

Armin Sonnenhohl

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS, ESTUDO DE CASO: UHMWPE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Eduardo A. Fancello,
D.Sc.

Coorientador: Prof. Edison da Rosa,
Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Carlos R. M.
Roesler, Dr. Eng.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sonnenhohl, Armin

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE PROCEDIMENTOS
EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS, ESTUDO DE CASO: UHMWPE / Armin Sonnenhohl
; orientador, Eduardo Alberto Fancello ; coorientador,
Edison da Rosa, coorientador, Carlos Rodrigo de Mello
Roesler. - Florianópolis, SC, 2015.

127 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Ensaio de caracterização
mecânica. 3. Comportamento mecânico dos materiais. 4.
Polímeros médicos. 5. Dispositivos para ensaios mecânicos.
I. Fancello, Eduardo Alberto. II. Rosa, Edison da. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Armin Sonnenhohl

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS, ESTUDO DE CASO: UHMWPE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de concentração Projeto e Análise Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 09 de Outubro de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniela Águida Bento Dallacosta, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é
dedicado ao
laboratório
Grante.*

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, contemplando todos os seus os professores e colaboradores que realizam um belo e incessável trabalho, ajudando na formação de nós alunos.

Aos meus orientadores Eduardo, Edison e Rodrigo, pelo voto de confiança e por toda dedicação e paciência, principalmente na elaboração deste documento.

Ao Lauro, Paulo de Tarso, José Carlos, Rodrigo Vieira e Barcellos, professores do Grante com os quais sempre tive agradáveis conversas além de que, de certa forma, também me orientaram neste trabalho.

Agradeço também ao material UHMWPE que, apesar das dificuldades na confecção das amostras, proporcionou belas curvas e praticamente não produziu deformações localizadas na maior parte dos testes.

Aos meus colegas de laboratório Paulo, Diego, Thiago, Jan Michel, pelas diversas horas de conversa frente a curvas obtidas neste trabalho, ao Otavio, André, Hélio, Juliano, Rafael, Augusto, Jakson, Maicon, Ronaldo, Hammes, Tarifa, Juliana, Márcio, Carol, Françaó, Corbélia e principalmente ao Guilherme Tavares e João Dudy, pelo grande auxílio e dedicação na busca de medições de qualidade nos ensaios com DIC.

Aos meus irmãos do SurfeBV, Felipe, Guilherme e Caio, pelas ondas compartilhadas e pela torcida na conclusão do mestrado.

Ao meu amigo Luiz Pinagé, pelo auxílio nas calibrações dos LVDTs e por todo o incentivo.

Aos meus pais, Dulce e Dieter, e ao meu irmão Martin, por todo apoio, suporte financeiro e emocional.

Aos meus avós, por todo carinho que sempre recebi e pelo exemplo de caráter que me deram.

Finalmente, agradeço a Elisa Ferrari, minha grande companheira, por sempre desejar o meu sucesso e aceitar minhas ausências durante o mestrado, sendo de grande importância para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Palavras-chave: UHMWPE, Ensaio de caracterização mecânica, Design de dispositivos, Correlação Digital de Imagens.

Devido ao amplo uso de polímeros termoplásticos com função mecânica na indústria, faz-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de metodologias robustas para a caracterização de comportamento mecânico destes materiais. O presente trabalho apresenta uma proposta de metodologia de ensaios para caracterização mecânica de termoplásticos, contemplando carregamentos trativo, compressivo uniaxial e compressivo biaxial, em regime de deformações finitas, com deslocamentos monotônicos e cíclicos. Para a implementação experimental da proposta foram projetados e fabricados três novos dispositivos de fixação e posicionamento da amostra para estes ensaios. Foi projetado também, um novo conceito de transdutor de deslocamento biaxial para corpos de prova de pequenas dimensões, capaz de medir simultaneamente as deformações longitudinal e transversal do corpo de prova. Nos ensaios experimentais a curva tensão-deformação verdadeira foi obtida utilizando-se a técnica de correlação de imagens digitais (DIC) e transdutores de deslocamento do tipo LVDT. Como estudo de caso foram realizados ensaios de caracterização mecânica do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), material utilizado para aplicações médicas nas superfícies de contato articulado de próteses para artroplastia de joelho, quadril e ombro, principalmente. A metodologia proposta possibilitou a obtenção da curva tensão-deformação verdadeira para o material analisado e a determinação dos parâmetros associados. Foram detectadas diferenças no comportamento do material quando testado nas diferentes direções com relação ao sentido da extrusão da barra original. Os dispositivos projetados foram capazes de obter, com homogeneidade, deformações acima de 50% e seus projetos estão autorizados para reprodução. Os desenhos técnicos estão disponíveis nos apêndices deste documento. Os resultados completos dos ensaios realizados podem ser acessados no site deste projeto.

