CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
DANIEL BARDUZZI TAVARES

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE
CORPO DE PROVA UNIFICADO PARA ENSAIOS MECÂNICOS DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS INJETADOS.**

São Bernardo do Campo
2016

DANIEL BARDUZZI TAVARES

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE
CORPO DE PROVA UNIFICADO PARA ENSAIOS MECÂNICOS DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS INJETADOS.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Centro
Universitário FEI para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado
pelo Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi
Donato.

São Bernardo do Campo

2016

Tavares, Daniel Barduzzi.

Desenvolvimento e validação numérico-experimental de corpo de prova unificado para ensaios mecânicos de polímeros termoplásticos injetados. / Daniel Barduzzi Tavares. São Bernardo do Campo, 2016. 150 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi Donato.

1. Debalanceamento de termoplásticos. 2. Corpo de prova unificado. 3. Ensaios mecânicos. I. Donato, Gustavo Henrique Bolognesi, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Aluno: Daniel Barduzzi Tavares

Matrícula: 214304-8

Título do Trabalho: Desenvolvimento e validação numérico-experimental de corpo de prova unificado para ensaios mecânicos de polímeros termoplásticos injetados.

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi Donato

Data da realização da defesa: 25/08/2016

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 25 / 08 / 2016.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi Donato Ass.: _____

Prof.^a Dr.^a Adriana Martinelli Catelli de Souza Ass.: _____

Prof. Dr. Konstantinos Dimitriou Stavropoulos Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho a Deus e minha família,
por toda fonte de inspiração e motivação,
pilares para árdua e cotidiana luta.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder o precioso dom da vida, saúde e disposição.

A minha família, base fundamental e de suporte emocional e compreensão pelas ausências no período da realização deste trabalho, principalmente à minha esposa Rubia pelo companheirismo, cumplicidade e carinho em todos os momentos de tribulações, aos meus queridos pais, Sueli e Sr. Tavares pelo constante incentivo, aconselhamento e ensinamentos éticos, e também aos meus irmãos Telma e Fernando e aos meus sogros, Solange e Fred.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Donato, pelo grande apoio, disponibilidade, ensinamentos e incentivo, com sua postura crítica e condução motivadora que contribuíram diretamente para o enriquecimento deste trabalho e também pelo meu aprimoramento acadêmico / profissional.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco, Prof. Msc. Willian Naville, Prof. Dr. Baltus Bonse, Prof. Dra. Adriana M. C. de Souza pelo constante apoio desde o ingresso no programa de mestrado.

Ao Centro Universitário FEI, instituição a qual tenho grande carinho, pela bolsa concedida e por toda infraestrutura e disponibilidade de recursos.

Aos instrutores e funcionários do Centro de Laboratórios Mecânicos, em especial à Adelaide Bispo de Sá, Antonio Mirom, Douglas Oliveira, Edilson e José Maria, por toda contribuição.

A todos os companheiros que fiz ao longo do programa de mestrado, em especial Regis Barros, Leonardo Andrade, Rodrygo Moço, Eduardo Vittorini e Juliana Caruso, por todo o compartilhamento de conhecimento e opiniões construtivas.

A empresa Elevadores Atlas Schindler SA, por gentilmente ceder um encoder para a medição da taxa de carregamento angular.

A empresa TOLEDO Brasil Indústria de Balanças Ltda., pela instrumentação realizada com strain-gages no extensômetro desenvolvido pelo presente trabalho.

A todos que, de alguma forma me apoiaram durante a realização deste projeto, meus mais sinceros agradecimentos.

“Count what is countable, measure what is measurable and what is not measurable make measurable”

Galileo Galilei (Rossi, 2014)

RESUMO

Os componentes poliméricos termoplásticos de engenharia são em sua grande maioria produzidos por injeção e no geral são submetidos a carregamentos multiaxiais, tornando necessário conhecer as propriedades mecânicas para diferentes formas de carregamentos com o objetivo de otimizar ao máximo o produto em desenvolvimento. Porém, o panorama atual das normas técnicas define a realização de ensaios de tração, compressão e torção com corpos de provas distintos e metodologias não diretamente comparáveis, dadas as diferentes geometrias, volumes amostrados e os diferentes campos de tensões nos corpos de prova. Portanto, é de potencial relevância obter um corpo de prova com geometria unificada que possa ser utilizado para todos os tipos de ensaios mencionados anteriormente, e desta forma promover a comparabilidade de resposta dos polímeros para diferentes carregamentos, o que permitirá adotar uma metodologia robusta para o estudo do desbalanceamento destes materiais e do seu emprego em componentes complexos reais. Seguindo trabalhos anteriores do mesmo grupo de pesquisa, que efetuaram estudos exploratórios da existência de desbalanceamento nas propriedades dos polímeros e que fizeram propostas numéricas de novas geometrias de corpos de prova, este trabalho objetiva a proposição e validação de um corpo de prova unificado que possa ser injetado e atenda aos ensaios de tração, compressão e torção, com eficiência e repetibilidade. A metodologia envolveu o projeto do corpo de prova, simulação de elementos finitos para garantir uma geometria viável, projeto e construção de um molde de injeção, realização do processo de injeção de termoplásticos usuais e ensaios de tração, compressão e torção, com foco na validação final. Os resultados obtidos por meio das simulações numéricas da geometria unificada demonstraram uniformidade dos campos de tensões até próximo ou acima da tensão de instabilidade. O molde de injeção proposto atendeu aos resultados objetivados, com isenção de bolhas na região útil das amostras. Os ensaios experimentais demonstraram que a geometria unificada foi capaz de atender aos ensaios propostos, com repetibilidade e reprodutibilidade, tornando também possível a determinação do desbalanceamento com elevado grau de precisão.

Palavras-chave: Desbalanceamento de termoplásticos. Corpo de prova unificado. Ensaios mecânicos.

ABSTRACT

Thermoplastic components are, in most cases, produced by injection and can be submitted to multiaxial loading. This context encourages the accurate determination of the mechanical properties under varying loading regimes in order to support structural optimization efforts related to the product. However, current standards define different procedures for tensile, compression and torsion tests with distinct specimens and methodologies; properties are therefore not directly comparable due to different geometries, sampled volumes and stress fields within specimens. Consequently, it is potentially relevant to obtain a specimen with unified geometry, able to perform all tests as mentioned previously and thus guarantee the response comparability of thermoplastics under varying loadings. Based on previous works from the same research group, that performed exploratory studies in order to verify the existence of uneven mechanical properties and also carried out numeric proposal for new specimen geometries, this work intends to propose and validate a unified specimen which is feasible to be produced by injection and fulfill tension, compression and torsion tests with greater efficiency and repetibility. The methodology includes refined finite element simulations in order to ensure uniform stress fields in all tests. In addition, includes the design and construction of an injection mold and mechanical tests with focus on the final validation. The results from the numerical simulations revealed the uniformity of stress fields until or above the prescribed stress instability. The designed injection mold was successful considering the requirements, and provided samples free of bubbles in the useful region. The results of experimental tests proved that unified geometry could be employed to all desired tests, with good level of repeatability and reproducibility, making possible to determine accurate mechanical properties and the unevenness level to support mechanical design.

Keywords: Unevenness of thermoplastics. Unified specimen. Mechanical testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento histórico das resinas termoplásticas.....	22
Figura 2 - Principais produtores mundiais de resinas termoplásticas	23
Figura 3 - Aplicações dos polímeros	23
Figura 4 - Principais setores consumidores de transformados plásticos	24
Figura 5 - Processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos	25
Figura 6 - Módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura.	30
Figura 7 - Deformação elástica de um termoplástico amorfo acima de sua Tg.	31
Figura 8 - Curvas representativas do ensaio de tração para polímeros termoplásticos amorfos.....	32
Figura 9 - Curvas representativas - polímeros termoplásticos amorfos próximo da TG.	33
Figura 10 - Estágios da deformação plástica de um polímero semicristalino;.....	34
Figura 11 - Surgimento do craze.	35
Figura 12 - Proporções na formação de um <i>craze</i>	35
Figura 13 - Deformação de um termoplástico amorfo sob carga compressiva.	36
Figura 14 - Estado triplo de tensões.....	37
Figura 15 - Tensões principais.....	39
Figura 16 - Representação dos planos octaédricos.	42
Figura 17 - Lócus de falha de Tresca.....	44
Figura 18 - Lócus de falha de von Mises.	45
Figura 19 - Comparação entre os loci de falha de Tresca vs. von Mises.....	46
Figura 20 - Desbalanceamento de termoplásticos baseado na tensão limite de resistência mecânica.....	48
Figura 21 - Desbalanceamento de termoplásticos baseado no módulo de elasticidade.....	48
Figura 22 - Loci de falha dos critérios modificados de von Mises, aplicáveis aos termoplásticos.....	49
Figura 23 - Comparação entre o critério de escoamento de von Mises e os critérios conicamente e parabolicamente modificados para parâmetro <i>m</i> similar.	50
Figura 24 - Comparação entre dados experimentais - Critérios de von Mises / Parabolicamente modificado / Conicamente modificado	50
Figura 25 - Curvas típicas tensão vs. deformação para polímeros termoplásticos.	54
Figura 26 - Módulo secante vs. deformação para o PEAD	55
Figura 27 - Efeito da taxa de carregamento no ensaio de tração (PEAD)	56

Figura 28 - Dimensões de corpos de prova de ensaio de tração.....	57
Figura 29 - Exemplo de geometria de corpo de prova segundo ASTM D695.....	59
Figura 30 - Comportamentos indesejados durante o ensaio de compressão.....	60
Figura 31 - Corpo de prova de compressão, proposto de Caruso.....	61
Figura 32 - Corpo de prova de compressão, proposta de Odom e Adams.....	61
Figura 33 - Estados de tensões em torção	63
Figura 34 - Corpo de prova de torção	64
Figura 35 - Corpo de prova - Dimensões iniciais para estudo.	67
Figura 36 - Geometria unificada - Dimensões em mm (desenho fora de escala).....	70
Figura 37 - Curvas tensão vs. deformação considerando grandezas verdadeiras para POM e PEAD.....	71
Figura 38 - Malha 3D gerada no corpo de prova unificado no MSC Patran x64.....	72
Figura 39 - Geometria unificada apresentando graus de liberdade da superfície cilíndrica externa à cabeça em y e z para tração, no MSC Patran x64.....	73
Figura 40 - Geometria unificada com graus de liberdade da superfície cilíndrica externa à cabeça da amostra em y e z para tração, e carregamento aplicado na extremidade esquerda, para tração no MSC Patran x64.	73
Figura 41 - Resultado da simulação do carregamento de tração para o PEAD.....	76
Figura 42 - Resultado da simulação do carregamento de tração para o POM.	76
Figura 43 - Resultado da simulação do carregamento de compressão para o PEAD.....	78
Figura 44 - Resultado da simulação do carregamento em compressão para o POM.....	78
Figura 45 - Resultado da simulação do carregamento torcional para o PEAD.....	80
Figura 46 - Resultado da simulação do carregamento torcional para o POM.....	80
Figura 47 - Resultado da simulação do carregamento em flambagem para o POM.	82
Figura 48 - Resultado da simulação do carregamento de flambagem para o PEAD.....	82
Figura 49 - Tensão crítica de Euler em função do módulo de elasticidade	83
Figura 50 - Projeto do canal de alimentação (desenho fora de escala - dimensões em mm) ...	86
Figura 51 - Molde - placa móvel (gaveta).....	87
Figura 52 - Molde - placa fixa	88
Figura 53 - Injetora Battenfeld HM 60/350.....	89
Figura 54 - Corpos de prova injetados.	91
Figura 55 - Corpos de prova de PC.....	91
Figura 56 - Equipamento universal de ensaios MTS 810, célula de carga e adaptação na fixação.....	92

Figura 57 - Extensômetro $L_0=5$ mm	93
Figura 58 - Ensaio de tração	96
Figura 59 - Ensaio de compressão	96
Figura 60 - Determinação das tensões de escoamento por meio dos <i>offsets</i> definidos.....	97
Figura 61 - Equipamento TQ - Ensaio de torção	99
Figura 62 – Equipamentos utilizados para o ensaio de torção.	99
Figura 63 - Curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira para o PEBD.....	101
Figura 64 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PEAD.	103
Figura 65 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PP.....	105
Figura 66 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PA 6.	107
Figura 67 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PMMA.	108
Figura 68 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PC.	110
Figura 69 - Percentual de desvio para todas as propriedades em tração.....	112
Figura 70 - Tensão limite de escoamento verdadeira em tração, média e desvio padrão para todos os <i>offsets</i>	113
Figura 71 - Percentual de desvio para todas as propriedades em compressão	114
Figura 72 - Tensão limite de escoamento verdadeira em compressão, média e desvio padrão para todos os <i>offsets</i>	115
Figura 73 - Curvas tensão de cisalhamento vs. ângulo de deformação, para os ensaios de torção.....	116
Figura 74 - Comparativo entre termoplásticos ensaiados em torção	117
Figura 75 - Corpos de prova após ensaios mecânicos.	118
Figura 76 - Comparativo tração vs. compressão, para o PEBD.	119
Figura 77 - Comparativo tração vs. compressão, para o PEAD.	120
Figura 78 - Comparativo tração vs. compressão, para o PP.....	120
Figura 79 - Comparativo tração vs. compressão, para o PA6.	120
Figura 80 - Comparativo tração vs. compressão, para o PMMA.	121
Figura 81 - Comparativo tração vs. compressão, para o PC.	121
Figura 82 - Desbalanceamento, propriedades verdadeiras em função de cada material.....	123
Figura 83 - Desbalanceamento em função da tensão limite de escoamento verdadeira.	124
Figura 84 - Envelope de falha de Mohr-Coulomb parabólico.....	125
Figura 85 - Curva comparativa numérico vs. experimental - Ensaio de torção em PMMA. .	126
Figura 86 - Projeto detalhado do extensômetro	143
Figura 87 - Detalhamento da extremidade de contato da garra do extensômetro	144

Figura 88 - Vista lateral da lâmina, imposto 2,5 mm de deslocamento - MEF.....	144
Figura 89 - Simulação lâmina instrumentada - MEF.....	145
Figura 90 - Extensômetro $L_0=5$ mm.....	145
Figura 91 - Calibração do extensômetro, por meio de tambor micrométrico	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões de corpos de prova de ensaio de tração dos tipos I, II, III, IV e V.....	57
Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova #340 proposto por Caruso (2015).....	67
Tabela 3 - Parâmetros básicos assumidos para dimensionamento da geometria unificada	69
Tabela 4 - Dimensões propostas para o corpo de prova unificado	69
Tabela 5 - Tensões consideradas de instabilidade para avaliação dos resultados numéricos obtidos.	72
Tabela 6 - Deslocamentos finais aplicados nas garras móveis das simulações das malhas 3D.....	74
Tabela 7 - Tensões críticas (mínimas) para que ocorra flambagem nos três primeiros modos possíveis para os materiais de baixa rigidez (PEAD) e o de alta rigidez (POM) para a geometria unificada.	81
Tabela 8 - Comparativo entre índice de esbeltez vs. índice de esbeltez crítico.	84
Tabela 9 - Tensões de flambagem previstas analiticamente usando a teoria de Euler e utilizando o método dos elementos finitos.....	85
Tabela 10 - Parâmetros de injeção empregados no trabalho	90
Tabela 11 - Temperatura das zonas de aquecimento e temperatura do molde.....	90
Tabela 12 - Determinação da velocidade de ensaio	94
Tabela 13 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PEBD.	102
Tabela 14 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PEBD.	103
Tabela 15 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PEAD.	104
Tabela 16 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PEAD.	104
Tabela 17 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PP.....	106
Tabela 18 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PP.	106
Tabela 19 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PA 6.	107
Tabela 20 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PA 6.	108
Tabela 21 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PMMA.	109
Tabela 22 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PMMA.	109
Tabela 23 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PC.	111
Tabela 24 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PC.....	111
Tabela 25 - Resultados do cálculo do desbalanceamento para todos os materiais.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST: Associação Brasileira do Plástico

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS: acrilonitrila butadieno estireno

ASTM: *American Society for Testing Materials* (Sociedade Americana de Testes de Materiais)

CP: corpo de prova

CS: coeficiente de segurança

EPD: estado plano de deformação

EPT: estado plano de tensão

ETT: estado triplo de tensão

EVA: etileno vinil acetato

MEF: método dos elementos finitos

NAFTA: *North American Free Trade Agreement* (Tratado Norte Americano de Livre Comércio)

PA: poliamida (Nylon)

PC: policarbonato

PEAD: polietileno de alta densidade

PEBD: polietileno de baixa densidade

PET: politereftalato de etileno

PMMA: polimetacrilato de metila

PP: polipropileno

PS: poliestireno

PVC: policloreto de vinila

PTFE: politetrafluoretileno

SAN: estireno acrilinitrilo

Tg: temperatura de transição vítrea

Tm: temperatura de amolecimento

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia latina

A = área da seção transversal

A_d = área central do corpo de prova

A_D = área da cabeça do corpo de prova

d = diâmetro da seção de um corpo de prova (área útil)

D = diâmetro total corpo de prova (cabeça)

e_{fl} = deformação de flambagem

$e_{(Smáx)}$ = deformação para o ponto de máxima tensão

$e_{máx}$ = deformação máxima

E = módulo de elasticidade

E_t = módulo de elasticidade à tração

F = força que atua perpendicularmente à seção transversal

G = módulo de elasticidade transversal

I = momento de inércia

I_1, I_2, I_3 = invariantes de tensão

J_1, J_2, J_3 = invariantes de tensão (parcela deviatórica)

J = momento polar de inércia

L = comprimento total

L_{fl} = comprimento de flambagem

L_1 = comprimento da seção de maior diâmetro do corpo de prova (cabeça)

L_2 = comprimento da seção de menor diâmetro do corpo de prova (área útil)

L_4 = distância entre *grips* no corpo de prova

m = razão entre limite de escoamento à compressão e à tração, em módulo (desbalanceamento)

P = Carga aplicada

R = raio de concordância corpo de prova

$r_{giração}$ = raio de giração

$S_{(emáx)}$ = tensão no ponto onde ocorreu a máxima deformação

S_{fl} = tensão de flambagem

S_{LE} = tensão de escoamento

S_{LE-C} = tensão de escoamento na compressão

S_{LE-T} = tensão de escoamento na tração

$S_{LE\ 0.2\%}$ = tensão de escoamento calculada em *offset* de 0,2%

$S_{LE\ 0.5\%}$ = tensão de escoamento calculada em *offset* de 0,5%

$S_{LE\ 1\%}$ = tensão de escoamento calculada em *offset* de 1%

$S_{LE\ 2\%}$ = tensão de escoamento calculada em *offset* de 2%

S_{LR} = tensão limite de resistência

$S_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima

S_{RUP} = tensão de ruptura / fratura do corpo de prova

T = tensor das tensões

t = Espessura da viga

y_{max} = flecha máxima

x, y, z = coordenadas de eixos de referência

Simbologia grega

β = parâmetro de sensibilidade hidrostática

ε = deformação verdadeira

$\varepsilon_{(Smax)}$ = deformação verdadeira calculada para a máxima tensão de engenharia

λ = índice de esbeltez

λ_c = índice de esbeltez crítico

θ = ângulo de rotação

ν = coeficiente de Poisson

ρ = densidade do material

σ = tensão normal verdadeira

$\sigma_{critico}$ = tensão crítica de Euler (elástica) para extremidades bi engastadas

σ_0 = tensão normal crítica - tensão de escoamento

σ_{eq_t} = tensão equivalente de Tresca

σ_{eq_vM} = tensão equivalente de von Mises

σ_{eq_MCp} = tensão equivalente de Mohr-Coulomb parabólico

σ_f = tensão limite de fratura verdadeira / tensão de ruptura

σ_{fl} = tensão de flambagem verdadeira

σ_{ij} = tensão normal no plano i e direção j

σ_{inst} = tensão de instabilidade, na estricção ou fratura das amostras

σ_{LE} = tensão limite de escoamento a tração verdadeira

$\sigma_{LE\ 0.2\%}$ = tensão de escoamento verdadeira calculada em *offset* de 0,2%

$\sigma_{LE\ 0.5\%}$ = tensão de escoamento verdadeira calculada em *offset* de 0,5%

$\sigma_{LE\ 1\%}$ = tensão de escoamento verdadeira calculada em *offset* de 1%

$\sigma_{LE\ 2\%}$ = tensão de escoamento verdadeira calculada em *offset* de 2%

$\sigma_{LE-Compressão}$ = tensão limite de escoamento a compressão verdadeira

$\sigma_{LE-Tração}$ = tensão limite de escoamento a tração verdadeira

σ_{oct} = tensão normal octaédrica

$\sigma_{(smax)}$ = tensão verdadeira calculada em função da máxima tensão de engenharia

σ_x = tensão normal no plano de normal x quando na direção x

σ_y = tensão normal no plano de normal y quando na direção y

σ_z = tensão normal no plano de normal z quando na direção z

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensões normais principais

τ = tensão de cisalhamento

τ_{ij} = tensão de cisalhamento no plano i e direção j

τ_{oct} = tensão de cisalhamento octaédrica

$\tau_{oct_atuante}$ = tensão de cisalhamento octaédrica atuante

$\tau_{oct_critico}$ = tensão de cisalhamento octaédrica crítica

τ_{xy} = tensão de cisalhamento no plano x e direção y

τ_{xz} = tensão de cisalhamento no plano x e direção z

τ_{yx} = tensão de cisalhamento no plano y e direção x

τ_{yz} = tensão de cisalhamento no plano y e direção z

τ_{zx} = tensão de cisalhamento no plano z e direção x

τ_{zy} = tensão de cisalhamento no plano z e direção y

$\tau_0\ crítica$ = tensão de cisalhamento crítica

τ_{max} = tensão de cisalhamento máxima atuante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	EVOLUÇÃO E PANORAMA ATUAL.....	21
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	26
2	OBJETIVOS.....	28
3	REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
3.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TERMOPLÁSTICOS	29
3.1.1	Comportamento elástico - micromecanismo	29
3.1.1.1	<i>Abordagem da energia elástica.....</i>	<i>30</i>
3.1.1.2	<i>Abordagem da entropia elástica.....</i>	<i>31</i>
3.1.2	Comportamento plástico - micromecanismo	31
3.1.2.1	<i>Amorfo.....</i>	<i>32</i>
3.1.2.2	<i>Semicristalino</i>	<i>33</i>
3.1.3	Micromecanismos associados à fratura	34
3.1.3.1	<i>Escoamento por bandas de cisalhamento</i>	<i>36</i>
3.2	TÓPICOS SELECIONADOS DO ESTADO TRIPLO DE TENSÕES (ETT)	37
3.3	CRITÉRIOS DE FALHA E ESCOAMENTO.....	41
3.3.1	Critério de Tresca	41
3.3.2	Critério de von Mises.....	42
3.3.3	Lócus de falha de Tresca	43
3.3.4	Lócus de falha de von Mises	44
3.3.5	Comparativo dos loci de falha.....	45
3.3.6	Critérios modificados - materiais desbalanceados	46
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS PARA MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS	51
3.4.1	Ensaio de tração.....	52
3.4.1.1	<i>Influência da taxa de carregamento</i>	<i>56</i>
3.4.2	Ensaio de compressão	57
3.4.3	Ensaio de torção.....	62
4	CONCEPÇÃO DA GEOMETRIA UNIFICADA	66
4.1	DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA.....	66
4.1.1	Premissas	66
4.1.2	Condições de contorno.....	67

4.1.3	Dimensões finais	69
4.2	SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS	70
4.2.1	Procedimento	71
4.2.2	Uniformidade dos campos de tensões	74
4.2.3	Carregamento trativo	75
4.2.4	Carregamento compressivo	77
4.2.5	Carregamento torcional	79
4.2.6	Flambagem - cargas e modos	81
4.3	DESCRIÇÃO ANALÍTICA EM COMPRESSÃO	83
4.3.1	Flambagem - analítico vs. numérico	84
5	PROJETO DO MOLDE DE INJEÇÃO E PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	86
5.1	CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO MOLDE	86
5.2	SELEÇÃO DOS MATERIAIS EM ESTUDO	88
5.3	PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	89
5.4	CORPOS DE PROVA INJETADOS	91
6	METODOLOGIA - ENSAIOS EXPERIMENTAIS	92
6.1	METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO	92
6.1.1	Parâmetros básicos para tração e compressão	93
6.1.2	Ensaio de tração	95
6.1.3	Ensaio de compressão	96
6.1.4	Metodologia do tratamento de dados	97
6.2	METODOLOGIA PARA O ENSAIOS DE TORÇÃO	98
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIOS EXPERIMENTAIS	101
7.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO	101
7.1.1	PEBD	101
7.1.2	PEAD	103
7.1.3	PP	105
7.1.4	PA 6	106
7.1.5	PMMA	108
7.1.6	PC	110
7.1.7	Discussão dos resultados em tração	111
7.1.8	Discussão dos resultados em compressão	113
7.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TORÇÃO	115
7.3	GEOMETRIA UNIFICADA APÓS ENSAIOS	117

7.4	DESBALANCEAMENTO	119
7.5	VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE TORÇÃO	125
8	CONCLUSÕES	127
8.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A - FICHA TÉCNICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	135
	APÊNDICE B - PROJETO DO EXTENSÔMETRO AXIAL	141
	APÊNDICE C - PROTOCOLO DA TAXA DE CARREGAMENTO EM TORÇÃO	147

1 INTRODUÇÃO

O termo polímero tem sua origem na união de duas palavras gregas, onde o primeiro termo “poli” significa a palavra muitos e o segundo termo “mero” significa uma unidade, no sentido de materiais poliméricos é possível traduzi-la para unidade de repetição. Portanto, polímero é uma macromolécula, composta por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, que estão interconectados diretamente por uma ligação principal, que é a ligação covalente, e entre estas cadeias macromoleculares surge uma força atômica de caráter secundário, que pode ser de dois tipos: pontes de hidrogênio e força de ligação de Van der Walls, para os termoplásticos; ou ainda apresentarem ligações cruzadas para os termofixos e elastômeros (CANEVAROLO, 2002).

Os materiais poliméricos são subdivididos em categorias. A divisão mais comum e simplificada utilizada em engenharia os divide em quatro grandes grupos, sendo eles os termofixos, elastômeros, fibras e termoplásticos, sendo este último o foco do presente trabalho.

Os termoplásticos têm como característica a capacidade de amolecer e fluir sob um aumento substancial da temperatura, e juntamente com uma dada pressão pode ser moldado novamente nestas condições. Após a retirada das ações externas (pressão e temperatura) o material irá atingir seu estado sólido e com forma adquirida do molde. Desta forma pela ação da temperatura pode ser reprocessado e por consequência o mesmo é considerado um material reciclável. Este ponto de vista da reciclagem tem certas ressalvas, como por exemplo a mudança de propriedades mecânicas após o reprocessamento, que de certo modo podem trazer efeitos deletérios ao novo componente.

Do ponto de vista de aplicação a um componente que pode ser projetado em material polimérico termoplástico, existe uma categorização que contempla o desempenho mecânico, deste modo 4 grupos são determinados com base em seu emprego nos dias atuais.

Termoplásticos convencionais: são polímeros largamente empregados no dia a dia e correspondem à fração preponderante de polímeros ao redor do mundo. Esta classe é conhecida industrialmente como commodities. Apresentam baixo custo, facilidade de processamento, mas em compensação se comparado a outros polímeros termoplásticos exibem baixa resistência mecânica. Alguns exemplos desta classe: polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), poliestireno (PS), e o policloreto de vinil (PVC).

Termoplásticos especiais: tomando como base a categoria dos termoplásticos convencionais, os termoplásticos especiais apresentam algumas características melhoradas em suas propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e químicas, o que por consequência acarreta

também em aumento de seu custo. Nesta categoria para se obter características melhoradas é comum encontrar os copolímeros, alguns exemplos de materiais são o etileno vinil acetato (EVA) e o estireno acrilonitrilo (SAN). Também alguns homopolímeros são considerados especiais como o politetrafluoretileno (PTFE) e o polimetacrilato de metila (PMMA).

