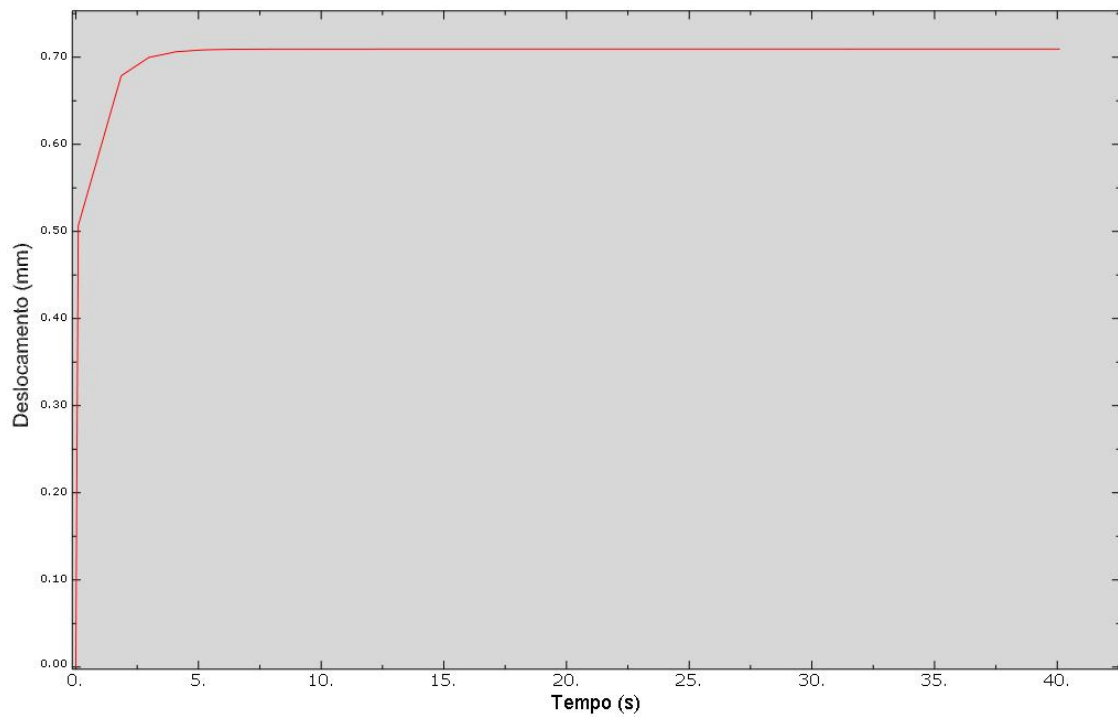


Figura 5.23 – Evolução do deslocamento instantâneo do ponto A - Technyl A118 V50.

A Tabela 5.2 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com o modelo proposto e o ensaio de fluência realizado na Guia.

Tabela 5.2 – Comparação dos resultados obtidos com o modelo numérico com os resultados do ensaio mecânico.

	Ensaio mecânico	Modelo numérico	Erro (%)
Deformação longitudinal instantânea ε_1	1,475	1,475	0
Deformação transversal instantânea ε_2	-0,7	-0,43	38
Deformação a 45° instantânea ε_3	0,3	0,2	33,3
Deslocamento instantâneo Δ_A	0,5	0,5	0
Deformação longitudinal ao final da fluência ε_1	2,05	2,05	0
Deformação transversal ao final da fluência ε_2	-1,02	-0,6	41
Deformação a 45° ao final da fluência ε_3	0,4	0,28	30
Deslocamento ao final da fluência Δ_A	0,78	0,71	8,9

5.4.2 – Simulação na Guia com o Technyl A218 V35

Aplicando no modelo da Guia as propriedades do Technyl A218 V35 apresentadas na Tabela 5.3, onde $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1$ na eq. (4.13), obtém-se a evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45°, conforme mostra a Figura 5.24.

Tabela 5.3 – Constantes elásticas do material Technyl A118 V35 para simulação da Guia.

	Direção 1	Direção 2
λ (MPa)	14,86	4,35
μ (MPa)	0,97	0,97
$\bar{\lambda}$ (MPa)	14,86	4,35
$\bar{\mu}$ (MPa)	0,97	0,97
$\bar{\nu}$	0,7	0,7

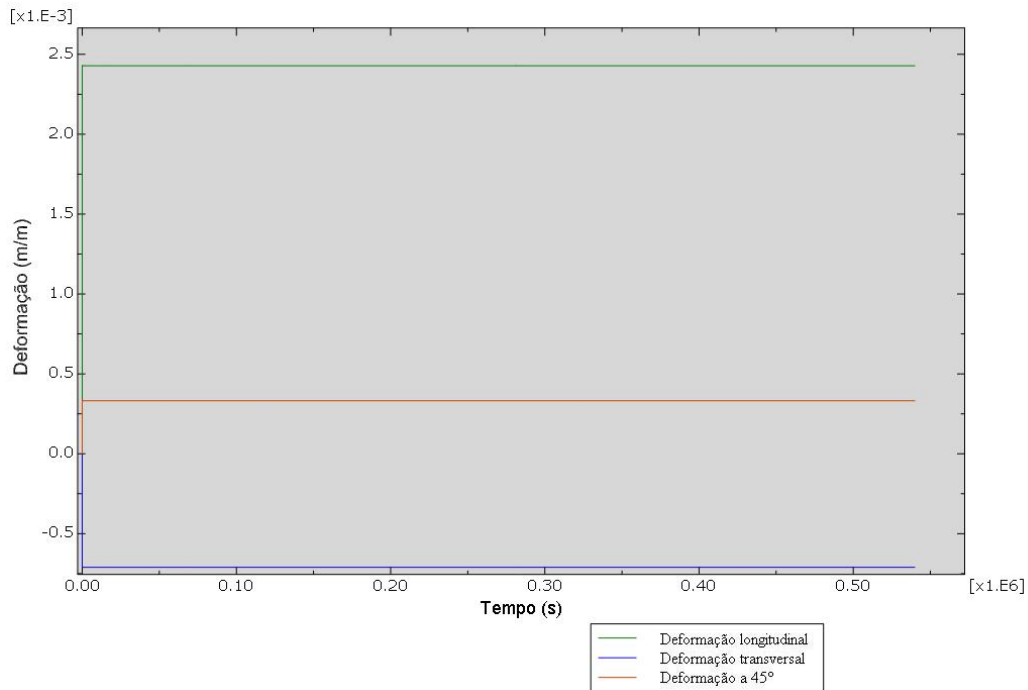


Figura 5.24 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° obtidas com o modelo numérico - Technyl A218 V35.

A deformação elástica instantânea é identificada traçando as curvas de fluência nos instantes iniciais, conforme mostra a Figura 5.25.

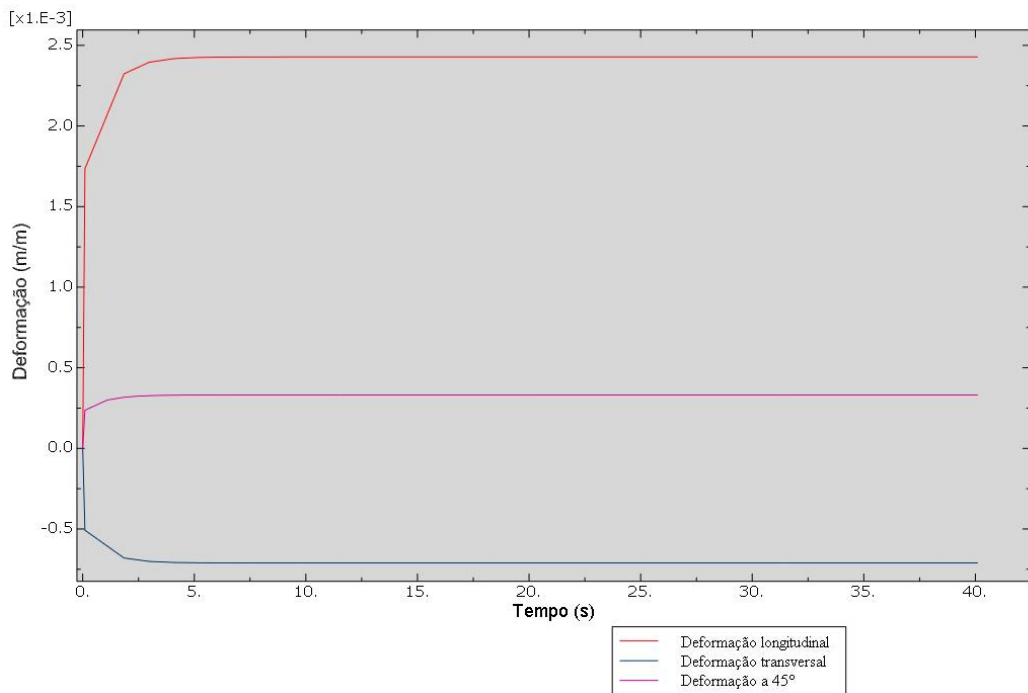


Figura 5.25 – Evolução das deformações longitudinal, transversal e a 45° nos instantes iniciais - Technyl A218 V35.

A Figura 5.26 apresenta a evolução do deslocamento do ponto A e a Figura 5.27 mostra o deslocamento instantâneo neste mesmo ponto.

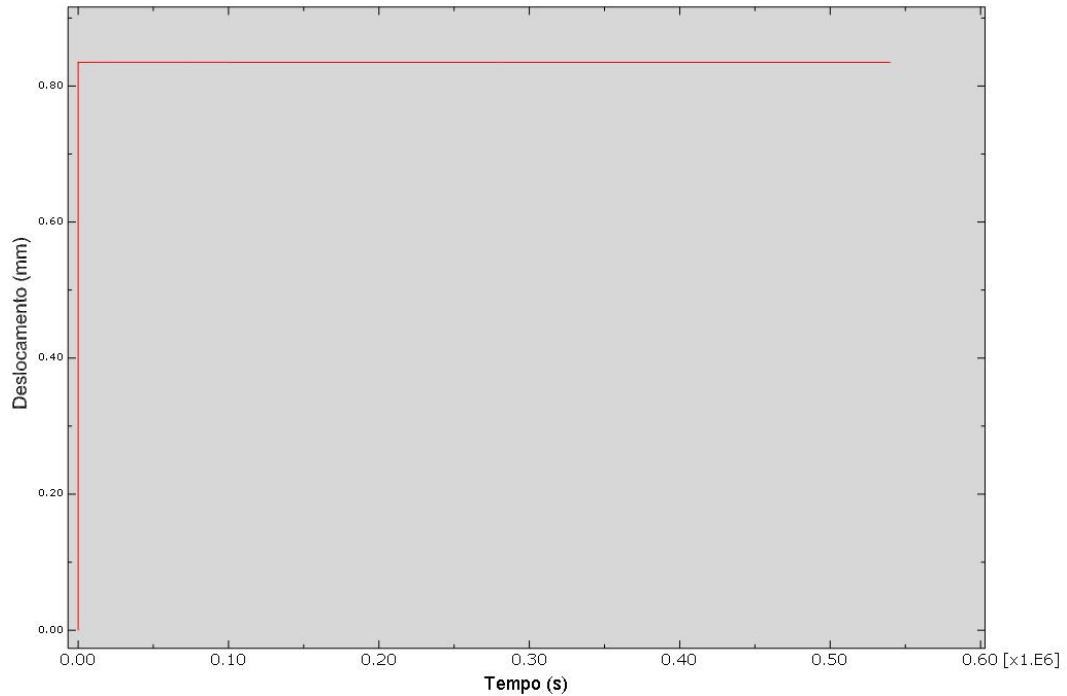


Figura 5.26 – Evolução do deslocamento do ponto A - Technyl A218 V35.

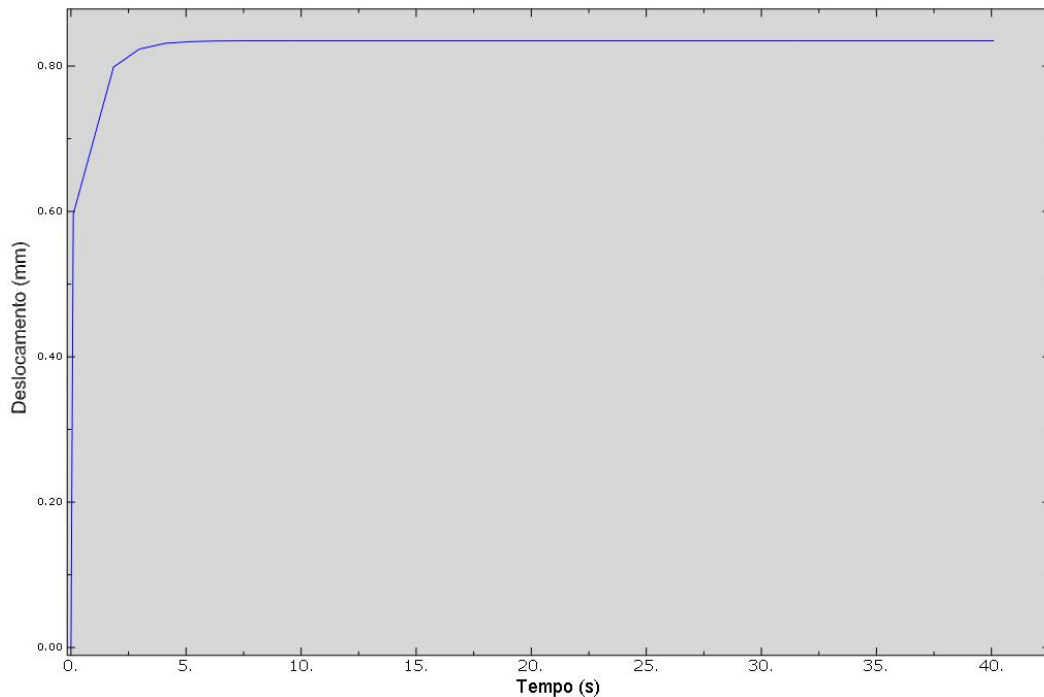


Figura 5.27 – Evolução do deslocamento instantâneo do ponto A - Technyl A218 V35.

CAPÍTULO 6

Avaliações Finais

6.1 – Conclusões

A adição de fibras em um material polimérico termoplástico de forma a reforçar um componente estrutural vem sendo amplamente utilizada na engenharia. Porém, o material resultante dessa combinação apresenta características de um material ortotrópico e viscoelástico que não são previstas conjuntamente por modelos matemáticos. Neste contexto, este trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivos, desenvolver um modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica para posteriormente aplicá-lo na simulação de uma peça injetada empregada como estudo de caso. Esta peça é produzida pelo Grupo Schaeffler, e é denominada de Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente.

Para o desenvolvimento do modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica, tomou-se um modelo existente de viscoelasticidade linear isotrópica de Zener e aplicou-se a ele a diferença de propriedades em três eixos ortogonais, um na direção 1, paralelo às fibras, um outro na direção 2, ortogonal às fibras, e um terceiro na direção 3, ortogonal aos dois anteriores. Este modelo foi programado e usado como subrotina do usuário no software Abaqus[®]. A orientação das fibras é obtida em uma simulação numérica do processo de injeção da peça realizada anteriormente no software Moldflow[®], para em seguida ser exportada ao Abaqus[®]. Foram feitos cortes em amostras da peça e analisados por microscopia eletrônica de forma a observar a orientação das fibras e compará-las aos resultados obtidos pela simulação da injeção. As constantes elásticas e as taxas de deformação dos materiais empregados como matéria-prima da Guia foram obtidas em ensaios de tração simples e em ensaios de fluência em corpos de prova padrão. Foram realizados ajustes do modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica a partir dos resultados dos ensaios realizados.

Finalmente, após o ajuste do modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica, o mesmo foi aplicado para simular o desempenho mecânico da Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente. Foi também realizado um ensaio mecânico da Guia de forma a avaliar o desempenho do modelo matemático proposto.

Pode-se concluir neste trabalho que a integração dos softwares Moldflow[®] e Abaqus[®] para simular o desempenho mecânico de peças injetadas demonstrou ser bastante promissora, sendo uma etapa importante a ser avaliada no desenvolvimento de um produto. Análises feitas por microscopia eletrônica demonstraram que a orientação das fibras obtida como resultado da simulação do processo de injeção é bastante satisfatória. Esta etapa é de grande importância dentro do processo de simulação do desempenho de peças injetadas para que o modelo matemático de viscoelasticidade ortotrópica seja representativo. Entretanto, a interface entre estes dois softwares precisa ser aprimorada.

A comparação dos resultados obtidos com a simulação da Guia, fazendo uso do modelo de viscoelasticidade linear ortotrópica proposto, com os resultados do ensaio mecânico apresentaram uma correlação bastante satisfatória. Foi observado que o modelo proposto consegue identificar a deformação elástica inicial em $t = t_0$, e a deformação ao final da fluência em $t = t_1$, porém, ele não descreve muito bem a taxa de deformação nos instantes iniciais de aplicação da carga. Isso por vir do fato de, na resolução numérica da equação diferencial que descreve o comportamento viscoelástico, a taxa de deformação é considerada de forma implícita, $\dot{\varepsilon}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$, sem prescrever a evolução exponencial da deformação, para

em seguida, realizar a derivada explícita e incorporá-la ao modelo matemático. No entanto, se não se deseja identificar o tempo para se atingir o patamar de deformação constante, este modelo pode ser considerado satisfatório.

6.2 – Propostas para Trabalhos Futuros

Como propostas para a continuidade deste trabalho, podem-se citar:

- Incorporação das tensões residuais oriundas do processo de injeção nos modelos para simulação de comportamento mecânico da peça;
- Propor melhorias no processo de injeção da peça, como por exemplo, na escolha da melhor posição do ponto de injeção da peça, temperatura e pressão do material injetado, e temperatura do molde;
- Aprimorar a resolução numérica da equação diferencial que descreve a viscoelasticidade no que se refere ao termo da taxa de deformação;
- Realizar ensaios mecânicos em corpos de prova com outras orientações de fibra de forma a identificar todas as constantes elásticas do material;
- Realizar ensaios mecânicos para a identificação de modos de falha, e posterior desenvolvimento de modelos matemáticos;
- Agregar outras soluções de modelos de viscoelasticidade linear;
- Ajustar o modelo de viscoelasticidade linear de Zener afim de que se possa obter uma melhor resposta nas deformações transversais e diagonais;
- Aprimorar a lei das misturas;

Referências Bibliográficas

ANSI/ASTM D 2990 - 01. (2001). *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, Part 35.* .

ANSI/ASTM D 638 - 03. (2004). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, Part 35.*

Ashby, M. F. (1998). *Engineering Materials: An Introduction to Microstructures, Processing and Design.* Oxford: Butterworth-Heinemann, Second Edition.

Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures.* New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Berthelot, J.-M. (1992). *Matériaux Composites – Comportement Mécanique et Analyse des Structures.* Masson.

Callister Jr., W. D. (1999). *Materials Science and Engineering: an Introduction.* New York: John Wiley and Sons, Inc.

Canevarolo Jr., S. V. (2002). *Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros.* São Paulo: Artliber Editora.

Chen W.H., C. C. (1993). An incremental relaxation finite element analysis of viscoelastic problems with viscoelastic problems with contact and friction. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* , 315-319.

Christensen, R. M. (1979). *Mechanics of Composite Materials.* New York: John Wiley e Sons.

Christensen, R. M. (1982). *Theory of Viscoelasticity.* New York: Dover Publications, Inc.

Christensen, R. M. (1982). *Theory of Viscoelasticity.* New York: Dover Publications, Inc.

Crawford, R. J. (1987). *Plastics Engineering.* USA: Maxwell Macmillan International Editions, 2nd edition.

Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Behavior of Polymers.* New York: J. Wiley and Sons, 3rd edn.

Flügge, W. (1975). *Viscoelasticity.* Springer-Verlag, 2nd edition.