ABSTRACT

Keywords: UHMWPE, Test of Mechanical Behavior of Materials, Device Design, Digital Image Correlation.

Due to the extensive use of thermoplastic polymers with special mechanical characteristics in the industry, the development of robust methods for the characterization of the mechanical behavior of these materials is increasingly important. This master thesis proposes a method for mechanical characterization of thermoplastics, contemplating specimens under tensile, compressive uniaxial and biaxial compression under conditions of finite strains, with monotonic and cyclic loads. For the experimental implementation of the proposal three new fixtures and positioning systems were designed and manufactured. It was also designed a new concept of biaxial displacement transducer for small specimens, capable of simultaneously measuring the longitudinal and transverse strains of the specimen. In experimental trials the true stress-strain curve was obtained using the digital image correlation technique (DIC) and displacement transducers of the LVDT type. At the study case, mechanical characterization tests of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) were performed. This material is used for medical applications in articulated contact surfaces of prostheses for knee arthroplasty, hips and shoulder, especially. With the proposed methodology it was possible to obtain true stress-strain curve for the analyzed material and the associated parameters. Differences in the behavior of the material when tested in different directions with respect to the direction of extrusion of the original bar were identified. The designed devices were able to reach, with homogeneity, over 50% of strain. Their designs are authorized for reproduction and are available in the appendices of this document. The full results of mechanical tests are available on the website of this project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Formação da estrutura molecular de um polímero [4].....	29
Figura 2 - Comportamento do UHMWPE em três diferentes taxas de deformação [8].....	32
Figura 3 - Fenômeno de fluência em níveis diferentes de tensão mecânica [8].	33
Figura 4 - Comparação entre a curva tensão/deformação de engenharia com amostras expostas a temperaturas distintas [9].....	34
Figura 5 - Ensaio de tração e compressão em curvas tensão-deformação de a) engenharia e b) real [10].	34
Figura 6 - Comparação entre as curvas tensão/deformação das amostras retiradas de diferentes direções de um tarugo extrudado [11].....	35
Figura 7 - Exemplo de curva tensão/deformação de polímeros.	36
Figura 8 - Geometria tipo gravata para corpos de prova de tração [13].....	38
Figura 9 - Ensaio de tração e cisalhamento com geometria de Arcan. O nível de triaxialidade varia de acordo com a direção do carregamento no corpo de prova.....	39
Figura 10 – a) Localização da ruptura fora da área de medição. b) Geometria de corpo de prova pré-entalhada.	39
Figura 11 - Representação do ensaio Small punch. a) amostra sem carga b) amostra após ensaio. [14].....	40
Figura 12 – a) Formato “barril” e b) Deslocamento transversal da amostra.	41
Figura 13 - Geometria de cp e dispositivo de fixação para carregamento multiaxial.[16].....	42
Figura 14 - Nova geometria de corpo de prova para ensaio de tração uniaxial..	44
Figura 15 – Comparação das tensões principais das geometrias a) Geometria tipo IV da norma ASTM-D638 b) Geometria proposta.	45
Figura 16 - Proposta de Geometria de corpo de prova e dispositivo de fixação.	46
Figura 17 - Exemplo de aplicação do dispositivo de tração.....	47
Figura 18 - Dispositivo para ensaios compressivos e geometria do corpo de prova.	48
Figura 19 – Ensaio de compressão biaxial a) geometria do corpo de prova, b) dispositivo montado e c) posicionado dentro do dispositivo de compressão uniaxial.	49
Figura 20 - Dispositivos para ensaio mecânico.....	51
Figura 21 - dispositivo de deslocamento e seu princípio de funcionamento.....	52
Figura 22 - <i>Clip-gage</i> em ensaio de tração uniaxial.....	53
Figura 23 - <i>Clip-gage</i> biaxial: a) Convencional (fonte: www.instron.com) e b) proposto pelo presente trabalho.	53
Figura 24 - Representação dos pontos de referência e a procura do mesmo no próximo instante de tempo através da correlação de imagem.[17] ..	54
Figura 25 - O gradiente de deslocamento obtido com DIC foi utilizado para alimentar um modelo constitutivo de dano [18].....	55