Termoplásticos de engenharia: componentes aplicados aos dispositivos mecânicos que podem ser empregados em alguns segmentos industriais tais como: indústria automobilística e eletroeletrônica. Neste caso, é exigido um grau de rigidez elevado ou ainda uma boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional. Alguns exemplos desta classe são: os náilons em geral (poliamidas), o politereftalato de etileno (PET), os poliacetais, o policarbonato (PC) e a acrilonitrila butadieno estireno (ABS).

Termoplásticos de engenharia especiais: esta categoria representa o estado da arte em polímeros aplicáveis a componentes industriais, os quais permitem o uso de termoplásticos em condições extremas, considerando que se trata de materiais poliméricos. Alguns dos empregos comuns ocorrem em situações agressivas, por exemplo em altas temperaturas (na ordem de 150 °C), onde mesmo assim o material em questão deve apresentar boa estabilidade térmica.

Estes polímeros no geral têm incorporados a sua estrutura enxofre como é o caso das polisulfonas. Outros materiais característicos para aplicações especiais são as poliimidas, poliéter cetona e alguns tipos de poliuretanos (CANEVAROLO, 2002).

1.1 EVOLUÇÃO E PANORAMA ATUAL

Um dos primeiros contatos com materiais resinosos e graxas, ocorreu com os povos egípcios e romanos, onde a aplicação foi para colar documentos, carimbar e vedar vasilhames (ABIPLAST, 2016; CANEVAROLO, 2002). Desde meados do século XIX existem registros de usos de resinas naturais que já possuíam algumas das características dos materiais plásticos sintéticos, descobertos posteriormente.

Na década de 1930 que os processos de fabricação e o uso de tais materiais realmente tomou uma proporção industrial, sendo que uma das grandes motivações foram os anos entre guerras. Além da necessidade de busca de novos materiais neste período, uma outra razão que acelerou o desenvolvimento de polímeros, foi o fato de matéria prima excedente com grande potencial industrial, o petróleo (BOWER, 2002).

Na Alemanha, em 1930, ocorreu a fabricação de poliestireno. Em 1936 houve a produção de polimetacrilato de metila e um dos primeiros registros de polietileno se deu por volta dos anos iniciais da segunda guerra mundial. Já o policloreto de vinil, descoberto em 1835

por Renault, tem registros de sua primeira produção industrial em larga escala na Alemanha e nos Estados Unidos em 1939 (BOWER, 2002).

A partir desse momento foram desenvolvidos novos materiais, conforme apresentado na Figura 1, e aplicações em diversos segmentos, as quais revolucionaram a sociedade. A gama de materiais poliméricos existentes é extremamente grande e seu desenvolvimento nos dias atuais não se estagnou. Pelo contrário, este ganha a cada dia novos aspectos como o desenvolvimento de novos copolímeros, blendas, compósitos e aplicações na área de nano materiais.

Figura 1 - Desenvolvimento histórico das resinas termoplásticas

Fonte: Garbassi; Po, 2004

Atualmente, é estimado que a produção total de resinas termoplásticas seja superior a 260 milhões de toneladas/ano. A China responde por 26 % de toda a produção mundial. A Europa (União Europeia, Suíça e Noruega), está em segundo lugar com 20 %, seguida pelo bloco econômico NAFTA (Tratado Norte Americano de Livre Comércio, composto por Estados Unidos, Canadá e México), com 19 %. Neste contexto a participação brasileira é na ordem de 6,7 milhões de toneladas/ano, o que representa 2,4 % da produção mundial. A Figura 2 apresenta a distribuição global dos principais produtores.

Figura 2 - Principais produtores mundiais de resinas termoplásticas

Fonte: Autor “adaptado de” Abiplast, 2016

A indústria do plástico no Brasil tem extrema relevância, dado que é uma fonte geradora de empregos, possui mais de 11,6 mil empresas distribuídas por todo o Brasil e apresenta faturamento de 62,2 bilhões anuais (ABIPLAST, 2016).

A versatilidade do material plástico é comprovada pela sua presença em segmentos industriais distintos. Na Figura 3, é possível verificar algumas aplicações atuais de polímeros, além de sua porcentagem de uso em alguns produtos cotidianos (ABIPLAST, 2016).

Figura 3 - Aplicações dos polímeros

Fonte: Abiplast, 2016

Os principais setores que utilizam os termoplásticos são: a construção civil, a indústria de alimentos e a indústria automobilística (Figura 4).

Na construção civil, o PVC é muito utilizado para a fabricação de tubos, conexões e esquadrias de janelas, mangueiras diversas, etc. Os transformados plásticos em poliestireno expandido são utilizados também em larga escala devido às suas propriedades de isolamento acústico e térmico na construção de lajes para casas e edifícios.

Na indústria alimentícia, os plásticos permitem maior tempo de prateleira (*shelf life*) devido às suas propriedades de barreira física. Para o setor de bebidas, as garrafas e recipientes de plástico são usados em larga escala, por serem recicláveis, terem baixo custo e para refrigerantes conferem certa impermeabilidade aos gases, não permitindo que eles escapem antes do consumo.

Já na indústria automobilística, o plástico agrega flexibilidade e leveza na produção de autopeças, como por exemplo em painéis de carros com design moderno e peças mais leves que colaboram na redução do consumo de combustível e muitas vezes custo. Além de permitir a incorporação de carga (fibras ou pós) e tornar o mesmo um compósito, com o aumento de sua resistência mecânica.

Figura 4 - Principais setores consumidores de transformados plásticos

Fonte: Autor “adaptado de” Abiplast, 2016

Existem várias técnicas de moldagem para os materiais termoplásticos (Figura 5). Todas elas consistem em aquecer e moldar a resina por meio de elevadas temperaturas e transportá-la

através de uma rosca até um molde/matriz com o formato do produto a ser fabricado. A técnica mais utilizada é a extrusão, com 62 %, sendo que esse processo pode ser subdividido em extrusão de filmes, perfis, chapas e sopro que corresponde respectivamente a aproximadamente 40 %, 32 %, 19 % e 9 % de tudo que é produzido por este processo.

O segundo método mais utilizado é a injeção, com participação de 30 % nos processos de fabricação de polímeros. Esse processo confere detalhes muito específicos aos produtos, como roscas, furos e encaixes com bom controle dimensional; sendo muito utilizado na indústria de autopeças (como painéis de carros), fabricando produtos intermediários que servem como insumos para a indústria automotiva e também na produção de utilidades domésticas que se destinam ao consumidor final. Este método do ponto de vista de engenharia é de grande relevância e possibilita o desenvolvimento de componentes de alto desempenho.

Figura 5 - Processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Diante de um mercado extremamente competitivo e agressivo, o processo de desenvolvimento de produtos tem como uma de suas grandes responsabilidades o projeto de componentes eficientes e otimizados no menor tempo possível. Para tal, se faz necessário conhecer de forma precisa e abrangente as propriedades mecânicas do material em questão, a fim de garantir a integridade estrutural e vida útil das aplicações.

A justificativa do termo preciso com relação a propriedades mecânicas não faz alusão ao significado puro da medição direta, e sim está ligado diretamente a um objetivo ainda mais profundo, o de isenção das influências geométricas que o corpo de prova a ser ensaiado possa conter, intrínsecos às geometrias propostas por normas atuais. Portanto, transcende as imprecisões experimentais, e o objetivo central é apresentar a transferabilidade do campo experimental com um corpo de prova padronizado para o campo real, na aplicação em um componente. Já o conceito de conhecimento de propriedades mecânicas abrangentes, vai de encontro à necessidade do minucioso conhecimento do comportamento do material para múltiplos carregamentos, ou seja, diversos ensaios tais como ensaios de tração, compressão, flambagem e torção podem se fazer necessários na tratativa de campos multiaxiais de carregamento.

Ensaaios mecânicos para materiais metálicos em geral são mais difundidos e, fazendo uso dos argumentos da mecânica dos sólidos a casos de isotropia e balanceamento (mesmas propriedades em tração e compressão), muitas vezes um ensaio de tração segundo a E8/E8M (ASTM, 2013c) permite a determinação de outras propriedades relevantes às avaliações de integridade, mesmo em aplicações caracterizadas por diferentes estados de tensão.

Já para polímeros termoplásticos, segundo Osswald et al. (2006), os testes mecânicos efetuados são pouco compreendidos e seus resultados são frequentemente mal interpretados e mal utilizados. A razão pela qual isto ocorre para estes materiais está ligada ao fato de que os mesmos possuem comportamento tensão vs. deformação elasto-plástico viscoso e comportamento desbalanceado em tração e compressão. Deste modo, a investigação das propriedades mecânicas deveria ser efetuada de maneira mais abrangente para obter as propriedades com a dada precisão e rigor, o que ainda apresenta questões em aberto. Um dos esforços iniciais para atender a este propósito é a unificação de corpos de prova entre os diversos ensaios e o estabelecimento de uma metodologia de ensaios e tratamento de dados embasada na mecânica dos sólidos combinada com a fenomenologia do comportamento polimérico.

Dado este contexto é válido ressaltar que existem normas com reconhecimento internacional na execução de ensaios mecânicos em polímeros termoplásticos. Para ensaios de tração uma das mais difundidas é a D638-14 (ASTM, 2014), e para o de compressão a D695-15 (ASTM, 2015a), porém entre ambas não há uma única geometria que possibilite a comparação de resultados sem a influência geométrica (e do volume amostrado) dos inúmeros corpos de prova propostos, além de que não há normas específicas para a determinação de propriedades destes materiais à torção. Portanto, uma geometria unificada poderia suprir estas necessidades e trazer maior simplicidade e comparabilidade aos procedimentos.

A pesquisa de Caruso (2015) apresenta a fundamentação para se usar uma única geometria para ensaios de tração, compressão e torção. Por meio de uma análise de 66 geometrias distintas, o trabalho citado efetuou testes mecânicos, simulações numéricas e provou a viabilidade de uma única geometria para atender a diversos ensaios mecânicos.

Portanto todo o desenvolvimento de Caruso (2015) seguiu a linha exploratória em identificar diante de inúmeras geometrias qual seria a situação ótima de ensaio experimental. Por outro lado, todas as amostras testadas no referido trabalho foram obtidas a partir de barras extrudadas que posteriormente foram usinadas. Estes processos efetuados no trabalho citado apresentam pontos negativos. A extração do corpo de prova de uma barra extrudada leva a orientação preferencial das cadeias poliméricas, não representando o comportamento real de um componente de engenharia, que na maioria dos casos é injetado em formas mais complexas. O processo de usinagem em corpos de prova para ensaios em materiais poliméricos pode gerar empenamento e impõe rugosidade na superfície, podendo promover a concentração de tensão.

Desta forma este trabalho propõe uma geometria unificada de reduzidas dimensões (comparável a componentes reais, com espessura de parede esbelta) obtida por meio do processo de injeção. Este processo tem como vantagens do ponto de vista experimental, a obtenção de propriedades mais realistas ao se comparar com um componente injetado real. Ainda, o benefício de se testar sob diferentes carregamentos um corpo de provas de mesma geometria, propriedades e volume de material amostrado. Também, há a possibilidade da produção de grande quantidade de amostras com repetibilidade microestrutural e dimensional, deste modo obtém-se confiabilidade na metodologia de ensaios. Por fim, o corpo de prova pode apresentar excelente acabamento superficial, devido ao processo de injeção, dependendo somente da qualidade do molde (cavidade de injeção).

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa desenvolver numericamente, viabilizar a injeção e realizar a validação experimental de uma geometria monoespécime, unificada, para múltiplos tipos de ensaios mecânicos em polímeros termoplásticos tais como tração, compressão e torção. De forma ampla, o foco central é garantir que estes corpos de prova apresentem campos de tensões e deformações uniformes e estáveis na região útil sem que haja efeitos deletérios referentes à geometria, tais como a influência de concentração de tensões, atrito, flambagem ou diferentes volumes amostrados em diferentes ensaios. Desta forma é possível adotar as propriedades mecânicas obtidas em laboratório e utilizá-las de forma realista no projeto e desenvolvimento de produtos numa perspectiva industrial aplicada.

Para que haja o completo sucesso dos objetivos definidos no parágrafo anterior, se faz necessário atender aos seguintes objetivos específicos:

- a) desenvolvimento de uma geometria unificada baseada na melhor geometria de Caruso (2015), porém com dimensões reduzidas que permitam a injeção e a busca de uma razão entre comprimento útil e seção transversal útil mais próxima de 1;
- b) simulação de elementos finitos da geometria unificada mencionada acima em busca da validação da uniformidade de tensões e deformações;
- c) projeto e confecção de uma matriz de injeção para a referida geometria;
- d) injeção de amostras de materiais poliméricos termoplásticos diversos;
- e) ensaios mecânicos para validação do comportamento mecânico do corpo de prova, tais como tração, compressão e torção.

Adicionalmente, para os ensaios mecânicos mencionados houve a necessidade da concepção e montagem dos dispositivos e transdutores de teste, tais como garras e extensômetros específicos, o que se soma às atividades centrais do projeto de pesquisa que suporta o presente trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é dedicado à revisão de tópicos essenciais para o embasamento das discussões deste trabalho e para o entendimento fenomenológico do comportamento mecânico de polímeros termoplásticos estudados sob a luz de um corpo de prova unificado com a proposta de atender a ensaios mecânicos de tração, compressão e torção.

3.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TERMOPLÁSTICOS

Ao discutir ensaios mecânicos, se faz necessário compreender a fenomenologia que ocorre do ponto de vista estrutural nos termoplásticos. A etapa inicial do carregamento é ligada diretamente ao regime elástico de deformação, seguido pelo escoamento, deformação plástica e por fim a ruptura. Em síntese será apresentada a fundamentação para cada regime de deformação e sua inserção dentro dos interesses do trabalho.

3.1.1 Comportamento elástico - micromecanismo

O comportamento no regime elástico de polímeros termoplásticos ocorre para reduzidos níveis de tensão, sendo que a deformação associada a este estado é instantânea, recuperável e as moléculas não se deslocam permanentemente uma em relação à outra.

O micromecanismo associado à deformação elástica é diretamente relacionado às ligações covalentes (intramoleculares). O carregamento quando aplicado promove: variação de ângulo e aumento da distância da ligação entre os átomos da cadeia principal. Nos semicristalinos, o processo da deformação elástica se inicia pelo estiramento das cadeias poliméricas da região amorfa (CALLISTER, 2007; CANEVAROLO, 2002).

O comportamento mecânico dos termoplásticos é severamente afetado pela temperatura. De forma objetiva são apresentadas a seguir duas abordagens ainda em regime elástico de deformação, tomando como base a referência da temperatura de transição vítrea do material. Para facilitar o entendimento, o assunto será abordado de maneira distinta, com foco em avaliar o comportamento mecânico considerando o material acima ou abaixo da T_g .

3.1.1.1 Abordagem da energia elástica

Segundo Roesler et al. (2007), a rigidez (E = módulo de elasticidade) de termoplásticos abaixo de sua temperatura de transição vítrea (T_g) é principalmente influenciada pela energia necessária para deslocar átomos de suas posições de equilíbrio.

A condição de equilíbrio, corresponde à condição da mínima energia, que é quando o material está descarregado. Esta é a abordagem da energia elástica, válida tanto para termoplásticos amorfos como para semicristalinos.

A Figura 6 demonstra que com o aumento da temperatura a rigidez tende a diminuir. Desta curva dois pontos são de extrema relevância a princípio. O primeiro é a transição secundária, que tende a apresentar uma suave inflexão tanto para um material amorfo como para o semicristalino. As transições são causadas por processos de relaxação localizados que habilitam uma mobilidade limitada da macromolécula e assim causam um relaxamento de tensão devido ao movimento de alguns segmentos. O segundo ponto relevante, é quando se atinge a T_g , neste ponto é evidente que a queda da rigidez é maior para os materiais amorfos (Figura 6 (a)), do que para os materiais semicristalinos (Figura 6 (b)). Isto se deve ao fato de que a temperatura de transição vítrea afeta diretamente as regiões amorfas, nas quais há um ganho de mobilidade, o que não ocorre para as regiões com blocos cristalinos.

Figura 6 - Módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura.

Fonte: Autor, "adaptado de" Roesler et al., 2007

Legenda: (a) termoplásticos amorfos; (b) termoplásticos semicristalinos.

3.1.1.2 Abordagem da entropia elástica

Acima da T_g os materiais amorfos se deformam com características tendendo ao viscoso, porém isto pode não ocorrer. Segundo Roesler et al. (2007), devido ao alto grau de entrelaçamento da estrutura, as macromoléculas não deslizam umas sobre as outras, pois este deslizamento relativo é restringido pelos nós da estrutura, conforme apresentado na Figura 7 (b). Assim é possível caracterizar ainda o regime elástico de deformação, porém com queda acentuada do módulo de elasticidade. A abordagem da entropia elástica é baseada na energia termodinâmica que é responsável por definir um estado conformacional da macromolécula (Figura 7 (a)). Deste modo ao tracionar a macromolécula e cessar a aplicação do carregamento, a mesma irá retornar ao seu estado enovelado. Pois, a entropia da macromolécula no estado enovelado é maior do que no estado estirado.

Figura 7 - Deformação elástica de um termoplástico amorfo acima de sua T_g .

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

Legenda: (a) Macromoléculas emaranhadas; (b) Macromoléculas sendo submetidas ao esforço, e o emaranhamento ainda permanece.

Para os termoplásticos semicristalinos o comportamento é um pouco diferenciado, devido ao fato dos mesmos apresentarem uma forte ligação intermolecular nas regiões cristalinas. O decaimento do módulo de elasticidade ao atingir a T_g é menor se comparado com os materiais amorfos, pois somente as regiões amorfas, tornam-se elástico entrópicas enquanto que as regiões cristalinas permanecem em estado de energia elástica.

3.1.2 Comportamento plástico - micromecanismo

Polímeros podem deformar plasticamente quando existe o deslocamento relativo entre macromoléculas, uma sobre a outra. O comportamento plástico para polímeros termoplásticos é fortemente dependente da temperatura, devido ao fato de que obstáculos tem que ser

superados pela energia de ativação térmica. A mesma está diretamente ligada ao espaçamento que pode ocorrer ou não devido a geração de volumes livres que estão ligados com o aumento da temperatura.

3.1.2.1 Amorfo

Para os termoplásticos amorfos, o comportamento em regime plástico pode ser dividido, de forma a avaliar com base na T_g , o modo de como o micromecanismo ocorrerá.

Segundo Roesler et al. (2007), ao considerar temperaturas menores que 80% da T_g , as ligações intramoleculares apresentam elevado nível de força e os volumes específicos são tão pequenos que o deslizamento relativo entre macromoléculas não irá ocorrer. Para esta condição diante de um carregamento, existe a tendência do material se comportar de tal modo a absorver reduzida energia para se romper, ou seja se comportar de maneira frágil, havendo assim quebra de ligações primárias, ligações covalentes.

De maneira contrária, quando ocorre um aumento incremental de temperatura e a mesma chega a patamares próximo da T_g , o material exibe uma tendência de apresentar um aumento de sua ductilidade. Portanto, é possível observar que com o aumento da temperatura, os volumes livres passam a ser de grande relevância, pois os mesmos possibilitam o aumento do distanciamento macromolecular, que por sua vez torna viável o deslizamento relativo entre cadeias. A Figura 8 demonstra comparativamente diante de um ensaio de tração, o que ocorrerá com as curvas em função da T_g de cada material, se comparada com a temperatura do ambiente de ensaio.

Figura 8 - Curvas representativas do ensaio de tração para polímeros termoplásticos amorfos.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

Próximo da transição vítrea as macromoléculas ganham maior mobilidade, e ao longo do carregamento as mesmas podem se rearranjar, conforme apresentado na Figura 9. Após o escoamento atingido o corpo de prova inicia a estricção e conforme a deformação aumenta gradativamente, ocorre o processo de estiramento das macromoléculas a frio, que reflete em um desenovelamento macromolecular seguido por um rearranjo da mesma. Porém quanto mais pronunciado este alinhamento molecular, mais as ligações covalentes serão carregadas ocasionando um endurecimento localizado (*strain hardening*), fenômeno resultante do intenso alinhamento localizado.

A nível macroscópico, a região do empescoamento em princípio é pontual. Gradativamente, esta região com secção reduzida, tende a tomar todo o comprimento útil do corpo de prova (Figura 9 (d)). Caso o polímero esteja próximo da T_g , as deformações podem ser superiores a 300% (SPERLING, 2006; ROESLER et al, 2007).

Figura 9 - Curvas representativas - polímeros termoplásticos amorfos próximo da T_g .

Fonte: Autor "adaptado de" Roesler et al., 2007

Por outro lado, se a temperatura de aplicação do componente exceder a T_g , de modo significativo, as cadeias podem facilmente deslizar umas sobre as outras, devido ao aumento expressivo de volumes livres. Neste caso, diante da deformação plástica, o polímero tende a se comportar como um líquido viscoso, apresentando baixo limite de resistência mecânica (ROESLER et al., 2007).

3.1.2.2 Semicristalino

Para estes materiais o início do processo da deformação plástica se dá pelo estiramento a princípio das regiões amorfas (Figura 10 (b)), que é o limiar do regime elástico para o plástico.

Ao passo que a deformação aumenta, os blocos de regiões cristalinas começam a rotacionar tendendo a se alinhar com a direção do carregamento (Figura 10 (c)). Ocorrendo a intensificação do nível de deformação existe a separação e definição de blocos isolados de regiões cristalinas, assim havendo a possibilidade da formação de uma nova camada rearranjada em uma orientação vertical, conforme apresentado pela Figura 10 (d) e (e), onde o estágio (d) representa a separação das regiões em blocos e o estágio (e) representa a formação de fibras microscópicas orientadas. Nos semicristalinos as impurezas ou mesmo cadeias menores, ou seja defeitos a nível molecular são concentrados nas regiões amorfas. Pois, as zonas cristalinas expulsam para a zona da interface o que é indesejado, o que torna esta zona suscetível a inicialização de uma pré trinca diante de um carregamento (ROESLER et al., 2007).

Figura 10 - Estágios da deformação plástica de um polímero semicristalino.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

3.1.3 Micromecanismos associados à fratura

Os micromecanismos que precedem a fratura de termoplásticos são: as bandas de cisalhamento ou o surgimento de microfissuramentos. O microfissuramento (*craze*) geralmente é associado com uma possível fratura frágil posterior ao seu surgimento. A ocorrência do mesmo, é resultado de um intenso e localizado deslizamento macromolecular. Pode ocorrer também por defeitos superficiais tais como: falhas, riscos ou impurezas; fatores que geram um estado triaxial de tensões.

O surgimento do *craze* fornece ao material a possibilidade de uma grande fonte de absorção de energia antes de sua ruptura. O *craze* apresenta-se normalmente em três estágios distintos, o primeiro é caracterizado pela nucleação de vazios, o segundo estágio é a fase onde há o crescimento dos vazios alinhados ao carregamento e por fim, a abertura do craze de forma

lenticular, que se dá de maneira perpendicular à direção de aplicação do carregamento. A Figura 11 caracteriza os três estágios distintos do surgimento do *craze* (O'CONNELL; McKENNA, 2004).

Figura 11 - Surgimento do *craze*.

Fonte: Autor, “adaptado de” O’Connell e McKenna, 2004

Legenda: a) Nucleação vazios; b) Crescimento dos vazios; c) Craze lenticular.

O surgimento do *craze* é característico em termoplásticos amorfos abaixo de sua T_g . Do ponto de vista microestrutural, sua dimensão em espessura gira em torno de $1\ \mu\text{m}$ à $10\ \mu\text{m}$ e seu diâmetro é na ordem de $10\ \mu\text{m}$ à $1000\ \mu\text{m}$, o que une as duas partes são fibrilas que funcionam como pontes. Estas fibrilas são referentes à união de inúmeras cadeias moleculares e tem diâmetro de $10\ \text{nm}$ à $100\ \text{nm}$, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Proporções na formação de um *craze*.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

Do ponto de vista geométrico a espessura da falha lenticular está diretamente ligada à temperatura, já a quantidade de microtrincas é diretamente dependente do nível de tensão imposto. Mesmo havendo o microfissuramento, a tensão do material diante de um ensaio de tração apresenta uma queda suave, a mesma não é de grandes proporções, pois as fibrilas são compostas por macromoléculas extremamente orientadas capazes de suportarem carregamentos elevados se comparados com regiões amorfas de mesmo volume. Em um material amorfo onde inicia-se o craze, por motivo dos defeitos microestruturais, ocorre o espalhamento da luz e desta forma o material se apresenta de maneira esbranquiçada, fenômeno denominado de

esbranquiçamento por tensão (SPERLING, 2006; O'CONNELL; MCKENNA, 2004; ROESLER et al, 2007).

3.1.3.1 Escoamento por bandas de cisalhamento

Um mecanismo associado de forma frequente do ponto de vista de deformação plástica, é o escoamento por bandas de cisalhamento. Este que pode ocorrer de forma difusa ou localizada em um dado componente, sem perda da coesão intramolecular (CANEVAROLO, 2002). Segundo Sperling (2006), o escoamento sob cisalhamento, forma regiões orientadas paralelas ao plano de máximo cisalhamento, maior que 45° com relação a direção do carregamento, para materiais sensíveis ao estado hidrostático, que é o caso dos polímeros. Estas bandas de cisalhamento podem ser birrefringentes, porém nenhum vazio é observado na estrutura, que permanece coesa.

Roesler (2007), indica que a deformação por bandas de cisalhamento pode apresentar um angulo entre 45° e 60° , com relação à direção de carregamento. Este comportamento é de grande relevância principalmente quando se trata de condições que o polímero está sob um carregamento compressivo (

Figura 13). Dentro destas bandas de cisalhamento a deformação plástica é altamente localizada e pode atingir níveis de até 100% de deformação ou mais. No entanto a deformação é muito pequena fora desta zona. Desta forma existe um alto grau de alinhamento das cadeias. Quando um grande número de bandas de cisalhamento converge para um mesmo ponto, existe a tendência de nucleação de uma trinca que pode levar até a ruptura de forma catastrófica do componente.

Figura 13 - Deformação de um termoplástico amorfo sob carga compressiva.

Fonte: Autor "adaptado de" Roesler et al., 2007

3.2 TÓPICOS SELECIONADOS DO ESTADO TRIPLO DE TENSÕES (ETT)

Um Estado Triplo de Tensões (ETT) caracteriza todos os carregamentos atuantes em um ponto de um sólido e costuma ser apresentado na forma de um volume cúbico infinitesimal sollicitado por nove componentes de tensões, sendo 3 normais e 6 cisalhantes (Figura 14).

Figura 14 - Estado triplo de tensões

Fonte: Donato, 2015

Cada uma das tensões é acompanhada de dois índices, sendo o primeiro um indicativo do plano de atuação da tensão (por meio de sua normal) e o segundo a direção de atuação da tensão. E toda e qualquer tensão cisalhante que possui os mesmos índices porém invertidos possui a mesma magnitude mas atuação contrária, segundo a lei da paridade das tensões tangenciais, portanto $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. A equação (1) caracteriza o ETT por meio do tensor das tensões.

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (1)$$

A lei da paridade de tensões é satisfeita ao se idealizar um cubo de faces iguais e impor ao mesmo equilíbrio rotacional, ou seja somatória de momentos para cada eixo e igualar a zero, o que acarreta em uma simplificação no tensor acima descrito. Por conta de deixar o mesmo simétrico, os 9 valores de tensões podem ser reduzidos a somente 6 grandezas que podem caracterizar plenamente e de maneira unívoca as tensões em um volume cúbico infinitesimal de material (Equação 2).

Desta forma, o caso do estado triplo de tensões pode ser descrito apenas por seis componentes de tensões, onde é suficiente apenas três tensões normais e três de cisalhamento, a saber: σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{xz} .