Referências Bibliográficas

- Gibson, R. F. (1994). *Principles of composite material mechanics*,. McGraw-Hill Int. Ed.
- Halpin, J. C. (1968). Observations on Linear Anisotropic Viscoelasticity. *Journal of Composite Materials* , pp. 68-80.
- Hibbeler, R. (1997). *Mechanics of materials*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 3rd ed.
- J. Lemaitre, J. C. (1990). *Mechanics of Solids*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lucas, E. S. (2001). *Caracterização de Polímeros*. Rio de Janeiro: e-papers.
- Malvern, L. E. (1960). *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- McCrum, N. G. (1988). *Principles of Polymer Engineering*,. Oxford: Oxford University Press.
- Munaiar Neto, J. (1998). *A study on viscoelastic and viscoplastic constitutive models and the use of implicit algorithms for their numerical integration*. São Carlos: , Ph.D. thesis, University of São Paulo, EESC-USP, (in Portuguese).
- Pagliosa, C. (2004). *Determinação Experimental de Propriedades Viscoelásticas de Material Polimérico*. Florianópolis: Dissertação de Mestrado 101p. UFSC.
- Pereira, J. C. (2007). *Apostila do curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos*. Florianópolis.
- Rosen, B. W. (1965). Mechanics of composite strengthening in fiber composite materials. . *Americal Society for Metals* , pp. 37-75.
- Roylance, D. (2001). *Engineering Viscoelasticity*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology – MIT.
- Smith, W. F. (1998). *Princípios da Ciência e Engenharia de Materiais*. Portugal : Editora McGrall-Hill.
- Sullivan, J. L. (1992). *Polymer Viscoelasticity*. Unpublished notes, Ford Motor Co., Dearborn, MI.
- Tsai, S. W. (5 de 1971). A general theory of strength for anisotropic materials. pp. 58-80.
- Tsai, S. W. (1980). *Introduce to Composite Materials*. Technomic Publishing Co., Inc.
- Tsai, S. W. (1992). *Theory of Composites Design*. *Think Composites* .

Referências Bibliográficas

Tschoegl, N. W. (1988). *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior, An Introduction*. New York: Springer-Verlag.

van der Vegt, A. K. (2002). *From polymers to plastics*. The Netherlands: DUP Blue Print Delft.

William, D. C. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 5. ed.

Zienkiewicz, O. C. (1991). *La Méthode des Eléments Finis – Formulations de base et Problèmes Linéaires*. Paris: Afnor Technique.

APÊNDICE A

Método de Integração Numérica

A equação diferencial dada pela eq. (3.17), ou a eq. (3.19), que representa o comportamento viscoelástico linear isotrópico de materiais dado pelo modelo de Zener é resolvida por meio de integração numérica. O operador de integração para estas equações é o operador de diferenças finitas centrais, que descreve uma função f e sua derivada no tempo como:

$$f_{t+\frac{\Delta t}{2}} = f_t + \frac{\Delta f}{2} \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{f}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (\text{A.2})$$

Sendo f_t o valor da função no início do incremento, Δf a mudança da função sobre o incremento e Δt o incremento de tempo. Na equação diferencial em questão, a função f pode ser o tensor tensão $[\sigma_{ij}]$ e o tensor deformação $[\varepsilon_{ij}]$.

Aplicando as eqs. (A.1) e (A.2) na eq. (3.17), tem-se:

$$\left\{ [\sigma_{ij}] + \frac{\Delta[\sigma_{ij}]}{2} \right\} + \bar{\nu} \left\{ \frac{\Delta[\sigma_{ij}]}{\Delta t} \right\} = \lambda \left\{ \varepsilon_v + \frac{\Delta\varepsilon_v}{2} \right\} [I] + 2\mu \left\{ [\varepsilon_{ij}] + \frac{\Delta[\varepsilon_{ij}]}{2} \right\} + \bar{\lambda} \left\{ \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta t} \right\} [I] + 2\bar{\mu} \left\{ \frac{\Delta\varepsilon_{ij}}{\Delta t} \right\} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{A.3})$$

Multiplicando a eq. (A.3) por Δt e manipulando alguns de seus termos, tem-se:

$$\left\{ \frac{\Delta t}{2} + \bar{\nu} \right\} \Delta[\sigma_{ij}] = \left\{ \frac{\Delta t}{2} \lambda + \bar{\lambda} \right\} \Delta\varepsilon_v [I] + \{ \Delta t \mu + 2\bar{\mu} \} \Delta[\varepsilon_{ij}] + \Delta t \left\{ \lambda \varepsilon_v [I] + 2\mu [\varepsilon_{ij}] - [\sigma_{ij}] \right\} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{A.4})$$

Assim, a variação do tensor tensão $\Delta[\sigma_{ij}]$ pode ser calculada da forma:

Apêndices

$$\Delta[\sigma_{ij}] = \frac{\left\{ \frac{\Delta t}{2} \lambda + \bar{\lambda} \right\} \Delta \varepsilon_v [I] + \left\{ \Delta t \mu + 2\bar{\mu} \right\} \Delta [\varepsilon_{ij}] + \Delta t \left\{ \lambda \varepsilon_v [I] + 2\mu [\varepsilon_{ij}] - [\sigma_{ij}] \right\}}{\frac{\Delta t}{2} + \bar{\nu}} \quad i, j = 1, 2, 3$$

(A.5)

A matriz Jacobiana [J] para o estado triaxial de tensões tem os termos:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \sigma_{xx}}{\partial \Delta \varepsilon_{xx}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xx}}{\partial \Delta \varepsilon_{yy}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xx}}{\partial \Delta \varepsilon_{zz}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta \sigma_{yy}}{\partial \Delta \varepsilon_{xx}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{yy}}{\partial \Delta \varepsilon_{yy}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{yy}}{\partial \Delta \varepsilon_{zz}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta \sigma_{zz}}{\partial \Delta \varepsilon_{xx}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{zz}}{\partial \Delta \varepsilon_{yy}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{zz}}{\partial \Delta \varepsilon_{zz}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta \sigma_{yz}}{\partial \Delta \gamma_{yz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{yz}}{\partial \Delta \gamma_{xz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{yz}}{\partial \Delta \gamma_{xy}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta \sigma_{xz}}{\partial \Delta \gamma_{yz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xz}}{\partial \Delta \gamma_{xz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xz}}{\partial \Delta \gamma_{xy}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta \sigma_{xy}}{\partial \Delta \gamma_{yz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xy}}{\partial \Delta \gamma_{xz}} & \frac{\partial \Delta \sigma_{xy}}{\partial \Delta \gamma_{xy}} \end{bmatrix} \quad (A.6)$$

Sendo:

$$\frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial \Delta \varepsilon_{ij}} = \frac{\Delta t \left(\frac{\lambda}{2} + \mu \right) + \bar{\lambda} + 2\bar{\mu}}{\frac{\Delta t}{2} + \bar{\nu}} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (A.7)$$

$$\frac{\partial \Delta \sigma_{ii}}{\partial \Delta \varepsilon_{jj}} = \frac{\Delta t \frac{\lambda}{2} + \bar{\lambda}}{\frac{\Delta t}{2} + \bar{\nu}} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{com } i \neq j \quad (A.8)$$

$$\frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial \Delta \varepsilon_{ij}} = \frac{\Delta t \frac{\mu}{2} + \bar{\mu}}{\frac{\Delta t}{2} + \bar{\nu}} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{com } i \neq j \quad (A.9)$$

APÊNDICE B

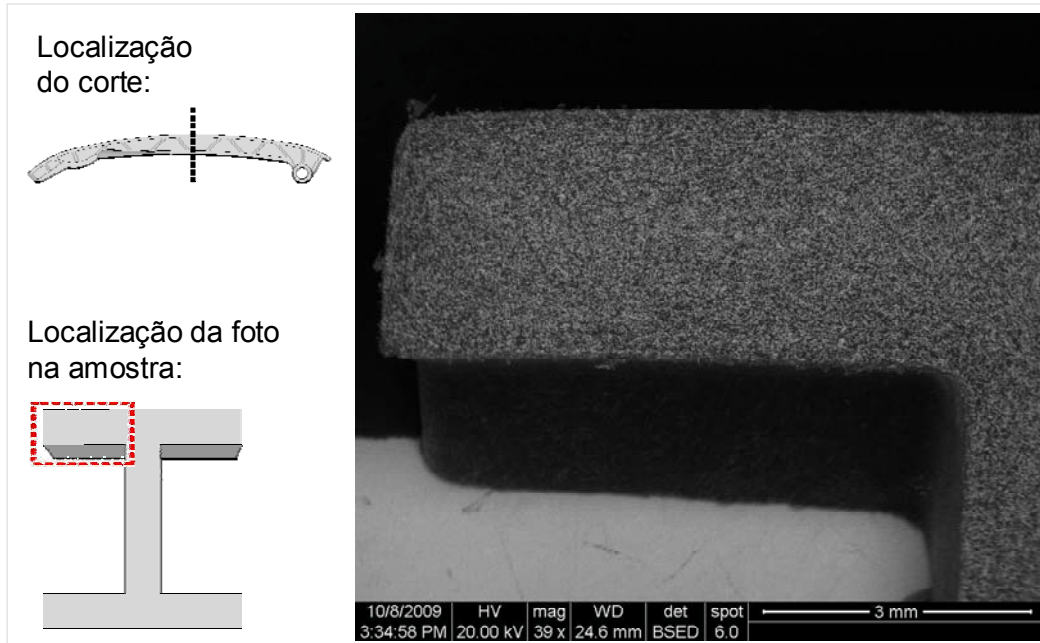
Identificação da Orientação das Fibras por Microscopia Eletrônica



Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

Relatório Final

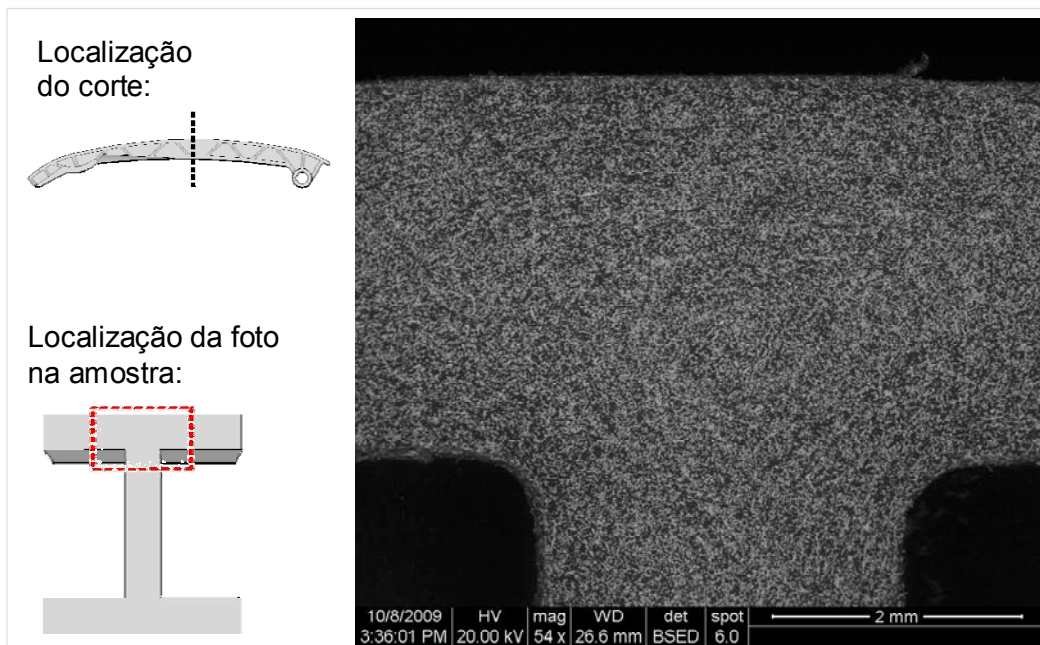
Corte 1 – Foto 1



2

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

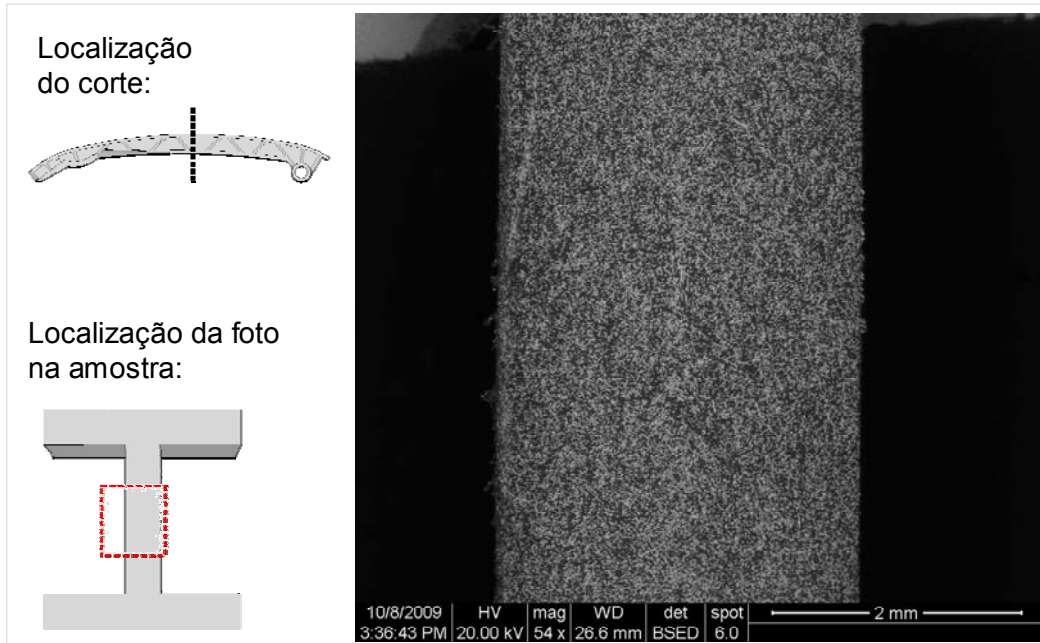
Corte 1 – Foto 2



3

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

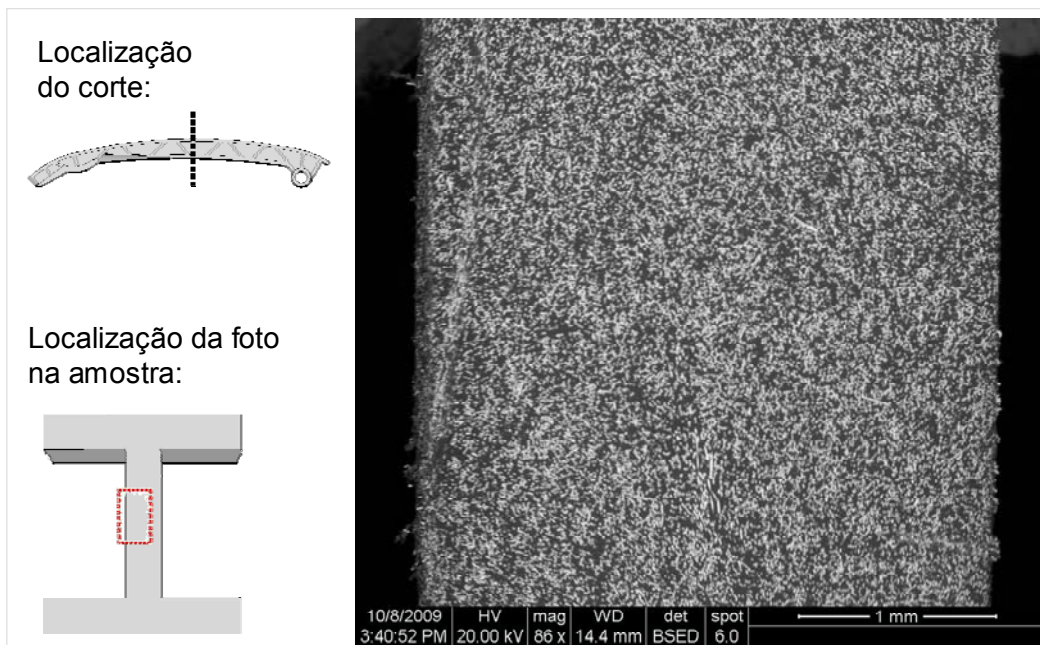
Corte 1 – Foto 3



4

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

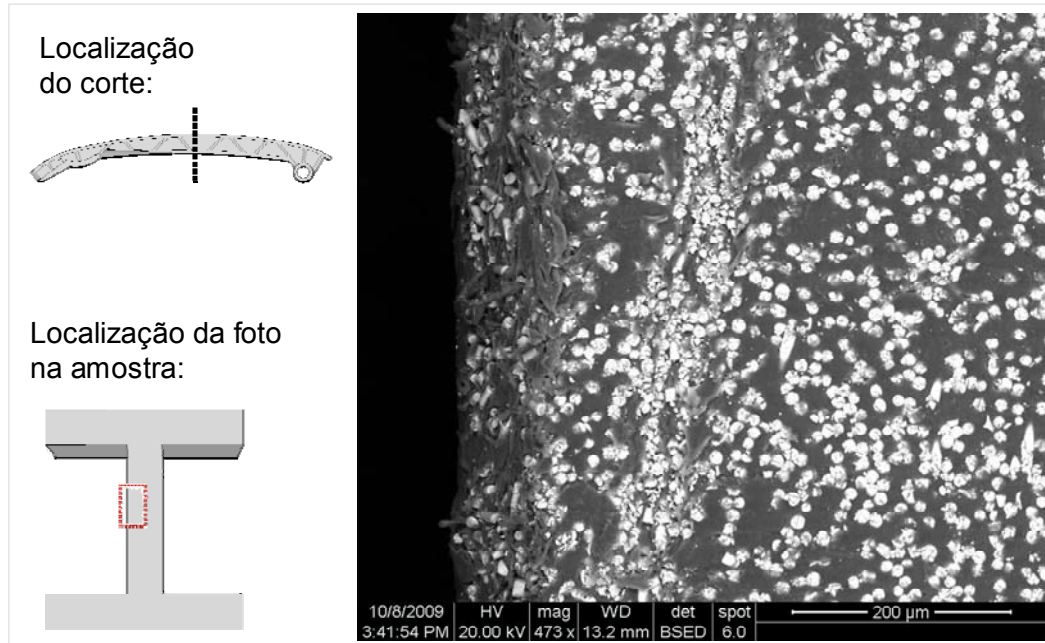
Corte 1 – Foto 4



5

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

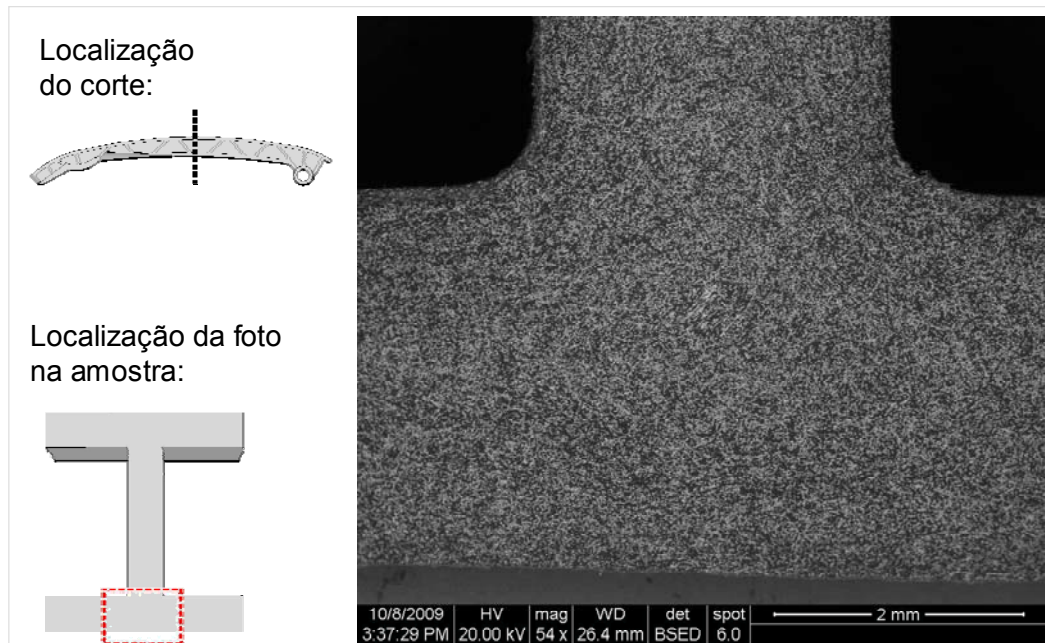
Corte 1 – Foto 5



6

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

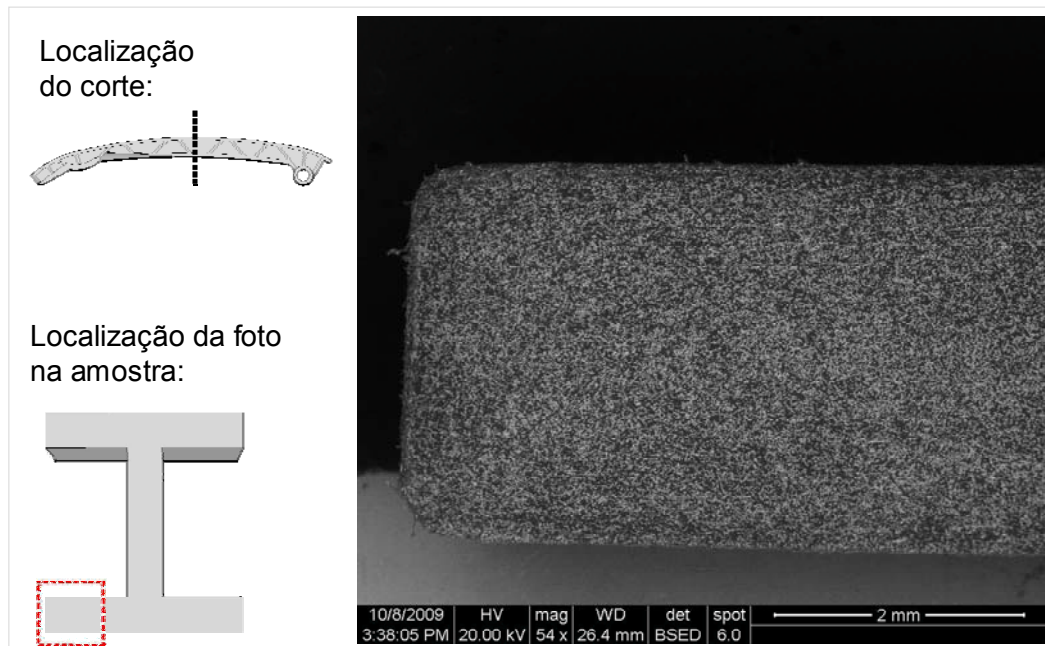
Corte 1 – Foto 6



7

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

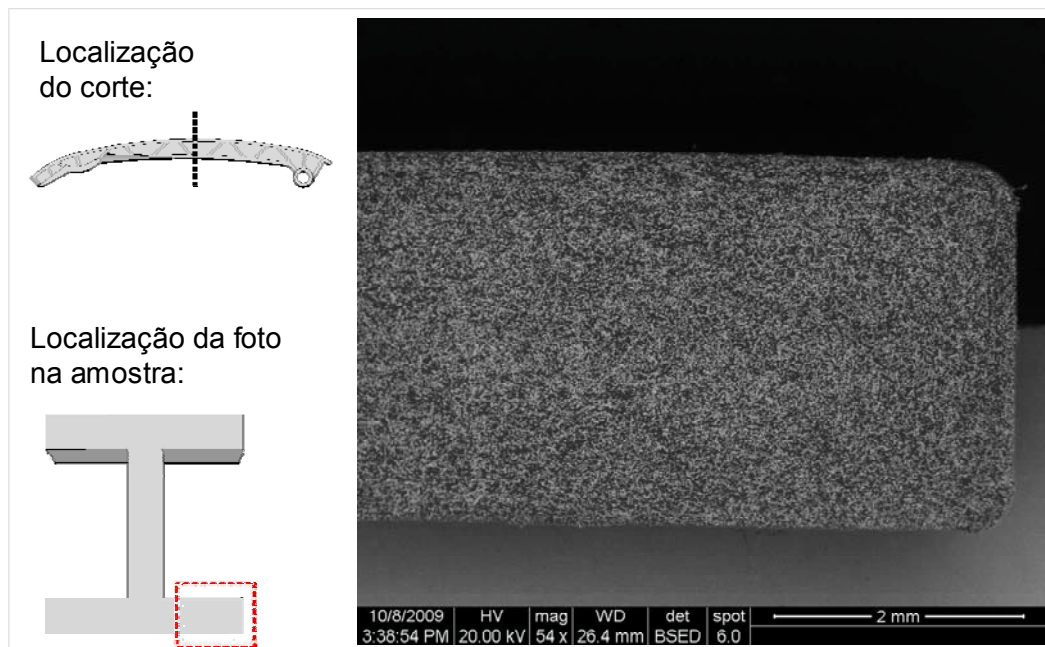
Corte 1 – Foto 7



8

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

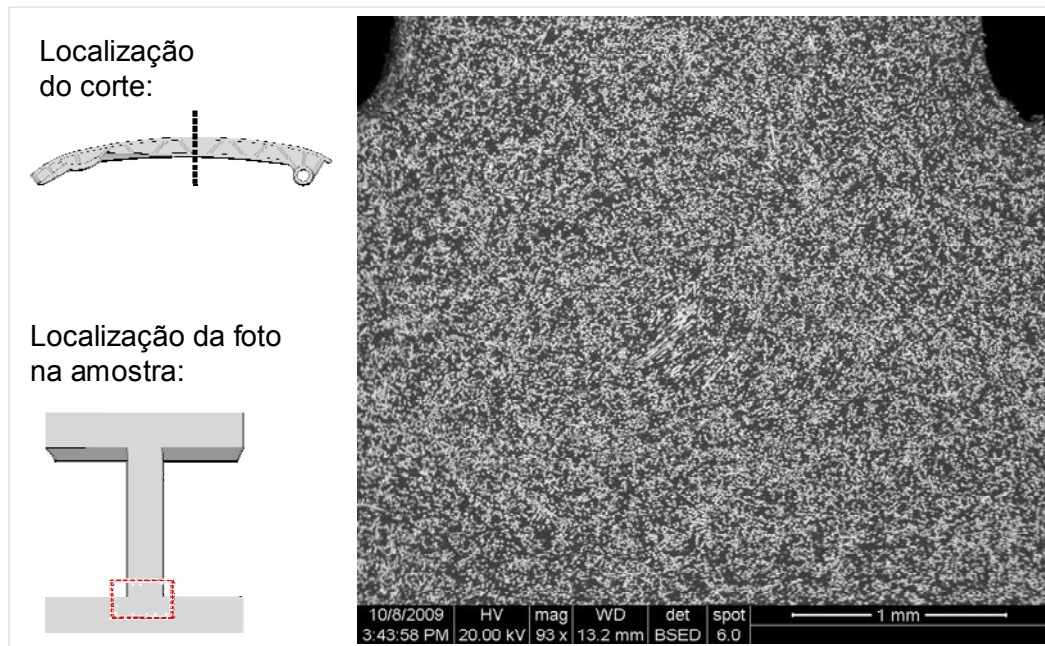
Corte 1 – Foto 8



9

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

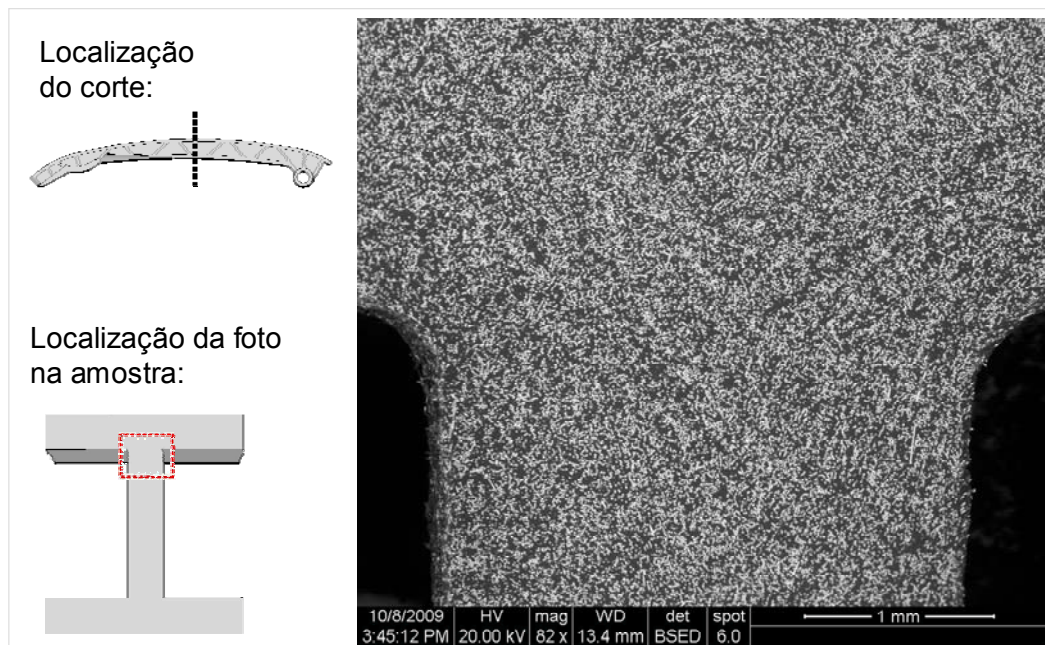
Corte 1 – Foto 9



10

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

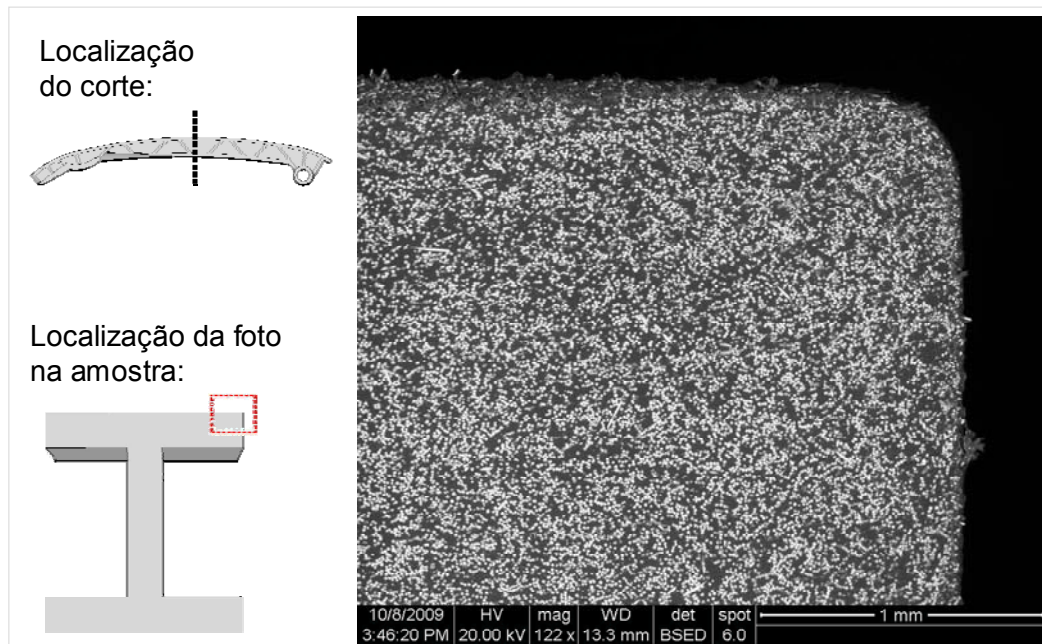
Corte 1 – Foto 10



11