Figura 26 - Exemplo da curva força em função do tempo de um ensaio de tração uniaxial de um termoplástico.	56
Figura 27 - Diferença entre as tensões reais e de engenharia em um ensaio de tração.	57
Figura 28 - Gráfico de deslocamento ao longo do tempo nas direções Axial e Transversal.	58
Figura 29 - Deformação causada por uma força.	58
Figura 30 - Posição dos <i>markers</i> e gradiente de deformação real em corpo de prova indeformado.	61
Figura 31 - Gradiente de deformação real, a) direção Axial e b) transversal.	61
Figura 32 - Curva Tensão - Deformação para ensaio de tração.	62
Figura 33 - Curva Tensão-Deformação para ensaio de compressão.	62
Figura 34 - Módulo secante do material em 4MPa, 8Mpa, 14Mpa e 18Mpa.	63
Figura 35 - Deformação transversal em função da deformação axial.	64
Figura 36 - Curva da taxa de deformação [%/s] em relação à deformação real para ensaio de tração com velocidade de 100mm/min.	65
Figura 37 - Corte do tarugo em fatias.	68
Figura 38- Disposição das amostras extraídas no tarugo de 400 mm.	69
Figura 39 - Extração das amostras para compressão uniaxial.	69
Figura 40 - Extração dos blocos para cps transversais e cps extraídos.	70
Figura 41 - Amostras para ensaio de compressão biaxial.	70
Figura 42 - Desenho de corte com jato inicial afastado da geometria da amostra.	71
Figura 43 - Material sacrificado no ajuste de parâmetros da máquina de corte.	72
Figura 44 - Extração das amostras bem sucedida por corte a jato d'água.	72
Figura 45 - Tarugos a serem confeccionados os corpos de prova na nova geometria sugerida para ensaio de tração.	73
Figura 46 - Gráfico Deslocamento-Tempo das amostras a) trc01 (0,1mm/s), b) trc1(1mm/s) e c) trc10 (10mm/s).	76
Figura 47 - Curva temporal da força de reação dos corpos de prova no ensaio cíclico.	77
Figura 48 - Curva de engenharia - comparação entre velocidade de carregamento.	77
Figura 49 - Comparação entre as curvas tensão-deformação de engenharia em carregamentos monotônico e cíclico do ensaio de tração uniaxial.	78
Figura 50 - Comparação entre curvas tensão-deformação real e de engenharia, em ensaio de tração com carregamento cíclico.	79
Figura 51 - Comparação entre curvas tensão-deformação real e de engenharia, em ensaio de tração com carregamento monotônico.	79
Figura 52 - Tensão Real/Deformação LN das amostras de UHMWPE em ensaio de tração nas três velocidades de carregamento monotônico.	80
Figura 53 - Tensão real-deformação LN das amostras de UHMWPE em ensaio de tração nas três velocidades de carregamento cíclico.	80

Figura 54 - Relação entre deformação transversal e axial para as curvas real e de engenharia.	81
Figura 55 - Comparação entre curva real (logarítmica) e de curva de engenharia.	82
Figura 56 - Curva tensão–deformação logarítmica para carregamento compressivo monotônico nas três velocidades.	83
Figura 57 - Curva tensão-deformação para carregamento cíclico em três velocidades.....	84
Figura 58 - Curva tensão-deformação verdadeira para os ensaios com carregamento compressivo e trativo.....	85
Figura 59 - Curva tensão Real–deformação LN dos ensaios de compressão.	86
Figura 60 - Curva tensão–deformação das amostras axial e transversal no ensaio de compressão uniaxial com taxa de deformação de 1%/s.....	86
Figura 61 - Rigidez do dispositivo de compressão biaxial.	88
Figura 62- Curva tensão–deformação (Vertical e Transversal) para carregamento monotônico de 0,1%/s.	88
Figura 63 - Curva tensão–deformação para carregamento cíclico de 0,1%/s. ...	89
Figura 64 – Região da curva da Figura 63 durante o intervalo de deslocamento nulo para ensaio com velocidade de 0,1%/s.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de amostras	68
Tabela 2 – Velocidade de carregamento para obter taxa de deformação de referência estipuladas.	74
Tabela 3 - Carregamentos dos ensaios de tração uniaxial.	75
Tabela 4 – Coeficiente de Poisson e Módulo Secante para ensaio de tração.	82
Tabela 5 – Dimensões das amostras e carregamento dos ensaios de compressão biaxial.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CP – Corpo de Prova

DIC – Correlação de Imagens Digitais (*Digital Image Correlation*)

GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico (Laboratório da UFSC)

ISO - *International Organization for Standardization*

LEBm – Laboratório de Engenharia Biomecânica (Laboratório da UFSC)

LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* (Transdutor de deslocamento)

POSMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UHMWPE – *Ultra High Molecular Weight Polietileno*

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

X	Vetor de coordenadas na referência
x	Vetor de coordenadas no instante t
u	Distância instantânea entre garras
E	Módulo de Elasticidade
F	Força
A_0	Área indeformada
A	Área instantânea
l_0	Comprimento útil inicial do corpo de prova
l_i	Comprimento instantâneo de l_0
C	Tensor deformação de Cauchy-Green à direita
F	Gradiente de deformações