Estados biaxiais ou uniaxiais de tensões são casos particulares do ETT, nos quais são nulas as tensões em respectivamente uma ou duas direções do plano cartesiano, o que simplifica a análise e cujo detalhamento foge do escopo do trabalho (RAGAB, 1998; DIETER, 1988).

$$T = \sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (2)$$

Mas ainda assim estas tensões são válidas somente para três direções x, y e z, o que não garante que representem as tensões máximas e mínimas atuantes em um dado volume cúbico infinitesimal de material; as mesmas podem estar em qualquer orientação do espaço cartesiano, sendo denominadas tensões principais.

As tensões principais atuam em um específico e único sistema de coordenadas no qual somente existem tensões normais atuantes e ausência das tensões tangenciais no ponto material. As três tensões principais que ocorrem em um dado ponto material são denominadas σ_1 , σ_2 e σ_3 , sendo que σ_1 refere-se ao valor mais elevado, por convenção (RAGAB, 1998). Cada uma destas tensões está associada a sua face e desta forma o tensor das tensões fica simplificado. Do ponto de vista do volume cúbico infinitesimal de material, este tensor pode ser equiparado com o tensor das tensões completo, conforme Figura 15.

Do ponto de vista do carregamento de um volume cúbico infinitesimal de material, o tensor cartesiano é exatamente igual ao tensor das tensões principais (Equação 3). A única diferença entre os dois tensores é do ponto de vista matemático, onde o volume cúbico infinitesimal de material que resulta no tensor cartesiano com relação ao das tensões principais está rotacionado espacialmente.

$$T = \sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Figura 15 - Tensões principais

Fonte: Donato, 2015

De acordo com Hosford (2005), a magnitude das tensões principais é dada pelas raízes da equação 4, onde é possível encontrar três raízes. O resultado será dado por, σ_1 , σ_2 e σ_3 , que respectivamente devem ser ordenados do maior valor para o menor.

$$\sigma_p^3 - I_1 \sigma_p^2 - I_2 \sigma_p - I_3 = 0 \quad (4)$$

De acordo com a equação 4 é possível observar que surgem os invariantes de tensões que podem ser calculados pelas equações 5, 6 e 7.

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (5)$$

$$I_2 = \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (6)$$

$$I_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} - \sigma_x \cdot \tau_{yz}^2 - \sigma_y \cdot \tau_{zx}^2 - \sigma_z \cdot \tau_{xy}^2 \quad (7)$$

Os invariantes apresentam esta nomenclatura pois os mesmos, independentemente do sistema de coordenadas permanecem inalterados. O invariante 1 (I_1) é a soma das tensões normais e tem o significado da parcela hidrostática do carregamento. O invariante 2 (I_2) representa a parcela do cisalhamento no ponto material, ou seja, a tendência de distorcer os planos. Já o invariante 3 (I_3) representa um misto tanto de tensão normal como de tensão de cisalhamento (DOWLING, 1999).

O entendimento a respeito dos invariantes é de fundamental importância para o estudo dos critérios de resistência, assunto do próximo tópico. Com a definição de cada invariante de

tensão é possível efetuar uma correlação direta entre os critérios de resistência aplicados a materiais com tendência dúctil ou frágil.

Para melhor compreensão e aplicação dos invariantes se faz necessário retomar o estado de tensões apresentado na Figura 14 e o seu respectivo tensor apresentado na Equação 2. Desta forma é possível dividir o ETT em um dado volume infinitesimal em função da soma de dois estados de tensões distintos, um médio e o outro desviador.

A tensão média ou tensão hidrostática tem como sua definição a média das tensões cartesianas ou principais, conforme apresentado na equação 8.

$$\sigma_h = \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{I_1}{3} \quad (8)$$

Por sua vez o tensor desvio corresponde a subtração da tensão média para cada tensão normal do tensor cartesiano. Deste modo é apresentado na equação 9, as duas parcelas de modo tensorial.

$$T = \begin{vmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{vmatrix} \quad (9)$$

$Tensor_{Médio}$

$Tensor_{Desvio}$

O tensor médio está intimamente ligado à parcela do I_1 , que corresponde ao estado hidrostático de tensões. Do ponto de vista físico este tensor tende a expandir ou comprimir um volume cúbico infinitesimal de material de maneira uniforme.

Ao efetuar uma correlação com os materiais poliméricos termoplásticos ao supor um carregamento puramente baseado em tensões médias, é possível dizer que haverá uma tendência de distanciamento macromolecular (ligações secundárias) e também das ligações primárias. Este comportamento tende a caracterizar uma ruptura com pouca ou ausência de deformação, assim caracterizando um material frágil. Deste modo o tensor médio é utilizado como base na fundamentação de critérios de resistência para materiais frágeis.

O tensor desvio por sua vez está intimamente ligado às parcelas dos invariantes 2 e 3, portanto o caráter deste tensor é basicamente distorcional. Do ponto de vista físico, o mesmo age de modo a cisalhar o volume infinitesimal de material.

Correlacionando este comportamento com materiais poliméricos termoplásticos supondo um carregamento puramente deviatório, haverá o deslizamento macromolecular, deste modo é possível caracterizar o escoamento e a plasticidade. Portanto esta parcela do tensor é a responsável por promover a deformação plástica, deste modo a mesma fundamenta os critérios de resistência para materiais dúcteis.

3.3 CRITÉRIOS DE FALHA E ESCOAMENTO

Os componentes de engenharia podem estar sujeitos a uma complexidade de carregamentos envolvendo tração, compressão, flexão, torção, pressão ou a combinação destes, incorrendo em carregamentos multiaxiais. Se suficientemente elevadas, tais tensões combinadas podem agir juntas e ocasionar ao material o seu escoamento ou mesmo sua ruptura catastrófica (fratura). Prever estes limites de segurança para utilizar o componente sob tais estados de tensões exige a aplicação de um critério de falha (DOWLING, 1999).

Diversos critérios estão disponíveis, alguns dos quais podem prever o escoamento e outras falhas por fratura. No presente trabalho são alvo de interesse os critérios para materiais dúcteis, voltados à previsão de escoamento e/ou evolução da plasticidade.

3.3.1 Critério de Tresca

O critério de Tresca foi desenvolvido com foco para materiais metálicos dúcteis e preconiza que o escoamento ocorre quando for atingida a máxima tensão de cisalhamento crítica (HOSFORD, 2005; WARD; SWEENEY, 2013).

Fenomenologicamente Tresca considera a tensão de cisalhamento máxima como fundamento para seu critério pois a mesma é a responsável por promover movimentação de discordâncias em materiais metálicos dúcteis, o que ocorre somente na iminência de início de deformação plástica, ou seja, se revela irreversível. Analogamente, este fenômeno de deformação plástica em polímeros ocorre quando há deslizamento intermacromolecular do ponto de vista da estrutura de termoplásticos, fenômeno que será melhor explicado adiante.

O critério parte do princípio da máxima tensão de cisalhamento atuante, onde a tensão de cisalhamento no escoamento corresponde à metade da tensão de escoamento em tração, deste modo é definido na equação 10. A aplicação prática do critério de Tresca portanto é apresentada na equação 11. Deste modo é possível concluir, para que não ocorra o escoamento a tensão

máxima atuante deve ser menor ou igual ao valor da razão entre tensão limite de escoamento do componente em questão dividido pelo coeficiente de segurança adotado.

$$\sigma_{eq_t} = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (10)$$

$$\sigma_{eq_t} \leq \frac{S_{LE}}{CS} \quad (11)$$

A dedução do equacionamento foge do escopo deste trabalho e pode ser encontrada detalhadamente em literaturas clássicas tal como Ragab (1998) e Dowling (1999).

3.3.2 Critério de von Mises

O critério de von Mises também comumente chamado de critério da máxima energia distorcional, tem o foco de sua aplicação para materiais dúcteis e isotrópicos. Do ponto de vista fenomenológico, o mesmo caracteriza o escoamento do material quando a tensão de cisalhamento em planos específicos definidos como planos octaédricos atinge um valor crítico.

A quantificação de uma tensão equivalente por von Mises é diretamente dependente do tensor desvio já que o mesmo é baseado na energia distorcional e não leva em conta a tensão hidrostática que está relacionada à variação de volume ao se considerar um ponto material (ROESLER et al., 2007; DOWLING, 1999; POPOV, 1978). Os planos octaédricos podem ser representados pela intersecção de oito planos com os eixos das tensões principais de forma simétrica com relação à origem de acordo com a Figura 16 (a).

Figura 16 - Representação dos planos octaédricos.

Fonte: Autor “adaptado de” Bianchi, 2011

Legenda: (a) Representação da intersecção de oito planos octaédricos; (b) Tensão normal e tensão de cisalhamento octaédrica para um plano.

A fundamentação do critério é baseada no conceito de que o escoamento ocorrerá na condição em que as tensões de cisalhamento nos planos octaédricos atinjam o valor crítico. Deste modo a tensão equivalente de von Mises a partir do estado triplo de tensões, que pode promover o escoamento em função das tensões principais, é definida segundo a equação 12 e para as cartesianas com base na equação 13.

$$\sigma_{eq_vM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{eq_vM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (13)$$

Analogamente ao que já foi apresentado no critério de Tresca, conclui-se que para não ocorrer o escoamento, a tensão máxima atuante deve ser menor ou igual ao valor da razão entre tensão limite de escoamento do componente em questão dividido pelo coeficiente de segurança adotado, conforme equação 14.

$$\sigma_{eq_vM} \leq \frac{S_{LE}}{CS} \quad (14)$$

A dedução do equacionamento foge do escopo deste trabalho e pode ser encontrada detalhadamente em literaturas clássicas tal como Ragab (1998) e Dowling (1999).

3.3.3 Lócus de falha de Tresca

Do ponto de vista espacial, o lócus de falha do critério de Tresca é apresentado na forma de um tubo hexagonal. A Figura 17 (a) demonstra o lócus de falha a luz do estado plano de tensão (EPT), onde nos eixos estão representadas as tensões principais σ_1 e σ_2 . A Figura 17 (b) apresenta o lócus de falha a luz do estado triplo de tensão (ETT).

O eixo, que é concêntrico com o tubo hexagonal, representa o estado de tensões hidrostáticas em que todas as tensões principais se igualam respeitando, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, e então sobre o eixo não ocorre o escoamento (DOWLING,1999). Para ocorrer o escoamento se faz necessário violar o lócus de falha, assim a tensão equivalente de Tresca calculada deve cair fora do lócus demarcado.

Figura 17 - Lócus de falha de Tresca.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al, 2007

Legenda: (a) Lócus de falha de Tresca para o EPT; (b) Representação do tubo hexagonal, lócus de falha de Tresca para o ETT.

O lócus de falha para o EPT pode ser calculado conforme as equações de 15 até 20. Deste modo cada região do lócus de falha pode ser pré-determinada conforme apresentado na Figura 17 (a).

Região 1 e 4	$\sigma_1 = +S_{LE}$ e $\sigma_1 = -S_{LE}$	(15), (16)
--------------	---	------------

Região 2 e 5	$\sigma_2 = +S_{LE}$ e $\sigma_2 = -S_{LE}$	(17), (18)
--------------	---	------------

Região 3 e 6	$\sigma_1 - \sigma_2 = -S_{LE}$ e $\sigma_1 - \sigma_2 = +S_{LE}$	(19), (20)
--------------	---	------------

3.3.4 Lócus de falha de von Mises

O lócus de falha do critério de von Mises por sua vez é apresentado na forma de um tubo cilíndrico. A Figura 18 (a) demonstra o lócus de falha à luz do EPT, onde nos eixos estão representadas as tensões principais, σ_1 e σ_2 . A Figura 18 (b) apresenta o lócus de falha à luz do ETT. O eixo, que é concêntrico com o tubo cilíndrico, representa o estado de tensões hidrostáticas em que todas as tensões principais se igualam respeitando, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, e então sobre o eixo não ocorre o escoamento (DOWLING,1999). Para ocorrer o escoamento se faz necessário violar o lócus de falha, assim a tensão equivalente de von Mises calculada deve cair fora do lócus demarcado.

Figura 18 - Locus de falha de von Mises.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007.

Legenda: (a) Locus de falha de von Mises para o EPT; (b) Representação do tubo cilíndrico, locus de falha de von Mises para o ETT.

O locus de falha para o EPT conforme apresentado na Figura 18 (a), tem os pontos de intersecção com os eixos das tensões principais σ_1 e σ_2 , determinados pela tensão limite de escoamento (positivo e negativo). A curva da elipse que corresponde diretamente ao locus de falha pode ser calculada conforme a equação 21, que foi baseada na equação 12 e teve imposta a condição de $\sigma_3 = 0$, consideradas as devidas simplificações.

$$S_{LE}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (21)$$

3.3.5 Comparativo dos loci de falha

A Figura 19 apresenta a comparação entre os dois loci de falhas apresentados anteriormente, Tresca e von Mises. Esta representação é de grande valia e permite efetuar considerações ao se comparar os dois critérios de forma gráfica, onde se verifica que a superfície desenvolvida segundo Tresca de área transversal hexagonal está inscrita no tubo de cilíndrico representado por von Mises.

Seguem os pontos de maior relevância entre os dois critérios de falhas apresentados nos itens citados a seguir (WARD; SWEENEY, 2013; DOWLING, 1999; HOSFORD, 2005;):

- a) ambos os critérios independem da tensão hidrostática;
- b) critério de von Mises apresenta maior aderência quando comparado a dados experimentais;

- c) critério de Tresca é conservador se comparado à von Mises, ou seja o mesmo é mais favorável à segurança diante de um projeto mecânico, porém pode se correr o risco de superdimensionamento;
- d) em alguns pontos os critérios apresentam os mesmos valores para escoamento porém a máxima diferença entre os dois critérios é na ordem de 15,5%.

Figura 19 - Comparação entre os loci de falha de Tresca vs. von Mises

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007 e Ward e Sweeney, 2013.

3.3.6 Critérios modificados - materiais desbalanceados

Os dois critérios apresentados anteriormente são largamente difundidos e utilizados com o foco para metais dúcteis. Embora a fenomenologia do escoamento de polímeros termoplásticos dúcteis seja distinta dos metais, a ativação da movimentação relativa entre macromoléculas é também dada por cisalhamento e os critérios apresentados podem ser de utilidade. Porém, materiais poliméricos de forma geral são classificados como materiais desbalanceados, pois os mesmos apresentam limites de escoamento e resistência à compressão diferentes dos de tração (ROESLER et al., 2007).

No geral, a resistência à compressão costuma ser maior que à tração. Desta forma se os critérios anteriores foram utilizados os mesmos serão aproximações conservadoras, não indo ao encontro das necessidades da indústria atual. De acordo com Roesler et al. (2007) a resistência ao escoamento para polímeros em solicitação uniaxial à compressão gira em torno de 20% a 30% maior do que se fosse submetido a tração uniaxial. Já para materiais metálicos, salvo exceções como exemplo o ferro fundido, o limite de resistência à tração costuma ser igual à compressão. Portanto, os critérios apresentados anteriormente não conseguem ser realistas se considerados para aplicações nas quais haverá de alguma forma a aplicação de cargas compressivas. Ao

aplicar critérios de resistência para materiais dúcteis desbalanceados se faz necessário levar em conta a parcela da tensão hidrostática, a qual até o presente momento foi desconsiderada. Os critérios de Tresca e von Mises (materiais balanceados) não descrevem adequadamente o comportamento dos polímeros, uma vez que a parcela da tensão hidrostática na tensão de escoamento e ruptura desses materiais é de extrema relevância (GHORBEL, 2008).

Os primeiros relatos sobre o uso deste critério foram em pesquisas que datam a década de 1960, assim foram desenvolvidos critérios de falha mais realísticos com aplicação para os materiais poliméricos (RAGHAVA; CADDEL; YEH, 1973). Hu e Pae (1963), efetuaram a inclusão nos critérios de falha do primeiro invariante de tensão (II), referente às tensões hidrostáticas do campo de tensão.

O nível de desbalanceamento de um material pode ser quantificado a partir da simples relação entre as tensões limite de escoamento à compressão e à tração, de acordo com a equação 22 e onde S_{LE-C} e S_{LE-T} são respectivamente a tensão limite de escoamento à compressão e tensão limite de escoamento à tração.

$$m = \left| \frac{S_{LE-C}}{S_{LE-T}} \right| \quad (22)$$

Com o objetivo de ilustrar a razão m para o presente trabalho, foi utilizado o software CES Edupack 2016. Foram plotados gráficos que representam a variação do m para a base de polímeros termoplásticos disponíveis neste software, o que corresponde a 558 materiais (termoplásticos). De modo a facilitar a visualização, apenas alguns materiais de amplo uso foram destacados nos gráficos.

A Figura 20 apresenta a variação da razão m em função da tensão limite de escoamento à tração. Neste caso, a razão m foi calculada em função da tensão limite de resistência à compressão, dividido pela tensão limite de escoamento à tração. Por meio desta figura conclui-se que para a grande maioria dos polímeros termoplásticos, a razão m tende ao desbalanceamento, ou seja, valores diferentes do que um.

A Figura 21 também apresenta a variação da razão m em função da tensão limite de escoamento à tração. Contudo, a razão m para esta situação, foi calculada em função do módulo de elasticidade em compressão dividido pelo módulo de elasticidade em tração.

Figura 20 - Desbalanceamento de termoplásticos baseado na tensão limite de resistência mecânica.

Fonte: Autor, 2016

Figura 21 - Desbalanceamento de termoplásticos baseado no módulo de elasticidade.

Fonte: Autor, 2016

Definida a razão m , é possível assumir então duas abordagens para efetuar melhores estimativas de comportamento mecânico para estes materiais desbalanceados. As abordagens tomam como base o critério de von Mises já apresentado anteriormente. A fundamentação é baseada em incorporar os efeitos hidrostáticos a este critério. Deste modo os critérios são denominados de: critério de escoamento de von Mises conicamente modificado e critério de escoamento de von Mises parabolicamente modificado (ROESLER et al., 2007). De acordo com Osswald et al. (2006), estas duas abordagens podem ser calculadas conforme as equações 23 e 24, respectivamente representando a tensão equivalente de von Mises com base no critério conicamente modificado e parabolicamente modificado.

$$\sigma_{Conico} = \frac{m-1}{2m}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \frac{m+1}{2\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (23)$$

$$\sigma_{parabolico} = \frac{m-1}{2m}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \sqrt{\left(\frac{m+1}{2m}\right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{2m} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (24)$$

Deste modo a representação dos loci de falha para ambos critérios é apresentada conforme a Figura 22.

Figura 22 - Loci de falha dos critérios modificados de von Mises, aplicáveis aos termoplásticos.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

Legenda: a) Lócus de falha do critério parabolicamente modificado de von Mises, para desbalanceamento de $m=3$.

b) Lócus de falha do critério conicamente modificado de von Mises, para desbalanceamento de $m=2,3$.

A Figura 23 demonstra a comparação entre o tradicional critério de von Mises com os critérios conicamente e parabolicamente modificados, aplicáveis a materiais desbalanceados, no caso específico deste trabalho os polímeros termoplásticos.

Figura 23 - Comparação entre o critério de escoamento de von Mises e os critérios conicamente e parabolicamente modificados para parâmetro m similar.

Fonte: Autor “adaptado de” Roesler et al., 2007

Dentre os dois critérios modificados apresentados, segundo a literatura o que caracteriza mais proximamente os dados experimentais é o critério parabolicamente modificado de von Mises. Deste modo, o parabólico é mais realista que o critério conicamente modificado de acordo com resultados experimentais (OSSWALD et. al., 2006). A Figura 24 representa dados experimentais para diversos termoplásticos usualmente empregados em componentes de engenharia.

Figura 24 - Comparação entre dados experimentais - Critérios de von Mises / Parabolicamente modificado / Conicamente modificado

Fonte: Osswald et. al., 2006, p.493.

Ao longo das pesquisas realizadas no presente trabalho é possível afirmar que mesmo havendo critérios aplicáveis para materiais desbalanceados existe uma grande lacuna com

relação à determinação das propriedades à tração e compressão e à aplicação destes critérios ou mesmo pesquisas sobre o tema. Desta forma a difusão deste assunto mesmo a nível industrial não é de grandes proporções. Portanto a utilização de um corpo de prova unificado para que sejam mensuradas propriedades de tração, compressão e torção facilita os ensaios experimentais sob diferentes carregamentos e elimina algumas variáveis indesejadas - como diferentes geometrias, atrito, volumes amostrados e processos de fabricação (considerando que a proposta atual deve ser injetada), variáveis estas que influenciam diretamente no comportamento mecânico dos materiais poliméricos.

Deste modo o presente trabalho visa contribuir de forma direta nas pesquisas relacionadas a ensaios mecânicos, avaliações de integridade de componentes poliméricos e também critérios de escoamento de materiais desbalanceados.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS PARA MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS

A caracterização do comportamento mecânico pode ser feita atingindo-se ou não a ruptura do material. Por exemplo: módulo elástico, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, etc., são parâmetros caracterizados sem atingir a ruptura do polímero. Por outro lado, tensão e deformação na ruptura, resistência ao impacto, número de ciclos de vida sob fadiga, etc., são propriedades mecânicas determinadas no limite da resistência destrutiva do polímero (CANEVAROLO, 2002).

Atualmente existe uma série de testes mecânicos a serem realizados para materiais poliméricos, muitos dos quais não são oficialmente reconhecidos como testes normalizados. O foco deste trabalho é propor uma geometria unificada, que objetiva atender aos ensaios de tração, compressão e torção. Portanto serão utilizadas como referência as normas ASTM que são reconhecidas tanto academicamente como industrialmente para execução dos testes.

A padronização de testes é de extrema relevância, já que valida os testes de modo interlaboratorial, ou seja, é capaz de trazer a uniformidade ao procedimento independentemente de onde o teste foi realizado ou por quem o realizou. Do ponto de vista crítico, os testes padronizados são essenciais, mas é válido esclarecer que nem sempre as condições e premissas adotadas segundo as normas vigentes são válidas para todos os casos possíveis que a mesma deveria cobrir. Existem lacunas ou mesmo pontos que poderiam ser otimizados ou modificados. Por esta motivação, este trabalho visa contribuir com a proposta de uma geometria única que permita melhor comparabilidade de resultados, além de ser uma situação realística a nível de processamento, já que a proposta da mesma é a produção do corpo de prova via injeção.

3.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é largamente utilizado com o foco de fornecer informações básicas para seleção de materiais e projeto, tal como parâmetros de resistência e também como um critério de aceitação na especificação de materiais. No teste de tração o material em questão é submetido a um esforço uniaxial constante e crescente, ou seja, um carregamento monotônico, enquanto simultaneamente são medidos o deslocamento e a força, e deste modo o ensaio prossegue até que ocorra a ruptura do corpo de prova (DIETER, 1988; NIELSEN, LANDEL, 1994). Com as repostas medidas simultaneamente ao longo do ensaio até a ruptura, torna-se possível calcular as tensões resultantes, tal como em função da medida do deslocamento as deformações ao longo do ensaio. Em geral o corpo de prova é instrumentado com o extensômetro, que visa medir a deformação somente na seção útil.

Os resultados obtidos por meio do ensaio de tração para os polímeros termoplásticos são frequentemente mal interpretados e até mesmo mal executados e mensurados do ponto de vista experimental. A dificuldade em efetuar um tratamento adequado aos materiais poliméricos advém destes apresentarem uma porção elástico linear muito pequena se comparado aos metais. Deste modo, a determinação de algumas propriedades é comprometida, tal como módulo de elasticidade e tensão de escoamento.

Contudo existem procedimentos padronizados tais como a D638-14 (ASTM, 2014) que equivale a ISO 527-1 (ISO, 2012), que definem as condições necessárias a fim de efetuar o teste em polímeros termoplásticos de maneira padronizada (NIELSEN; LANDEL, 1994; OSSWALD et al., 2006).

Ao se tratar da gama de propriedades obtidas por meio do ensaio de tração se faz necessário efetuar uma breve definição de cada uma das mesmas, pois estes termos básicos serão utilizados a fim de discussão de cada propriedade mecânica que estará intimamente ligada a curva tensão deformação.

Os materiais poliméricos podem apresentar comportamentos distintos durante o ensaio de tração, conforme já apresentado e discutido anteriormente no capítulo referente ao comportamento mecânico. Porém mesmo diante deste cenário de distinção entre curvas, existem pontos em comum que caracterizam as propriedades mecânicas à tração e são estes: módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência (máxima tensão suportada pelo material), tensão limite de ruptura (tensão no momento da ruptura) e parâmetros associados a ductilidade (alongamento e estrição). A cada tensão que pode ser calculada é possível associar a deformação correspondente.

A tensão limite de escoamento apresenta certo impasse nas pesquisas realizadas para materiais poliméricos, pois para alguns autores, este ponto pode ser caracterizado como a menor tensão para a qual a deformação aumenta sem que haja um aumento corresponde proporcional a tensão, ou seja ocorre deformação de forma gradativa sem ocorrer aumento da força (SHAH,1998, BOWER; 2002, WARD; SWEENEY,2013). Já por sua vez segundo Bianchi (2011) e Ozilio (2012), o escoamento pode ser definido tomando como base que ao carregar um material e o mesmo não retorna mais para a sua geometria inicial o mesmo ultrapassou a tensão limite de escoamento, sentido análogo aos materiais metálicos desde que desprezado o comportamento viscoso dos polímeros.

Por um outro aspecto, as normas caracterizam este ponto de tal maneira a tomar como base a medida por uso de um *offset* que é a forma característica de tentar buscar um padrão por meio de uma convenção. Para maioria dos metais este valor é empregado na ordem de 0,2 % de deformação. Para os metais este *offset* funciona muito bem, já que estes materiais apresentam um regime elástico bem definido, ou seja, a reta paralela à reta do módulo de elasticidade que deverá ser traçada para mensurar a tensão limite de escoamento, distanciada em 0,2 %, apresenta grande precisão. Porém para materiais poliméricos a reta pela qual se define o módulo de elasticidade em muitos casos não é de grande precisão, pois a linearidade de polímeros é pequena e em muitos casos quase inexistente, portanto a reta a qual será traçada paralela a do módulo de elasticidade pode não representar o valor real do material em questão e deste modo afetará diretamente a determinação da tensão limite de escoamento.

A Figura 25 apresenta três casos característicos com curvas típicas de termoplásticos do ponto de vista experimental. Onde a curva (I) representa, o comportamento característico para materiais frágeis. O ponto A representa a máxima tensão que o material suportou e este ponto também é a tensão de ruptura. A curva (II) representa, o comportamento característico de materiais dúcteis. Segundo definição já abordada anteriormente, o ponto B pode ser definido como tensão de escoamento e o mesmo reflete a tensão máxima do material, após o mesmo há uma queda e o material se rompe (C). E a última curva (III), representa o comportamento de materiais dúcteis. O ponto D, é onde ocorre o escoamento e logo em seguida ocorre o ponto de máxima tensão (E) que pode ser simultâneo ao ponto de ruptura.

Como já apresentado neste capítulo, a determinação da tensão de escoamento pode seguir a convenção do *offset*, e portanto, a partir deste momento a tensão de escoamento apresentada nesta figura passa a não ser válida.

Figura 25 - Curvas típicas tensão vs. deformação para polímeros termoplásticos.

Fonte: Autor, “adaptado” de ASTM, 2014.

Segundo Bianchi (2011), por meio de uma investigação a respeito de diferenças entre vários *offsets*, o mesmo avaliou diferenças nos valores de tensões limite de escoamento com base em quatro *offsets* distintos: 0,2%, 0,5%, 1,0% e 2,0%. Com base nestas avaliações, o mesmo concluiu que o desvio para os *offsets* de 0,2% e 0,5% são elevados, e o valor passa a ser confiável (ou estável para fins de quantificação e comparação) apenas acima de aproximadamente 1%.

Já o módulo de elasticidade também apresenta suas variações. Segundo Brown (2002), o módulo de elasticidade pode ser caracterizado basicamente de duas maneiras para materiais poliméricos, usualmente como discutido abaixo:

- a) o módulo tangente, que é a relação tensão/deformação de uma reta que pode ser ajustada a porção inicial do ensaio de tração e passa pela origem no gráfico. Para a maioria dos polímeros esta porção linear é muito pequena e durante o ensaio pode ser considerada um evento de curta duração;

- b) o módulo secante que é o valor calculado para um valor específico de deformação, sendo mais largamente empregado para materiais com comportamento tendendo a maior rigidez, ou seja, um maior módulo de elasticidade.