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

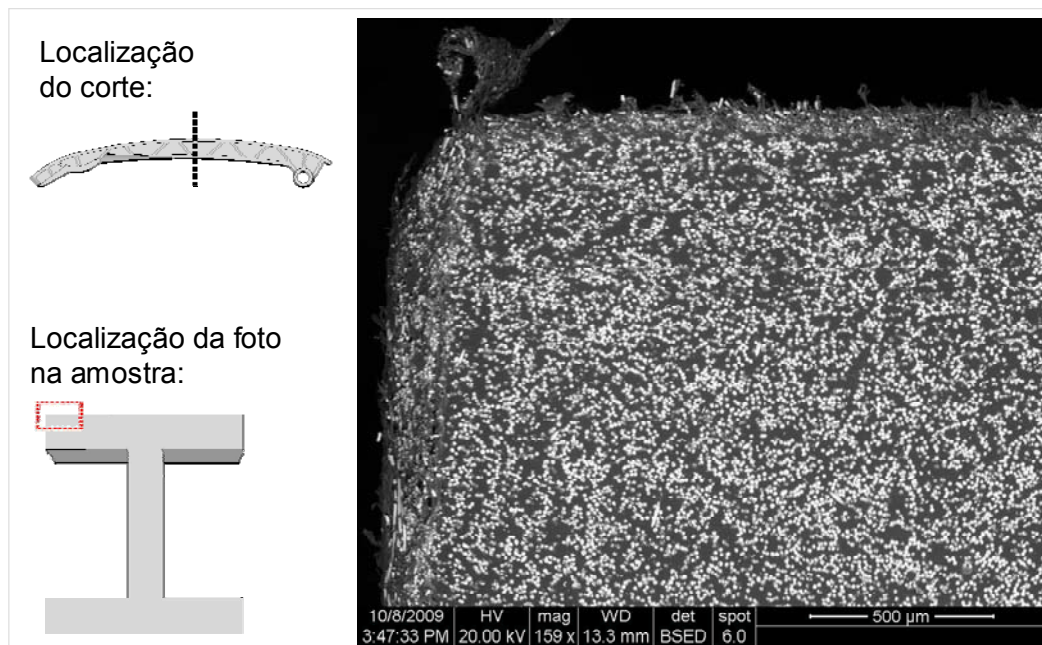
Corte 1 – Foto 11



12

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

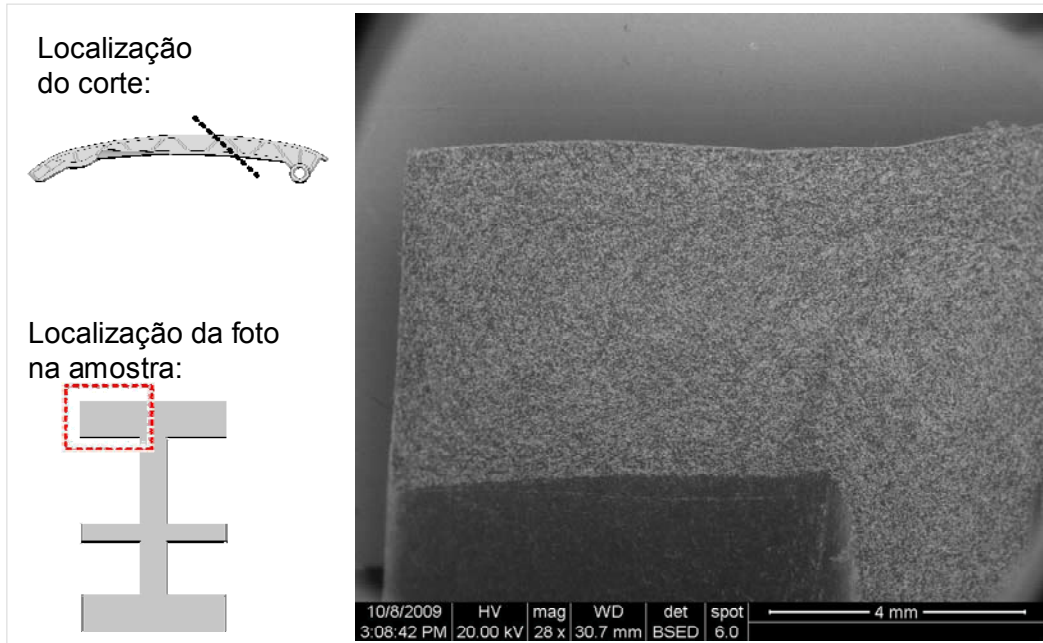
Corte 1 – Foto 12



13

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

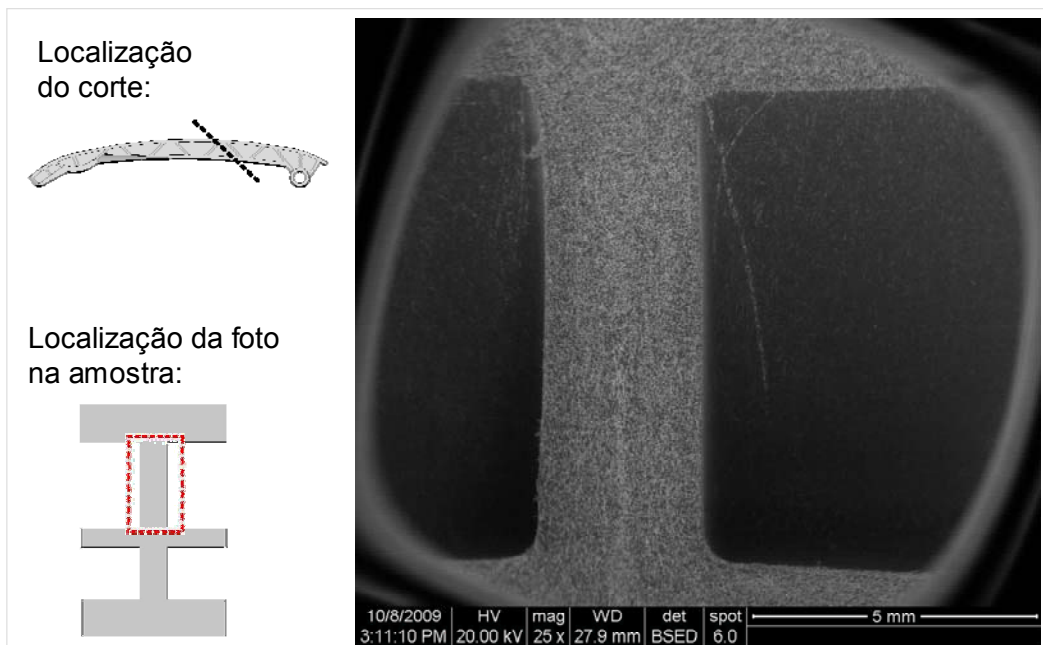
Corte 2 – Foto 1



14

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

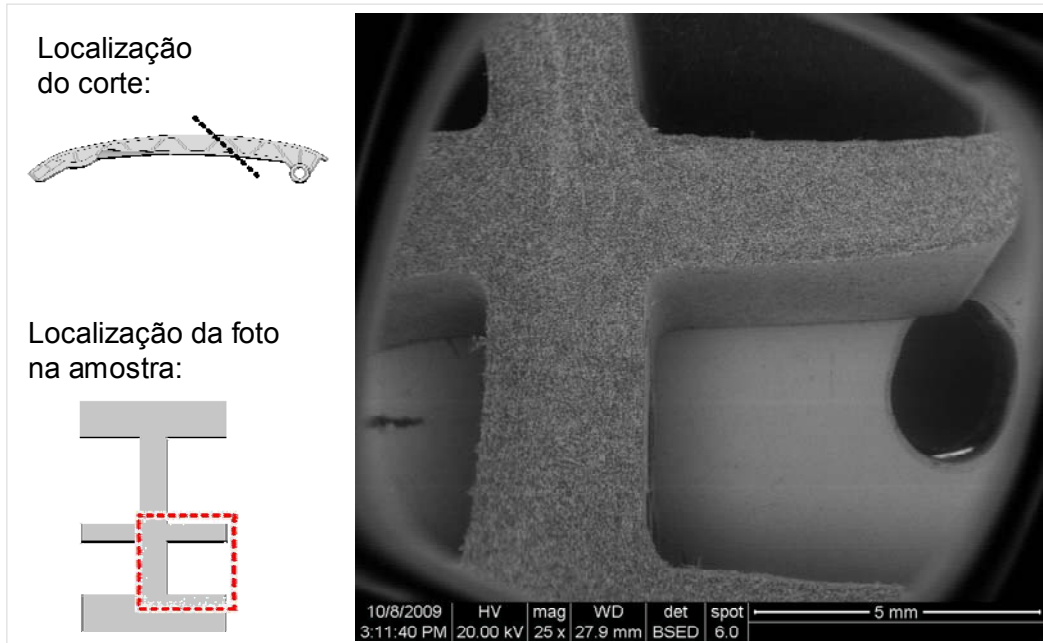
Corte 2 – Foto 2



15

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

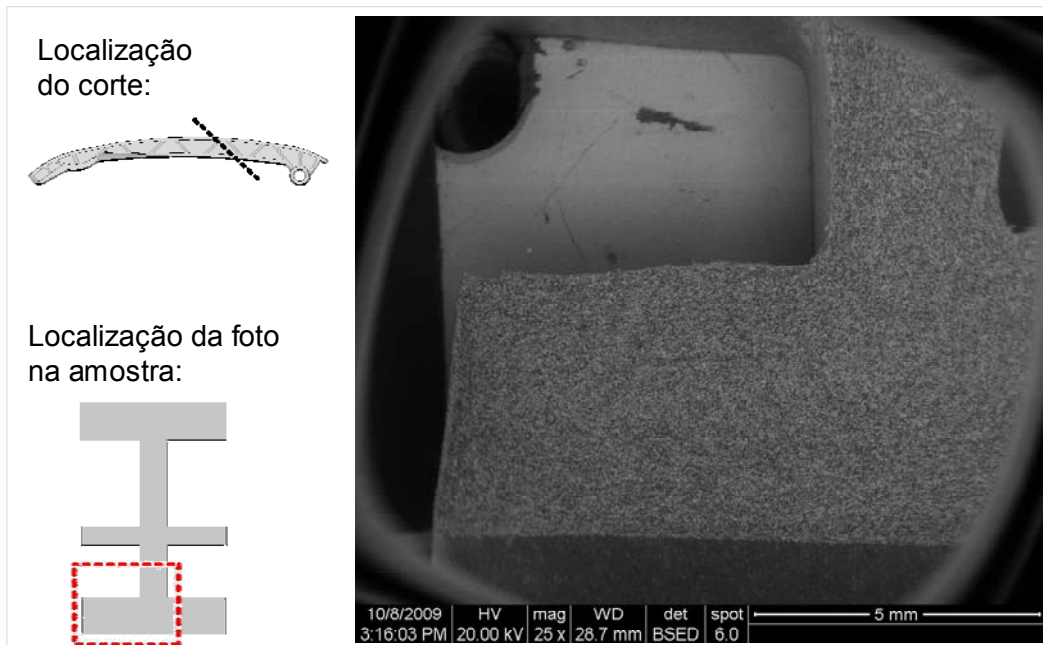
Corte 2 – Foto 3



16

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

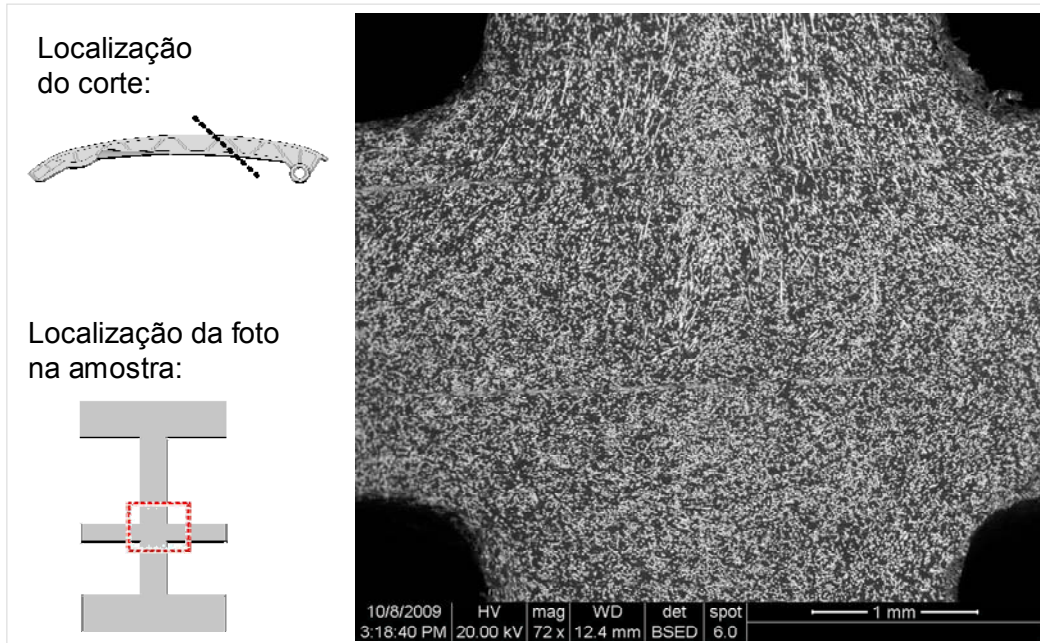
Corte 2 – Foto 4



17

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

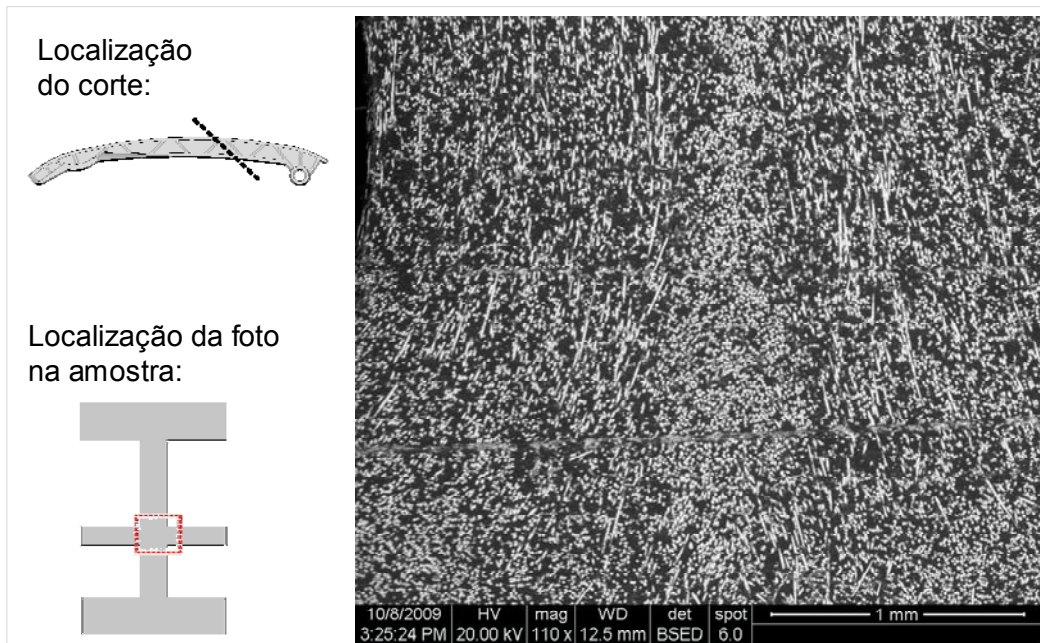
Corte 2 – Foto 5



18

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

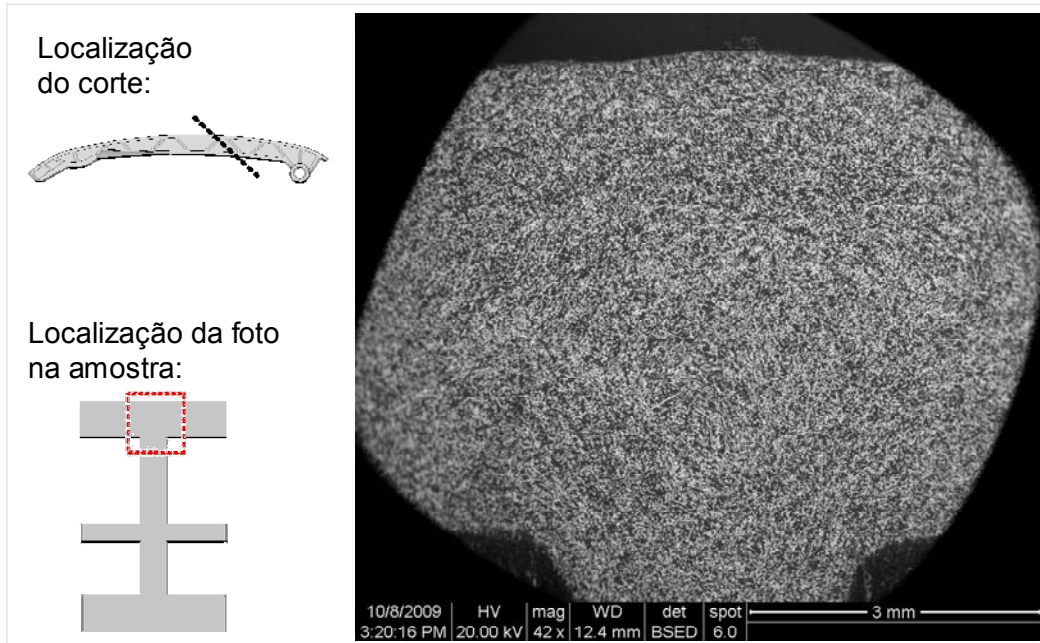
Corte 2 – Foto 6



19

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

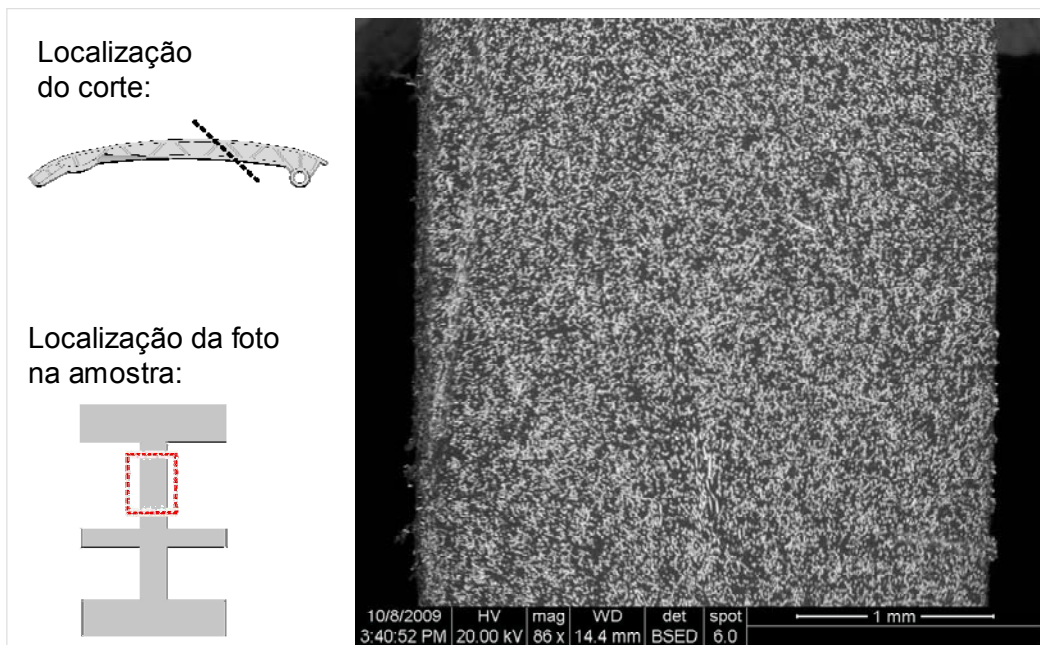
Corte 2 – Foto 7



20

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

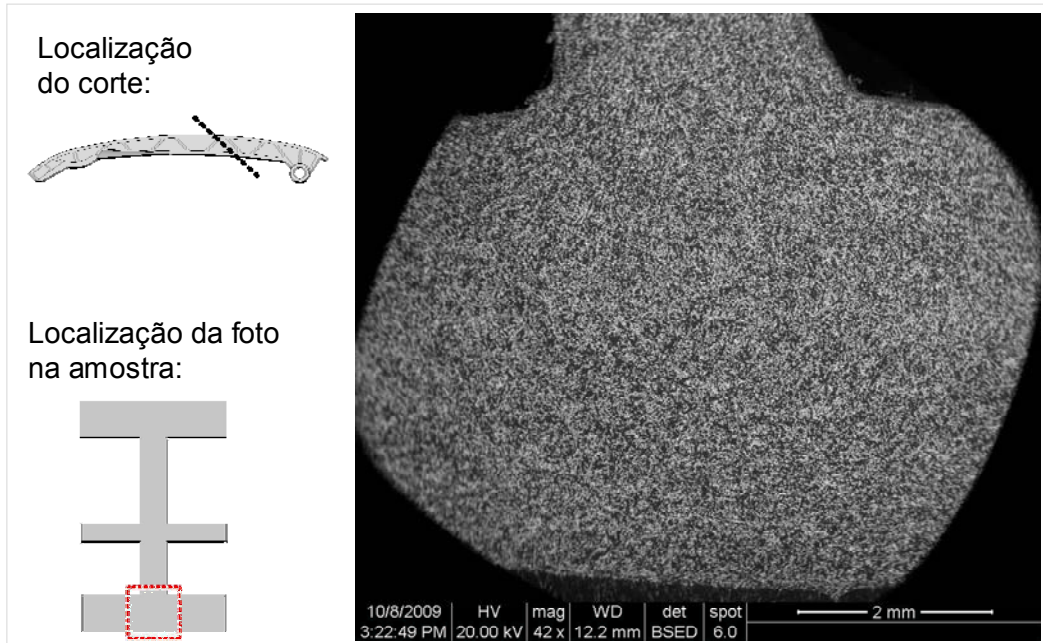
Corte 2 – Foto 8



21

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