Alfabeto grego:

σ	Tensão mecânica
ν	Coefficiente de Poisson
ε	Deformação mecânica
ε_{eng}	Deformação de engenharia
ε_{est}	Deformação de engenharia estimada
ε_{real}	Deformação verdadeira
Δl	Deslocamento instantâneo
χ	Gradiente do mapeamento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	25
1.1 MOTIVAÇÃO	25
1.2 OBJETIVOS	26
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO	27
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
2 REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1 POLÍMEROS	29
2.2 TERMOPLÁSTICOS	30
2.3 UHMWPE	30
<i>2.3.1 Propriedades mecânicas do UHMWPE</i>	<i>31</i>
2.4 ENSAIOS MECÂNICOS	35
<i>2.4.1 Ensaio de tração uniaxial</i>	<i>40</i>
<i>2.4.2 Ensaio de compressão uniaxial</i>	<i>41</i>
<i>2.4.3 Ensaio multiaxial</i>	<i>42</i>
3 DISPOSITIVOS DE ENSAIO	43
3.1 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	43
3.2 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	47
3.3 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO BIAXIAL	49
4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	51
4.1 FORÇA E TENSÃO REAL	55
4.2 DESLOCAMENTOS E MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO	57
5 ESTUDO DE CASO	67
5.1 EXTRAÇÃO DAS AMOSTRAS	67
5.2 ENSAIOS E TIPOS DE CARREGAMENTO	73
5.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	75
5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM CARREGAMENTO NA DIREÇÃO DA EXTRUSÃO	82
5.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM CARREGAMENTO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL À EXTRUSÃO	85
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS	95

APÊNDICE – DESENHOS TÉCNICOS DOS DISPOSITIVOS DE ENSAIO.....98

INTRODUÇÃO

A tecnologia aplicada na área da saúde tem desempenhado um papel de extrema importância nos últimos anos. A necessidade de alternativas menos agressivas ao corpo humano no que se refere ao uso de próteses e implantes tem estimulado o desenvolvimento de novas aplicações para materiais plásticos na medicina, dentre os quais se destacam os polímeros, devido à facilidade de produção, além de apresentarem propriedades mecânicas que podem se aproximar das propriedades dos materiais biológicos.

O uso de polímeros em medicina é um exemplo das primeiras aplicações dos polímeros, com os estudos destes materiais em experimentos cirúrgicos. Dentre os mais utilizados para aplicação médica estão os polímeros: polietileno (PE), polieter éter ketone (PEEK), poliuretano (PU), politetrafluoretileno (PTFE), polimetilmetacrilato (PMMA), polietilenotereftalato (PET), borracha de silicone (SR), polisulfona (PS) [1].

Dentre os polímeros citados, destaca-se o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), amplamente utilizado no par tribológico de articulações (em conjunto com ligas de Aço Inox ou CrCoMo), principalmente nas artroplastias de quadril (componente acetabular) e joelho (componente tibial). Conforme [2] esse material possui amortecimento de impacto eficaz e baixo coeficiente de atrito. O baixo coeficiente de fricção e a reduzida perda de volume por abrasão são características de grande importância neste material. Apesar destas características, o desgaste do componente polimérico é o maior fator causativo das falhas em próteses de quadril e joelho [3].

Considerando a função mecânica desempenhada por polímeros termoplásticos atualmente, bem como a necessidade de aprimorar as características de comportamento destes materiais visando aplicações de alto desempenho, é necessário determinar de forma inequívoca o comportamento mecânico destes materiais sob diferentes modos de carregamento. Os parâmetros obtidos nestas caracterizações experimentais podem ser utilizados como dados de entrada em modelos constitutivos destes polímeros visando à simulação computacional do comportamento mecânico de novos projetos de produtos.

1.1 MOTIVAÇÃO

A necessidade de uma metodologia para a caracterização de comportamento mecânico de termoplásticos, a ser executada de forma

fácil e efetiva, incentivou o desenvolvimento e aplicação deste estudo. O alto custo de dispositivos convencionais para testes de caracterização é um fator proibitivo para muitos laboratórios de pesquisa realizarem testes mais elaborados, o que motiva a criação de novos dispositivos de ensaios de caracterização mecânicas.