Ao se tratar do módulo secante vale o comentário adicional sobre seu ponto de vista tecnológico, pois o mesmo sofre um efeito considerável ao se variar a deformação escolhida para tomar como base na medição de seu valor. Este efeito pode ser visto claramente na Figura 26, onde é notório, que para uma maior deformação haverá um decréscimo significativo no valor do módulo secante.

Figura 26 - Módulo secante vs. deformação para o PEAD

Fonte: Autor “adaptado de” Brown, 2002

Devido a este motivo é mais comum utilizar o módulo tangente, porém é válida a ressalva de que atenção especial deve ser dada no tratamento de dados para o módulo de elasticidade, pois a porção escolhida para efetuar os cálculos deve realmente conter a porção linear elástica e em muitos casos torna-se necessário para ter uma região realmente linear elástica, eliminar a porção inicial do teste (região que pode conter imprecisões iniciais, devido a possíveis folgas no equipamento e acomodação do corpo de prova). Caso contrário, além da imprecisão no valor do módulo de elasticidade, haverá impacto negativo na determinação da tensão limite de escoamento.

3.4.1.1 Influência da taxa de carregamento

Quanto maior a velocidade de ensaio, maior a resistência mecânica e menor a capacidade de deformação da amostra, justamente pela menor incidência de fenômenos dependentes do tempo, ou seja, efeitos viscosos. O efeito que ocorre por conta da taxa de carregamento pode ser observado na Figura 27.

Segundo Osswald et al. (2006) o uso de taxa de deformação pode se dar de acordo com o material a ser testado. Materiais com tendência de comportamento frágil, segundo a ISO-527 (ISO, 2012) aquele que não escoar para romper ou sua deformação no momento da ruptura atinge níveis $<10\%$, a velocidade de ensaio será na ordem de 5 mm/min e materiais com tendência dúctil, aquele que apresenta um perceptível escoamento ou tem sua deformação na ruptura $>10\%$, a velocidade deverá ser de 50 mm/min , e se o foco for em obter o módulo de elasticidade a taxa de deformação ainda deverá ser mais lenta, na ordem de 1 mm/min .

A Figura 27 apresenta o efeito da sensibilidade à taxa de carregamento para um termoplástico semicristalino, no caso específico um PEAD, onde é possível afirmar que ao aumentar a taxa de carregamento ocorre o aumento da resistência mecânica seguida da diminuição expressiva da ductilidade.

Figura 27 - Efeito da taxa de carregamento no ensaio de tração (PEAD)

Fonte: Autor “adaptado de” Osswald et al., 2006.

A norma D638-14 (ASTM, 2014) apresenta 5 possibilidades de geometria, apresentadas na Figura 28 e Tabela 1, com base em dimensões distintas. Para cada uma destas

geometrias existem velocidades de ensaio específicas de 1, 5, 10, 50, 100 e 500 mm/min. Segundo esta norma a velocidade de ensaio escolhida deve ser a menor possível com o objetivo de produzir a ruptura do corpo de prova a partir de 0,5 min. até 5 min. de ensaio.

Em resumo o corpo de prova Tipo I é o mais utilizado e exige que o mesmo possua espessura de até 7 mm. O Tipo II é utilizado para materiais que foram testados com o Tipo I, porém não romperam. O Tipo III é utilizado para faixa de espessura entre 7 e 14 mm. O Tipo IV é utilizado para ensaios comparativos entre materiais com valores de rigidez distintas entre eles. O Tipo V é utilizado para ensaios em corpos de prova que possuem espessura menor que 4 mm. Para corpos de prova injetados são indicados os tipos III e IV.

Figura 28 - Dimensões de corpos de prova de ensaio de tração.

Fonte: ASTM, 2014.

Legenda: (a) Tipos I, II, III e V; (b) Tipo IV.

Tabela 1 - Dimensões de corpos de prova de ensaio de tração dos tipos I, II, III, IV e V.

Dimensões	Dimensões dos corpos de prova por espessura, T, mm (polegada)					Tolerâncias
	7 (0,28) ou menor	Entre 7 e 14 (0,28 e 0,55)	4 (0,16) ou menor			
	<i>Tipo I</i>	<i>Tipo II</i>	<i>Tipo III</i>	<i>Tipo IV</i>	<i>Tipo V</i>	
W - Largura da seção estreita	13 (0,50)	6 (0,25)	19 (0,75)	6 (0,25)	3,18 (0,125)	$\pm 0,5 (\pm 0,02)$
L ₂ - Comprimento da seção estreita	57 (2,25)	57 (2,25)	57 (2,25)	33 (1,30)	9,53 (0,375)	$\pm 0,5 (\pm 0,02)$
W ₀ - Largura total, min	19 (0,75)	19 (0,75)	29 (1,13)	19 (0,75)	...	+ 6,4 (+0,25)
W ₀ - Largura total, min	...	...	...	...	9,53 (0,375)	+ 3,18 (+0,125)
L - Comprimento total, min	165 (6,5)	183 (7,2)	246 (9,7)	115 (4,5)	63,5 (2,5)	...
W _G - Comprimento do gage	50 (2,0)	50 (2,0)	50 (2,0)	...	7,62 (0,3)	$\pm 0,25 (\pm 0,01)$
W _G - Comprimento do gage	...	...	...	25 (1,0)	...	$\pm 0,13 (\pm 0,005)$
L ₄ - Distância entre grips	115 (4,5)	135 (5,3)	115 (4,5)	65 (2,5)	25,4 (1,0)	$\pm 5 (\pm 0,2)$
R - Raio do filete	76 (3,0)	76 (3,0)	76 (3,0)	14 (0,56)	12,7 (0,5)	$\pm 1 (\pm 0,04)$
R ₀ - Raio externo (Tipo IV)	...	...	...	25 (1,0)	...	$\pm 1 (\pm 0,04)$

Fonte: ASTM, 2014.

3.4.2 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão para polímeros termoplásticos é realizado com base na norma D695-15 (ASTM, 2015a) ou pela ISO 604 (ISO, 2002). De forma geral o comportamento

mecânico à compressão é mensurado por meio de taxa de carregamento baixa e constante ao longo do ensaio, portanto é um ensaio monotônico.

A determinação das características por meio do ensaio de compressão é de extrema relevância, especialmente quando o componente a projetar/avaliar estará sujeito a este modo de deformação em sua aplicação real. Do ponto de vista normativo este ensaio pode determinar o módulo de elasticidade e tensão limite de escoamento ou focar em obter a tensão limite de resistência à ruptura. Para isto a D695-15 (ASTM, 2015a) recomenda corpos de prova específicos e razões dimensionais a serem consideradas.

Para certos materiais como espumas e borrachas, materiais que apresentam um módulo de elasticidade baixo, a abordagem experimental é relativamente simples, mas algumas vezes pode se tornar complexa por fatores de forma. Plásticos com alta rigidez podem também ser avaliados por meio dos ensaios de compressão, mas em muitas aplicações as tensões trativas ou as de cisalhamento são mais importantes. Contudo até mesmo se o módulo de cisalhamento não é de primeiro interesse pode ser que a flambagem seja um potencial problema a ser considerado (BROWN, 2002).

Os testes de compressão podem ser uma forma padronizada da obtenção de dados para pesquisas e controle de qualidade. As propriedades mecânicas à compressão de certa forma são similares às propriedades à tração do ponto de vista do tratamento matemático. Basicamente é obtido como resultado final de um teste de compressão o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, deformação total e a tensão limite de resistência à compressão. Mas de fato o limite de resistência à compressão e o módulo de elasticidade são as duas propriedades principais extraídas do ensaio de compressão (SHAH, 1998; ASTM, 2015a).

Para os polímeros que, ao término do teste em compressão rompem de modo catastrófico, a resistência a compressão mensurada apresenta um valor definido e que é válido, pois para os polímeros que não rompem deste modo, a propriedade de resistência à compressão considerada irá depender basicamente do grau de distorção deste corpo de prova e do critério que será adotado para se considerar que houve a falha (ASTM, 2015a).

Um cuidado deve ser tomado com base nos resultados obtidos por meio do ensaio de compressão pois dependendo da aplicação os resultados podem ser considerados insignificantes para projetos de engenharia que envolvam a carga em função do tempo. Portanto para estes casos em especial adicionalmente são recomendados testes de fluência, fadiga ou mesmo considerando eventos dinâmicos como o ensaio de impacto (ASTM, 2015a).

A amostra a ser testada pode apresentar seção transversal com área prismática de 12,7 mm x 12,7 mm por uma altura de 25,4 mm ou a mesma deve ser um cilindro de dimensões na

ordem de 25,7 mm de altura por 12,7 mm de diâmetro de acordo com a Figura 29, ou seja, mantendo a razão do comprimento pelo diâmetro na ordem de 2 (L/d). A versão cilíndrica é a mais usual, os corpos de prova podem ser preparados por processo de usinagem. Outro parâmetro relevante do ponto de vista dimensional em compressão é o índice de esbeltez (equação 25) do corpo de prova. O mesmo deve estar entre 11 e 16, principalmente quando o foco do ensaio é em determinar o módulo de elasticidade como também a tensão limite de escoamento (ASTM, 2015a).

$$\text{Índice_Esbeltez} = \frac{L_{fl}}{r_{\text{gição}}} \quad (25)$$

Figura 29 - Exemplo de geometria de corpo de prova segundo ASTM D695.

Fonte: Odom; Adams, 1994.

Definida a geometria, o corpo de prova deve ser inserido no equipamento universal de ensaios. As extremidades do mesmo devem ser lubrificadas e a velocidade de ensaio recomendada do início até o ponto de escoamento no ensaio de compressão é de 1,3 mm/min para corpo de prova com altura de 25,4 mm (esta altura considera o corpo de prova um cilindro entre bases na máquina de ensaio). Para a fase final do ensaio após o escoamento a velocidade pode ser aumentada e deve estar entre 5 até 6 mm/min., deste modo o ensaio pode prosseguir até a fase final da ruptura.

Dada a consideração das dimensões é muito importante efetuar uma breve discussão entre a razão do comprimento (L) pelo diâmetro (d) do corpo de prova. A relação do L/d é fundamental para o comportamento do polímero em teste à compressão. Caso esta relação seja relativamente grande pode tender a ocorrer flambagem, o que acarretará em uma medida experimental inválida para caracterizar as propriedades mecânicas à compressão. Além da preocupação da relação L/d , a flambagem pode ser afetada por mal alinhamento do corpo de prova com o eixo de aplicação do esforço uniaxial do equipamento universal de ensaios. Por

outro lado, se a relação L/d é pequena o corpo de prova durante o ensaio tende a aumentar seu diâmetro devido ao efeito *Poisson*. Mas devido ao atrito com as placas, ou seja, onde o carregamento está sendo efetuado haverá um retardo no aumento no diâmetro nas extremidades, o que resultará na forma do corpo de prova tendendo a um barril, este efeito pode ser minimizado pela devida lubrificação das extremidades da amostra.

De acordo com a descrição dos fenômenos que podem ocorrer em um ensaio em compressão, a Figura 30 representa esquematicamente os comportamentos que podem vir a invalidar um teste de compressão. Deste modo as figuras representam: (a) caso onde a relação L/d é muito pequena e portanto, o efeito deletério neste caso é o atrito das extremidades do corpo de prova que faz o mesmo atingir a forma de barril, (b) comportamento em flambagem devido a lubrificação ineficiente das amostras e/ou grandes razões L/d e (c) comportamento em flambagem devido à instabilidade lateral.

Figura 30 - Comportamentos indesejados durante o ensaio de compressão.

Fonte: Hosford, 2005.

Segundo Dowling (1999) e Hosford (2005), a fim de se obter uma relação L/d que atenda aos dois pontos mencionados acima, ou seja, o L/d seja pequeno o suficiente para evitar a flambagem e seja o maior possível para assim diminuir ao máximo o efeito de bordas. Um compromisso razoável seria para materiais dúcteis $L/d = 3$. E para materiais frágeis o valor poderia oscilar de $L/d=1,5$ a 2 já que os efeitos de bordas para estes materiais são menores. Porém é válido ressaltar que estes valores de referência são válidos do ponto de vista de materiais metálicos, para polímeros não há grandes informações sobre estas relações.

De acordo com Ozilio (2012) utilizando o conceito de um corpo de prova cilíndrico prismático para relações de L/d com valores de 1, 2, 3, 3,5 e 4 o mesmo apresentou que a relação ótima seria de L/d de 3, porém sendo possível utilizar ainda com alta confiabilidade a relação L/d de 2, para polímeros termoplásticos. Caruso (2015) avaliou razões de L/d na ordem de 2 até 4 e efetuou validações do ponto de vista numérico experimental de corpos de prova de termoplásticos usinados (geometria acordo Figura 31). Do ponto de vista numérico por meio

do uso do MEF, a razão L/d de 3 foi a que apresentou piores resultados, pois nesta condição os campos de tensão não apresentaram uniformidade até níveis de carregamento úteis para obtenção do módulo elástico, das tensões limite de escoamento e da tensão de instabilidade. Do ponto de vista experimental dentre as amostras testadas os melhores resultados foram obtidos para o corpo de prova com relação de L/d de 2.

Figura 31 - Corpo de prova de compressão, proposto de Caruso.

Fonte: Caruso, 2015.

Além dos trabalhos citados anteriormente, o estudo de Odom e Adams (1994) é de grande relevância, pois neste estudo foi efetuada uma série de ensaios de compressão em uma resina polimérica termofixa (epóxi), com corpo de prova apresentando as seguintes relações dimensionais em função do L/d : 2, 1,5, 1,3, 1,1 e 0,9, conforme apresentado na Figura 32, onde na figura (a) são apresentadas as relações em função do L/d , e na figura (b) as garras utilizadas para a compressão.

Figura 32 - Corpo de prova de compressão, proposta de Odom e Adams.

Fonte: Autor “adaptado de” Odom e Adams, 1994.

As conclusões que Odom e Adams (1994) obtiveram por meio dos testes são de grande valia para o presente trabalho, pois mesmo realizado o estudo com um termofixo a geometria

dos corpos de prova sofre o carregamento de compressão de modo que ambas extremidades estão bi engastadas, fato que reflete o comportamento direto proposto nesta dissertação. Do ponto de vista geométrico o trabalho de Odom e Adams (1994) mostra que com um único corpo de prova de compressão é possível obter módulo de elasticidade e tensão limite de escoamento como tensão limite de resistência do material em compressão, fato este não recomendado pela D695-15 (ASTM, 2015a), que recomenda uma geometria distinta para medições de módulo e tensão limite de escoamento com $L/d=4$ e índice de esbeltez de 11 à 16, e para corpos de prova que visa chegar até a ruptura a relação de $L/d=2$. Odom e Adams (1994) mostram que com L/d de 2 para um corpo de prova bi engastado é a razão ótima para o teste atendendo de maneira satisfatória ambas condições (medição de módulo / limite de escoamento como tensão limite de resistência).

Contudo nas geometrias propostas por Odom e Adams (1994) existem pontos que podem ser otimizados, já que as mesmas apresentam seção transversal circular e zona útil com forma cilíndrica unidas as suas cabeças cilíndricas também por seções cônicas, que não representa uma transição suave e gradual. Além disto o trabalho não apresentou uma correlação numérico experimental para assim validar o modelo com um embasamento fenomenológico, cobrindo diversas hipóteses, tal como flambagem. Neste contexto, a pesquisa exploratória de Caruso (2015) já apresentada anteriormente, efetuou uma avaliação via método numérico e otimizou a geometria de Odom e Adams (1994). Com base em ambos estudos, o presente trabalho irá utilizar as premissas e dificuldades encontradas por ambos a fim de projetar a geometria unificada de forma eficiente e que garanta em compressão bons resultados experimentais.

3.4.3 Ensaio de torção

Segundo Swallowe (1999) e Dieter (1988) o ensaio de torção é um método conveniente para medir o módulo de elasticidade transversal e também não menos importante a resistência ao escoamento sob carregamento torcional (cisalhante).

O ensaio de torção possibilita atingir um elevado nível de deformação sem a ocorrência de instabilidade (estricção) típica no ensaio de tração. Daí o grande interesse para aplicações de processamento a quente de metais, onde os mesmos são expostos a elevados níveis de deformação plásticas (HOSFORD, 2005).

Do ponto de vista de comportamento mecânico, o carregamento em torção promove no corpo de prova testado um estado biaxial de tensões, que é de grande relevância se

comparado com os outros ensaios apresentados neste trabalho, pois os ensaios de compressão e tração, descrevem apenas o campo uniaxial.

Sob o ponto de vista de comportamento mecânico e estados de tensão sob torção, a discussão não havia sido realizada. Deste modo a Figura 33 ilustra o estado de tensões em um ponto material sujeito ao carregamento de torção. A máxima tensão de cisalhamento ocorre mutuamente em dois planos perpendiculares aos eixos, tanto longitudinal como transversal, representado pelo $\tau_{\max}$.

As tensões principais σ_1 e σ_3 estão posicionadas com relação ao plano horizontal em um ângulo de 45° , ambas tem a mesma magnitude, porém σ_1 está sob tração enquanto σ_3 está sob compressão. Deste modo o valor intermediário será zero (DIETER, 1988).

Do ponto de vista da fratura sob torção para polímeros, não há informações relevantes na literatura. Segundo Dieter (1988), a fratura sob torção pode ser dividida em duas classes distintas para os metais, onde para materiais dúcteis a falha ocorre por meio dos planos de máximo cisalhamento, portanto a fratura característica é de característica plana, ou seja, perpendicular ao plano normal. Já a fratura para materiais frágeis ocorre geralmente a 45° e tende a formar um helicóide, isto porque a mesma ocorre em um plano perpendicular ao da tensão normal σ_1 .

Figura 33 - Estados de tensões em torção

Fonte: Dieter (1988).

Por meio das pesquisas na literatura realizadas neste trabalho, é possível concluir que não há muitas informações relevantes sobre ensaios de torção aplicáveis a materiais poliméricos. Mesmo em relação às normas existe uma grande lacuna. As normas que mais se aproximam do tema com foco em polímeros são, D1043-10 (ASTM, 2010b) que apresenta um método de testes com o foco na determinação das propriedades ligadas a rigidez em função da temperatura por meio do ensaio de torção; outra norma na área de ensaios é a D4065-12

(ASTM, 2012), sendo que a mesma apresenta um método para determinação de propriedades dinâmicas em torção para polímeros.

A geometria usual de teste de torção é um sólido cilíndrico com suas extremidades fixas, sendo que em um dos lados é aplicado o carregamento torcional e no outro lado é efetuado o engastamento. Deste modo diante do carregamento, ocorre a torção e o surgimento de um ângulo, conforme proposto pela Figura 34.

Figura 34 - Corpo de prova de torção

Fonte: Swallowe (1999).

Este corpo de prova é submetido a um carregamento crescente por meio do ângulo de rotação e o seu respectivo torque é mensurado. Com o objetivo de efetuar uma análise mais precisa do que ocorre na região de estudo e ser possível traçar a curva da tensão de cisalhamento atuante pelo ângulo de deformação distorcional, se faz necessário o uso de um instrumento que permita mensurar a deformação exatamente na região da seção reduzida de uma amostra.

A longo da seção transversal do corpo de prova a tensão de cisalhamento varia linearmente de zero para o centro do corpo de prova até o valor máximo na superfície se considerado o trecho linear elástico da curva. Após ocorrer o escoamento ocorre um gradiente da distribuição de tensões ao longo do corpo de prova, ou seja, as tensões passam a não serem mais lineares ao longo do raio.

Para casos pontuais, onde ocorre intenso nível de deformação plástica, o corpo de prova exibe a tendência de diminuição de seu comprimento, porém o mesmo é engastado nas extremidades e existe restrição de movimento com relação ao eixo longitudinal. Devido a este motivo, na direção axial do corpo de prova podem surgir tensões devido à restrição. Estas tensões axiais vão se somar com as tensões promovidas pelo carregamento torsional. Deste modo, existe a tendência de influenciar no resultado final do teste, e por consequência final a fratura pode apresentar característica distinta das citadas anteriormente (DIETER, 1988).

Com base nas pesquisas realizadas, é possível concluir que para o ensaio de torção em termoplásticos, não há uma norma específica que forneça as diretrizes básicas para realização

da caracterização das propriedades mecânicas. Ao buscar referência nas normas vigentes, que mais se aproximam do assunto, não é possível obter muitas informações objetivas que de fato contribuam para o desenvolvimento deste trabalho. A D5279-08 (ASTM, 2008) não descreve um corpo de prova e sim dá indicação que as amostras empregadas devem ser representativas do material a ser testado. Já por sua vez a D1043-10 (ASTM, 2010b) apresenta uma geometria como base, uma barra com seção transversal retangular, porém com base no estudo deste trabalho, a proposta por uniformidade de tensão será mantida em foco e portanto, a geometria de estudo proposta será a cilíndrica. Estas limitações encontradas pelo autor são de grande motivação ao presente estudo, pois visa também cobrir esta lacuna presente na determinação de propriedades mecânicas com foco em torção.

4 CONCEPÇÃO DA GEOMETRIA UNIFICADA

Este capítulo aborda todas as etapas referentes ao desenvolvimento da geometria unificada. A princípio são apresentadas as premissas adotadas como condições de contorno, em seguida será determinada a geometria com suas respectivas cotas. De posse das dimensões da geometria, será executada avaliações analíticas e numéricas, com o foco em avaliar a uniformidade dos campos de tensões, seguida de discussões sobre estes resultados.

4.1 DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA

Como já apresentado anteriormente, a concepção da geometria unificada no presente trabalho vai de encontro a uma proposta que visa cobrir uma lacuna existente na determinação de propriedades mecânicas de materiais poliméricos.

As propriedades mecânicas para termoplásticos normalmente são mensuradas do ponto de vista monotônico, onde os ensaios realizados tanto a nível científico como industrial, são de tração (ASTM, 2014) e flexão (ASTM, 2010a). Porém outros ensaios são de extrema relevância na determinação de propriedades mecânicas. As propriedades compressivas, permitem associadas ao ensaio de tração a determinação do nível de desbalanceamento do material, como também o ensaio de torção, que visa caracterizar o material sob a ação de campos biaxiais. Portanto a geometria unificada visa a realização dos testes de tração, compressão e torção, utilizando uma única geometria.

4.1.1 Premissas

A premissa será apresentada neste item, e de forma na sequência virão as condições de contorno que conduziram o presente trabalho a atingir a geometria desejável do corpo de prova unificado. A pesquisa de Caruso (2015) identificou por meio de uma análise nas normas correntes de tração, que há uma correlação entre dimensões específicas dos corpos de prova. As principais razões entre as diversas geometria normalizadas são apresentadas a seguir (cotas conforme Figura 35):

- a) comprimento e diâmetro úteis (L_2/d);
- b) raio de concordância da cabeça e o diâmetro da região central (R/d);
- c) área da cabeça do corpo de prova (A_D) e a área central do corpo-de-prova (A_d), (A_D/A_d);
- d) comprimento da cabeça e o diâmetro da cabeça do corpo de prova (L_1/D).

Figura 35 - Corpo de prova - Dimensões iniciais para estudo.

Fonte: Autor, 2016.

No mesmo estudo após a definição das relações geométricas, foram efetuados ensaios mecânicos, que identificaram a geometria com o melhor desempenho, chamada de corpo de prova #340, com dimensões e razões explícitas, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova #340 proposto por Caruso (2015)

Geometria	d	L_2/d	L_2	R/d	R	D	A_D/A_d	L_1/D	L_1	L_3	L
Unidades	mm	mm/mm	mm	mm/mm	mm	mm	mm/mm	mm/mm	mm	mm	mm
#340	6,4	2,0	12,7	4,0	25,4	12,5	3,9	2,0	25,0	12,1	86,9

Fonte: Autor “adaptado de” Caruso 2015

Deste modo, o presente trabalho pretende adaptar esta geometria (embora com proporções mantidas) em função de condições de contorno para dimensões reduzidas, para facilitação de confecção de amostras em quantidade por meio de injeção.

4.1.2 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas têm como base a revisão da literatura apresentada inicialmente. Portanto, foi efetuado um delineamento com base em cada ensaio mecânico que

a geometria unificada visa atender. Deste modo, as limitações e pontos a serem melhorados são apresentados abaixo:

- a) a amostra de tração foi inspirada na norma de ensaio de tração D638-14 (ASTM, 2014), porém com uso de uma seção transversal cilíndrica de dimensões reduzidas. Tomando como base, o menor L_2 (comprimento útil) possível, que é de 5 mm, pois para este comprimento ainda é possível encontrar extensômetros comerciais dos principais fabricantes como Instron e MTS. Porém para este trabalho o mesmo foi projetado e confeccionado pelo autor, por motivo do Centro Universitário FEI ainda não possuir o mesmo;
- b) do ponto de vista do ensaio de compressão, a geometria foi inspirada no trabalho de Odom e Adams (1994), como já apresentado no parágrafo 3.4.2. Contudo, as cabeças devem ser unidas às áreas úteis por meio de raios de concordância suaves que eliminem a concentração de tensões, sendo isto avaliado numericamente. A área útil da amostra deve possuir proporção L_2/d (comprimento útil sobre diâmetro útil) que maximize a carga de flambagem, ou ao menos permita que a instabilidade só ocorra após obtida a tensão limite de escoamento e a parte do regime plástico de deformação uniforme de interesse do material. A pesquisa de Caruso (2015) fez seu estudo com a relação $L_2/d=2$, que é a recomendação da norma vigente, porém segundo sua pesquisa foi sugerido como trabalho futuro o $L_2/d=1$. Portanto o presente trabalho tem em foco buscar um L_2/d tendendo a 1, mesmo não sendo recomendado pelas normas. Esta razão por sua vez vai de encontro a uma geometria de fácil injeção de dimensões reduzidas;
- c) do ponto de vista a tornar possível também o ensaio em torção a geometria deve apresentar seção transversal cilíndrica (no trecho útil) com eixo retilíneo possibilitando o ensaio em ambos regimes de deformação, elástico e plástico. Na região das cabeças do corpo de prova, onde o mesmo é fixado no equipamento universal de ensaios o mesmo apresenta seção cilíndrica, porém com faces planas paralelas, para deste modo facilitar a fixação em garras no equipamento de torção e permitir que não exista a possibilidade de escorregamento, tornando a aplicação de torque ao corpo de prova contínua e gradativa.

Deste modo, a Tabela 3 apresenta quais relações foram adotadas das premissas definidas pela pesquisa de Caruso (2015) e quais parâmetros básicos foram provenientes das condições

de contorno, mencionadas acima. Tais proporções e dimensões foram a base para a determinação das dimensões finais da geometria unificada.

Tabela 3 - Parâmetros básicos assumidos para dimensionamento da geometria unificada

Parâmetros adotados com base cp#340 (CARUSO, 2015)			Parâmetros básicos provenientes das condições de contorno	
Geometria	R/d	A_D/A_d	D	L_2
Unidades	mm/mm	mm/mm	mm	mm
Unificada	4,0	3,9	8,0	5,5

Fonte: Autor, 2016.

4.1.3 Dimensões finais

Com os parâmetros básicos determinados foi possível efetuar um procedimento iterativo de cálculo a fim de determinar todas as dimensões relevantes do corpo de prova. Este processo foi possível por meio do emprego de um recurso de otimização do Microsoft Excel, conhecido como “Solver”, uma vez que todas as proporções e formulações relativas ao corpo de prova haviam sido programadas no programa. Para este recurso foi definido como fator limitante que o diâmetro da seção útil não excedesse o valor de 5 mm, por motivo das limitações práticas na produção de corpos de prova, razão baseada na possibilidade de defeitos de injeção como formação de bolhas.

Desta forma a Tabela 4 apresenta as dimensões resultantes para o corpo de prova unificado proposto pelo presente trabalho.