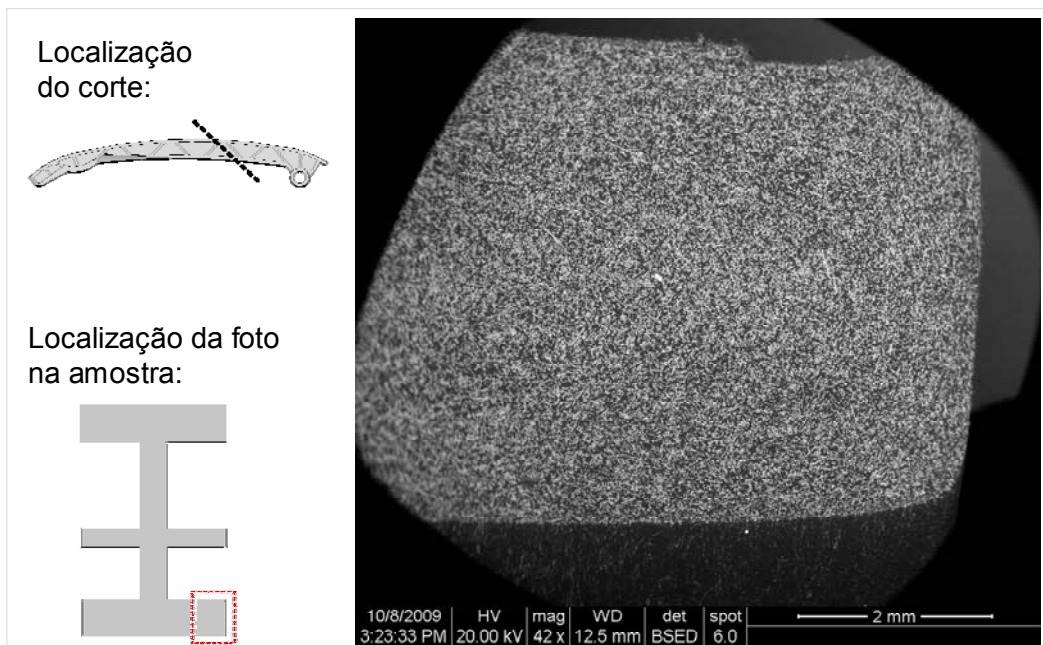
Corte 2 – Foto 9



22

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

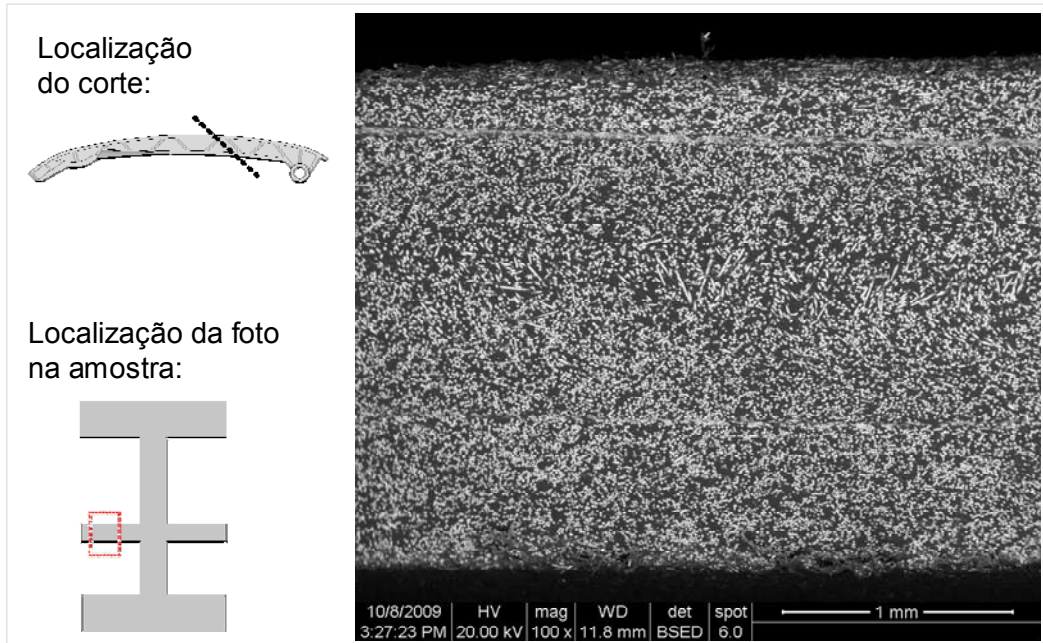
Corte 2 – Foto 10



23

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

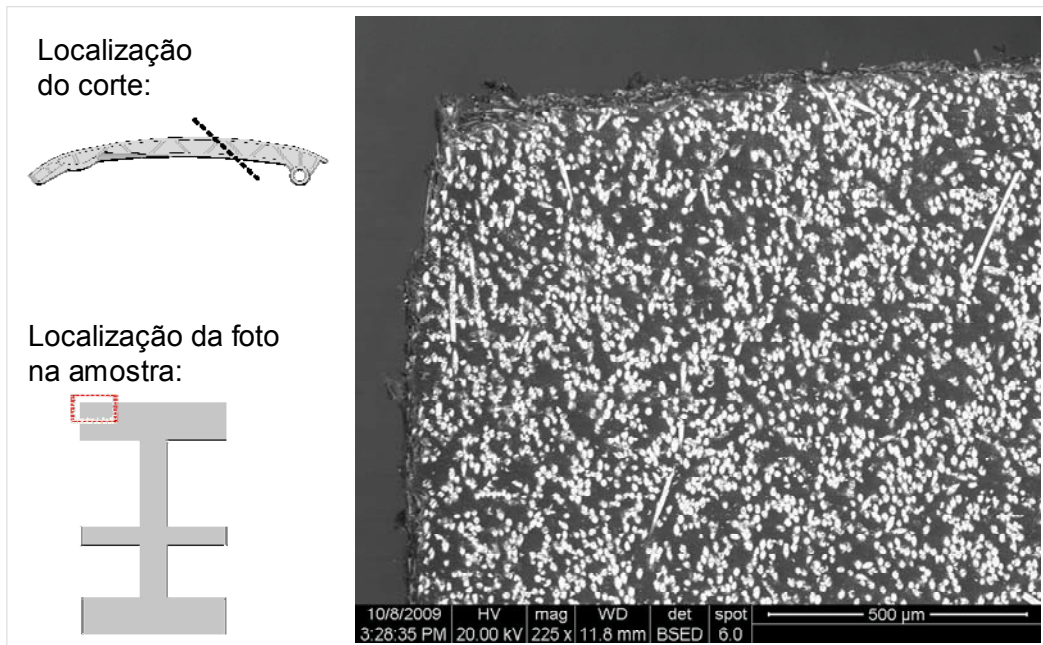
Corte 2 – Foto 11



24

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

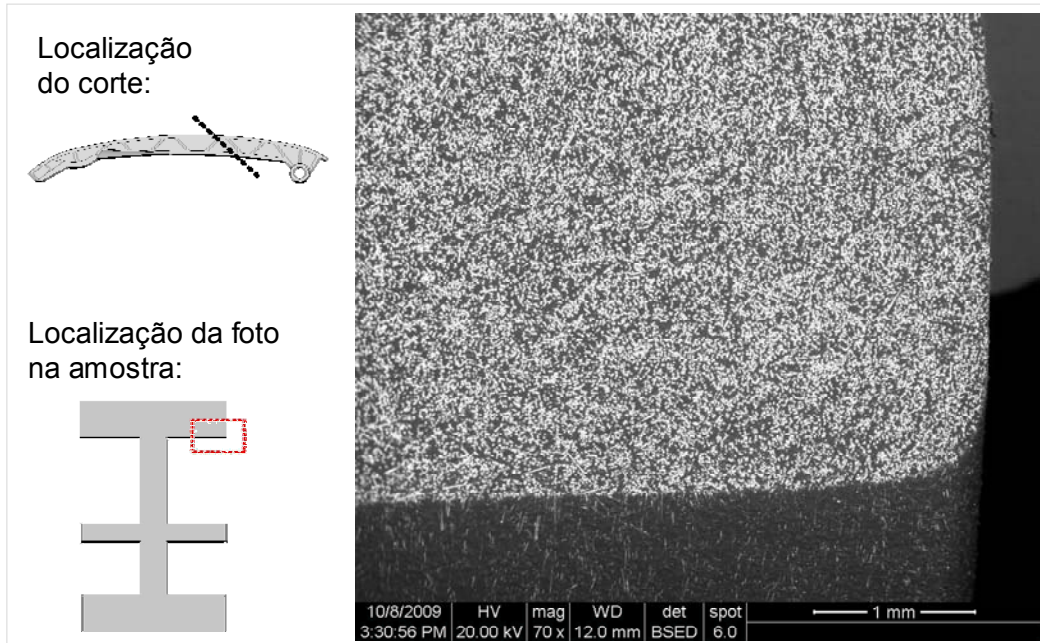
Corte 2 – Foto 12



25

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

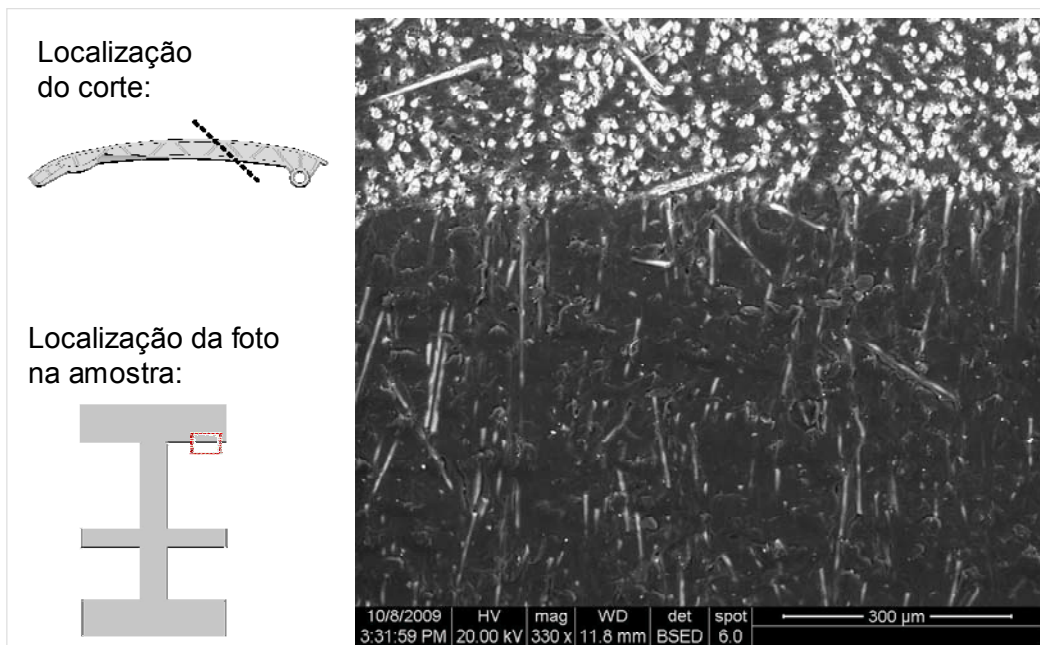
Corte 2 – Foto 13



26

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

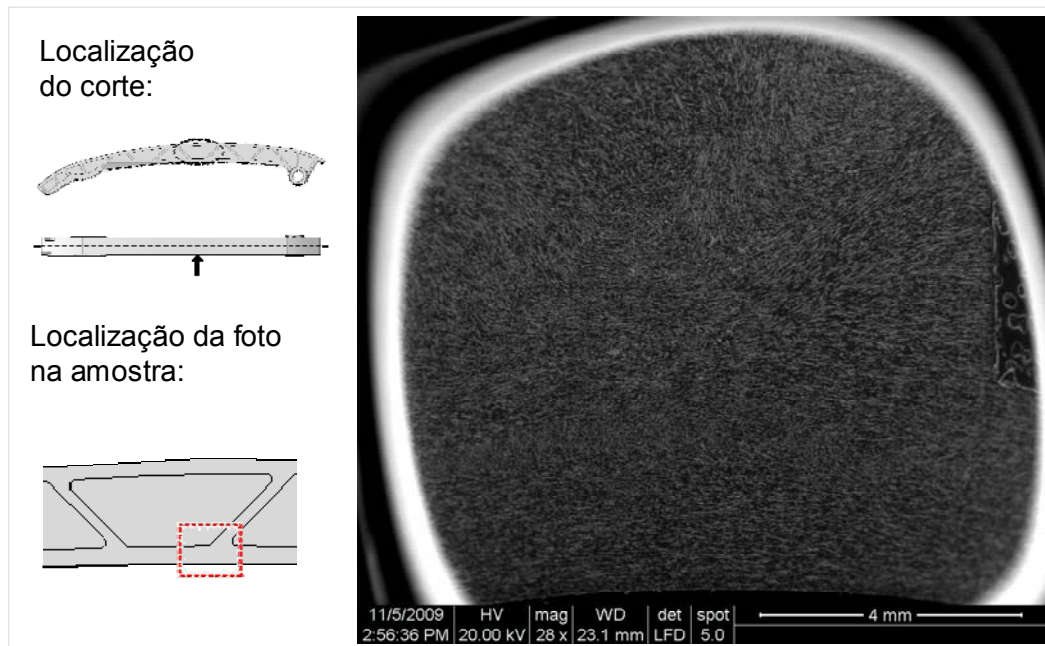
Corte 2 – Foto 14



27

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

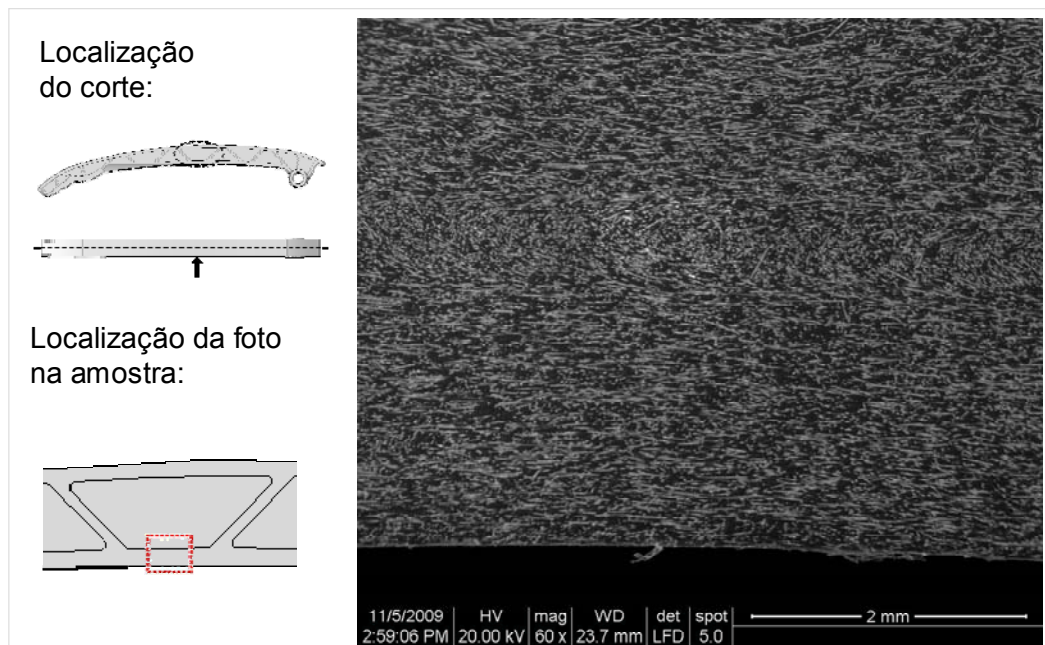
Corte 3 – Foto 1



28

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

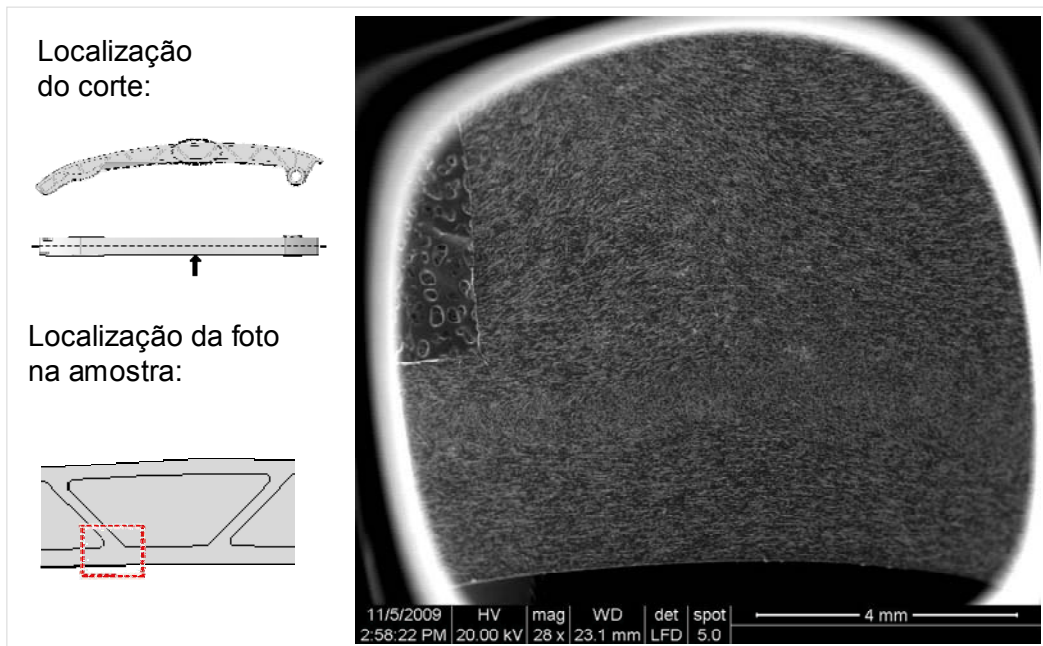
Corte 3 – Foto 2



29

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

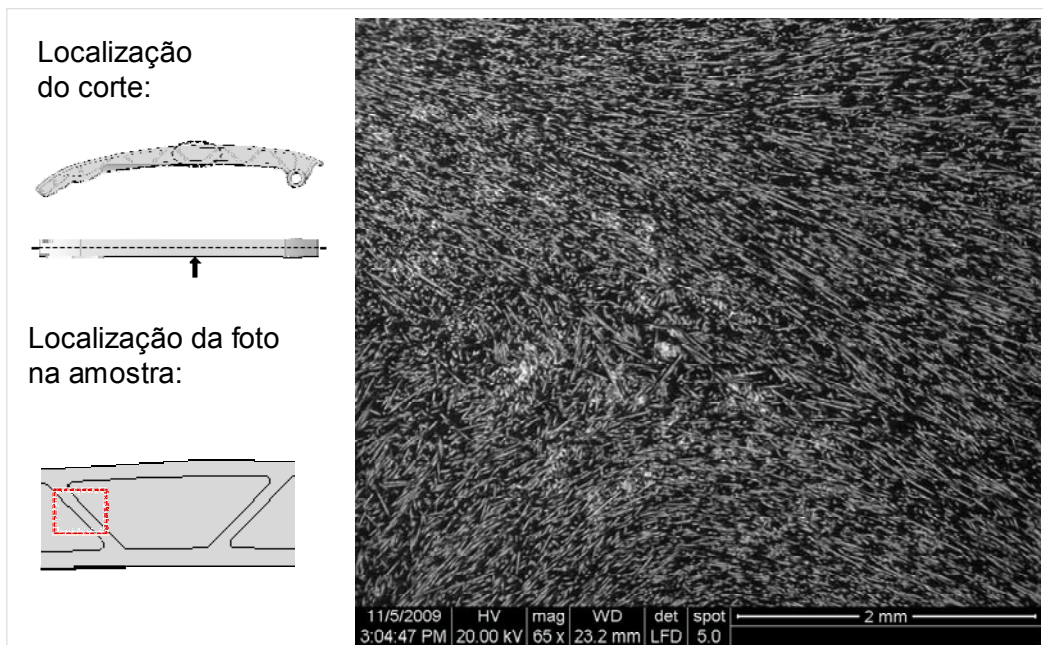
Corte 3 – Foto 3



30

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

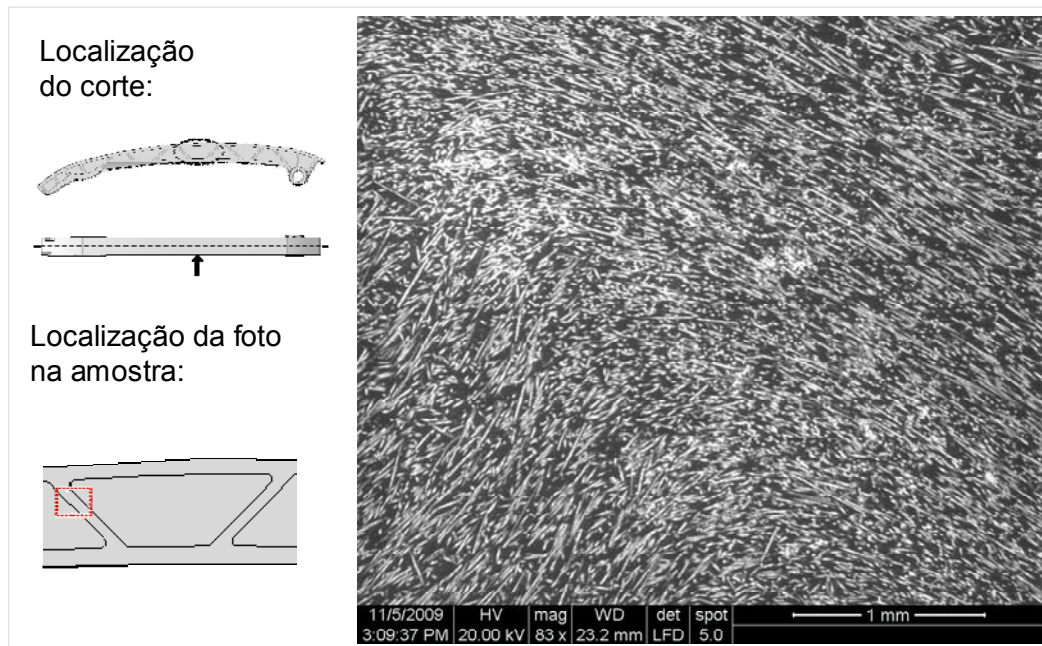
Corte 3 – Foto 4



31

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

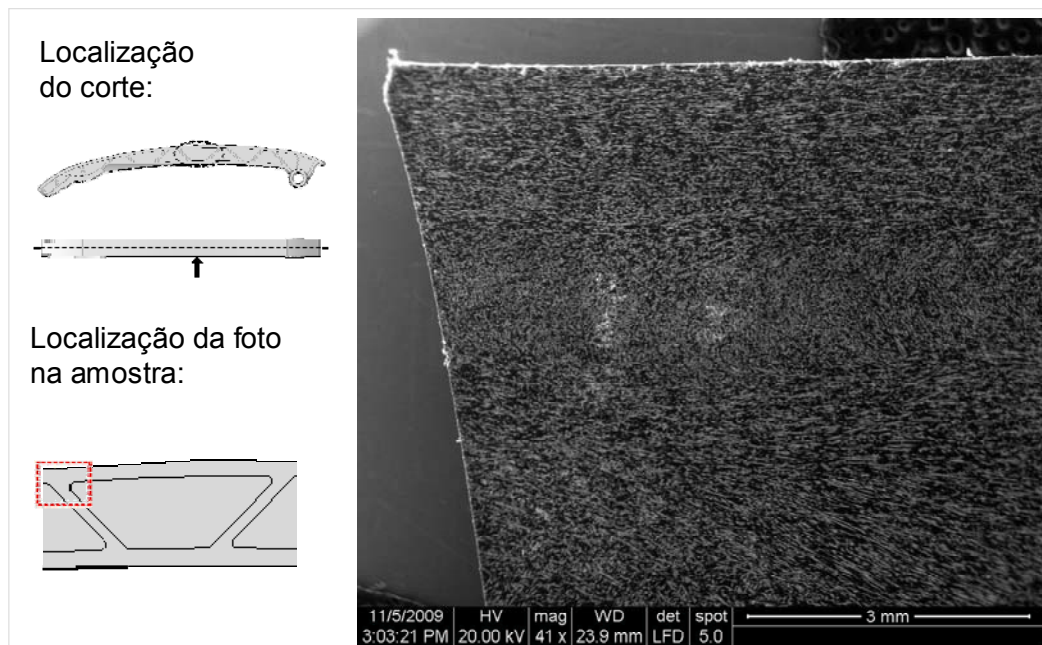