Na perspectiva da análise numérica de comportamentos de materiais poliméricos, é necessária execução de ensaios mecânicos para desenvolver modelos constitutivos para polímeros em uso na indústria. Atualmente, para polímeros, os modelos constitutivos que descrevem com uma boa aproximação o comportamento mecânico são complexos, pois levam em consideração a velocidade do carregamento, efeitos de fluência e de relaxação de tensão, fenômenos estes que tem peso menor em materiais metálicos. Essa complexidade faz necessário o uso de alguns parâmetros extras no modelo constitutivo, os quais devem ser obtidos através de ensaios mecânicos mais elaborados, exigindo carregamentos diferenciados e/ou combinados para assim conseguir uma caracterização mais completa do material em questão. A complexidade em realizar estes ensaios está relacionada à fixação e alinhamento das amostras, ocorrência de forças de atrito indesejáveis afetando a resposta do corpo de prova, e a necessidade de obtenção da curva tensão e deformação verdadeira.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho reside em desenvolver uma nova metodologia para ensaios de caracterização do comportamento mecânico de polímeros, bem como desenvolver os dispositivos de fixação necessários para a aplicação experimental desta metodologia. Os requisitos de projeto para estes dispositivos são:

- Rigidez elevada de maneira a não causar movimentos transversais nas amostras ao longo do ensaio;
- Ser de fácil fabricação;
- Ter um custo de fabricação baixo, inferior a 25% do preço de dispositivos convencionais.

A metodologia de ensaios desenvolvida foi aplicada ao UHMWPE devido à grande relevância deste material na área biomédica.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O desenvolvimento de uma metodologia para ensaios de caracterização mecânica, e os dispositivos criados, trará grandes avanços para os laboratórios envolvidos e, também, para a comunidade científica, uma vez que, os projetos dos dispositivos estão autorizados para a reprodução, e sua execução é simples e de baixo custo. A fabricação dos dispositivos trará uma economia de até 80% aos laboratórios acadêmicos, frente à aquisição de equipamentos comerciais nacionais.

Com os dispositivos sugeridos por esta metodologia, é possível realizar os ensaios com mais facilidade e obter resultados mais confiáveis, por conta da capacidade autocentrante, no caso do dispositivo de tração, e a alta rigidez estrutural dos dispositivos de compressão.

Para o ensaio de tração, o dispositivo criado fez diminuir o deslocamento de corpo rígido, se comparado com garras convencionais do tipo cunha, facilitando o uso de técnicas ópticas de medição e aumentando a precisão da medição com o uso do dispositivo de Correlação de Imagens Digitais (DIC).

Com os novos dispositivos e com as técnicas de medições utilizadas, foi possível medir a área instantânea ao longo do ensaio, é possível a obtenção das curvas verdadeiras de tensão-deformação, pouco presente nos trabalhos científicos devido a dificuldade dos laboratórios de pesquisa adquirir dispositivos capazes de fazer, com precisão suficiente, este tipo de medição.

Para o estudo de caso, foram realizados os ensaios, utilizando a metodologia sugerida, em amostras de UHMWPE do tipo específico para uso médico. Os resultados completos e o projeto dos dispositivos podem ser acessados na íntegra por meio do site: www.grante.ufsc.br

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Inicialmente é apresentada uma revisão bibliográfica referente aos polímeros, com ênfase no UHMWPE, utilizado no estudo de caso. A revisão bibliográfica também contém estudo de diferentes tipos de ensaios mecânicos e geometria de corpo de prova.

No capítulo 3 são apresentados os dispositivos de fixação e as geometrias de corpo de prova propostos e desenvolvidos no presente estudo.

O capítulo 4 contém uma breve introdução das técnicas de medição sugeridas para os ensaios mecânicos. Além disto, é apresentado um novo transdutor de deslocamento que pode ser utilizado nos ensaios de tração.

Os resultados dos ensaios experimentais do UHMWPE utilizando a metodologia proposta são apresentados no capítulo 5. Os apêndices apresentam os projetos dos dispositivos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 POLÍMEROS

Os polímeros foram primeiramente produzidos com o uso de materiais orgânicos para a fabricação da borracha, com o processo de vulcanização, a criação de explosivos utilizando algodão e a fabricação de filmes fotográficos a partir da canfora e celuloide em meados do século XIX.

Com os avanços tecnológicos após a segunda Guerra Mundial o uso dos polímeros cresceu muito no âmbito industrial, e as vantagens desse material configuram-se em função de características como a fácil fabricação e moldagem, excelente isolamento térmico e elétrico, boa capacidade de absorver/dissipar energia, entre outras. Diante disso, tem-se verificado um aumento na sua utilização para a fabricação dos mais variados produtos tecnológicos, como componentes eletrônicos, peças de automóveis, eletrodomésticos, anteparos balísticos para blindagem de veículos, pranchas de surfe e muitos outros.