Tabela 4 - Dimensões propostas para o corpo de prova unificado

Geometria	d	L_2/d	L_2	R/d	R	D	A_D/A_d	L_1/D	L_1	L_3	L
Unidades	mm	mm/ mm	mm	mm/ mm	mm	mm	mm/ mm	mm/ mm	mm	mm	mm
Unificado	4,1	1,3	5,5	4,0	16,2	8,0	3,9	3,0	21,0	7,8	69,0

Fonte: Autor “adaptado de” Caruso, 2015

De posse das dimensões do corpo de prova foi possível assim efetuar o projeto do mesmo conforme apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Geometria unificada - Dimensões em mm (desenho fora de escala)

Fonte: Autor, 2016.

4.2 SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS

No presente trabalho a técnica dos elementos finitos visa permitir ir além da avaliação convencional por meio da resistência dos materiais clássica e efetuar uma análise com maior riqueza de detalhes e realística incorporando os efeitos elastoplásticos, embora desconsiderando o efeito do tempo, já que o corpo de prova visa atender primariamente aos ensaios de tração, compressão e de torção.

Os softwares de elementos finitos aqui utilizados foram, como pré e pós processador o MSC Patran x64 2010, e já como processador o MSC Marc 2010. O MSC Patran x64 2010 é onde as premissas para a análise são inseridas, tal como geometria, propriedades do material testado, tipo de elemento a ser utilizado, densidade da malha, deste modo este é o ambiente onde as condições de contorno com o objetivo de modelar o teste são impostas. Já o pós-processador é o ambiente onde todo o resultado após o processamento será apresentado, permite visualização gráfica e geralmente os softwares de elementos finitos apresentam gradientes de cores. Deste modo é comum a representação com cores tendendo ao vermelho (cores quentes) de regiões com maiores níveis de carregamento, tensões, deformação entre outras, e com tonalidades tendendo ao azul (cores frias) de regiões com menores intensidades das grandezas obtidas como resposta. É válido o comentário que isto não é uma regra.

O processador efetua uma análise matricial onde é descrito o comportamento de cada elemento. Suas matrizes de rigidez podem ser combinadas gerando um grande sistema de equações que permite representar uma estrutura vinculada e carregada. Os softwares que efetuam o processamento devem ser selecionados com o objetivo de atender ao comportamento mecânico da estrutura em questão, ou seja, de maneira mais simples considerar linearidade, fatores dependentes do tempo ou mesmo como na aplicação deste trabalho a não linearidade do

material e as grandes deformações da geometria. O software selecionado para este trabalho foi o MSC Marc 2010, que permite uma avaliação adequada ao se tratar de materiais termoplásticos não lineares (tanto do ponto de vista geométrico como de modelo constitutivo), fato este de fundamental importância na aproximação dos cálculos.

4.2.1 Procedimento

As simulações numéricas em elementos finitos foram realizadas a título de verificação se a geometria unificada sugerida iria apresentar estabilidade e distribuição uniforme dos campos de tensões diante dos carregamentos propostos.

Portanto, inicialmente foi necessário decidir quais materiais seriam utilizados como base para as validações numéricas. Deste modo, o critério utilizado para decisão foi em função do módulo de elasticidade, sendo escolhido um material com baixa rigidez (PEAD) e um material com alta rigidez (POM – polióxido de metileno). Esta escolha permitiu avaliar o comportamento de extremos com relação ao módulo de elasticidade.

As curvas inseridas no MSC Patran dos materiais citados (Figura 37), foram obtidas experimentalmente por Caruso (2015), efetuando um ensaio de tração convencional com geometria padrão, conforme a norma D638-14 (ASTM, 2014).

Figura 37 - Curvas tensão vs. deformação considerando grandezas verdadeiras para POM e PEAD.

Fonte : Caruso, 2015.

Legenda: Para o PEAD, as curvas são apresentadas até a ocorrência da estricção e para o POM, até a ocorrência de ruptura.

Para as avaliações dos resultados das análises numéricas, duas propriedades mecânicas dos materiais são relevantes, sendo elas o módulo de elasticidade e a tensão para o momento no qual ocorreu a instabilidade, propriedades estas apresentadas conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Tensões consideradas de instabilidade para avaliação dos resultados numéricos obtidos.

Material	Tensão de instabilidade (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Alta rigidez (POM)	77	3385
Baixa rigidez (PEAD)	24	1074

Fonte: Caruso, 2015.

Definidos os materiais para as simulações, o próximo passo foi importar o modelo 3D da geometria unificada, desenhado por meio do software Autodesk Inventor no software MSC Patran x64. O passo seguinte consistiu em gerar uma malha baseada em quadriláteros de 4 nós (2D) ao longo de toda a extensão do corpo de provas; esta malha 2D foi então rotacionada gerando deste modo a malha 3D como apresentado na Figura 38. Neste modelo foi efetuada uma avaliação de convergência numérica preliminar que avalia o refinamento da malha e garante a convergência e a representação da fenomenologia física desejada.

Figura 38 - Malha 3D gerada no corpo de prova unificado no MSC Patran x64.

Fonte: Autor, 2016.

No ambiente do MSC Patran x64 foram impostas as restrições referentes aos vínculos. As vinculações foram realizadas por meio de coordenadas cilíndricas na extremidade esquerda do corpo de prova, onde foram bloqueados os graus de liberdade referentes à superfície cilíndrica externa à cabeça em y e z para tração, conforme apresentado na Figura 39. Já para os

outros ensaios realizados, todos os graus de liberdade foram bloqueados, o que simula o comportamento de uma garra hidráulica ou mesmo pneumática.

Na extremidade direita do corpo de prova foram aplicadas as demais restrições, conforme ilustrado na Figura 40, para o caso de tração. Ainda considerando coordenadas cilíndricas, a superfície externa foi impedida de rotacionar e os corpos de prova receberam os deslocamentos impostos descritos de acordo com a Tabela 6, para que a tensão de instabilidade fosse ultrapassada.

Figura 39 - Geometria unificada apresentando graus de liberdade da superfície cilíndrica externa à cabeça em y e z para tração, no MSC Patran x64.

Fonte: Autor, 2016.

Figura 40 - Geometria unificada com graus de liberdade da superfície cilíndrica externa à cabeça da amostra em y e z para tração, e carregamento aplicado na extremidade esquerda, para tração no MSC Patran x64.

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 6 - Deslocamentos finais aplicados nas garras móveis das simulações das malhas 3D.

Deslocamentos (mm) e carregamentos aplicados								
CP #	Tração		Compressão		Torção		Flambagem	
	POM	PEAD	POM	PEAD	POM	PEAD	POM	PEAD
Unificado	5	6	-7,5	-9	Fixo em X, rotação 4π		Criação de carga unitária (1N) nos nós em coordenada cilíndrica, em Z	

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: corpo de prova unificado. Tração, compressão, torção e flambagem.

Como premissa foram consideradas nas simulações propriedades elastoplásticas, já o comportamento viscoso não foi levado em consideração, deste modo foi admitido um comportamento independente do tempo. Após todas as condições impostas no MSC Patran, a simulação numérica foi processada no MSC Marc.

Do ponto de vista das simulações numéricas, a velocidade em que os ensaios são realizados não é levada em consideração, neste aspecto o software considera apenas passos incrementais que são baseados na deformação total. Nesse trabalho foram utilizados 100 passos incrementais para uma boa descrição da não linearidade do problema e a fim de favorecer a convergência numérica.

4.2.2 Uniformidade dos campos de tensões

Para a geometria unificada proposta neste trabalho foi essencial a verificação da uniformidade da distribuição de tensões e deformações, com o foco na seção reduzida. As simulações cujos resultados aparecem a seguir, tem o foco de verificar que diante da solicitação mecânica para cada ensaio realizado, o corpo de prova apresente estabilidade para níveis de carregamento acima da tensão limite de escoamento. Deste modo torna-se possível a determinação de propriedades mecânicas com repetibilidade e reprodutibilidade tornando o corpo de prova proposto confiável e preciso.

Os resultados apresentados a seguir estão divididos em função dos carregamentos propostos para a geometria unificada.

4.2.3 Carregamento trativo

A simulação foi efetuada impondo ao corpo de prova o carregamento trativo e, como resposta a este, foram geradas as ilustrações dos campos tensões de von Mises referenciadas nas tensões de instabilidade, já apresentadas conforme Tabela 5.

Para o material de baixa rigidez (PEAD) os resultados apresentados a seguir estão na ordem de 50%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 125%, 150%, 175% e 200% da tensão de instabilidade, e para o material de maior rigidez (POM) foram coletados resultados de 50%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 125% e 150% da tensão de instabilidade.

Para o material de menor rigidez (PEAD), avaliado numericamente com resultados apresentados conforme Figura 41, é possível afirmar que até 110% da tensão de instabilidade experimental de Caruso (2015), há uma distribuição uniforme de tensões ao longo do comprimento do corpo de prova. Na análise de elementos finitos isto é representado pelas cores que estão distribuídas uniformemente.

Para o nível acima de 150% da tensão instabilidade existe uma intensificação do nível de tensão na região de secção reduzida, que é seguido pela rápida evolução da estrição quando atingido 175%.

Por sua vez o resultado para o material de maior rigidez (POM) apresentado conforme Figura 42, demonstra uniformidade até 100% da tensão instabilidade experimental de Caruso (2015). Para nível de tensão acima de 110% da tensão instabilidade ocorre uma intensificação central no corpo de prova e posteriormente na ordem de 125% da tensão instabilidade ocorre o início da estrição.

É possível deste modo notar que a tendência observada com base nas simulações para a geometria unificada proposta é a mesma obtida experimentalmente por Caruso (2015) para materiais de mesma categoria, já que a instabilidade do corpo de prova se deu próxima e posteriormente aos 100% da tensão instabilidade. Tal resultado valida de um ponto de vista numérico a estabilidade da geometria proposta para os ensaios de tração. Diante dos resultados numéricos, o material de maior rigidez é o que mais se aproxima dos experimentos ao se considerar o ensaio de tração realizado segundo a D638-14 (ASTM, 2014).

Deste modo o cenário é positivo do ponto de vista do carregamento em tração do corpo de prova unificado à luz da análise numérica e valida todas premissas adotadas até o momento, apresentando com clareza a estabilidade e uniformidade dos campos de tensões ao longo da geometria unificada e indicando que a totalidade das propriedades mecânicas pretendidas poderá ser obtida em laboratório.

Figura 41 - Resultado da simulação do carregamento de tração para o PEAD.

Figura 42 - Resultado da simulação do carregamento de tração para o POM.

4.2.4 Carregamento compressivo

A simulação foi efetuada impondo ao corpo de prova proposto no presente trabalho (geometria unificada) o carregamento compressivo, e como resposta a este foram geradas as ilustrações dos campos tensões de von Mises baseadas nas tensões de instabilidade experimental de tração de Caruso (2015), já apresentadas conforme Tabela 5. Para o material de baixa rigidez (PEAD) os resultados coletados foram na ordem de 50%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 125%, 150%, 175% e 200% da tensão de instabilidade, e para o material de maior rigidez (POM) foram coletados resultados de 50%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 125% e 140% da tensão de instabilidade.

A abordagem adotada para a análise do carregamento compressivo é de total não linearidade de material e geometria, mas não visa levar em conta a previsão de flambagem em si, que será foco de uma avaliação específica que segue. Os critérios levados em conta nesta avaliação são similares aos da tração e objetivam a uniformidade dos campos de tensões pelo menos até a tensão de instabilidade, pois deste modo é possível obter o módulo de elasticidade à compressão e a tensão limite de escoamento advinda das diferentes definições. É válido comentar que nesta simulação os materiais foram considerados balanceados.

É possível afirmar que o material de baixa rigidez (PEAD) apresenta um nível de estabilidade até os 150% da tensão instabilidade, e só acima deste valor começa a apresentar uma tendência de formação de um barril. Este comportamento reflete que a geometria apresenta excelente estabilidade à compressão.

Já o material de maior rigidez (POM), apresenta grande estabilidade dos campos de tensões até os 110% da tensão instabilidade e somente acima deste valor o mesmo inicia a sua deformação em forma de barril. Porém, os pontos de interesse do ponto de vista de um ensaio experimental seriam coletados com riqueza de detalhes antes de tais instantes e portanto sem as perturbações que surgem devido ao carregamento.

Portanto, ao se considerar um material tanto com um baixo ou alto valor de rigidez é possível notar que para a geometria unificada, ainda levando em consideração a premissa de balanceamento, atende de maneira satisfatória à condição do teste em compressão apresentando uma tendência de formação de barril mas somente após a tensão de instabilidade. Este fato garante a aquisição de maneira satisfatória das propriedades mecânicas relevantes para este ensaio, conforme apresentado nas Figura 43 e Figura 44.

Figura 43 - Resultado da simulação do carregamento de compressão para o PEAD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise são verificados os níveis de tensões equivalentes de von Mises aplicadas para diferentes percentuais da tensão de instabilidade do material de menor rigidez (PEAD).

Figura 44 - Resultado da simulação do carregamento em compressão para o POM.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise são verificados os níveis de tensões equivalentes de von Mises aplicadas para diferentes percentuais da tensão de instabilidade do material de maior rigidez (POM).

4.2.5 Carregamento torcional

A simulação foi efetuada no corpo de prova proposto apresentado neste trabalho (geometria unificada), impondo o carregamento torcional por meio de um nível de rotação de 4π , nível imposto a fim de ultrapassar a tensão de instabilidade experimental de Caruso (2015). A resposta a este nível de carregamento gerou ilustrações nas quais são retratados os campos de tensões de von Mises, referenciadas nas tensões de instabilidade, já apresentadas conforme Tabela 5. Para o material de baixa rigidez (PEAD) os resultados coletados foram na ordem de 50%, 70%, 80%, 90%, 100% e 115% da tensão de instabilidade, e para o material de maior rigidez (POM) foram coletados resultados de 50%, 70%, 80%, 90% e 100% da tensão de instabilidade.

A abordagem adotada para a análise do carregamento torcional mesma é análoga à estratégia já apresentada para os carregamentos em compressão e tração, onde o foco é, por meio do método numérico, avaliar a uniformidade da distribuição dos campos de tensão ao longo do corpo de prova em função do carregamento aplicado.

Diante do carregamento torcional, o material de menor rigidez (PEAD), permaneceu prismático e com tensões estáveis no raio externo do comprimento útil até 115% da tensão instabilidade experimental de Caruso (2015). Deste modo, a leve concentração que surge em 100% da tensão instabilidade é intensificada e se distribui ao longo da seção útil do corpo de prova. Ainda com esta concentração, há garantia de estabilidade de tensões e isto deve viabilizar passar expressivamente o ponto da instabilidade.

O material de maior rigidez (POM), apresenta uma intensificação de tensões na ordem de 90 % da tensão instabilidade, o que é menor se comparado com o valor encontrado para o material de menor rigidez. Acima dos 90%, o patamar de tensões do POM aumenta, porém a distribuição de tensões (cores) é mantida em mesma proporção ao longo da seção reduzida. Portanto para o POM, a tensão de instabilidade é atingida em níveis percentuais menores do que o PEAD. Mas por outro lado a distribuição para o POM foi melhor do que para o PEAD. Independente destes dois pontos, tanto o de menor rigidez quanto o de maior rigidez, do ponto de vista experimental, devem atender ao objetivo que a geometria unificada visa, assim determinando as propriedades diante do ensaio de torção.

Os comportamentos mensurados para estes materiais seguem de acordo com a Figura 45 e a Figura 46. Portanto, para o material de baixa e alta rigidez com os valores exatamente ou próximos da tensão instabilidade, respectivamente, as previsões numéricas indicam que os

resultados obtidos por meio da caracterização torcional permitirão a determinação das propriedades para esta gama de materiais.

Figura 45 - Resultado da simulação do carregamento torcional para o PEAD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise são verificados os níveis de tensões equivalentes de von Mises aplicadas para diferentes percentuais da tensão de instabilidade do material de menor rigidez (PEAD).

Figura 46 - Resultado da simulação do carregamento torcional para o POM.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise são verificados os níveis de tensões equivalentes de von Mises aplicadas para diferentes percentuais da tensão de instabilidade do material de maior rigidez (POM).

4.2.6 Flambagem - cargas e modos

A Figura 47 e a Figura 48 apresentam os resultados obtidos por meio da simulação de flambagem da geometria unificada proposta no presente trabalho. É possível observar que nestas figuras estão detalhados três modos possíveis de flambagem que poderiam ocorrer na geometria unificada ao considerar tanto o material de alta como o de baixa rigidez.

De forma geral o modo principal a ser julgado e considerado é o primeiro que do ponto de vista experimental e fenomenológico é o de maior interesse, pois o mesmo é o que ocorre para o menor nível de carregamento imposto, sendo que os outros para ocorrerem necessitam de maior energia/carga. O modo 1 apresentado é caracterizado pela deflexão lateral, característico das condições de contorno impostas já que o mesmo é bi engastado.

A relação L_2/d determinada anteriormente na descrição da geometria do corpo de prova unificado, foi de fundamental importância para os resultados apresentados neste tópico, já que as relações impactam diretamente na esbelteza do corpo de prova. Deste modo podem fazer com que a tensão obtida por esta óptica possa cair até valores menores do que a tensão de instabilidade e deste modo ocorrer flambagem de maneira prematura, o que tornaria inviável efetuar a coleta das propriedades em função do ensaio de compressão.

A Tabela 7 apresenta os valores de tensão mínima necessária para que ocorra flambagem na geometria unificada em função da rigidez do material a ser testado (vale ressaltar que a simulação admite geometria ideal e sem desalinhamentos e os mesmos níveis não são esperados nos experimentos). É notado que o nível de carregamento do material de menor rigidez é na ordem de 32% do material de maior rigidez (conclusão ao se comparar os valores para o Modo I), que reflete diretamente a relação entre o módulo de elasticidade dos dois materiais escolhidos, para que ocorra o primeiro modo.

Tabela 7 - Tensões críticas (mínimas) para que ocorra flambagem nos três primeiros modos possíveis para os materiais de baixa rigidez (PEAD) e o de alta rigidez (POM) para a geometria unificada.

Geometria	$\sigma_{crítica}$ (mínima) numérica (MPa)	
	Alta Rigidez	Baixa Rigidez
Modo I	379	120
Modo II	494	156
Modo III	715	226

Fonte: Autor, 2016.

Figura 47 - Resultado da simulação do carregamento em flambagem para o POM.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise é verificada a menor carga que promoverá a menor tensão para que ocorra o modo 1 de flambagem para o material de maior rigidez (POM).

Figura 48 - Resultado da simulação do carregamento de flambagem para o PEAD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Nesta análise é verificada a menor carga que promoverá a menor tensão para que ocorra o modo 1 de flambagem para o material de menor rigidez (PEAD).

4.3 DESCRIÇÃO ANALÍTICA EM COMPRESSÃO

O método usado para avaliar o comportamento mecânico em compressão empregou a equação de Euler clássica amplamente difundida na literatura, e que pode ser encontrada por exemplo na obra de Beer et al. (2006). Por meio deste cálculo é possível prever para qual tensão crítica ocorrerá a flambagem em função do material (módulo de elasticidade) e geometria do corpo de prova.

Do ponto de vista do cálculo a consideração mais relevante para adequar a equação de Euler é de que o corpo de prova é submetido ao carregamento de maneira em que suas extremidades estão bi engastadas. Deste modo o comprimento de flambagem (L_{fl}) a ser considerado na equação foi o comprimento do corpo de prova entre as garras do equipamento ($L_2 + 2L_3 = 21$ mm) dividido por 2 e o raio de giração foi de 1,015 mm (diâmetro do corpo de prova dividido por 4). Portanto a equação 26, apresenta como a mesma foi utilizada no presente trabalho.

$$\sigma_{\text{critico}} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{fl}}{r_{\text{giração}}} \right)^2} \quad (26)$$

Deste modo foi possível traçar um gráfico que correlaciona a tensão crítica de Euler com o módulo de elasticidade do material, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Tensão crítica de Euler em função do módulo de elasticidade

Porém, a previsão apresentada acima, considera que o material irá flambar no regime puramente linear elástico. Esta consideração é válida quando considerado, uma barra relativamente longa com pequeno diâmetro. Quando o aspecto geométrico da mesma, tende a um comprimento pequeno com um diâmetro maior, haverá a possibilidade do surgimento de deformações plásticas. De acordo com Féodosiev (1977), deve ser efetuada uma comparação entre o índice de esbeltez (já apresentado, conforme equação 25) com o índice de esbeltez crítico (equação 27). O índice de esbeltez crítico (λ_c), leva em consideração as propriedades do material (módulo de elasticidade e tensão limite de escoamento), diferentemente do índice de esbeltez (λ), que considera apenas fatores geométricos.

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{E}{S_{LE}}} \quad (27)$$

Se λ for menor que λ_c , a teoria de Euler não é válida, pois haverá regime plástico de deformação. Deste modo, a tensão crítica de flambagem terá de ser recalculada. Segundo Odom e Adams (1994), as equações que podem ser empregadas nestes casos, são: Engesser e Considere-Engesser. Ambas são similares à equação 26, o ponto de maior relevância é o módulo de elasticidade utilizado no cálculo. A equação de Engesser utiliza o módulo tangencial, enquanto Considere-Engesser faz uso do módulo de elasticidade reduzido. Portanto, de modo a verificar o comportamento da geometria unificada para os materiais termoplásticos, foi efetuada a comparação entre λ_c e λ , para o material de alta rigidez e um de baixa rigidez (POM e PEAD respectivamente, como já verificado nas etapas anteriores). A Tabela 8, apresenta os resultados calculados para λ_c e λ . É possível então verificar que a equação de Euler é válida e portanto, não há necessidade do cálculo para o regime plástico.

Tabela 8 - Comparativo entre índice de esbeltez vs. índice de esbeltez crítico.

	E (MPa)	S_{LE} (MPa)	λ_c	λ
Alta rigidez (POM)	3385	61	23,4	20,7
Baixa Rigidez (PEAD)	1074	21	22,5	

Fonte: Autor, 2016.

4.3.1 Flambagem - analítico vs. numérico

Com o intuito de efetuar uma comparação do ponto de vista do carregamento compressivo pela óptica somente do fenômeno de flambagem, este tópico avalia as tensões de

flambagem numéricas já apresentadas no parágrafo 4.2.6, com a estimativa analítica realizada usando a teoria difundida de Euler, já discutida conforme parágrafo 4.3. Os resultados seguem de acordo com a Tabela 9, que além das tensões explícitas acima apresenta novamente o valor da tensão de instabilidade para os materiais aqui avaliados, e o fator multiplicador que representa quantas vezes seria necessário ultrapassar a tensão de instabilidade para que ocorresse flambagem, de acordo com a tensão crítica de Euler. Por meio da Tabela 9, a seguinte tendência pode ser observada:

- a) é possível notar que o fator multiplicador foi na ordem de 4 vezes maior que a tensão instabilidade, indicando assim estabilidade diante de um carregamento compressivo e que também não há excessos no dimensionamento da geometria unificada. Efetuando uma comparação com o trabalho de Caruso (2015), o fator multiplicador para a análise exploratória de inúmeras geometrias variou de 6 até 12;
- b) os valores de tensão numéricos obtidos pelo MEF são em torno de 21% maiores do que os valores calculados pela teoria de flambagem segundo Euler (percentual obtido ao se comparar as tensões críticas numéricas e de Euler, conforme Tabela 9);
- c) do ponto de vista de realismo, o método numérico é que mais se aproxima da realidade por conta de considerar o material com comportamento elastoplástico, já que Euler considera o polímero um sólido linear elástico;
- d) a avaliação numérica trata a geometria do corpo de prova de maneira global, ou seja, leva em conta a seção reduzida e todo o desenvolvimento do raio de concordância que unirá esta seção de menor dimensão até a cabeça do corpo de prova (maior diâmetro); já a teoria clássica de Euler não permite que estas considerações sejam levadas em conta e considera a seção de interesse somente um cilindro;
- e) dadas estas razões é aceitável que exista uma diferença entre o numérico vs. analítico. Deste modo torna-se possível concluir que o corpo de prova proposto no presente trabalho atenderia ao objetivo.

Tabela 9 - Tensões de flambagem previstas analiticamente usando a teoria de Euler e utilizando o método dos elementos finitos.

<i>Geometria</i>	Alta Rigidez (POM)				Baixa Rigidez (PEAD)			
CP #	$\sigma_{crítica}$ <i>Númerica</i> (MPa)	$\sigma_{crítica}$ <i>Euler</i> (MPa)	σ <i>instabilidade</i> (MPa)	<i>Fator</i> <i>multiplicador</i>	$\sigma_{crítica}$ <i>Númerica</i> (MPa)	$\sigma_{crítica}$ <i>Euler</i> (MPa)	σ <i>instabilidade</i> (MPa)	<i>Fator</i> <i>multiplicador</i>
Geometria unificada	379	312	77	4	120	99	24	4

Fonte: Autor, 2016.

5 PROJETO DO MOLDE DE INJEÇÃO E PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Este capítulo é dedicado a apresentar as etapas envolvidas no projeto e fabricação do molde de injeção. Em seguida, é apresentada a escolha dos materiais que serão injetados, para o estudo da geometria unificada. Por fim, são apresentados os parâmetros utilizados na injetora do laboratório de processamento de polímeros (Centro Universitário FEI) e como resultado final, os corpos de prova de todos os materiais selecionados, já injetados.

5.1 CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO MOLDE

A partir da geometria unificada definida e validada por meio das simulações numéricas, o próximo passo foi desenvolver o projeto de um molde onde fosse possível obter o corpo de prova. Foi efetuado um estudo preliminar para definição da geometria do canal de alimentação e do caminho pelo qual o polímero injetado iria preencher a cavidade do molde. Este estudo é importante pois irá evitar o alinhamento das macromoléculas - caso isto ocorra, o corpo de prova resultante não representará um componente real, que apresenta estrutura aleatória. Além deste ponto, a restrição não deve ser de dimensões diminutas que também impeça o preenchimento com pressão de injeção adequada, pois maiores taxas de cisalhamento impostas no processo de injeção, podem contribuir de tal modo que exista a tendência do corpo de prova apresentar tensões residuais. Outro aspecto negativo a ser considerado, quando a dimensão do canal é pequena, é que há o favorecimento do “congelamento” do polímero durante o preenchimento da cavidade, ou seja, antes do preenchimento completo do molde o material solidifica-se ainda no canal. Deste modo, o melhor projeto para o canal de alimentação para injeção é apresentado conforme Figura 50.

Figura 50 - Projeto do canal de alimentação (desenho fora de escala - dimensões em mm)

Fonte: Autor, 2016.

Partindo da estrutura básica do equipamento de injeção do Laboratório de Processamento de Materiais Poliméricos do Centro Universitário FEI, foi verificado que para injetar um corpo de prova cilíndrico haveria a necessidade de confeccionar não só a gaveta (componente alocado na parte móvel da injetora) mas também a placa fixa (componente que está alocado ao lado do bico de injeção).

Dadas as definições e condições de contorno, o desenvolvimento dos componentes foi efetuado nos softwares Autodesk Inventor e AutoCAD, o que resultou em um molde bipartido.

O aço utilizado para confecção do mesmo foi o AISI H13. Este foi usinado no Centro de Laboratórios Mecânicos do Centro Universitário FEI; após este processo foi efetuado o tratamento térmico conforme o seguinte ciclo:

- a) austenitização em forno à vácuo na temperatura de 1020 °C;
- b) têmpera com resfriamento em óleo;
- c) revenimento na temperatura de 550 °C por 2h (duplo);
- d) dureza final de aproximadamente de 53 HRC.

Após tratamento térmico os moldes foram retificados e em seguida montados na injetora, apresentados conforme Figura 51 e Figura 52.

Figura 51 - Molde - placa móvel (gaveta)

Fonte: Autor, 2016.

Figura 52 - Molde - placa fixa

Fonte: Autor, 2016.