Corte 3 – Foto 5



32

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

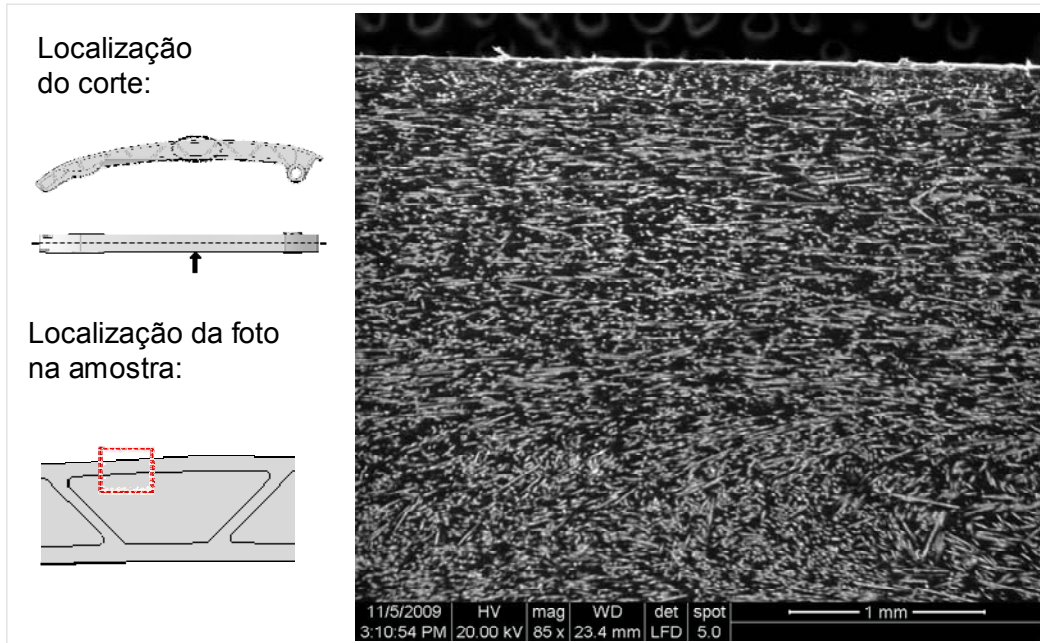
Corte 3 – Foto 6



33

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

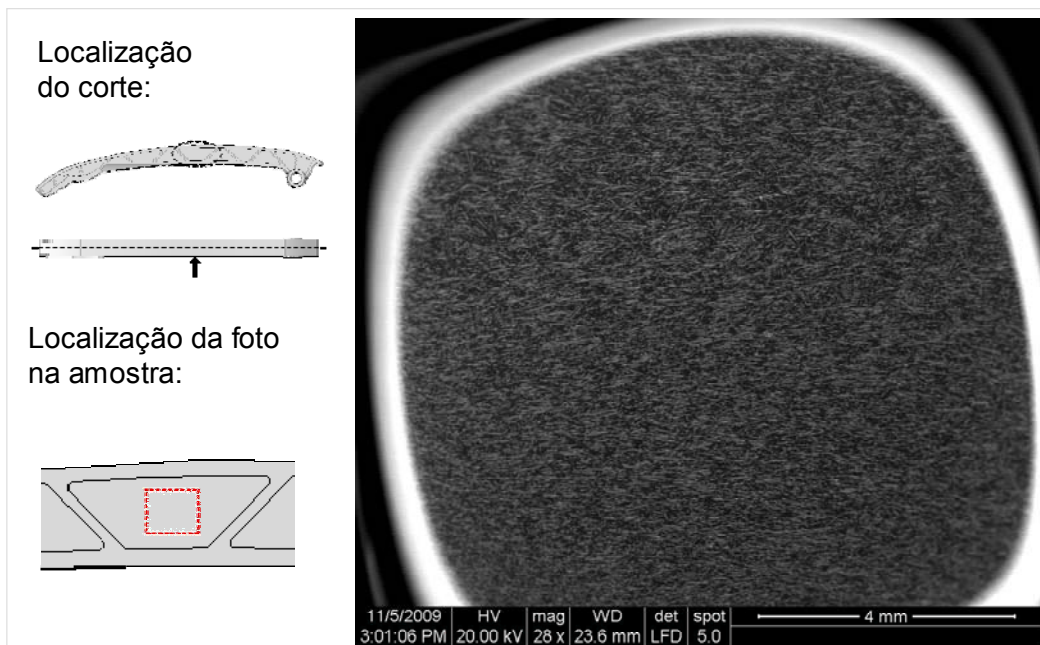
Corte 3 – Foto 7



34

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

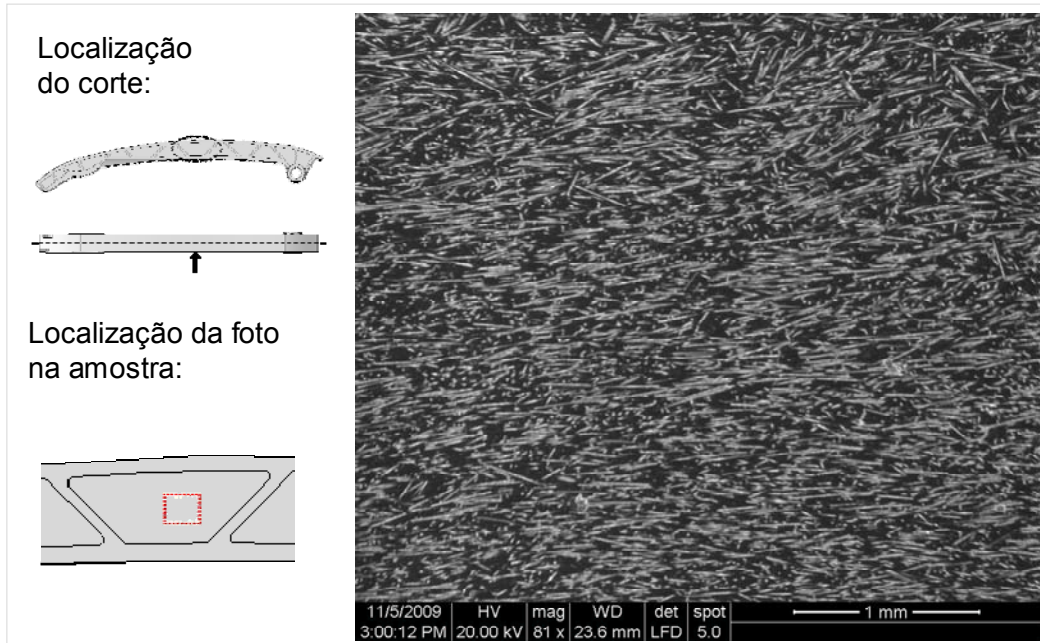
Corte 3 – Foto 8



35

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

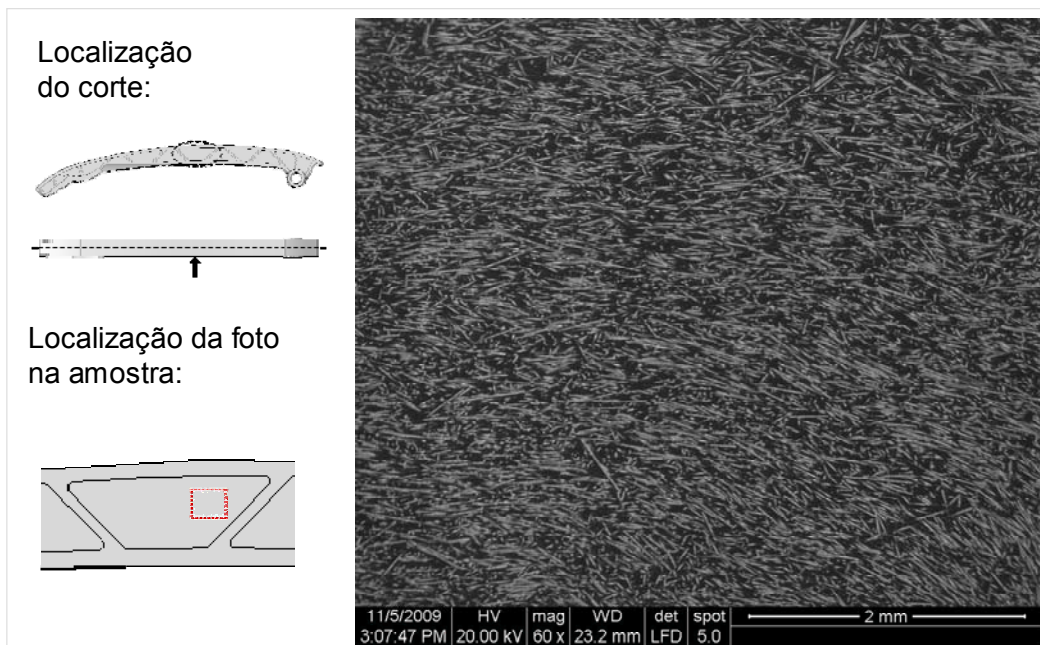
Corte 3 – Foto 9



36

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

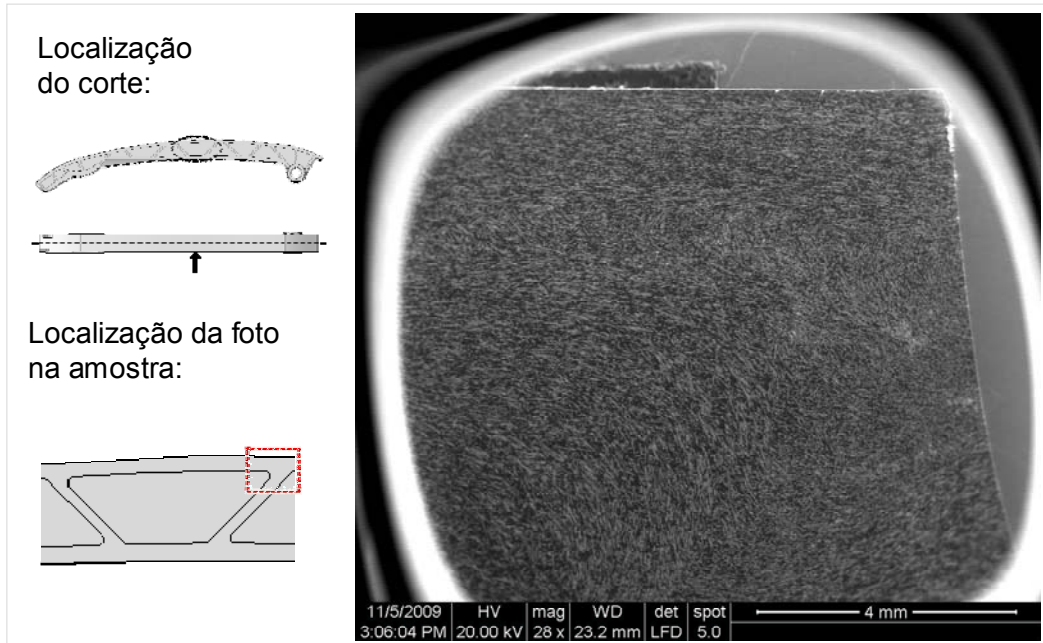
Corte 3 – Foto 10



37

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

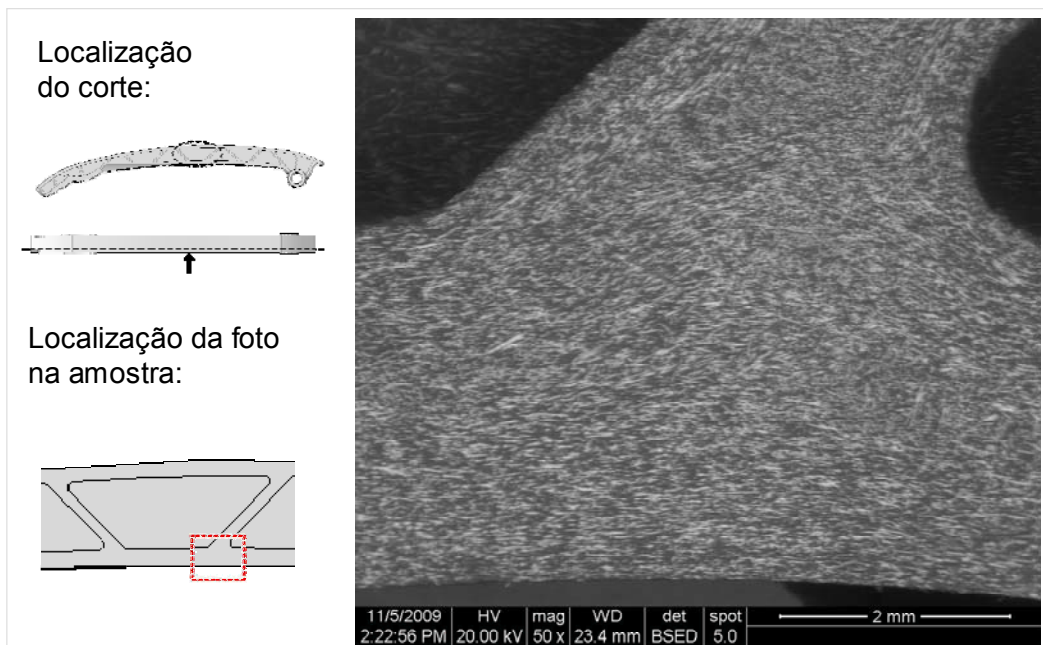
Corte 3 – Foto 11



38

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

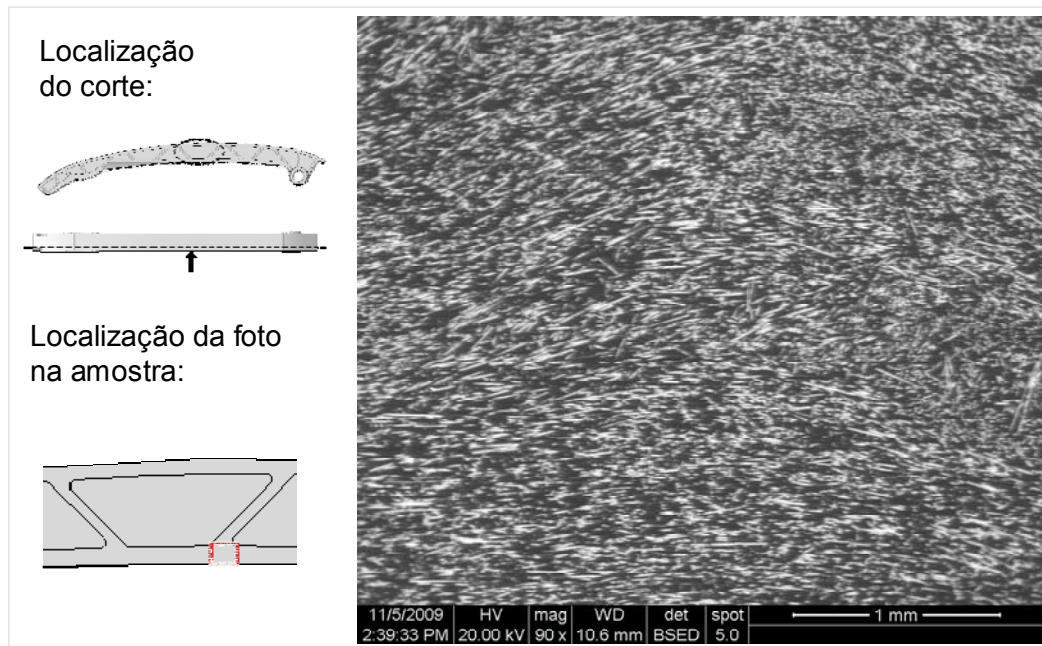
Corte 4 – Foto 1



39

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

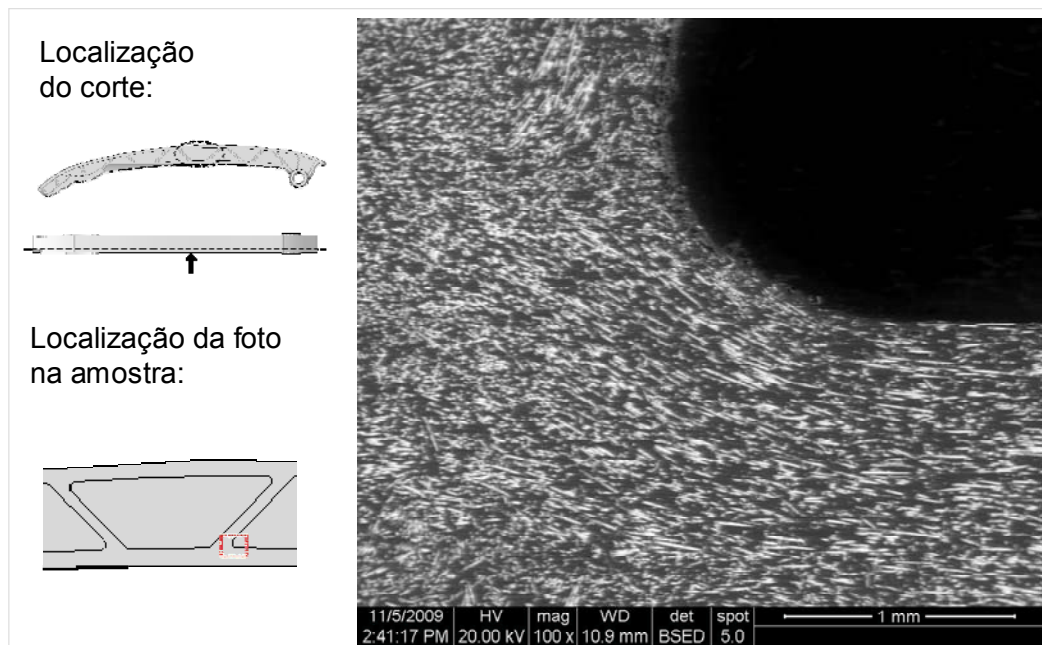
Corte 4 – Foto 2



40

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

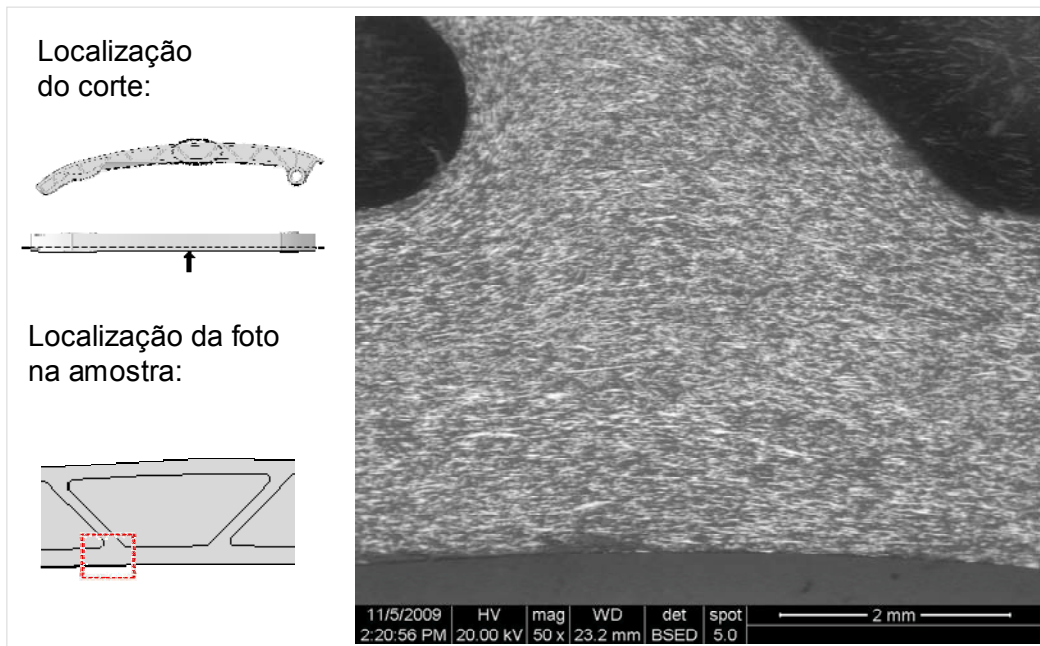
Corte 4 – Foto 3



41

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

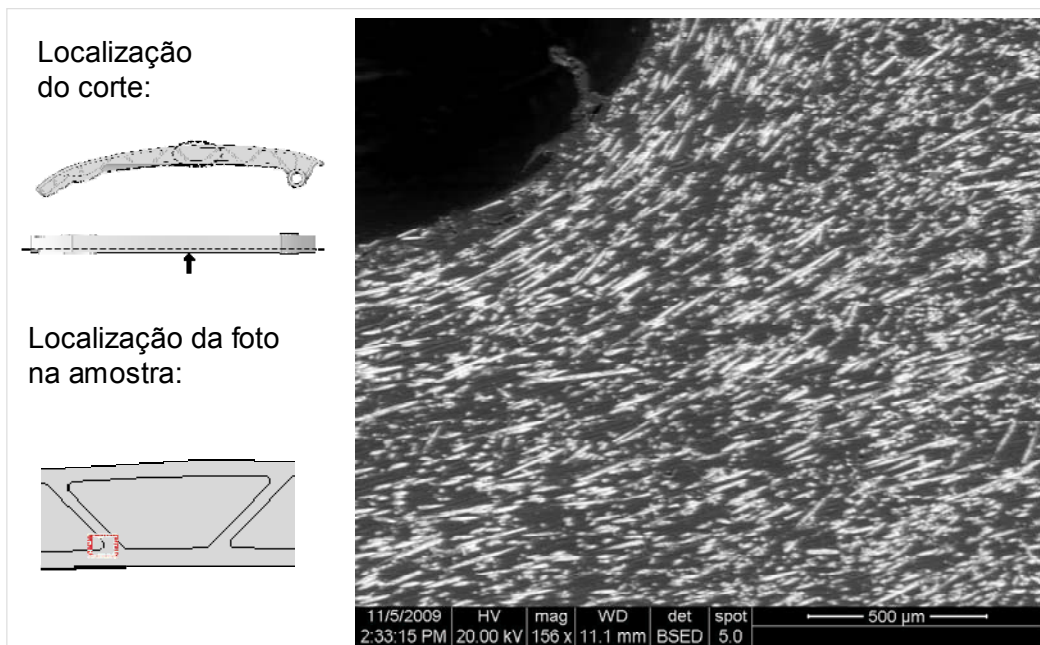
Corte 4 – Foto 4



42