A palavra polímero se origina do latim onde o prefixo “*poli*” quer dizer muitos, e o radical “*meros*”, significa partes, devido ao fato do polímero ser composto por moléculas de cadeias longas formadas pela repetição de um grande número de monômeros ligados através do fornecimento de calor e/ou pressão e/ou catalisação. Esse processo é chamado de polimerização. Na Figura 1 é demonstrada a polimerização do polietileno.

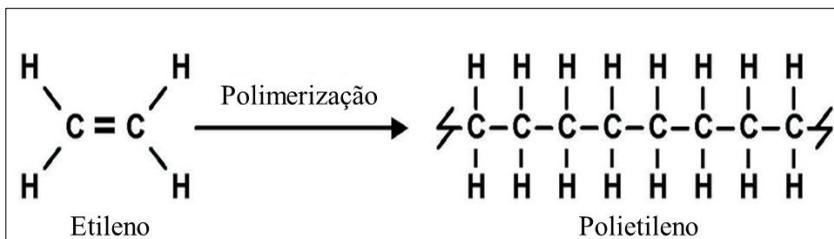


Figura 1- Formação da estrutura molecular de um polímero [4].

Desta forma, o polímero é constituído por um emaranhado de cadeias cuja forma influencia nas propriedades mecânicas do material. De fato, quanto mais amorfa for, maior a possibilidade de atingir grandes deformações sem que haja ruptura, enquanto que uma forma mais cristalina permite que o polímero seja mais resistente, porém mais frágil.

Os polímeros podem ser classificados em elastômeros, termofixos e termoplásticos.

2.2 TERMOPLÁSTICOS

Os termoplásticos apresentam como principal característica, a fácil moldagem e, ao contrário dos termorrígidos, possibilitam uma fácil reciclagem.

O comportamento dos termoplásticos se caracteriza pela sua complexidade, uma vez que são observadas respostas diferentes a iguais solicitações mecânicas aplicadas ao polímero, porém com distinção de alguns parâmetros, como uma pequena variação de temperatura. Outros exemplos de fatores externos que podem influenciar no comportamento são submissão à irradiação gama e a ocorrência de algum ciclo de vida, verificando assim o acúmulo de algum tipo de dano.

Atualmente, com o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho, é possível o seu emprego no interior do corpo humano em aplicações biomédicas as quais incluem: implantes vasculares, componentes de implantes ortopédicos, cateteres, vasos sanguíneos artificiais e lentes oculares. Nestas aplicações, esses polímeros precisam ser concebidos para atuar em um ambiente hostil dentro do corpo humano com um alto grau de confiabilidade. Modelos prevendo o comportamento de termoplásticos específicos vêm sendo criados nos últimos anos e necessitam de informações obtidas da caracterização completa do material através de ensaios mecânicos. Desta forma, faz-se necessário o completo entendimento do comportamento dos polímeros para melhorar sua aplicação em produtos biomédicos, por exemplo.

2.3 UHMWPE

O Polímero Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) vem sendo utilizado em diversas aplicações como, por exemplo, na indústria alimentar, devido a sua capacidade para prevenir o crescimento de fungos e bactérias, e na cozinha, para o revestimento de utensílios e pela facilidade de remoção de gordura em sua superfície.

Esse material pode ser encontrado também na superfície inferior de pranchas de *snowboard* e esqui. O UHMWPE também tem aplicações medicinais, em substituições de articulações do corpo humano, sendo um dos plásticos mais utilizados na medicina. Sua vantagem nessa aplicação refere-se à biocompatibilidade, o baixo coeficiente de atrito e ter sua superfície antiaderente e auto lubrificante. Em comparação a outros termoplásticos, o UHMWPE se destaca em função da maior resistência ao impacto, e a sua capacidade de resistir ao desgaste.

Sua primeira aplicação em implantes ortopédicos ocorreu em 1962 por S. J. Charnley e desde então milhões de cirurgias de implantes de quadril, ombro e joelho foram realizadas com esse tipo de material [5]. Em comparação, com outros tipos de polímero da mesma família o UHMWPE possui um peso molecular de 6.000.000 g/mol enquanto o Polímero de Alta Densidade (HDPE), comercialmente conhecido como PEAD no Brasil, possui apenas 50.000g/mol.

Apesar das qualidades citadas acima, a vida útil estimada das próteses utilizando UHMWPE é de 10 a 15 anos, o que pode ser um problema, visto que muitos jovens necessitam de cirurgias de implantes de próteses, e sendo assim, realizam diversas cirurgias para a substituição delas no decorrer de suas vidas. Segundo [6], a principal causa da substituição das próteses reside no fato que apesar da biocompatibilidade do UHMWPE, o resíduo gerado pelo desgaste do componente polimérico da prótese causa complicações clínicas resultando em última instância na soltura do implante metálico e consequente necessidade de retirada e substituição deste (cirurgia de revisão).