5.2 SELEÇÃO DOS MATERIAIS EM ESTUDO

A seleção dos materiais a serem testados, considerou a premissa de que este corpo de prova injetado visa atender a maior gama possível dos polímeros termoplásticos de engenharia e convencionais. O critério então utilizado foi em função das propriedades mecânicas distintas para materiais amorfos e semicristalinos. Deste modo, foi possível cobrir uma ampla gama de aplicações industriais, de pesquisa e de níveis de rigidez e resistência distintos. Portanto, foi incluída neste trabalho a execução da injeção e posteriores ensaios mecânicos nos seguintes materiais:

- a) polietileno de baixa densidade (PEBD);
- b) polietileno de alta densidade (PEAD) - Braskem HC7260LS-L;
- c) polimetacrilato de metila (PMMA) - Acrigel ECL100;
- d) policarbonato (PC) - Makropol B3 MF UV CRLA010 PC306;
- e) polipropileno (PP) - Braskem H503;
- f) poliamida 6 (PA 6) - Basf Mazmid B27 8.

Os certificados que estavam acompanhando os materiais a serem testados seguem no Anexo A, sendo que para o PEBD não foi possível obter a origem e a certificação.

Dentre os materiais escolhidos, o PC e o PMMA, conhecidos comercialmente como policarbonato e acrílico, representam dois termoplásticos amorfos. Ambos são transparentes e apresentam (em se tratando de termoplásticos) alta resistência mecânica e alto módulo de elasticidade. Por outro lado, enquanto o PMMA apresenta reduzida ductilidade, o PC apresenta elevada ductilidade.

Já os demais termoplásticos escolhidos representam a classe dos semicristalinos: três poliolefinas, que são polímeros originários a partir do monômero de hidrocarboneto com ligação dupla e em geral com estrutura química C_2H_{2n} : PP e dois PE, sendo o PEAD que apresenta uma macromolécula linear e portanto tem cristalinidade elevada; e um PEBD que apresenta uma macromolécula com ramificações e uma cristalinidade menor que o PEAD - porém ambos têm o mesmo monômero. E por fim o último material, PA 6, comumente conhecido como nylon, que pertence ao grupo das poliamidas, representa um polímero de engenharia e apresenta dentro dos termoplásticos alta resistência mecânica e excelente estabilidade dimensional.

5.3 PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com o objetivo de obter o corpo de prova injetado, o equipamento utilizado foi a Injetora Battenfeld HM 60/350, presente no laboratório de processamento de materiais poliméricos do Centro Universitário FEI, conforme apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Injetora Battenfeld HM 60/350

Fonte: Autor, 2016.

Para cada material, houve necessidade de efetuar uma configuração específica do equipamento. Os principais parâmetros ajustados envolvem a seleção das temperaturas das zonas de aquecimento do material dentro da unidade de injeção, posteriormente a seleção das pressões de injeção e recalque (80% da pressão de injeção), definição do volume de material a ser injetado, tempo e temperatura de resfriamento no molde.

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam todos os parâmetros de injeção configurados para cada material. Cada parâmetro foi ajustado de forma iterativa com o objetivo de se obter uma extração automática do molde por meio da ação dos extratores do mesmo, otimizar ao máximo o tempo de ciclo tornando-o menor possível e eliminar ao máximo possíveis defeitos no corpo de prova tais como: bolhas, contração excessiva, marcas de queima na superfície (*burn marks*) e linhas de fluxo.

Tabela 10 - Parâmetros de injeção empregados no trabalho

Parâmetros \ Material	PEAD	PEBD	PP	PMMA	PC	PA 6
Pressão de recalque (bar)	800	400	400	1120	1120	800
Pressão de injeção (bar)	1000	500	500	1400	1400	1000
Vazão volumétrica (cm ³)	10	10	50	12	20	20
Velocidade de dosagem (mm/s)	150	150	150	120	200	500
Pressão de dosagem (bar)	20	20	20	30	20	100
Volume de injeção (cm ³)	18	22	20	28	22,5	28
Volume de comutação (cm ³)	8	11,7	8,8	14	9,50	15
Tempo de recalque (s)	13	15	11	20	15	10
Tempo de resfriamento (s)	25	15	25	15	20	20

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 11 - Temperatura das zonas de aquecimento e temperatura do molde

	Material	PEAD	PEBD	PP	PMMA	PC	PA 6
Temperatura (°C)	Bico	195	218	245	240	290	255
	Zona 1	198	213	235	237	282	250
	Zona 2	198	204	222	238	275	245
	Zona 3	195	195	200	235	265	215
	Molde	35	35	35	60	70	65

Fonte: Autor, 2016.

5.4 CORPOS DE PROVA INJETADOS

Conforme apresentado na Figura 54, é possível observar os corpos de prova injetados ainda com os canais de alimentação. Na região útil de cada amostra não houve bolhas e nenhum defeito, porém algumas amostras, tal como PC e PP apresentaram bolhas nas cabeças. A Figura 55 apresenta como demonstrativo o corpo de prova de PC sem os canais de alimentação, é possível notar a bolha na cabeça e suaves marcas da atuação dos extratores.

Figura 54 - Corpos de prova injetados.

Fonte: Autor, 2016.

Figura 55 - Corpos de prova de PC.

Fonte: Autor, 2016.

6 METODOLOGIA - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo visa apresentar a metodologia empregada para execução dos ensaios experimentais de tração, compressão e torção. A princípio será apresentada a metodologia para os ensaios de tração e compressão e por fim a metodologia dos ensaios de torção.

6.1 METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

O equipamento utilizado para desenvolvimento dos ensaios de tração como compressão foi o equipamento universal de ensaios MTS 810, que tem um quadro (*frame*) para a capacidade de até 25 toneladas. É um equipamento servo-hidráulico e permite grande flexibilidade na montagem de dispositivos de testes, calibrado segundo E4-15 (ASTM, 2015b). A célula de carga utilizada para aquistar a força ao longo do ensaio foi escolhida com fundo de escala de 200 kg, capaz de atender a geometria unificada para todos os materiais propostos, calibrada segundo E74-13 (ASTM, 2013b). Para fixação da geometria unificada ao equipamento universal de ensaios, foi necessário efetuar uma adaptação por meio de uma haste paralela porta pinças com diâmetro de 20 mm e sua respectiva pinça ER20-8 (Figura 56).

Figura 56 - Equipamento universal de ensaios MTS 810, célula de carga e adaptação na fixação.

Fonte: Autor, 2016.

Com o objetivo de efetuar a medida de deformação de forma precisa para o corpo de prova unificado, foi utilizado um extensômetro com abertura inicial de 5 mm (Figura 57). O centro universitário FEI não possuía este equipamento, portanto o mesmo foi projetado e desenvolvido para atender ao presente trabalho.

Este extensômetro foi desenvolvido com a característica de atender tanto aos ensaios de tração quanto de compressão, portanto sua variação em função de sua abertura inicial foi de $\pm 100\%$ (± 5 mm).

O desenvolvimento foi efetuado utilizando o método analítico inicialmente e foi otimizado em função do método dos elementos finitos. Posteriormente, definida a geometria, o conjunto foi usinado e foi efetuada a instrumentação com strain gages, utilizando o conceito de ponte (Wheatstone) completa em flexão, gentilmente efetuado pela empresa Toledo do Brasil LTDA. Após esta etapa, o extensômetro foi integrado ao controlador MTS FlexTest 40 e calibrado, onde o maior erro foi na ordem de 0,7%. Todas as etapas de desenvolvimento em detalhes são apresentadas no apêndice B.

Figura 57 - Extensômetro $L_0=5$ mm

Fonte: Autor, 2016.

6.1.1 Parâmetros básicos para tração e compressão

Com o objetivo deste trabalho em propor uma nova geometria unificada, para ensaio de polímeros termoplásticos que visa atender a formas de carregamentos distintos, os ensaios realizados seguem uma sequência sistêmica desenvolvida com base na pesquisa em diversos trabalhos e normas. Deste modo para o bom desenvolvimento de todos os testes, alguns pontos em comum foram levados em consideração e unificados, para deste modo haver comparabilidade entre dados obtidos. Estes parâmetros básicos utilizados em todos os ensaios foram: velocidade de ensaio, condicionamento da amostra, quantidade de amostras por testes e dimensionamento pré-teste.

Velocidade de ensaio: A nível de execução de ensaios mecânicos em equipamento universal de ensaio, a forma mais comum de efetuar o ensaio é por meio de uma velocidade constante de carregamento; esta velocidade é de simples controle pois a mesma reflete diretamente o deslocamento pelo tempo do atuador, em caso de equipamentos servo hidráulicos ou mesmo o deslocamento pelo tempo de uma travessa, em caso de equipamentos eletromecânicos. Entretanto, o ideal para controle de taxa de carregamento é trabalhar com deformação pelo tempo, portanto neste trabalho será determinada uma mesma taxa de deformação para o corpo de prova e esta será calculada para assim impor ao equipamento universal de ensaio a velocidade do ensaio.

Para ensaios de compressão a velocidade estipulada segundo a D695-15 (ASTM, 2015a) até a tensão limite de escoamento é de $1,3 \pm 0,3$ mm/min para um corpo de prova cilíndrico prismático com altura de 25,4 mm, deste modo é possível encontrar a taxa de carregamento dividindo a velocidade pela altura do corpo de prova, assim a taxa foi $0,051 \pm 0,012$ min⁻¹.

Deste modo ao considerar o corpo de prova proposto neste trabalho (Figura 36), a dimensão que sofre tanto o carregamento de tração como compressão, ou seja entre garras do equipamento, é de 21 mm (L_2+2L_3 , que se refere ao comprimento útil acrescido as regiões de concordância). Assim considerando a taxa de carregamento de compressão de $0,051$ min⁻¹, resultará em uma velocidade de deslocamento entre garras na ordem de 1,1 mm/min.

Por outro lado, a especificação de velocidade segundo a D638-14 (ASTM, 2014) apresenta vários valores que estão intimamente ligados à geometria de corpo de prova escolhido. Segundo Osswald et al. (2006) é recomendada velocidade de 5 ou 50 mm/min a depender do material. Portanto na seleção da velocidade, foi considerado por questão de analogia geométrica, o corpo de prova tipo V (que reflete o menor corpo de prova recomendado para tração) segundo a D638-14 (ASTM, 2014), assim a velocidade determinada para tração foi de 1 ± 25 % mm/min. A variação da velocidade de ensaio permitida para o corpo de prova unificado é apresentada conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Determinação da velocidade de ensaio

	Velocidade de ensaio segundo norma (mm/min)			Taxa de carregamento (min ⁻¹)
	Mínima	Nominal	Máxima	Nominal
Carregamento				
Tração	0,75	1,00	1,25	0,05
Compressão	1,00	1,30	1,60	0,10

Fonte: Autor, 2016.

Deste modo, a decisão da escolha da velocidade foi de 1,2 mm/min ($0,06 \text{ min}^{-1}$), pois desta forma a taxa de carregamento poderá ser imposta tanto para o ensaio de compressão tal como o de tração, e a mesma já está otimizada para próximo do mínimo entre os dois ensaios, se considerados os valores de norma. Esta decisão da escolha próximo ao mínimo garante boa precisão na determinação das propriedades mecânicas em regime elástico, tais como módulo de elasticidade e tensões de escoamento.

Condicionamento de amostra: Seguindo a D618-13 (ASTM, 2013a), os corpos de prova foram mantidos por no mínimo 40 horas em ambiente controlado, com temperatura e umidade relativa na ordem de 23°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) e 50% ($\pm 10\%$) respectivamente.

Quantidade de amostras por teste: Segundo a D638-14 (ASTM, 2014) e a D695-15 (ASTM, 2015a), no mínimo 5 corpos de prova devem ser testados para uma amostragem de materiais isotrópicos. Caso ocorra a ruptura por motivo de alguma falha oculta ou mesmo ocorra a estricção ou ruptura fora da seção reduzida o teste deve ser realizado novamente.

Dimensionamento pré-teste: O corpo de prova deve ser medido no mínimo 5 vezes na região útil de teste (L_2) com instrumento que garanta no mínimo a precisão de 0,005 mm e ser considerado o menor valor encontrado. (Como os corpos de prova foram injetados, houveram mínimas variações ao longo da seção útil)

6.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração (Figura 58) foi realizado com inspirações nas normas D638-14 (ASTM, 2014) e ISO 527 (2012). Como já definido anteriormente no item referente aos parâmetros básicos de ensaios, a velocidade de ensaio é de 1,2 mm/min e foram testados 5 corpos de prova para cada material.

O foco no ensaio de tração realizado neste trabalho, é somente até o momento de instabilidade do corpo de prova. Para os materiais testados, que não sofreram ruptura, foi pré determinado uma deformação de 60 % baseada no L_0 do extensômetro de 5 mm, ou seja a partir do momento que o corpo de prova atingisse um L_f na ordem de 8 mm o ensaio seria interrompido, por não haver sentido para a investigação realizada neste trabalho, pois após a instabilidade os dados não apresentam significado do ponto de vista estrutural (a menos que sejam tratados por alguma metodologia que permita incorporar a traxialidade).

Figura 58 - Ensaio de tração

Fonte: Autor, 2016.

6.1.3 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão (Figura 59) foi realizado com inspirações nas normas D695-15 (ASTM, 2015a) e ISO 604 (2002). Como já definido anteriormente no item referente à comparabilidade de resultados, a velocidade de ensaio é de 1,2 mm/min e foram testados 5 corpos de prova para cada material. O momento no qual foi definido o fim do ensaio neste trabalho foi quando o corpo de prova apresentasse a formação de barril ou a flambagem, assim caracterizando a instabilidade geométrica do corpo de prova. Dependendo da forma de como o corpo de prova flambar, e da posição de como o extensômetro está acoplado ao mesmo, o sinal aquisitado que é negativo, já que a amostra está comprimindo, pode se tornar positivo. Isto ocorre pelo motivo de que a curvatura da região útil tende a abrir o extensômetro.

Figura 59 - Ensaio de compressão

Fonte: Autor, 2016.

6.1.4 Metodologia do tratamento de dados

O equipamento universal de ensaios MTS 810, por meio do software TestWorks4, tem a possibilidade de exportar todos os canais de aquisição de dados do equipamento em uma planilha de texto, a qual foi importada posteriormente pelo Microsoft Excel com o objetivo de organização dos dados e do cálculo da curva verdadeira e posterior geração de gráficos.

Para cada ensaio realizado foi calculado um valor de módulo de elasticidade (E) correspondente à curva de engenharia. Esta propriedade foi extraída do trecho referente à porção elástica linear de cada curva, que foi determinada utilizando o coeficiente de correlação de 0,999. Para casos onde não foi possível usar este coeficiente de correlação, o presente estudo utilizou o coeficiente mais próximo deste valor, em certos casos na ordem de 0,997.

A determinação precisa do módulo de elasticidade é de fundamental importância na determinação do limite de escoamento, pois com base no mesmo, foi possível traçar retas paralelas à porção elástica linear, distanciadas em *offsets* pré-determinados, sendo que os valores escolhidos foram de 0,2 %, 0,5 %, 1,0 % e 2,0 %. Deste modo foi coletada graficamente a intersecção de cada reta de *offset* com a curva de tensão-deformação e obtido assim o respectivo valor da tensão de escoamento para cada *offset*, conforme apresentado na Figura 60. Este procedimento foi utilizado tanto para o ensaio de tração quanto para compressão.

Figura 60 - Determinação das tensões de escoamento por meio dos *offsets* definidos

Fonte: Autor, 2016.

Além das propriedades citadas anteriormente, módulo de elasticidade e tensões de escoamento, outros parâmetros relevantes também foram obtidos. Para o ensaio de tração o maior valor de tensão também foi coletado e chamado de tensão máxima ($S_{m\acute{a}x}$) e para o mesmo foi coletado sua deformação ($e_{Sm\acute{a}x}$). Posteriormente a este ponto a fim de caracterizar de forma completa o ensaio de tração foi determinado a deformação máxima ($e_{m\acute{a}x}$) e a respectiva tensão ($S_{em\acute{a}x}$). Com relação ao ensaio de compressão a determinação do módulo de elasticidade e tensões de escoamento foi realizada de maneira análoga à tração. Adicionalmente foi determinada a tensão para qual ocorreu a flambagem (S_f) e sua respectiva deformação (e_f).

A fim de efetuar uma análise exploratória, foram coletados, além de todas as propriedades referentes a curva de engenharia, os mesmos pontos para a curva verdadeira. Onde a tensão verdadeira e a deformação verdadeira são determinadas pelas equações 28 e 29. A curva tensão vs. deformação verdadeira apresenta seu término exatamente no ponto que corresponde à máxima tensão de engenharia, convertida para o valor da tensão verdadeira.

$$\sigma = S \cdot (1 + e) \quad (28)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \cdot (1 + e) \quad (29)$$

6.2 METODOLOGIA PARA O ENSAIOS DE TORÇÃO

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de torção foi o TQ SM1 (Figura 61), que permite a imposição de uma velocidade angular manualmente, até que ocorra a instabilidade do corpo de prova. As hastes paralelas, porta pinças com diâmetro de 20 mm, e suas respectivas pinças ER20-8, que foram utilizadas para os ensaios de tração e compressão, foram adaptadas para o equipamento de torção, de modo a promover grau de liberdade axial. Durante o ensaio de torção o corpo de prova pode se deslocar em seu sentido longitudinal, não gerando tensões axiais.

Figura 61 - Equipamento TQ - Ensaio de torção

Fonte: Autor, 2016.

Com o objetivo de medir o torque foi utilizada uma célula de carga, calibrada para capacidade de 1500 N.mm, suficiente para os materiais ensaiados em função da geometria unificada. A medição com precisão do ângulo de rotação foi efetuada por meio de um *encoder* incremental do fabricante Hengstler de modelo RI 58-0, com precisão de 1000 pulsos por rotação (gentilmente cedido pela empresa Elevadores Atlas Schindler). Para aquisição de dados foi utilizado o equipamento HBM Quantum MX840 A, com filtro AAF (*anti aliasing filter*) e taxa de aquisição de 20 Hz. O software utilizado para coleta de dados foi o Catman Easy AP, que permitiu exportar os dados para o Excel, para posterior tratamento. A Figura 62 apresenta os equipamentos em detalhes.

Figura 62 – Equipamentos utilizados para o ensaio de torção.

Fonte: Autor.

Legenda: (a) Encoder. (b) Célula de carga. (c) Aquisitor de dados MX 840A HBM

A taxa de carregamento para este ensaio foi inspirada nas definições pré estabelecidas para tração e compressão, onde a taxa de deformação foi de $0,06 \text{ min}^{-1}$, que correspondeu a uma velocidade de 1,2 mm/min. Para utilizar a mesma taxa em torção foi adotado a premissa de que

as tensões equivalentes de von Mises para tração deveriam ser iguais às tensões equivalentes de von Mises para torção. A partir desta premissa tornou-se possível determinar que a velocidade de carregamento angular foi igual a 57 °/min. O protocolo adotado para a definição desta velocidade angular está presente no apêndice C.

Neste ensaio foram testadas 5 amostras para cada material. Foi determinado como ponto de término de teste, quando o corpo de prova atingisse a rotação de 300°, pois para este valor a amostra já instabilizou, ou seja, foi coletada a região de maior interesse.

Como resultado direto dos testes realizados, obteve-se a curva de torque (N.mm) vs. ângulo (°). Posteriormente, foi calculada a tensão de cisalhamento, apresentada conforme a equação (30).

Onde, as variáveis envolvidas são o torque (T – [Nmm]), diâmetro da seção útil da geometria unificada (d – [mm]) e por fim, o momento polar de inércia (J – [mm²])

$$\tau = \frac{T \cdot d}{2 \cdot J} \quad (30)$$

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados experimentais e de sua discussão. Em princípio são apresentados os resultados para tração e compressão, em seguida os resultados dos ensaios de torção e por fim, os resultados do desbalanceamento.

7.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de tração e compressão são apresentados em subtópicos para cada material avaliado, com suas respectivas curvas (engenharia e verdadeira) e resultados.

7.1.1 PEBD

A Figura 63 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão.

Figura 63 - Curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira para o PEBD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

No ensaio de tração todas as amostras foram conduzidas até 60% de deformação e o ensaio foi interrompido neste momento, já que não houve estricção, e este foi considerado o ponto de término de teste. As curvas de tração deste material apresentaram ao longo de todo o teste uma trajetória crescente, não havendo um ponto máximo distinto. Porém foi notório que em um dado momento houve um suave patamar. O início deste patamar foi utilizado como ponto de referência de “tensão máxima” para assim definir a curva verdadeira.

A Tabela 13 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de tração. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia foi menor que 6 %, enquanto das tensões de escoamento verdadeiras foi menor do que 5%. Já para as tensões máximas foi na ordem de 3% e por fim o módulo de elasticidade apresentou desvio de 11%. As deformações apresentaram desvio menor do que 10%.

Tabela 13 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PEBD.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	5,1	5,4	5,7	6,3	6,3	6,6	7,0	7,6	7,9	0,215	10,4	0,600	9,6	0,194	80
Desv. Pad.	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,020	0,3	0,000	0,3	0,016	9
Desv. (%)	5,4	5,7	5,3	5,8	4,2	4,1	4,9	4,1	2,0	9,3	2,5	0,0	3,1	8,4	10,7

Fonte: Autor, 2016.

Durante o ensaio de compressão, todas as amostras apresentaram flambagem e no exato momento deste fenômeno o ensaio foi interrompido. Tanto visualmente como também a nível gráfico é notório o fenômeno. Na ocorrência deste evento, o sinal aquisitado pelo extensômetro acoplado ao corpo de prova pode se comportar de maneira inversa ao carregamento imposto, situação já discutida na metodologia (parágrafo 6.1.3).

A Tabela 14 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira apresentou uma tendência de diminuição de seu valor ao passo que o *offset* aumenta, sendo que o maior valor foi de 10% para o *offset* de 0,2 %.

Houve uma limitação experimental na determinação da tensão de escoamento verdadeira para o *offset* de 2 %, onde o mesmo não foi coletado pois a curva apresentou seu ponto de flambagem anterior ao mesmo. Quanto as tensões máximas e módulo de elasticidade os desvios foram respectivamente na ordem de 3,5 % e 4,5 % de valores máximos. Com relação às deformações, o percentual de desvio apresentou valor máximo de 10,8 %.

Tabela 14 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PEBD.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	5,6	6,4	7,4	8,7	8,7	9,7	11,0	-	11,4	0,171	13,3	0,158	98
Desv. Pad.	0,5	0,4	0,3	0,3	0,9	0,8	0,9	-	0,3	0,018	0,5	0,016	4
Desv. (%)	8,3	6,3	4,6	3,7	10,0	8,1	7,7	-	3,1	10,8	3,5	10,1	4,5

Fonte: Autor, 2016.

7.1.2 PEAD

A Figura 64 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão para o PEAD.

Figura 64 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PEAD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

No ensaio de tração para este material, todas as amostras foram conduzidas até 60% de deformação, ponto adotado como término de teste. Este material apresentou nítida estricção.

A Tabela 15 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de tração, onde o desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O desvio máximo foi de 7,1 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima e tensão verdadeira o desvio foi menor que 3,2 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 4,4%.

Tabela 15 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PEAD.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	9,0	10,8	12,8	15,2	9,4	11,2	13,5	16,2	19,8	0,135	16,2	0,600	22,5	0,127	733
Desv. Pad.	0,6	0,6	0,5	0,5	0,7	0,7	0,6	0,5	0,2	0,014	0,5	0,000	0,2	0,012	32
Desv. (%)	7,1	5,5	4,0	3,1	7,1	5,8	4,3	3,1	1,2	10,1	3,2	0,0	1,0	9,5	4,4

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 16 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão para o PEAD, onde o desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O valor máximo de desvio foi de 19,4 % para o *offset* de 0,2 %, para a tensão máxima de flambagem e tensão verdadeira o desvio foi menor que 6,7 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 6,7 %.

Tabela 16 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PEAD.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	8,7	11,4	14,2	17,7	9,1	11,9	15,0	18,9	31,8	0,173	37,3	0,160	870
Desv. Pad.	1,7	1,8	1,7	1,4	1,8	1,9	1,8	1,5	1,6	0,021	2,5	0,018	58
Desv. (%)	19,4	15,6	11,8	8,0	20,1	15,7	11,9	7,9	5,1	11,9	6,7	11,0	6,7

Fonte: Autor, 2016.

7.1.3 PP

A Figura 65 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão para o PP.

Figura 65 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PP.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

No ensaio de tração para este material, todas as amostras foram conduzidas até 60% de deformação, ponto adotado como término de teste. Este material apresentou nítida estrição.

A Tabela 17 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de tração. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O desvio máximo foi de 11,8 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima e tensão verdadeira o desvio foi menor que 1,1 %, por fim o módulo de elasticidade apresentou desvio menor que 8.3 %.

Tabela 17 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PP.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	14,1	17,5	20,6	24,7	14,8	18,4	21,8	26,4	31,8	0,119	23,0	0,600	35,6	0,112	1136
Desv. Pad.	1,7	1,4	1,2	0,8	1,7	1,5	1,3	0,9	0,2	0,008	0,1	0,000	0,4	0,007	94
Desv. (%)	11,8	8,1	5,8	3,4	11,8	8,2	5,8	3,5	0,5	6,7	0,6	0,0	1,1	6,4	8,3

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 18 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão para o PP. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset* e seu valor máximo foi de 13,4 % para o *offset* de 0,2 %, para a tensão máxima de flambagem e tensão verdadeira o desvio foi menor que 2 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 6,8 %.

Tabela 18 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PP.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	18,8	25,2	29,8	36,5	20,5	26,4	32,5	40,2	49,1	0,157	56,8	0,146	1167
Desv. Pad.	2,5	2,4	1,8	1,5	2,7	2,2	1,8	1,4	0,5	0,027	1,1	0,023	80
Desv. (%)	13,4	9,5	6,1	4,0	13,2	8,5	5,5	3,4	0,9	17,1	2,0	15,9	6,8

Fonte: Autor, 2016.

7.1.4 PA 6

A Figura 66 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão para a PA 6. No ensaio de tração todas as amostras foram conduzidas até 60% de deformação e o ensaio foi interrompido neste momento (este material apresentou estricção nítida). A Tabela 19 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de tração. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O desvio máximo foi de 8,3 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima e tensão verdadeira o desvio foi menor que 1,3 %, por fim o módulo de elasticidade apresentou desvio menor que 5,7 %.

Figura 66 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PA 6.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

Tabela 19 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PA 6.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	16,1	19,5	23,4	28,1	18,8	22,7	27,4	32,4	36,3	0,205	34,4	0,600	43,4	0,180	578
Desv. Pad.	1,1	1,3	1,3	0,8	1,6	1,7	1,4	0,5	0,5	0,011	0,4	0,000	0,5	0,008	33
Desv. (%)	6,9	6,6	5,4	2,7	8,3	7,4	5,2	1,6	1,3	5,3	1,2	0,0	1,1	4,5	5,7

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 20 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão para a PA 6. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O valor máximo foi de 9,8 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima de flambagem e tensão verdadeira o desvio foi menor que 4,9 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 3,2 %.

Tabela 20 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PA 6.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	14,1	19,4	25,0	32,5	16,8	23,3	30,3	39,8	56,7	0,186	67,3	0,171	651
Desv. Pad.	1,2	1,2	0,8	0,8	1,7	1,6	1,4	1,4	1,8	0,021	3,3	0,018	21
Desv. (%)	8,5	6,1	3,3	2,5	9,8	6,7	4,7	3,4	3,2	11,3	4,9	10,5	3,2

Fonte: Autor, 2016.

7.1.5 PMMA

A Figura 67 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão para a PMMA.

Figura 67 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PMMA.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

A Tabela 21 apresenta os resultados referentes ao ensaio de tração. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset* e apresentaram desvio máximo de 2,6 % para o *offset* de 0,2 % e para a tensão máxima, e tensão verdadeira o desvio foi menor que 1,5 % e por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 2 %. Todas as amostras romperam, porém o desvio que reflete a deformação mensurada foi elevado (82,6 %) pois as amostras apresentaram comportamento disperso com relação à deformação máxima, fato que pode estar relacionado com o processo de injeção, porém é notório que esta diferença não afetou as propriedades de maior interesse.