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

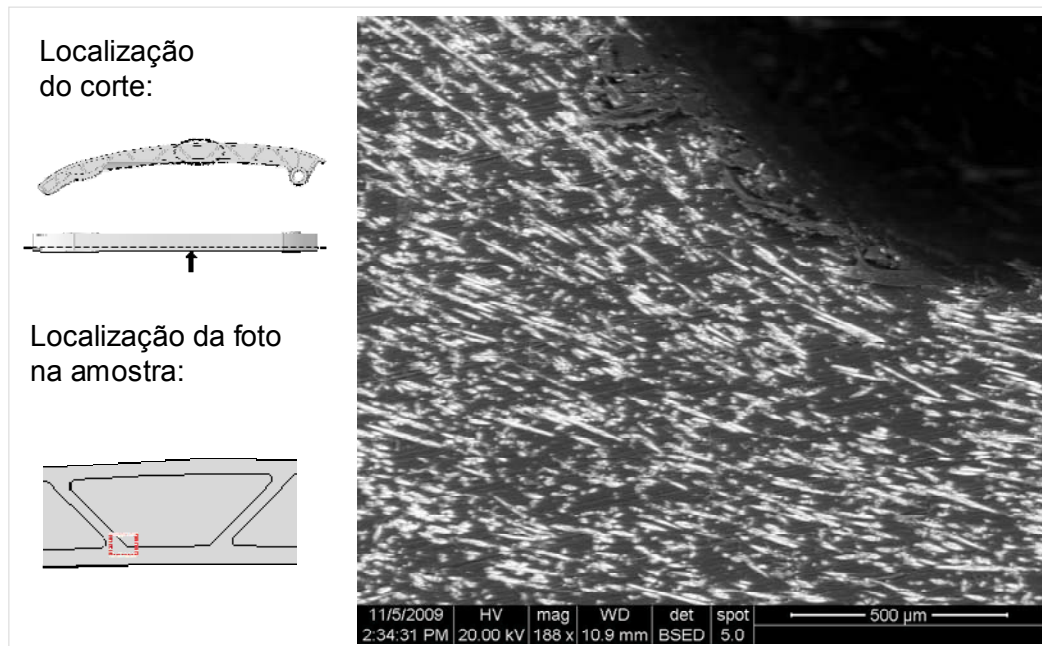
Corte 4 – Foto 5



43

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

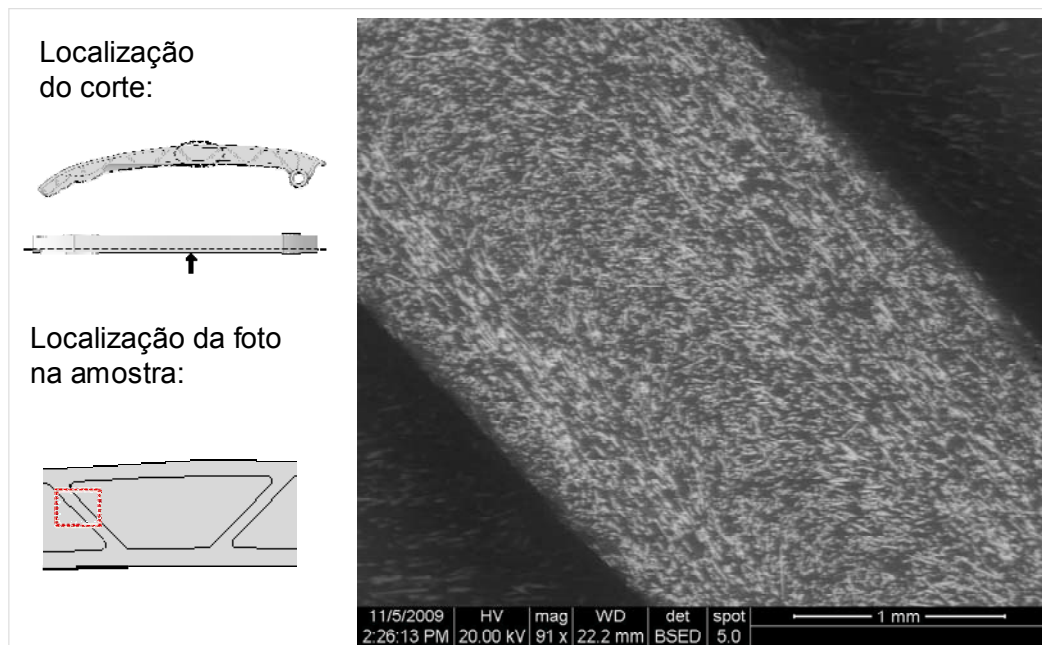
Corte 4 – Foto 6



44

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

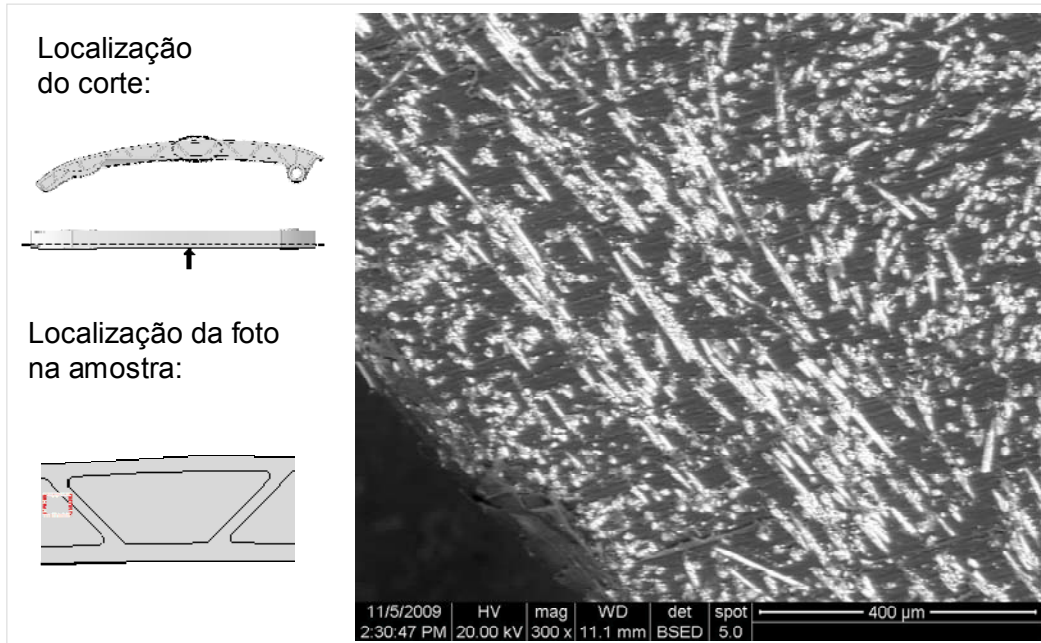
Corte 4 – Foto 7



45

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

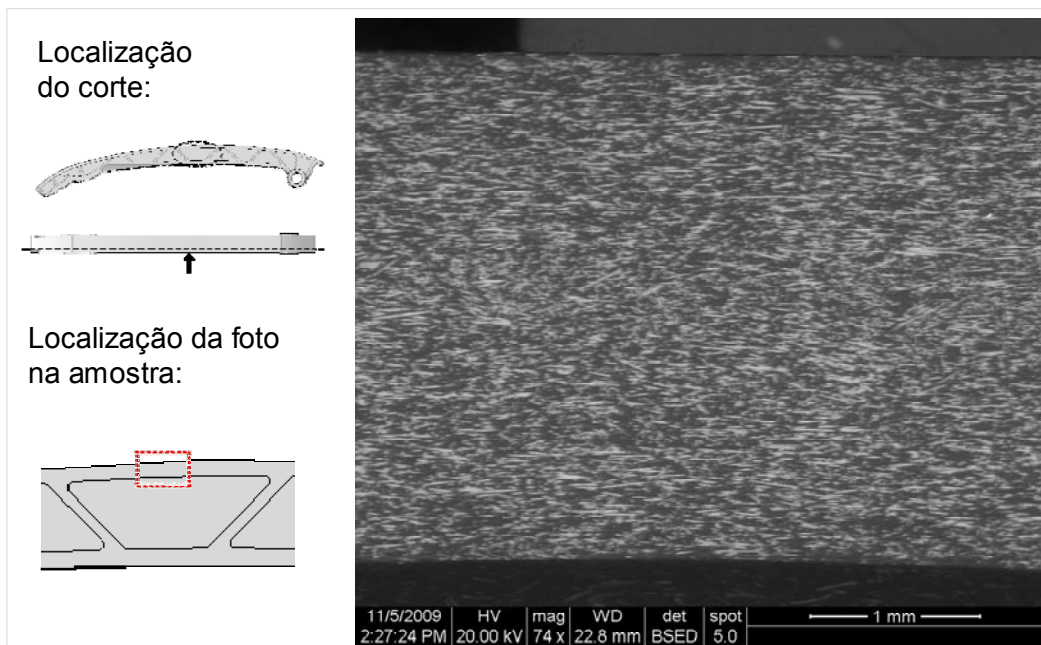
Corte 4 – Foto 8



46

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

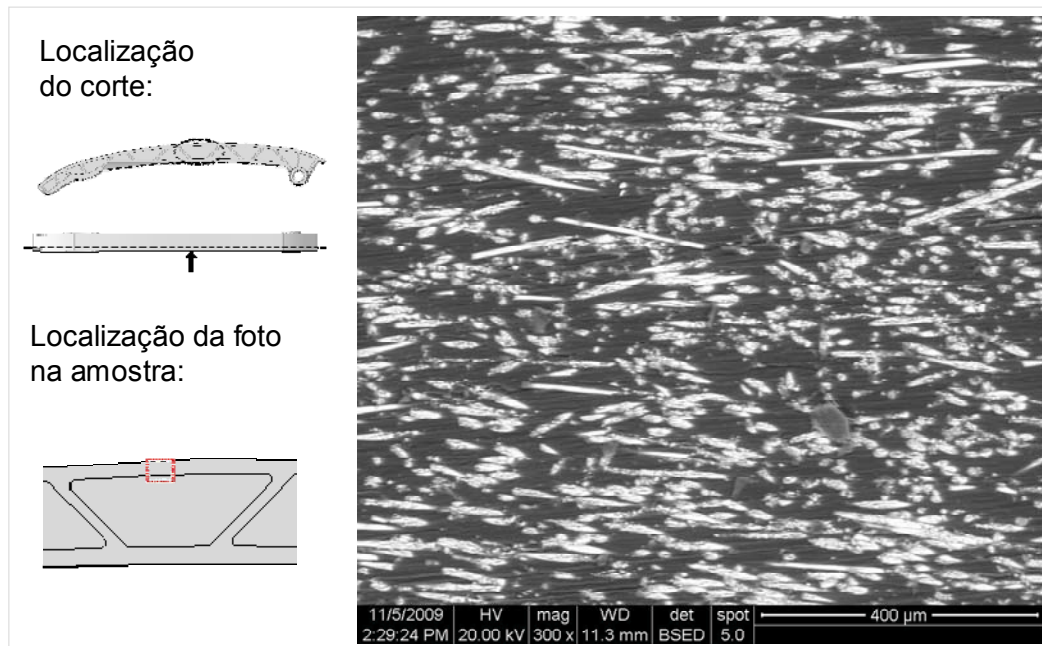
Corte 4 – Foto 9



47

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

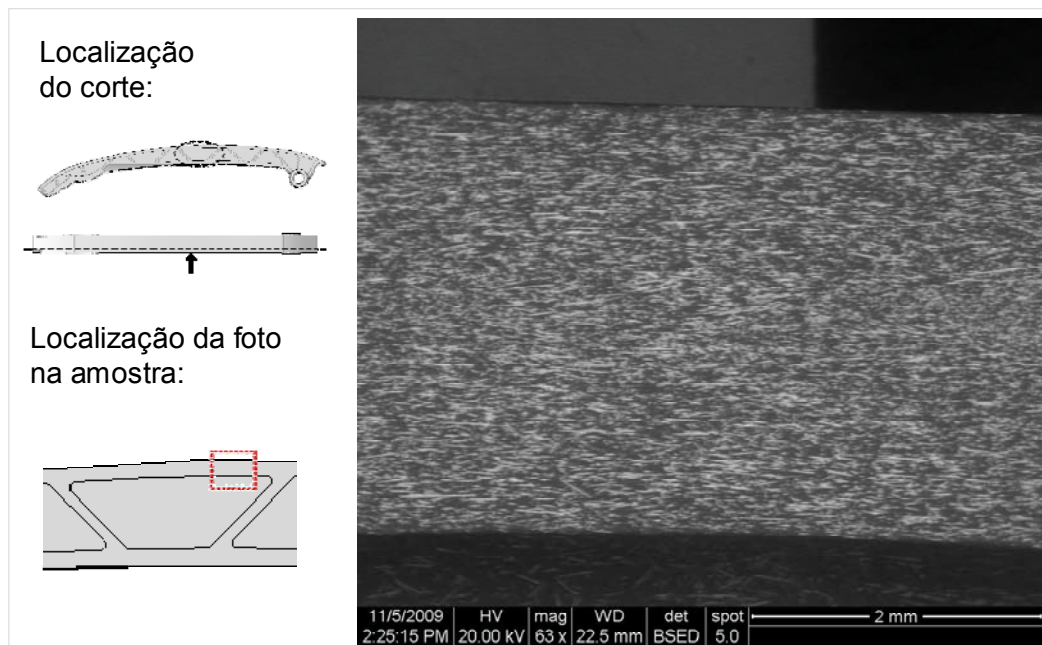
Corte 4 – Foto 10



48

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

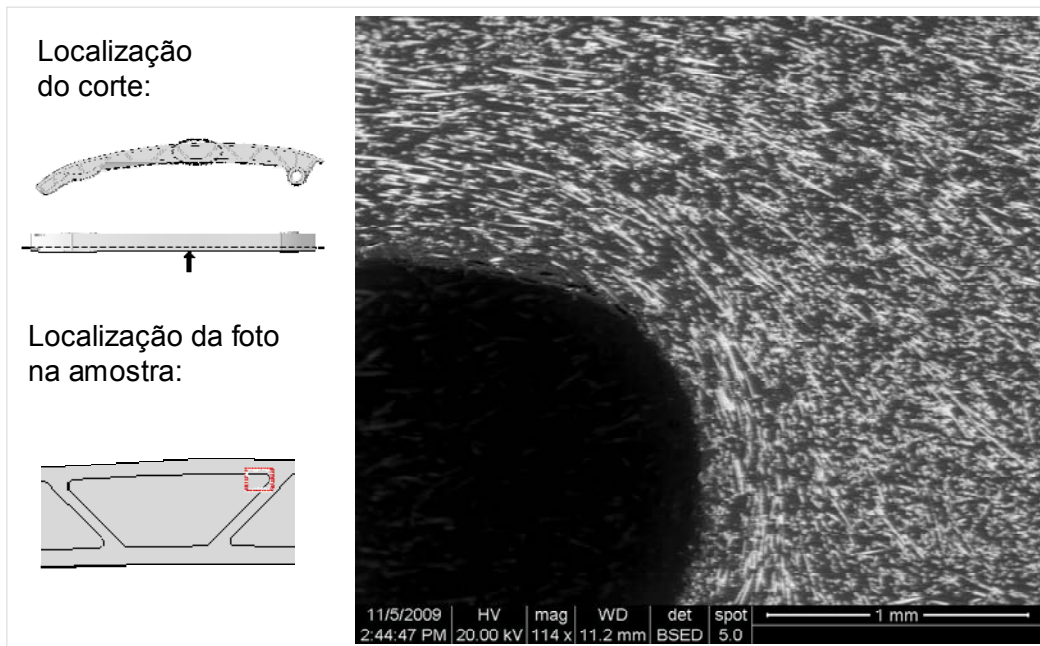
Corte 4 – Foto 11



49

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

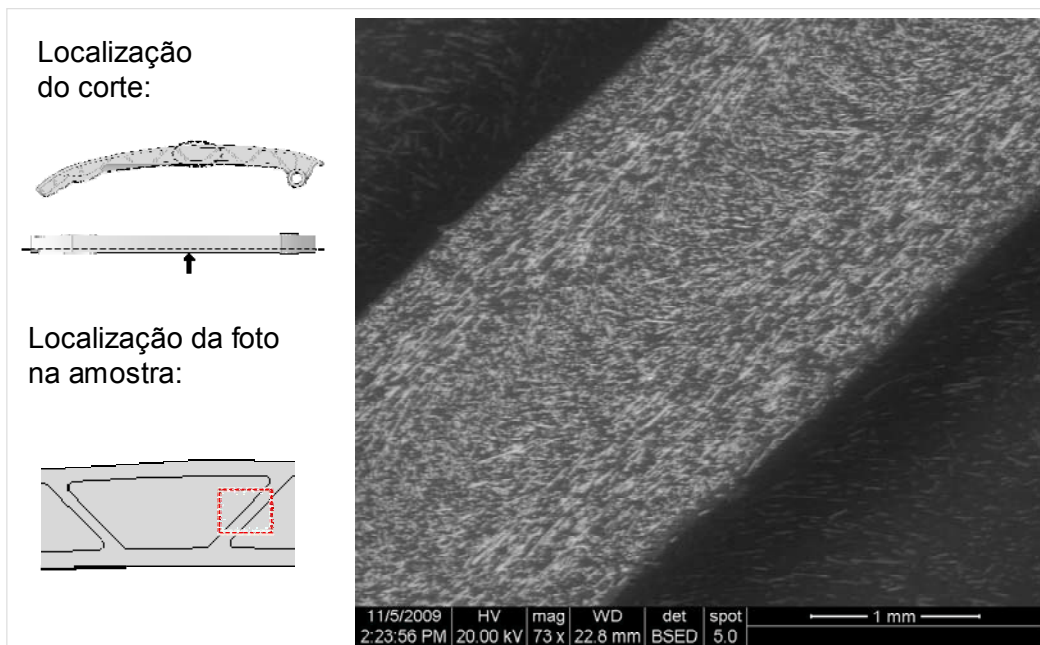
Corte 4 – Foto 12



50

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

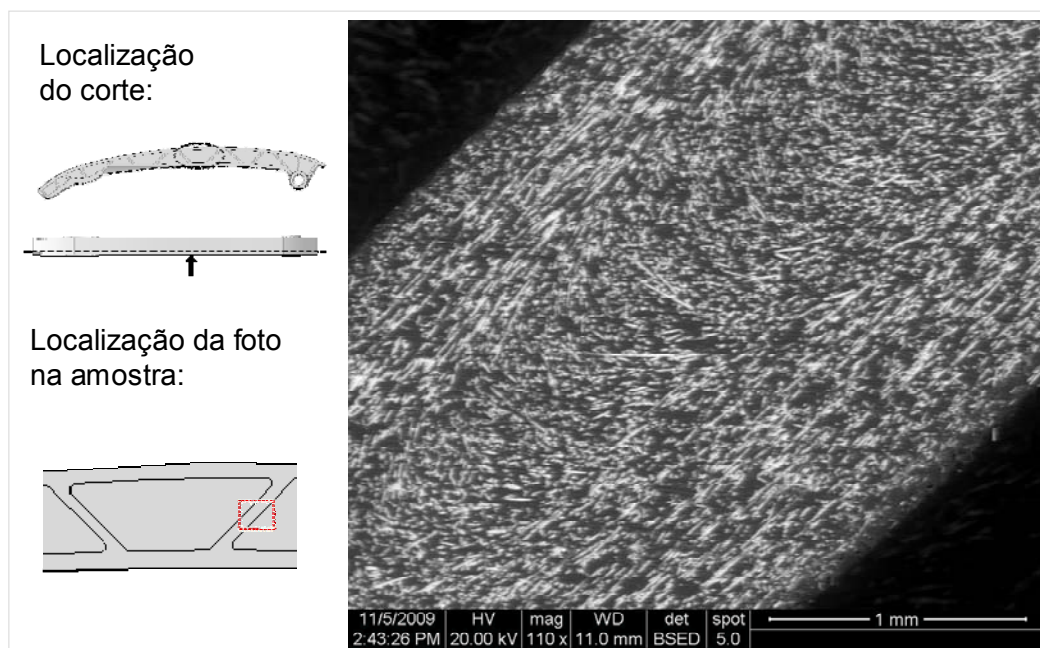
Corte 4 – Foto 13



51

SCHAEFFLER GROUP
AUTOMOTIVE

Corte 4 – Foto 14



APÊNDICE C

Ensaio Mecânico de Fluência no Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente



Creep Test

Guia do Sistema de Acionamento do Comando de Válvulas por Corrente

Viscoelastic Orthotropic Model
Final Report

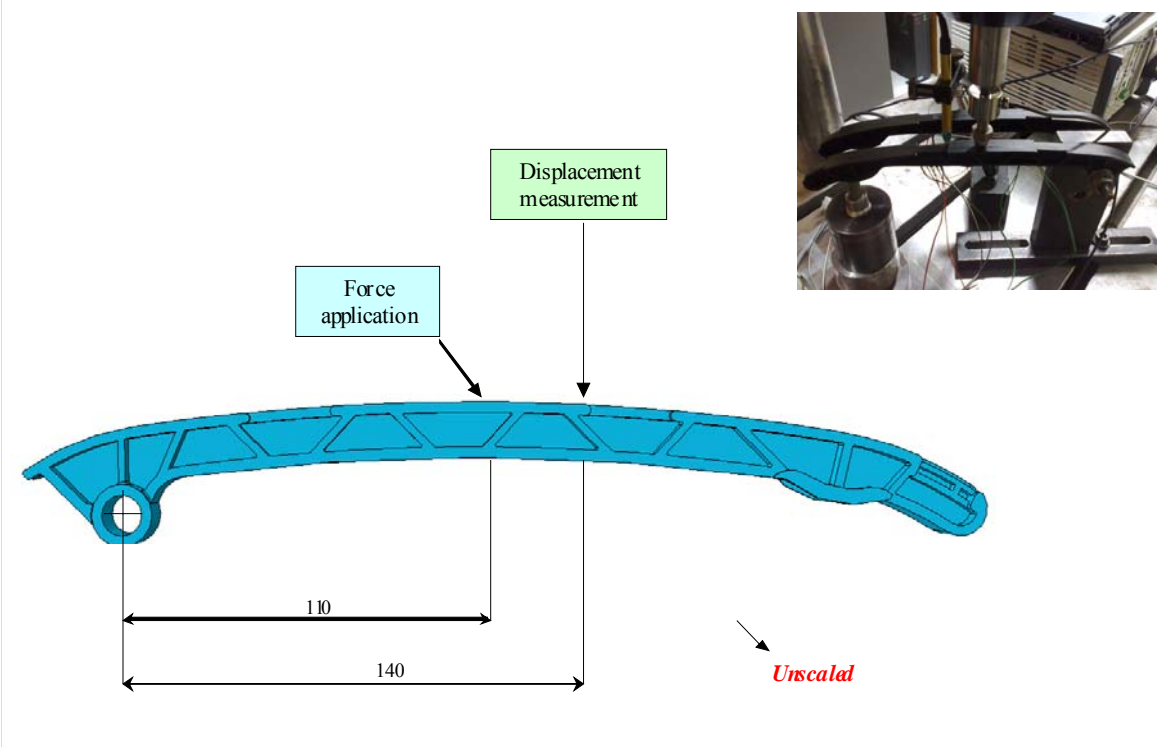
Experimental Setup

General View

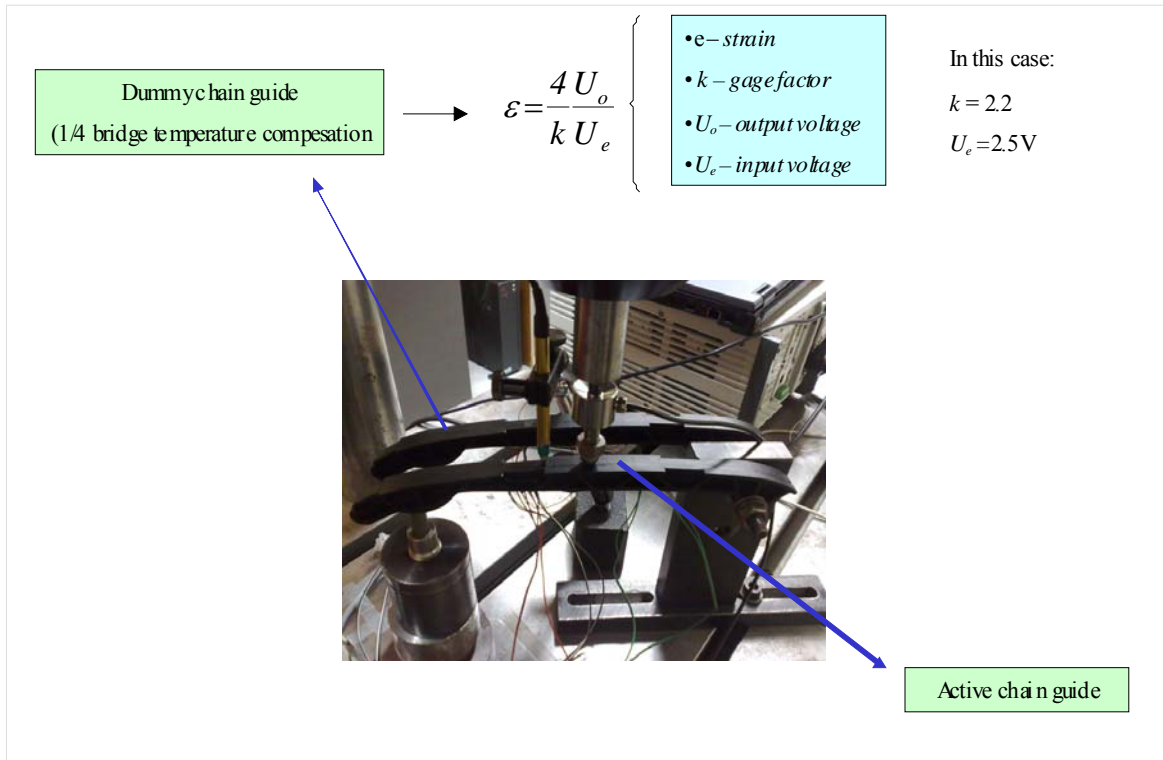


The diagram shows a central photograph of the experimental setup labeled "General View". Four blue arrows point from this central image to four smaller inset photographs. Each inset is labeled with a component name in a green box: "LoadCell" (top left), "LVDT (Displacement Sensor)" (top right), "Fixation" (bottom left), and "Tensioner" (bottom right). The "Fixation" inset shows a close-up of a metal component with a circular hole. The "Tensioner" inset shows a vertical metal rod with a circular base. A text box at the bottom center of the diagram states: "The data were stored using the data acquisition system: HBM MGC Plus and the software CatmanEasy."

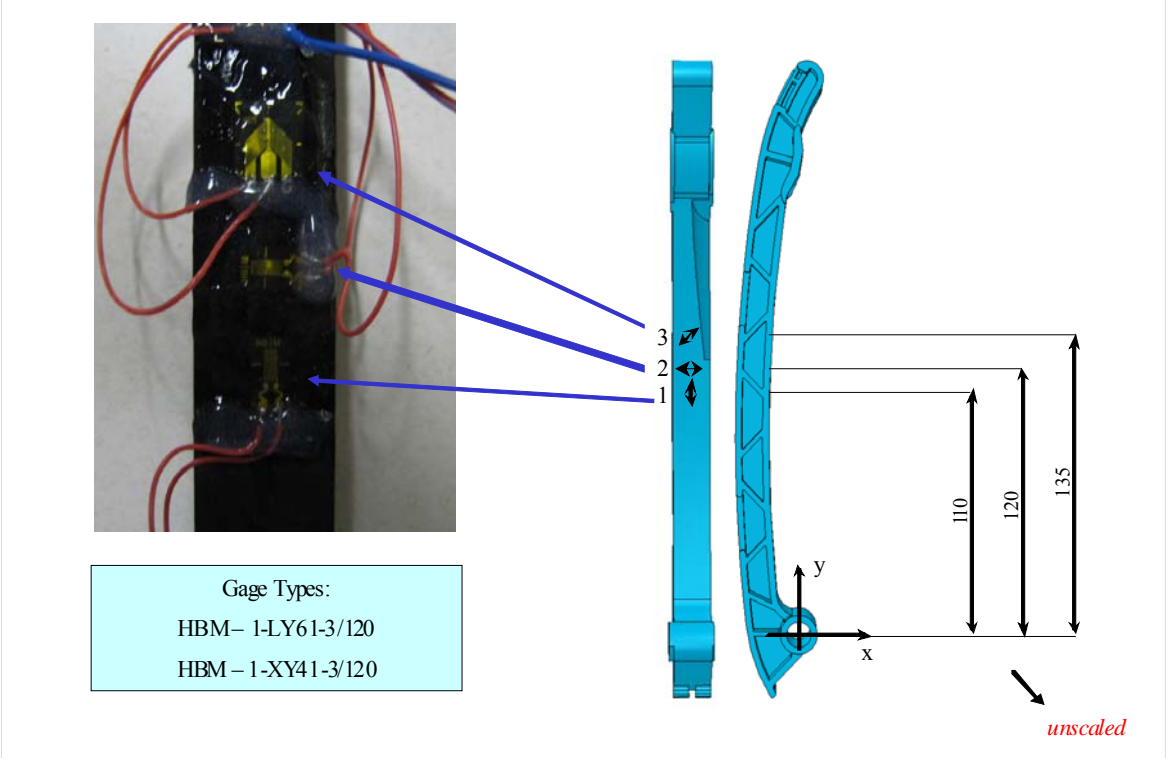
Experimental Setup Force application and displacement measurement



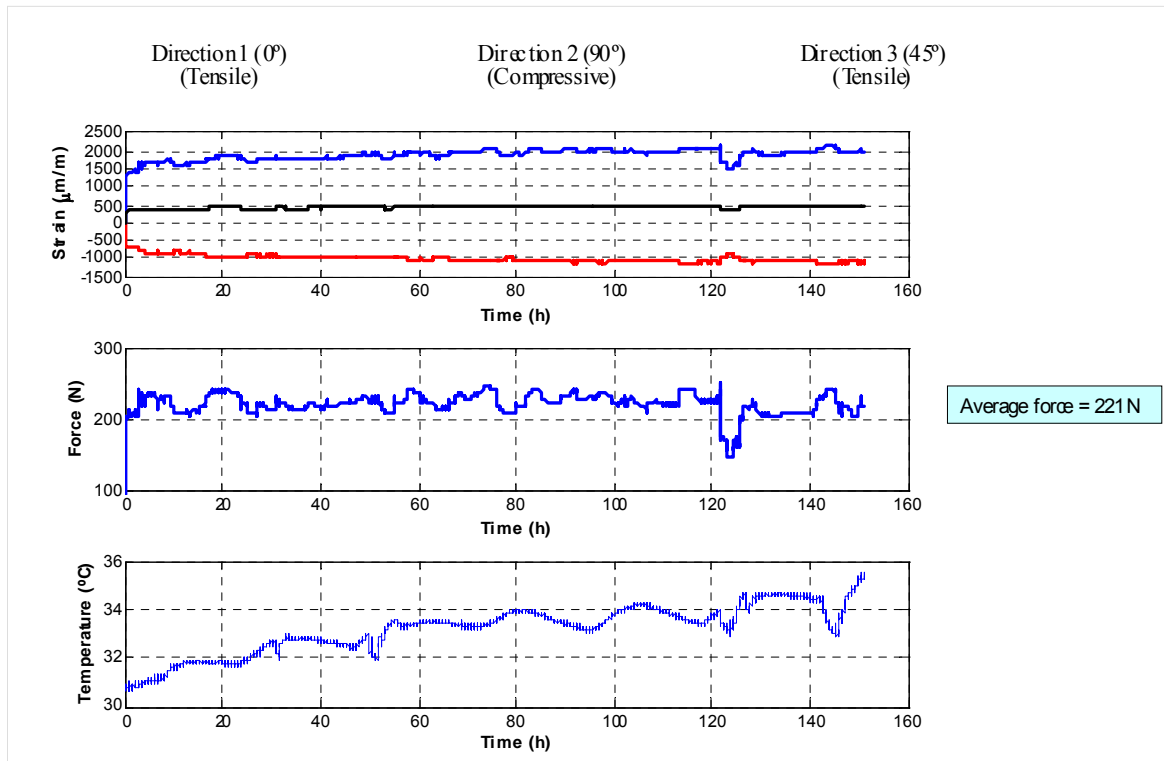
Experimental Setup General View



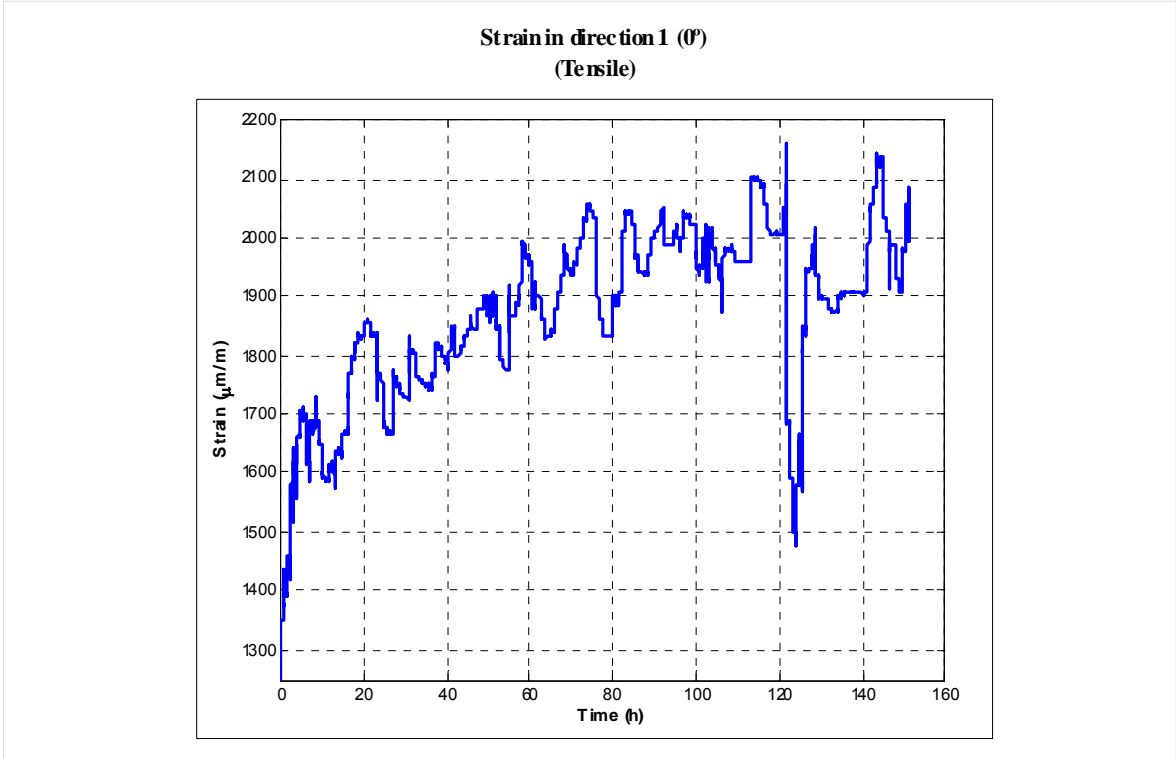
Experimental Setup Gages Positioning



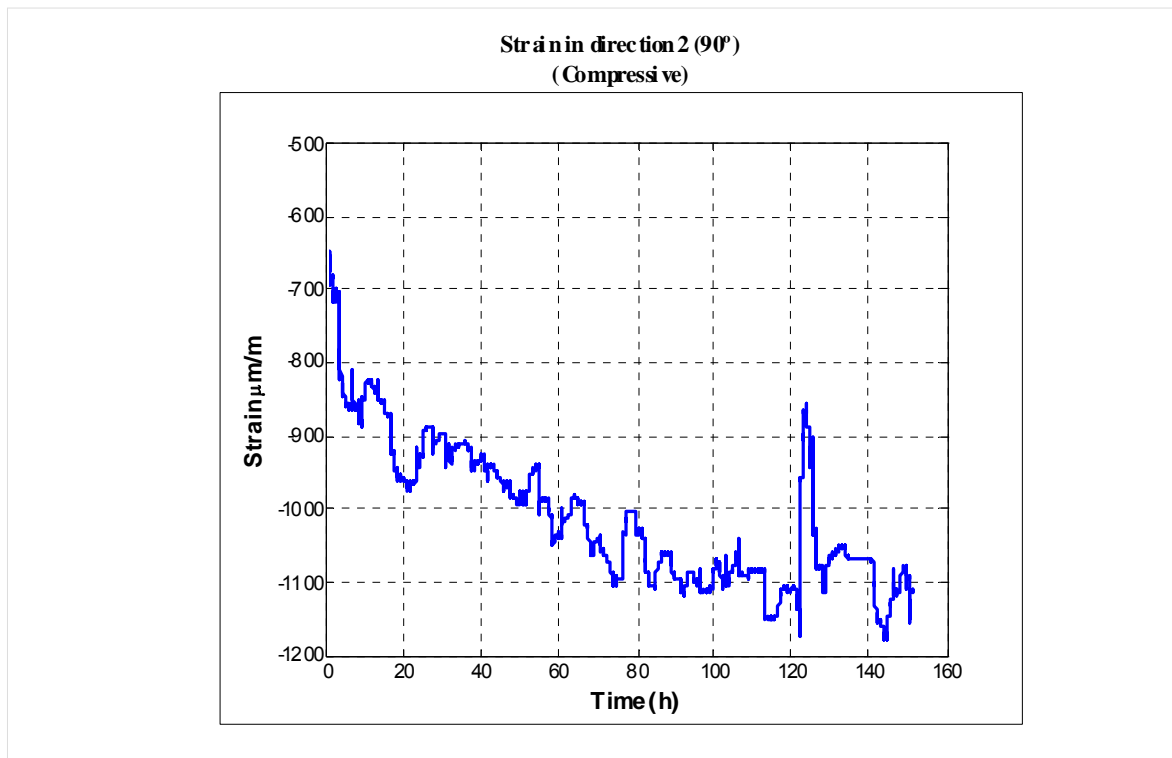
Test Results Strain, Force and Temperature



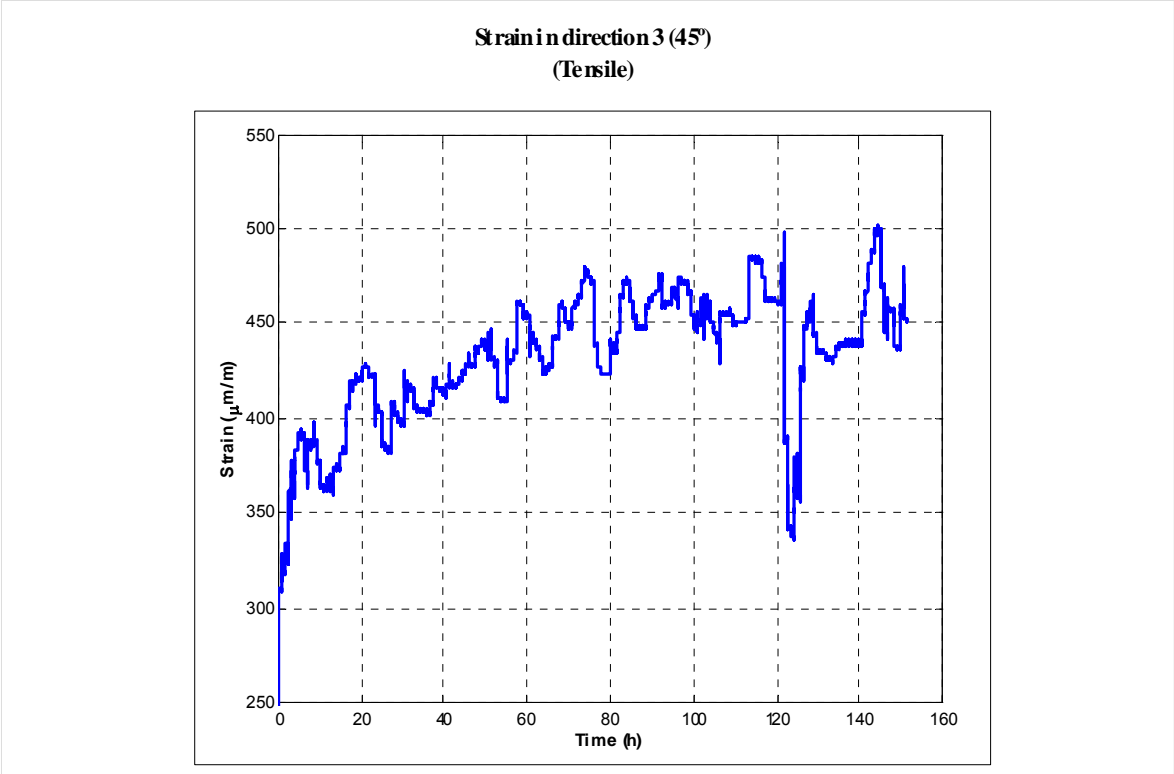
Test Results Strain - Direction 1



Test Results Strain - Direction 2



Test Results
Strain - Direction 3



Test Results Displacement