A partir disso, novas variações do UHMWPE veem sendo desenvolvidas com o objetivo de melhorar o desempenho frente à longevidade dos componentes produzidos com esse material, e com isso, diminuir a quantidade de cirurgias de substituição de próteses. Um ganho na resistência ao desgaste, estudado por [7], pode ser obtido por meio do método de ligações cruzadas, onde irradiando raios gama ou feixes de elétrons, causa o aumento do número de ligações cruzadas do polímero. Essa busca em variações do UHMWPE também incentiva o crescimento da realização de ensaios mecânicos que possam identificar e avaliar as melhorias obtidas.

2.3.1 Propriedades mecânicas do UHMWPE

Diversos são os fatores que interferem na reposta do polímero durante o carregamento dos ensaios. No caso dessas influências serem

parâmetros de entrada para o ensaio, é necessário o controle correto para que toda a região de medição esteja com a mesma condição. Por exemplo, é necessário garantir que toda a região sensível da amostra esteja em equilíbrio térmico. De acordo com [8] as propriedades mecânicas do UHMWPE variam com a velocidade de deformação aplicada. A Figura 2 mostra esse fenômeno, onde a curva tensão deformação de engenharia é diferente para cada taxa de deformação. Porém, no descarregamento todas as três curvas convergem para o mesmo ponto.

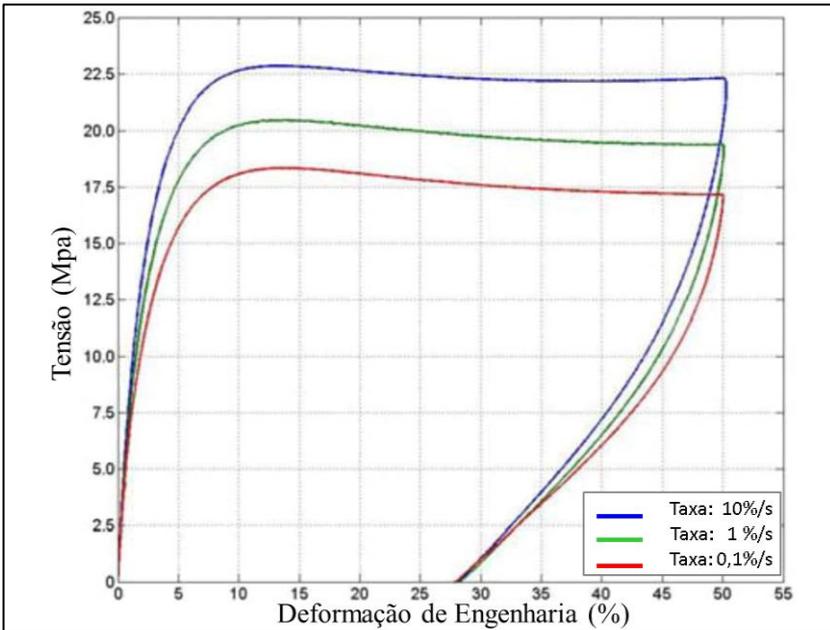


Figura 2 - Comportamento do UHMWPE em três diferentes taxas de deformação [8].

Com esta forte dependência da taxa de deformação no comportamento do UHMWPE, faz-se necessário o cuidado no controle das velocidades em que serão feitos os ensaios mecânicos.

A não linearidade também está presente no seu comportamento de fluência, onde é possível observar a divergência das curvas para valores diferentes de tensão, mesmo abaixo da tensão de escoamento do material ensaiado, como ilustra a Figura 3.

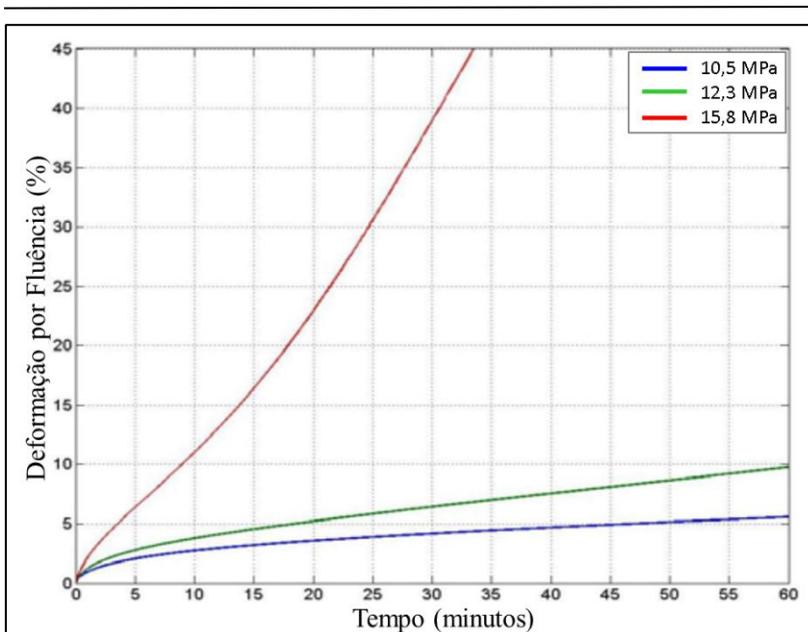


Figura 3 - Fenômeno de fluência em níveis diferentes de tensão mecânica [8].