Tabela 21 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PMMA.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	47,6	55,7	62,4	67,5	51,5	59,6	66,3	71,7	69,3	0,063	62,8	0,173	73,8	0,064	2380
Desv. Pad.	1,3	1,0	0,8	0,7	1,3	1,1	0,8	0,7	0,8	0,004	7,0	0,143	1,1	0,008	46
Desv. (%)	2,6	1,9	1,3	1,0	2,5	1,8	1,3	1,0	1,2	5,7	11,1	82,6	1,5	12,4	1,9

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 22 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão para o PMMA. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O valor máximo foi de 5,1 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima de flambagem e tensão verdadeira o desvio foi menor que 1,4 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 2,2 %.

Tabela 22 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PMMA.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	68,1	79,4	88,7	97,3	76,9	87,3	96,4	105,5	103,8	0,097	113,9	0,092	2597
Desv. Pad.	3,5	2,4	1,9	1,7	3,5	2,4	1,9	1,7	1,4	0,005	1,6	0,005	58
Desv. (%)	5,1	3,0	2,1	1,7	4,6	2,8	2,0	1,6	1,4	5,2	1,4	5,0	2,2

Fonte: Autor, 2016.

7.1.6 PC

A Figura 68 apresenta as curvas geradas ao longo dos testes de tração e compressão para a PC.

Figura 68 - Curvas tensão-deformação de engenharia e real para o PC.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Figura (a) e (b) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em tração. Figura (c) e (d) apresentam as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira em compressão.

A Tabela 23 apresenta os resultados referentes ao ensaio de tração. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset* e apresentaram desvio máximo de 6,4 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima e tensão verdadeira o desvio foi menor que 1,3 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 5.7 %. O ensaio foi conduzido até 60% de deformação quando o mesmo foi interrompido, este material apresentou estrição.

Tabela 23 - Resultados tratados referentes ao ensaio de tração para o PC.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{max}	$e_{(Smax)}$	$S_{(emax)}$	e_{max}	$\sigma_{(Smax)}$	$\epsilon_{(Smax)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	34,2	42,4	49,8	56,5	37,8	46,2	54,0	61,0	59,7	0,071	47,8	0,600	64,0	0,068	1742
Desv. Pad.	2,0	2,2	1,8	1,1	2,4	2,3	1,7	1,0	0,6	0,002	0,1	0,000	0,5	0,002	49
Desv. (%)	6,0	5,2	3,5	1,9	6,4	4,9	3,2	1,6	0,9	2,9	0,2	0,0	0,8	2,8	2,8

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 24 apresenta todos os resultados referentes ao ensaio de compressão para a PC. O desvio percentual do ponto de vista das tensões de escoamento de engenharia e verdadeira foram decrescentes com o aumento do *offset*. O valor de desvio máximo foi de 7 % para o *offset* de 0,2 %, já para a tensão máxima de flambagem e tensão verdadeira o desvio foi menor que 0,4 %, por fim o módulo de elasticidade com desvio menor que 3,1 %.

Tabela 24 - Resultados tratados referentes ao ensaio de compressão para o PC.

	S_{LE} 0,2%	S_{LE} 0,5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0,2%	σ_{LE} 0,5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	S_{fl}	e_{fl}	$\sigma_{(Sfl)}$	$\epsilon_{(Sfl)}$	E
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Média	47,1	54,3	61,2	68,5	52,0	59,2	66,5	74,3	72,7	0,079	78,4	0,076	1928
Desv. Pad.	3,3	2,4	1,9	1,4	3,5	2,7	2,2	1,4	0,3	0,005	0,2	0,004	61
Desv. (%)	7,0	4,5	3,2	2,0	6,7	4,6	3,3	1,9	0,4	5,8	0,3	5,5	3,1

Fonte: Autor, 2016.

7.1.7 Discussão dos resultados em tração

A Figura 69 apresenta o desvio para todas as propriedades mensuradas em tração com exceção da deformação. Os desvios percentuais foram maiores para as tensões de escoamento de engenharia e verdadeiras para o *offset* de 0,2 %, que é o valor usualmente difundido para determinação desta propriedade.

Outro ponto relevante é o desvio do módulo de elasticidade do PEBD que chegou próximo dos 11 %. Para os demais pontos, é notório que os desvios percentuais ficaram em menos de 9%. Os valores de tensão máxima e tensão verdadeira apresentam um pequeno desvio.

Devido a esta adesão nos pontos coletados, é possível afirmar que estas propriedades são menos sensíveis a variações entre as amostras.

Principalmente o PP apresentou um desvio maior de quase 12 %. Com base nos resultados é possível observar que existe maior adesão dos valores de escoamento quando coletados para um *offset* de 1 % ou 2 %, tornando o resultado mais preciso e menos sujeito a oscilações conforme apresentado na Figura 70.

Figura 69 - Percentual de desvio para todas as propriedades em tração

Fonte: Autor, 2016.

Figura 70 - Tensão limite de escoamento verdadeira em tração, média e desvio padrão para todos os *offsets*.

Fonte: Autor, 2016.

7.1.8 Discussão dos resultados em compressão

Diante do carregamento compressivo, a geometria unificada demonstrou, se comparado com o ensaio de tração, maior desvio percentual, principalmente para o PEAD e o PP, que apresentaram para algumas propriedades desvios consideráveis na ordem de até 20 %.

A geometria unificada apresentou como limitação a determinação da tensão limite de escoamento para o maior *offset* (2 %), tanto na curva de engenharia quanto verdadeira, para o material de menor módulo de elasticidade o PEBD. O mesmo não foi determinado pois sua flambagem ocorreu de modo prematuro a não permitir que por meio da metodologia que a reta paralela interseccionasse a curva.

A Figura 71 apresenta todos os desvios percentuais calculados em função de todas as propriedades mensuradas. Com base nesta figura torna-se possível concluir que independentemente do material, a tensão de escoamento para o *offset* de 2%, tanto de engenharia quanto a verdadeira, tal como a tensão de flambagem, tensão verdadeira e o módulo de elasticidade apresentaram percentual de desvio menor do que 9 %, salvo a exceção do PEBD

como já apresentado anteriormente, onde não foi possível mensurar a tensão de escoamento verdadeira para o *offset* de 2 %.

Figura 71 - Percentual de desvio para todas as propriedades em compressão

Fonte: Autor, 2016.

Da mesma forma que no ensaio de tração o desvio padrão para os valores da tensão de escoamento em compressão para o menor *offset* de 0,2 % foi maior, se comparado com o de maior *offset*, o que denota uma boa repetibilidade e reprodutibilidade para *offsets* de 1 % ou de 2 % de deformação, conforme apresentado na Figura 72.

Figura 72 - Tensão limite de escoamento verdadeira em compressão, média e desvio padrão para todos os *offsets*.

Fonte: Autor, 2016.

7.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TORÇÃO

A Figura 73 apresenta as curvas dos ensaios de torção realizados. Onde para cada material foram testados 5 corpos de prova, até a rotação de 300°.

Das cinco amostras testadas de PMMA, três apresentaram ruptura antes do nível de rotação de 300°. Os demais materiais não romperam, até o ângulo pré estabelecido, contudo todos os materiais atingiram o ponto da instabilidade.

O regime elástico de deformação apresentou boa aderência experimental, para todas as amostras independentemente do módulo de elasticidade do material testado.

É possível observar a nível gráfico que para os materiais de menor módulo de elasticidade (PEBD, PEAD, PP e PA6), houve maior dispersão no regime de deformação plástica. Enquanto que, para os materiais de maior módulo de elasticidade, PC e PMMA, a dispersão no regime plástico foi menor.

Figura 73 - Curvas tensão de cisalhamento vs. ângulo de deformação, para os ensaios de torção.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Para cada material foram efetuados ensaios em 5 corpos de prova.

A Figura 74 apresenta um comparativo dos resultados do ensaio de torção para a geometria unificada, entre os materiais escolhidos no presente trabalho. Sendo que de modo a ilustrar o comportamento, foi escolhido apenas uma curva por material testado (a que representa o comportamento médio). Esta comparação com as curvas em torção, não foi encontrada na literatura.

Ao se comparar a estes resultados com as curvas de tração e compressão, é possível afirmar que este resultado seguiu as mesmas tendências a nível de resistência mecânica, onde o material com maior resistência foi o PMMA, em seguida com resistência menor foram encontrados o PC, PA6, PP, PEAD e por fim o PEBD.

Figura 74 - Comparativo entre termoplásticos ensaiados em torção

Fonte: Autor, 2016.

7.3 GEOMETRIA UNIFICADA APÓS ENSAIOS

De modo a evidenciar o procedimento experimental, a Figura 75 apresenta um representativo do estado final dos corpos de prova após os ensaios mecânicos de tração, compressão e torção.

Figura 75 - Corpos de prova após ensaios mecânicos.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: Cada imagem é um representativo por material em função dos três ensaios realizados. Sendo identificado por: I) torção, II) compressão e III) tração.

Ao avaliar o aspecto final para cada material, em função do ensaio realizado, nota-se alguns comportamentos característicos. Em tração todos os materiais apresentaram estricção nítida, com exceção do PMMA, que rompeu de maneira frágil e o PEBD, que por sua vez não apresentou estricção.

Em compressão, os materiais semicristalinos flambaram apresentando modo I, deflexão lateral, conforme previsto no modelo numérico. Os materiais amorfos flambaram

tendendo ao modo II, estes materiais são também os que apresentam maior rigidez, é provável que este comportamento tenha ocorrido por possíveis desalinhamentos da máquina universal de ensaios, já que o modo que deveria ocorrer preferencialmente seria modo I.

Em torção, houve ruptura somente para o PMMA, esta que se apresentou em ângulo de 45°. Para os outros materiais foi observado que surgiram alinhamentos preferenciais também em 45° do eixo longitudinal.

7.4 DESBALANCEAMENTO

Como já apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho, o desbalanceamento é dado pela divisão das propriedades em compressão com relação à tração. Se o resultado for diferente de 1, o material é desbalanceado. De modo a apresentar o comportamento gráfico entre compressão vs. tração, uma única amostra com comportamento médio em tração e compressão foi selecionada para cada material testado.

Os resultados estão apresentados da Figura 76 à Figura 81. Com base nestas figuras, é possível concluir que o desbalanceamento foi evidente para todos os materiais, pois as curvas em compressão apresentaram nítida resistência mecânica superior se comparadas as de tração.

Figura 76 - Comparativo tração vs. compressão, para o PEBD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Figura 77 - Comparativo tração vs. compressão, para o PEAD.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Figura 78 - Comparativo tração vs. compressão, para o PP.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Figura 79 - Comparativo tração vs. compressão, para o PA6.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Figura 80 - Comparativo tração vs. compressão, para o PMMA.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Figura 81 - Comparativo tração vs. compressão, para o PC.

Fonte: Autor, 2016.

Legenda: (a) curva de engenharia e (b) curva verdadeira. Apenas foi escolhido um corpo de prova com comportamento médio, para tração e compressão.

Um dos objetivos deste trabalho é quantificar de modo preciso, por meio do corpo de prova unificado, o desbalanceamento de propriedades em termoplásticos. Devido a este motivo, além do cálculo do desbalanceamento para todas as propriedades, foi calculado também o seu respectivo desvio padrão, por meio da equação 31.

$$\frac{Desvio_Desbal.}{Média_Desbal.} = \sqrt{\left(\frac{Desvio_Comp.}{Média_Comp.}\right)^2 + \left(\frac{Desvio_Trac}{Média_Trac.}\right)^2} \quad (31)$$

Os resultados numéricos do desbalanceamento são apresentados na Tabela 25, para todos os materiais.

Tabela 25 - Resultados do cálculo do desbalanceamento para todos os materiais.

		S_{LE} 0.2%	S_{LE} 0.5%	S_{LE} 1%	S_{LE} 2%	σ_{LE} 0.2%	σ_{LE} 0.5%	σ_{LE} 1%	σ_{LE} 2%	$S_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{(Smax)}$	E
PC	Média	1,38	1,28	1,23	1,21	1,38	1,28	1,23	1,22	1,22	1,23	1,11
	Desv. Pad.	0,13	0,09	0,06	0,03	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0,01	0,05
	% Desvio	9,2	6,9	4,8	2,8	9,2	6,7	4,5	2,5	1,0	0,9	4,2
PMMA	Média	1,43	1,43	1,42	1,44	1,49	1,46	1,45	1,47	1,50	1,54	1,09
	Desv. Pad.	0,08	0,05	0,04	0,03	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	% Desvio	5,8	3,5	2,5	2,0	5,2	3,3	2,4	1,9	1,8	2,1	3,0
PA 6	Média	0,88	1,00	1,07	1,15	0,90	1,02	1,11	1,23	1,56	1,55	1,13
	Desv. Pad.	0,10	0,09	0,07	0,04	0,12	0,10	0,08	0,05	0,05	0,08	0,07
	% Desvio	11,0	9,0	6,4	3,7	12,9	10,0	7,0	3,8	3,4	5,1	6,5
PP	Média	1,33	1,44	1,44	1,48	1,38	1,44	1,49	1,52	1,54	1,59	1,03
	Desv. Pad.	0,24	0,18	0,12	0,08	0,24	0,17	0,12	0,07	0,02	0,03	0,11
	% Desvio	17,9	12,5	8,4	5,3	17,7	11,8	8,0	4,9	1,1	2,1	10,7
PEAD	Média	0,96	1,06	1,11	1,16	0,96	1,06	1,11	1,17	1,62	1,68	1,19
	Desv. Pad.	0,20	0,17	0,14	0,10	0,21	0,18	0,14	0,10	0,09	0,11	0,10
	% Desvio	20,7	16,5	12,5	8,6	21,3	16,8	12,6	8,5	5,3	6,4	8,0
PEBD	Média	1,13	1,24	1,32	1,40	1,46	1,53	1,63	-	1,32	1,13	1,21
	Desv. Pad.	0,06	0,07	0,07	0,09	0,06	0,07	0,09	-	0,06	0,06	0,14
	% Desvio	5,5	5,9	5,6	6,1	4,4	4,3	5,3	-	4,4	5,4	11,3

Fonte: Autor, 2016.

Para os materiais amorfos foi constatado o desbalanceamento, sendo que houve uma tendência de que todas as tensões de escoamento (engenharia e verdadeira), tensões máximas e tensão verdadeira apresentaram o desbalanceamento maior do que o encontrado para o módulo

de elasticidade (ainda assim este apresentou também desbalanceamento) conforme comparativo demonstrado na Figura 82. Já alguns materiais semicristalinos (PA6 e PEAD), apresentaram para os valores de tensão de escoamento de engenharia e verdadeira para o offset de 0,2 % valores abaixo de 1. Para as outras propriedades este valor foi maior que 1 o que comprova a existência do desbalanceamento.

Ao avaliar os dados é notório que existe uma tendência de maior desvio percentual na avaliação da tensão de escoamento verdadeira ou real para o offset de 0,2 %, independente do material. Este desvio tende a reduzir conforme aumenta o offset de escoamento. O percentual de desvio tanto para a tensão máxima de engenharia quanto para a tensão verdadeira foram menores do que 10%, sendo especificamente menor que 2,1 % para os materiais amorfos e menor do que 6,4 % para os materiais semicristalinos.

Figura 82 - Desbalanceamento, propriedades verdadeiras em função de cada material

Fonte: Autor, 2016.

Não é possível ser determinístico e apresentar um valor de desbalanceamento que caracterize o termoplástico avaliado. Portanto, do ponto de vista de aplicação estrutural em termos práticos, não existe um *offset* (tensão limite de escoamento) ideal para adoção e escolha do desbalanceamento. A escolha dependerá do nível de solicitação mecânica ou deformação imposta. Deste modo é possível utilizar o valor do desbalanceamento, com certa precisão.

Assim é possível prever falhas com maior rigor, utilizando modelos adequados (como apresentado na revisão, von Mises parabólico) e otimizar o projeto de componentes termoplásticos injetados.

A Figura 83, apresenta o desbalanceamento somente para as tensões de escoamento verdadeiras. É possível notar que para os semicristalinos (PA6, PP, PEAD e PEBD), houve em função do aumento do *offset* escolhido, uma tendência crescente de aumento do desbalanceamento. O PA6 e o PEAD, destacam-se como materiais tendendo ao balanceamento, com m entre 0,9 à 1,23. Por sua vez, o PP e PEBD, apresentam-se com nítido desbalanceamento, com valores de m , na ordem de 1,38 à 1,63.

Com relação aos amorfos (PMMA e PC), não houve tendência de comportamento característico. O PC apresentou tendência decrescente com o aumento do offset, com nítido desbalanceamento, o parâmetro m apresentou-se na ordem de 1,38 à 1,23. O material que apresentou maior regularidade na avaliação, independente do offset escolhido manteve-se com mesmo valor de m , foi o PMMA. O valor médio do desbalanceamento encontrado foi de aproximadamente 1,47.

Figura 83 - Desbalanceamento em função da tensão limite de escoamento verdadeira.

Fonte: Autor, 2016

7.5 VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE TORÇÃO

De modo a finalizar as avaliações da geometria unificada, foi realizada uma validação numérica do corpo de prova em torção. Para esta avaliação, à abordagem levou em conta as propriedades em tração, compressão e o nível de desbalanceamento do material escolhido, neste caso o PMMA.

O procedimento de simulação foi similar ao adotado na concepção da geometria unificada, no capítulo referente a simulação em elementos finitos (parágrafo 4.2 e 4.2.5). As diferenças relativas à referida metodologia foram: máxima rotação imposta ao corpo de prova de 60° ($\pi/3$), coleta de 50 incrementos e o uso do método de cálculo que contemplasse o desbalanceamento. O MSC Marc 2010 apresenta como opção para simulação de comportamento baseada na dependência da tensão hidrostática, o modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb parabólico. A dependência hidrostática é dada por um envelope de escoamento parabólico (Figura 84), que pode ser definido de acordo com a equação (32) (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2016; BARROSO, et al., 2010).

$$f = \left(3 \cdot J_2 + \sqrt{3} \cdot \beta \cdot \sigma_{eq_MCp} \cdot I_1 \right)^{1/2} - \sigma_{eq_MCp} = 0 \quad (32)$$

Figura 84 - Envelope de falha de Mohr-Coulomb parabólico

Fonte: MSC SOFTWARE CORPORATION, 2016.

Ao nível tecnológico da aplicação no ambiente do MSC Marc 2010, o que é inserido para este tipo de análise são basicamente dois parâmetros: a curva tensão deformação verdadeira em tração e o seu respectivo β . Sendo este parâmetro, uma variável que pode ser ligada diretamente ao desbalanceamento. Segundo Chakrabarty (2006), o desbalanceamento (m) pode ser apresentado pela equação (33), para o critério de Mohr-Coulomb parabólico.

$$m = \frac{1 + \sqrt{3}\beta}{1 - \sqrt{3}\beta} \quad (33)$$

De posse dos valores calculados de desbalanceamento (para o PMMA) foi estimado um β de 0,1050 que corresponde ao m de 1,44. Portanto foi possível construir a curva a nível numérico, que representasse o comportamento em torção, já incorporando à parcela do desbalanceamento, e também à curva que reflete o mesmo material na condição balanceado com $m=1$ (Figura 85).

É possível observar que no início do regime elástico a curva numérica apresenta excelente aderência a experimental. Após esta pequena porção elástica o comportamento da curva da simulação numérica apresenta certo desvio, porém segue em um regime parabólico crescente que atinge maior resistência se comparada à curva experimental. Esta avaliação, foi uma primeira aproximação numérica do comportamento obtido experimentalmente em torção, considerando o desbalanceamento. Dada a abordagem experimental ainda simplificada, são recomendados ensaios futuros para investigação do comportamento em torção.

Do ponto de vista numérico, ao comparar o material balanceado *vs.* material desbalanceado, é possível notar que existe influência na resistência mecânica ao variar o m . Com base na avaliação das curvas, há o indicativo de que para um maior nível de desbalanceamento, menor será a resistência à torção.

Figura 85 - Curva comparativa numérico *vs.* experimental - Ensaio de torção em PMMA.

Fonte: Autor, 2016.

8 CONCLUSÕES

Simulações numéricas: As simulações numéricas realizadas previamente com o objetivo de validar a geometria unificada - em tração, compressão, flambagem e torção - demonstram que a mesma possui condições de atender a proposta experimental do presente trabalho. Já que diante de todos os carregamentos realizados, a instabilidade ocorreu próxima ou posteriormente aos 100% da tensão de instabilidade, para o material de menor e maior rigidez.

Com base na tensão de instabilidade, as simulações numéricas para a tração e compressão atingiram os mesmos percentuais, 150% para o material de baixa rigidez e 110% para o de alta rigidez. Já para o carregamento torcional o material de maior rigidez apresenta uma intensificação de tensões na ordem 90% da tensão de instabilidade; por sua vez o material de menor rigidez apresenta sua instabilidade acima dos 110% da tensão de instabilidade. Para ambos materiais frente ao carregamento torcional, o objetivo deverá ser atendido, assim determinando as propriedades diante do ensaio de torção. Com relação a flambagem, houveram diferenças ao se tratar da comparação analítico vs. numérico, mesmo assim, a geometria unificada atende o objetivo do trabalho e de ensaios reais.

Diante das simulações realizadas foi possível concluir positivamente sobre a geometria unificada, que a mesma deverá tanto para a classe dos materiais de baixa como de alta rigidez, atender aos objetivos propostos.

Confecção das amostras / injeção: O molde apresentou excelentes resultados para o processo de injeção das amostras, desde que os parâmetros do equipamento fossem ajustados corretamente para cada material. O momento da extração dos corpos de prova do molde foi de fácil execução, mesmo ao se considerar um corpo de prova injetado em um molde bi-partido. Deste modo todas as amostras avaliadas no presente trabalho foram injetadas com sucesso e não houve presença de defeitos superficiais ou internos na secção útil do corpo de prova. Apenas o PC e o PP apresentaram algumas poucas bolhas, mas somente nas cabeças dos corpos de prova, o que não afeta a realização dos ensaios.

Ensaio de tração: A geometria unificada garantiu estabilidade e foi possível obter todas as propriedades, tanto do ponto de vista de engenharia, quanto das propriedades verdadeiras, mesmo para os diversos *offsets* sugeridos por esta metodologia. A avaliação para a tensão de escoamento demonstra que é recomendável efetuar a coleta destas propriedades para o *offset* de 1 % e/ou 2% ao se avaliar do ponto de vista do desvio percentual encontrado, pois deste modo todos os desvios serão menores que 6 %, com exceção do módulo de elasticidade que apresentou desvios na ordem de até 12 %.

Ensaio de compressão: Todas as amostras apresentaram flambagem e para todas as amostras foi possível determinar as propriedades em compressão, já apresentadas na metodologia e nos resultados do presente trabalho, salvo a exceção de que o material avaliado com menor módulo de elasticidade, PEBD ($E = 98 \pm 4$ MPa), flambou de maneira precoce e não permitiu a coleta da tensão de escoamento verdadeira para o *offset* de 2%. A mesma tendência é notada para o ensaio de compressão, onde as tensões de escoamento para os *offsets* de 0,2 % e 0,5 % apresentam maior percentual de desvio, se forem consideradas as outras propriedades excluindo estas o percentual de desvio menor que 12%.

Ensaio de torção: As amostras apresentaram boa aderência experimental. De modo específico, na região em que existe proporcionalidade, e as deformações são distribuídas ao longo de toda a amostra de maneira elástica, foi obtida excelente estabilidade e repetibilidade. Para o trecho plástico, houve instabilização e espalhamento experimental, pois a mensuração de ângulo avaliou a amostra como um todo, acrescida dos desvios relativos à rigidez do equipamento de teste. O recomendado é realizar a mensuração somente da região útil. Como a avaliação foi preliminar e exploratória, a instrumentação desta região não foi implementada em nível avançado. Portanto, este tema é sugerido como trabalho futuro.

Desbalanceamento: Foi possível garantir por meio dos experimentos conduzidos que os polímeros termoplásticos avaliados no presente trabalho são desbalanceados. A avaliação para os menores *offsets* de escoamento (menores que 1 %), demonstra um desvio percentual elevado, o que torna o dado impreciso. Para alguns materiais os *offsets* de 0,2 % e 0,5 % apresentaram valores de desbalanceados menores que 1, porém este comportamento foi pontual (PEAD e PA6); no restante todos os materiais apresentaram o desbalanceamento acima de 1, de forma clara e precisa. Não é possível ser determinístico e apresentar um valor de desbalanceamento que caracterize o termoplástico avaliado. Portanto, do ponto de vista de aplicação estrutural em termos práticos, não existe um *offset* (tensão limite de escoamento) ideal ou único para adoção e escolha do desbalanceamento. Ao avaliar o desbalanceamento somente para as tensões de escoamento verdadeiras, é possível notar que para os semicristalinos (PA6, PP, PEAD e PEBD), houve em função do aumento do *offset* escolhido, em uma tendência crescente de aumento do desbalanceamento. O PA6 e o PEAD, destacam-se como materiais tendendo ao balanceamento, com m entre 0,9 à 1,23. Por sua vez, o PP e PEBD, apresentam-se com nítido desbalanceamento, com valores de m na ordem de 1,38 à 1,63. Com relação aos amorfos (PMMA e PC), não houve tendência de comportamento característico. O PC apresentou tendência decrescente com o aumento do *offset*, com nítido desbalanceamento, o parâmetro m apresentou-se na ordem de 1,38 à 1,23. O material que apresentou maior

regularidade na avaliação, independente do offset escolhido manteve-se com mesmo valor de m , foi o PMMA. O valor médio do desbalanceamento encontrado foi de aproximadamente 1,47.

A metodologia empregada no presente trabalho, na determinação do desbalanceamento, demonstrou-se robusta, precisa e confiável. As causas que fazem com que ocorra o desbalanceamento, do ponto de vista de micromecanismos, não foram foco do presente trabalho. Dada a relevância do assunto, o mesmo é sugerido como trabalho futuro no capítulo seguinte.

Validação numérica do ensaio de torção: Embora os modelos numéricos de elementos finitos aplicados nesta avaliação sejam não lineares, de grandes deformações, altamente refinados e com as propriedades reais de tração, compressão e desbalanceamento, ainda assim não foi possível concluir sobre a aderência com os experimentos de torção, os quais foram simplificados. O modelo utilizado de Mohr-Coulomb parabólico, não reflete também exatamente o comportamento do von Mises parabólico, que foi sugerido na revisão da literatura. Devido a este motivo, o tema é sugerido como trabalho futuro, no capítulo subsequente. Contudo, do ponto de vista numérico, comparando a curva do material balanceado vs. curva do material desbalanceado, fica evidente que o desbalanceamento impacta na resistência mecânica à torção do termoplástico avaliado (PMMA). Ainda neste contexto foi notada uma tendência de que para um maior nível de desbalanceamento, menor foi a resistência mecânica à torção.

Conclusão final: Diante de todas as etapas e premissas avaliadas pelo presente trabalho, apresentadas de maneira resumida nos itens acima, é possível afirmar que: o corpo de prova unificado proposto e avaliado neste trabalho, não sofreu instabilidade antes da determinação de todas as propriedades mecânicas desejadas (independente do ensaio realizado), portanto o objetivo foi alcançado com sucesso. Adicionalmente o método para determinação do desbalanceamento (m), se mostrou confiável e dá indicações de que há a possibilidade de sugestão como uma metodologia robusta. Os pontos que merecem uma abordagem com maior aprofundamento são referentes aos mecanismos envolvidos no desbalanceamento e aos ensaios de torção, tanto do ponto de vista numérico quanto experimental para instrumentação somente da área útil por meio de clip-gage.

8.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de suprir lacunas e dificuldades encontradas no presente trabalho, são apontadas sugestões de pesquisas futuras, conforme descrito abaixo:

- a) explorar por meio da geometria unificada o ensaio de torção em materiais termoplásticos. Conduzindo experimentos com instrumentação na região útil (L_2) do corpo de prova, que permita determinar a deformação angular em função do torque aplicado. Com base nos dados experimentais, efetuar a avaliação numérica por meio de modelos que contabilizem o nível de desbalanceamento e validar o comportamento em torção. Deste modo, definindo uma metodologia robusta para avaliação do desbalanceamento;
- b) execução de testes em equipamento que permita a realização de esforços combinados, equipamento biaxial de ensaios, como torção e tração simultaneamente, a fim de refinar o estudo sobre carregamentos multiaxiais em materiais termoplásticos, para com isto contribuir diretamente para o estudo do desbalanceamento;
- c) efetuar pesquisa exploratória sobre os fatores que afetam o desbalanceamento em polímeros termoplásticos, e quais os micromecanismos envolvidos neste processo;
- d) promover um estudo interlaboratorial baseado na E691-15 (ASTM, 2015c) com o intuito de determinar a precisão do método de teste proposto utilizando o corpo de prova unificado, com foco nos ensaios propostos de tração, compressão e torção.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO PLÁSTICO. **Perfil 2015**. 2016. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf. Acesso em: 30 ago. 2016.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D618-13**: Standard practice for condition plastics for testing. West Conshohocken, 2013a.

_____. **D638-14**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 2014.

_____. **D695-15**: Standard test method for compressive properties of rigid plastics. West Conshohocken, 2015a.

_____. **D790-10**: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken, 2010a.

_____. **D1043-10**: Standard test method for stiffness properties of plastics as a function of temperature by means of a torsion test. West Conshohocken, 2010b.

_____. **D2990-01**: Standard test methods for tensile, compressive and flexural creep and creep-rupture of plastics. West Conshohocken, 2001.

_____. **D4065-12**: Standard practice for plastics, dynamic mechanical properties: determination and report procedures. West Conshohocken, 2012.

_____. **D5279-08**: Standard test method for plastics: dynamic mechanical properties: in torsion. West Conshohocken, 2008.

_____. **E83-10**: Standard practice for verification and classification of extensometer systems. West Conshohocken, 2010c.

_____. **E4-15**: Standard practice for force verification of testing machines. West Conshohocken, 2015b.

_____. **E74-13a**: Standard practice of calibration of force-measuring instruments for verifying the force indication of testing machines. West Conshohocken, 2013b.

_____. **E8/E8M-13a**: Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2013c.

_____. **E691-15**: Standard practice for conducting an interlaboratory study to determine the precision of a test method. West Conshohocken, 2015c.

BARROSO, A. et al. Plasticity effects in CFRP-Al adhesive joints. In: PAN-AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 11th, 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: ABCM, 2010. Disponível em: <<http://www.aamech.org/PACAM11/papers/area6-compositeMaterials/PAC0148-VicentiniD.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2016.

BEER, F. P. et al. **Mechanics of materials**. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

BIANCHI, Marcos. **Desbalanceamento de resistência mecânica em materiais poliméricos: caracterização experimental e aplicação exploratória para projeto**. 2011. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2011.

BOWER, David I. **An introduction to polymer physics**. Cambridge: Cambridge University, 2002.

BROWN, Roger. **Handbook of polymer testing: short-term mechanical tests**. Shawbury: Rapra Technology, 2002.

CADDELL, R. M.; RAGHAVA, R. S.; ATKINS, A. G. A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers. **Journal of materials science**. v. 8, p. 1641-1646, 1973.

CALLISTER, William D. **Material science and engineering: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CANEVAROLO, Jr. Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed., São Paulo: Artliber, 2002.

CARUSO, Juliana Gutierrez. **Desenvolvimento numérico-experimental de corpos de prova aplicáveis a ensaios de tração, compressão e torção de polímeros**. 2015. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI (FEI), São Bernardo do Campo, 2015.

CHAKRABARTY, J. **Theory of plasticity**. 3rd ed., Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2006

COOK, Robert. MALKUS, David. PLESHA, Michael. WITT, Robert. **Concepts and applications of finite element analysis**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 6892-12: Metallic materials - tensile testing - part 1: method of test at room temperature (ISO 6892-1: 2009)**. Berlim, 2012.

DIETER, George E. **Mechanical metallurgy**. London: McGraw-Hill, 1988.

DONATO, Gustavo H. B. **Comportamento mecânico dos materiais**. Centro Universitário da FEI. 2015. (notas de aula)

DOWLING, Norman E. **Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. 2 ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall. 1999.

FÉODOSIEV, V. **Resistência dos materiais**. 7 ed., Moscou: Editora Mir. 1977

GARBASSI, F; PO, R. Engineering thermoplastics overview. In: MARK, H. F. **Encyclopedia of polymer science and technology**. 3rd ed. Waco: John Wiley & Sons, 2004. p. 307–328. CD ROM.

GHORBEL, Elhem. A viscoplastic constitutive model for polymeric materials. **International Journal of Plasticity**, v. 24, p. 2032-2058, 2008.

HOSFORD, William F. **Mechanical behavior of materials**. New York: Cambridge University Press, 2005.

HU, L. W. PAE, K. D. Inclusion of the Hydrostatic Stress Component in Formulation of the Yield Condition. **Journal of the Franklin Institute**, v. 275, n° 6, p. 491-502, June 1963.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1**: plastics - determination of tensile properties - part 1: general principles. Berlim, 2012.

_____. **ISO 604**: plastics - determination of compressive properties. Berlim, 2012.

LAMKANFI, Ebrahim. et al. Strain distribution in cruciform specimens subjected to biaxial loading conditions. Part 1: Two-dimensional versus three-dimensional finite element model. **Journal Polymer Testing**, Elsevier, v. 29, p. 7-13, 2010.

MSC SOFTWARE CORPORATION. **Marc volume A**: theory and user information. 2016. Disponível em:
<https://simcompanion.mssoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC11101&actp=LIST>. Acesso em 30 ago. 2016.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos**: rosca única / extrusora e matrizes injeção e moldes. São Paulo: Artliber, 2005.

NIELSEN, Lawrence E. LANDEL, Robert F. **Mechanical properties of polymers and composites**. 2 ed., New York: Marcel Dekker, 1994.

O'CONNEL, P. A.; McKENNA, G. B. Yield and crazing in polymers. In: MARK, H. F. **Encyclopedia of polymer science and technology**. 3rd ed. Waco: John Wiley & Sons, 2004. p. 627–654. CD ROM.

ODOM, Edwin. M.; ADAMS, Donald. F. Development of an improved compression specimen geometry for unreinforced polymers. **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, v. 22, n. 2, p. 104-110, March 1994.

OSSWALD, Tim A. et al. **International Plastics Handbook**: the resource for plastics engineers. 4th ed., Munique: Hanser Gardner, 2006.

OZILIO, Helbert. **Caracterização experimental do desbalanceamento de propriedades mecânicas de polímeros termoplásticos sob tração e compressão**. 2012. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.

POPOV, E. G. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Editora Edgar Blumer, 1978.

RAGAB, Abdel-Rahman. BAYOUMI, Salah Eldin. **Engineering solid mechanics: fundamentals and applications**. London: CRC, 1998.

RAGHAVA, Ram; CADDEL, Robert M; YEH, Gregory S. Y. The macroscopic yield behaviour of polymers. **Journal of Materials Science**, v. 8, p. 225-232, 1973.

ROESLER, Joachim. HARDERS, Harald. BAEKER, Martin. **Mechanical behaviour of engineering materials: metals, ceramics, polymers and composites**. Berlin: Springer Science Business Media, 2007.

ROSSI, G. B. **Measurement and probability: a probabilistic theory of measurement with applications**. Genova: SpringerJohn Wiley & Sons, 2014.

SHAH, Vishu. **Handbook of plastic testing technology**. 2nd ed., California: John Wiley & Sons, 1998.

SPERLING, Leslie Howard. **Introduction to physical polymer science**. 4th ed. Pennsylvania: Wiley Inter-science, 2006.

SWALLOWE, G. M. **Mechanical properties and testing of polymers: an A-Z reference**. 3rd ed. Berlin: Springer Science Business Media, 1999.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J.N. **Theory of elasticity**, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2008.

WARD, Ian M., SWEENEY, John. **Mechanical properties of solid polymers**. 3rd ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2013.

APÊNDICE A - FICHA TÉCNICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Polietileno de Alta Densidade HC7260LS-L
Descrição:

A resina HC7260LS-L é um polietileno de alta densidade desenvolvido para o segmento de injeção. Possui densidade, dureza e rigidez elevados.

Sua distribuição estreita de massa molar resulta em baixa tendência à deformação. Esta resina é aditivada contra a ação da radiação ultravioleta.

Aplicações:

Caixaria, Caixas para uso industrial, Capacetes, Assentos sanitários, Utilidades domésticas, Brinquedos, Tampas e Paletes.

Processo:

Moldagem por Injeção

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190/2,16)	D 1238	g/10 min	7,2
Densidade	D 792	g/cm ³	0,959

Propriedades Típicas:

Propriedades de Referência de Placa^a

	Método ASTM	Unidades	Valores
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	30
Alongamento no Escoamento	D 638	%	7,5
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1350
Dureza Shore D	D 2240	-	64
Resistência ao Impacto Izod	D 256	J/m	35
Resistência à Quebra sob Tensão Ambiental ^b	D 1693	h/F50	< 4
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	°C	126
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	76

(a) Placa moldada por compressão pelo Método ASTM D 4703.

(b) Condições: 100% Igepal, placa de 2 mm, com entalhe de 0,3 mm, 50°C.

Observações Finais:

- As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam do certificado de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações, a Braskem tem desenvolvido resinas *tailor-made* para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ – Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 25087-34-7.
- Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizado para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- As resinas Braskem não contêm aditivos compostos por metais ou outras substâncias que tenham o objetivo de promover oxidação. Tais aditivos e a decomposição e fragmentação de resinas causada pela ação de oxidação, podem contaminar o meio ambiente, prejudicar o desempenho da embalagem e ainda aumentar o potencial de migração de componentes da embalagem para alimentos, comprometendo a aprovação da resina com relação aos requisitos da Resolução 105/99 da ANVISA. Sua utilização, em conjunto com resinas Braskem, implica perda imediata das garantias de desempenho descritas neste documento.
- As informações aqui contidas cancelam as anteriormente emitidas para este produto.
- Esta resina não contém a substância Bisfenol A (BPA, CAS#80-05-7) em sua composição.

Folha de Dados

Rev. 6 - Maio/07

H 503

Polipropileno H 503

Subfamília:

Homopolímero

Descrição:

O H 503 é uma resina de Polipropileno de baixo índice de fluidez, aditivada para uso geral. Indicada para moldagem por injeção, rafia, filmes biorientados e extrusão geral. O H 503 apresenta excelente processabilidade com boa estabilidade do fundido, bom balanço rigidez/impacto e baixa transferência de odor e sabor.

Aplicações:

Tampas flip-top e com dobradiças integradas, Peças de parede espessa, Fundo de carpete, Eletrodomésticos, Sacarias, Big bags, Embalagens para alimentos e produtos têxteis, Fitas adesivas, Filmes para linhas de conversão, Cerdas para vassouras e escovas

Processo:

Extrusão de Rafia

Moldagem por Injeção

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230° C/2,16kg)	D-1238-L	g/10 min	3,5

Propriedades Típicas - PP:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade(23°C)	D-792A	g/cm ³	0,905
Módulo de Flexão	D-790	GPa	1,47
Resistência a Tração no Escoamento	D-638	MPa	35
Alongamento no Escoamento	D-638	%	12
Dureza Rockwell	D-785-A	Escala R	84
Resistência ao Impacto IZOD a 23°C	D-256-A	J/m	36
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) a 1820kPa	D-648	°C	55
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) a 455kPa	D-648	°C	92
Temp. de Amolecimento Vicat - 1kg	D-1525	°C	155

Observações Finais:

- Esta resina atende à regulamentação para polímeros de olefinas do 21 CFR, seção 177.1520 do FDA Food and Drugs Administration. Os aditivos presentes são sancionados por regulamentação apropriada do FDA.
- As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam do certificado de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações, a Braskem tem desenvolvido resinas tailor-made para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ - Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 9003-07-0.
- Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizado para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- As resinas Braskem não contêm aditivos compostos por metais ou outras substâncias que tenham o objetivo de promover a oxidação. Tais aditivos e a decomposição e fragmentação de resinas causada pela ação de oxidação comprometem a aprovação da resina com relação aos requisitos da Resolução 105/99 da ANVISA. O uso destes aditivos implica a perda das garantias de desempenho descritas neste documento.

FICHA TÉCNICA

Acrigel® ECL100

DESCRIÇÃO

Baixa fluidez, boa resistência térmica e boa relação rigidez/impacto.
Principais aplicações: perfisados extrudados e peças técnicas injetadas.

	Método	Valores Típicos	Unidades
Propriedades Físicas			
Índice de Fluidez (230°C / 3,8 kg)	ASTM D-1238	2,3	g/10 min
Densidade	ASTM D-792	1,19	g/cm³
Propriedades Mecânicas			
Resistência à Tração (ruptura)	ASTM D-638	72	MPa
Alongamento (ruptura)	ASTM D-638	4	%
Impacto IZOD Entalhado	ASTM D-256	15	J/m
Dureza Rockwell (escala M)	ASTM D-785	96	-
Propriedades Térmicas			
Temperatura de Deflexão Térmica (1,8 MPa; 3,2mm)	ASTM D-648	98	°C
Temperatura de Amolecimento Vicat (10N, 120°C/h)	ASTM D-1525	110	°C
Temperatura de Amolecimento Vicat (50N, 50°C/h)	ASTM D-1525	102	°C
Contração do Moldado	ASTM D-955	0,3 - 0,6	%
Propriedades Óticas			
Transmitância	ASTM D-1003	92	%
Índice de Refração	ASTM D-542	1,49	-

Moldagem por Injeção

Condições de Processamento Recomendadas*

Pré-secagem: 85°C / 4 horas

Temperatura do Molde: 60°C

Zonas de Injetora	Zona 1 (Bico de Injeção)	Zona 2	Zona 3	Zona 4 (Alimentação)
Temperatura (°C)	245	250	240	230

*Valores indicativos. As condições ideais devem ser determinadas experimentalmente para cada processo e dependem do desenho da peça, número de cavidades, projeto do molde e máquina.

Nota:

Valores típicos. Não devem ser usados com a intenção de especificação. As normas acima são referências literárias sobre a metodologia analítica utilizada. Corpos de prova injetados sob condições ideais de processamento. As propriedades podem ser afetadas pela quantidade e tipos de pigmentos. As propriedades óticas informadas são válidas para produto natural sem tingimento.

Todas as informações presentes são dadas de boa fé e não é uma garantia do produto. Contate nosso departamento técnico para especificação do produto. Consulte nosso departamento técnico sobre necessidades de conformidade e homologação em normas nacionais e internacionais.

• MAKROPOL B3 MF UV CRLA010 PC306

Polycarbonato cristal, baixa viscosidade, com proteção aos raios UV, excelentes propriedades térmicas e mecânicas. Indicado para moldagem por injeção, em peças como lentes automotivas.

Polycarbonate crystal, low viscosity, UV stabilized, excellent thermal and mechanical properties. Suitable for injection molding as headlamp lenses for automobiles.

Propriedades / Properties	Método / Method	Unidade / Unit	Valores / Values
Físicas / Physical			
Identificação da resina <i>Resin Identification</i>	ISO 1043		>PC<
Índice de Fluidez (300°C/1.2-kg) <i>Melt mass-flow Rate</i>	ASTM D 1238	g/10 min.	19
Peso Específico (Densidade) <i>Density</i>	ASTM D 792	g/cm ³	1,2
Contração na Moldagem <i>Mold Shrinkage (Parallel/Normal)</i>	ASTM D 955	%	0,65
Absorção de Umidade <i>Water absorption (Equilibrium value)</i>	ISO 62	%	0,12
Absorção de Água - Saturação <i>Water absorption (Saturation value)</i>	ISO 62	%	0,3
Mecânicas / Mechanical			
Resistência a tração <i>Tensile stress at yield</i>	ASTM D 638	MPa	65
Alongamento na tração <i>Tensile elongation at yield</i>	ASTM D 638	%	6
Módulo de Tração <i>Tensile Modulus (1 mm/min)</i>	ASTM D 638	MPa	2400
Resistência a tração na ruptura <i>Tensile stress at break</i>	ASTM D 638	MPa	70
Alongamento na ruptura <i>Tensile elongation at break</i>	ASTM D 638	%	115
Resistência Flexão <i>Flexural stress at 5 % strain</i>	ASTM D 790	MPa	85
Módulo de Flexão <i>Flexural Modulus</i>	ASTM D 790	MPa	2350
Impacto Izod com entalhe <i>Notched Izod Impact (3,2 mm)</i>	ASTM D 256	J/m	740
Térmicas / Thermal			
Temperatura de deflexão térmica <i>Temperature of deflection under load</i> 0,45 MPa 1,80 MPa	ASTM D 648	°C	134 128
Temperatura de amolecimento Vicat <i>Vicat softening temperature (50 N, 50 °C/h)</i>	ASTM D 1525	°C	142

Coeficiente linear de expansão térmica <i>Coefficient of linear thermal expansion</i>	ASTM D 696	°C	0,65
Flamabilidade <i>Flamability</i> 1,5 mm 3,0 mm	UL 94	Class	V-2 HB
Condutividade térmica <i>Thermal conductivity</i>	ASTM C 177	W/(m·K)	0,20
Elétricas/ Electrical			
Resistividade volumétrica <i>Volume resistivity</i>	ASTM D 257	Ohm·m	1,00E+14
Resistividade superficial <i>Surface resistivity</i>	ASTM D 257	Ohm	1,00E+16
Resistência dielétrica <i>Dielectrical strength (1 mm)</i>	ASTM D 149	kV/mm	34
Propriedades Ópticas / Optical Properties			
Escurecimento <i>Haze (3 mm)</i>	ASTM D 1003	%	< 0,5
Transmissão luminosa <i>Luminous transmittance</i>	ASTM D 1003	%	87
Processo / Process			
Temperatura de Processo Moldagem <i>Molding Process Temperature</i>	/	°C	260 to 300
Temperatura do Molde <i>Mold Temperature</i>	/	°C	60 to 100
Secagem <i>Drying</i>	/	°C/hours	120/4

APÊNDICE B - PROJETO DO EXTENSÔMETRO AXIAL

Com o objetivo de efetuar a medida de deformação de forma precisa para o corpo de prova unificado será utilizado um extensômetro com abertura de 5 mm (em função do L_2 definido).

Este extensômetro foi desenvolvido com a característica de atender tanto em tração quanto em compressão, para deste modo atender de modo satisfatório os ensaios propostos. Para desenvolvimento do mesmo foi efetuado todo o projeto de modo analítico e também pelo método dos elementos finitos.

A condição de contorno no projeto deste extensômetro foram as seguintes:

- Projeto otimizado ao máximo visando minimizar a carga imposta pelo extensômetro ao corpo de prova.
- Capacidade de deformação máxima na ordem de 100%, tanto em tração quanto em compressão.

Para o método analítico o procedimento para cálculo foi em determinar por meio de equações básicas de resistência dos materiais, por meio do recurso do Microsoft Excel “Atingir Meta” quais seriam as dimensões ótimas visando atingir as premissas pré-estabelecidas e assim determinar o dimensional do mesmo.

As equações utilizadas, foram tomadas como base para apenas uma das lâminas do extensômetro, deste modo o equacionamento foi desenvolvido conforme apresentado pela equação 34, que representa a flecha para uma viga em flexão pura, já a equação 35, representa a equação de tensão na flexão pura.

$$y_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (34)$$

$$E\varepsilon = \frac{PL \frac{t}{2}}{I} \quad (35)$$

Deste modo foi possível reescrever uma nova equação que combinou tanto a equação 34 com 35, e assim foi possível encontrar a equação 36, que em função das deformações refletem a equação 37, que reescrita por motivo de facilitar os cálculos, reflete a equação final utilizada, eq. 38.

$$P = \frac{3EIy_{\max}}{L^3} \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{3EIy_{\max}}{L^3} L \frac{t}{2}}{EI} \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{3y_{\max}}{L^2} \frac{t}{2} \quad (38)$$

Por meio do equacionamento foi determinado o dimensionamento da lâmina do extensômetro (Figura 86), de tal forma que a deformação na região onde fosse efetuada a instrumentação fosse atingido um valor de 1000 microdeformações para a flecha máxima que foi determinada em 2,5 mm (para cada uma das lâminas).

Figura 86 - Projeto detalhado do extensômetro

Fonte: Autor, 2016

As extremidades das lâminas foram usinadas, de modo a facilitar a inserção de um elástico de pequenas dimensões, para assim facilitar a fixação do extensômetro ao corpo de prova, conforme apresentado na Figura 87.

Figura 87 - Detalhamento da extremidade de contato da garra do extensômetro

Fonte: Autor, 2016.

Após efetuada esta análise foi verificado a força imposta por meio da equação 35, e resultou no valor de 3 N para cada lâmina, ou seja para o extensômetros com abertura inicial de 5 mm quando aberto em 100% a força imposta ao corpo de prova é de 6 N.

Para validar o procedimento analítico foi efetuada uma simulação pelo MEF, onde foi considerado uma viga engastada e imposta em sua extremidade o deslocamento máximo de 2,5 mm e a 10 mm da extremidade engastada foi medido a deformação obtida como resposta a este deslocamento, o valor encontrado conforme apresentado na Figura 88 e Figura 89, foi de 923 microdeformações, valor aproximado do valor obtido analiticamente.

Figura 88 - Vista lateral da lâmina, imposto 2,5 mm de deslocamento - MEF

Fonte: Autor, 2016.

Figura 89 - Simulação lâmina instrumentada - MEF

Fonte: Autor, 2016.

Deste modo tornou-se possível efetuar a instrumentação por meio da técnica de extensometria elétrica, foram colados 4 strain-gages em 1 em cada superfície da lâmina, ou seja dois por lâmina (quando a lâmina sofre a flexão um strain-gage é tracionado e o outro por sua vez é comprimido) com o objetivo de montar a ligação em ponte completa, utilizando os conceitos da ponte de wheatstone e deste modo dar um elevado nível de precisão no instrumento, criando assim um transdutor (Figura 90).

As etapas de instrumentação, pré-calibração e compensação foram realizadas no laboratório de células de carga da TOLEDO do Brasil Ltda., a título de colaboração com o trabalho.

Figura 90 - Extensômetro $L0=5$ mm

Fonte: Autor, 2016.

De modo a integrar o extensômetro ao equipamento universal MTS 810, sem utilizar aquisitores de dados em paralelo, o mesmo foi submetido à calibração pelo autor por meio de um tambor micrométrico padrão (Figura 91) e impondo os valores de calibração no software MTS 793, que é o ambiente que parametriza todas as funções do equipamento universal de ensaios, desde dados de calibração até o controle das funções básicas.

O procedimento de calibração do extensômetro foi efetuado de acordo com a E83-10 (ASTM,2010c), foi imposto ao extensômetro deformações pré-determinadas na ordem de 0,1

mm/mm tanto em tração como em compressão, com valor final de 0.7 mm/mm. Em função de cada deformação imposta por meio do tambor micrométrico, o extensômetro apresentou sua respectiva resposta. Deste modo, o procedimento foi efetuado de modo iterativo até que houvesse a melhor convergência entre o tambor micrométrico com a resposta do extensômetro, ajustando parâmetros específicos de ganho no controlador FlexTest 40 da empresa MTS.

O percentual de erro para a calibração, oscilou na ordem de 0.4 % até 0.7 %, segundo a E83-10 (ASTM, 2010c) o extensômetro pode ser classificado como Classe C, que engloba erro de até 1 %. Ao efetuar a comparação com extensômetros comerciais em aplicações industriais e centros de pesquisas, é comum esta faixa de erro e é aceitável para ensaios como os efetuados no presente trabalho, porém existem extensômetros que atendem de maneira mais precisa, com erros menores do que 0,5 % ou até mesmo 0,25 %.

Figura 91 - Calibração do extensômetro, por meio de tambor micrométrico

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE C - PROTOCOLO DA TAXA DE CARREGAMENTO EM TORÇÃO

Ao considerar a equação de von Mises, já apresentada conforme equação (12), e ao considerar um estado uniaxial de tração e ao considerar um estado biaxial de torção pura, obtém-se as equações 39 e 40.

$$\sigma_{eq_vM_tração} = \sigma_1 \quad (39)$$

$$\sigma_{eq_vM_torção} = \sigma_1 \cdot \sqrt{3} \quad (40)$$

É possível admitir que a taxa de carregamento é igual a taxa de deformação imposta ao corpo de prova, deste modo é possível afirmar que para haver comparabilidade entre o ensaio de tração e torção é necessário que a tensão equivalente de von Mises na tração seja igual à da torção. E ainda é possível dividir esta tensão equivalente pelo tempo, configurando assim a taxa de carregamento. Conforme apresentado na equação 41.

$$\frac{\sigma_{eq_vM_tração}}{t} = \frac{\sigma_{eq_vM_torção}}{t} \quad (41)$$

Tração

Portanto, em tração é possível adotar a lei de *hooke* dividido pelo tempo, conforme apresentado na equação 42.

$$\frac{\sigma}{t} = \frac{E \cdot \varepsilon}{t} \quad (42)$$

Onde a taxa de deformação pode ser definida pela equação 43, com seu respectivo valor, definido no trabalho.

$$\frac{\varepsilon}{t} = 0,06 \text{ min}^{-1} \quad (43)$$

Ao substituir a equação 42 na equação 41 e considerar que $\sigma = \sigma_1$, define-se a equação 44.

$$\frac{\sigma_1}{t} = 0,06E \quad (44)$$

Deste modo, a tensão equivalente de von Mises para tração em função da taxa de carregamento é representada pela substituição, da equação 44 na equação 39, assim é obtido a equação 45.

$$\frac{\sigma_{eq_vM_tração}}{t} = 0,06E \quad (45)$$

Torção

Em torção, o procedimento é análogo ao de tração, onde adota-se inicialmente a lei de *hooke* dividido pelo tempo, conforme apresentado na equação 46.

$$\frac{\tau}{t} = \frac{G \cdot \gamma}{t} \quad (46)$$

Sendo G e γ , definidos conforme as equações 47 e 48.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (47)$$

$$\gamma = \frac{\rho \cdot \phi}{L} \quad (48)$$

Assim é possível substituir a equação 47 e 48 na equação 46, e obter a equação 49.

$$\frac{\tau}{t} = \frac{E \cdot \rho \cdot \phi}{2(1 + \nu) \cdot L \cdot t} \quad (49)$$

Onde velocidade angular é a parcela da equação 49 que corresponde a equação 50.

$$\text{velocidade}_{\text{angular}} = \frac{\phi}{t} \quad (50)$$

É possível impor na equação 48 as seguintes constantes, em função dos materiais testados e dimensões do corpo de prova unificado, sendo: $L=21$ mm, $\rho=2,05$ mm e $\nu=0.38$ (valor representativo para os termoplásticos do presente trabalho). E assim obter a equação 51.

$$\frac{\tau}{t} = \frac{E \cdot 2,05 \cdot \phi}{2(1 + 0,38) \cdot 21 \cdot t} = 0,0356 \frac{E \cdot \phi}{t} \quad (51)$$

Conforme apresentado na equação 39, a tensão equivalente de von Mises para o estado de torção está em função do σ_1 , que por sua vez pode ser considerado para a lei de *Hooke* em torção igual a $f(\tau)$, deste modo define-se a equação 52.

$$\frac{f(\tau)}{t} = \frac{\sigma_1}{t} = 0,0356 \frac{E \cdot \phi}{t} \quad (52)$$

Deste modo, a tensão equivalente de von Mises para torção em função da taxa de carregamento é representada pela substituição, da equação 52 na equação 40, assim é obtido a equação 53.

$$\frac{\sigma_{\text{eq_vM_torção}}}{t} = 0,0356 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\phi}{t} \quad (53)$$

Equivalência das tensões

Definida as tensões equivalentes de von Mises para tração e torção, é possível então substituir as equações 45 e 53 na equação 41, e assim obter a equação 54.

$$0,06 \cdot E = 0,0356 \cdot E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\phi}{t} \quad (54)$$

Ao simplificar a equação 54, torna-se possível então obter a velocidade angular de carregamento, já definida na equação 50, conforme apresentado na equação 55.

$$\frac{\phi}{t} = 0,972 [\text{rad/min}] \quad (55)$$

Portanto, definido assim a velocidade de carregamento angular compatível com as velocidades que foram usadas em tração e compressão, sendo igual a 57 °/min.