Outro efeito característico nos termoplásticos é a mudança de suas propriedades mecânicas com a temperatura, as quais [9] estudaram esse fenômeno no UHMWPE comparando amostras do material submetidas à solução salina nas temperaturas ambiente (23°C) e temperatura corporal (37°C). Neste trabalho é possível observar a diferença no comportamento do material na Figura 4 onde a tensão de escoamento e a tensão máxima ficam menores na maior temperatura.

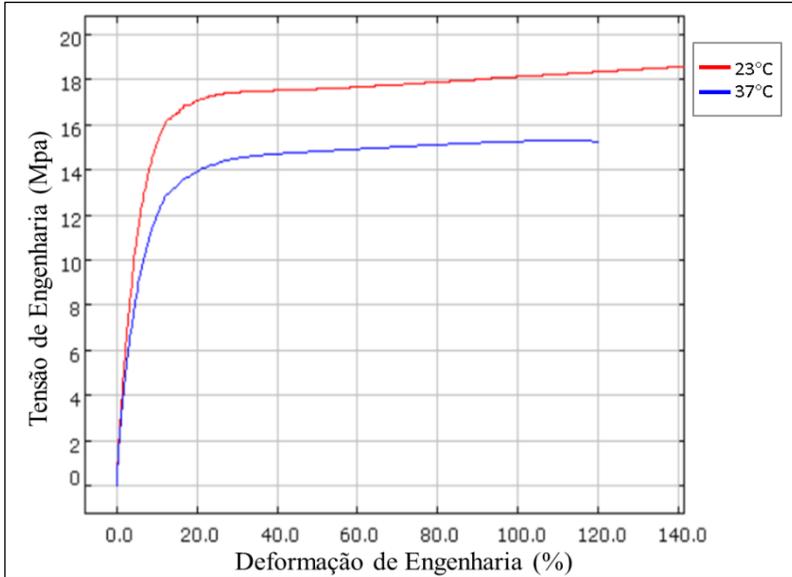


Figura 4 - Comparação entre a curva tensão/deformação de engenharia com amostras expostas a temperaturas distintas [9]

Quanto à necessidade da captura da curva tensão/deformação real ante a curva de engenharia, [10] demonstram que as amostras do material UHMWPE ensaiadas tiveram uma resposta diferente entre tração e compressão quando observado apenas a curva de engenharia. Entretanto, ao obter a curva real, ficou evidente que o material analisado possui um comportamento extremamente próximo entre as curvas tratativas e compressivas, conforme a Figura 5 ilustra.

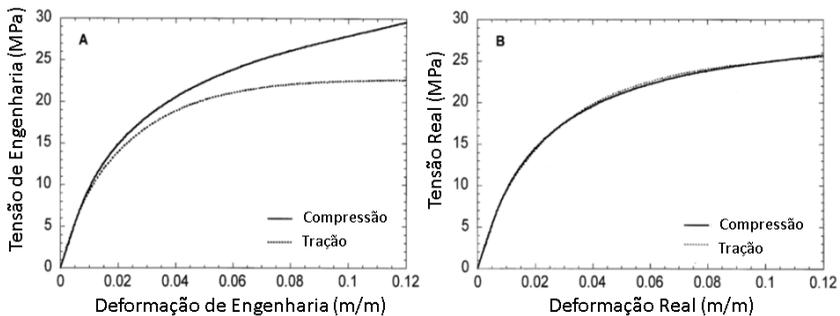


Figura 5 - Ensaio de tração e compressão em curvas tensão-deformação de a) engenharia e b) real [10].

Em um estudo realizado por [11], no qual foi explorado o comportamento do UHMWPE por meio do processo de extrusão, foram observadas diferenças entre as propriedades em função da direção de extração das amostras. O processo de extrusão causa o alinhamento das cadeias moleculares gerando uma anisotropia no material. Para demonstrar esse efeito foram realizados ensaios de tração de amostras em três direções ortogonais (Figura 6) (direção Y é o eixo de extrusão). A partir disso, os autores concluíram que a orientação molecular pode ter efeito no retardamento do desgaste.

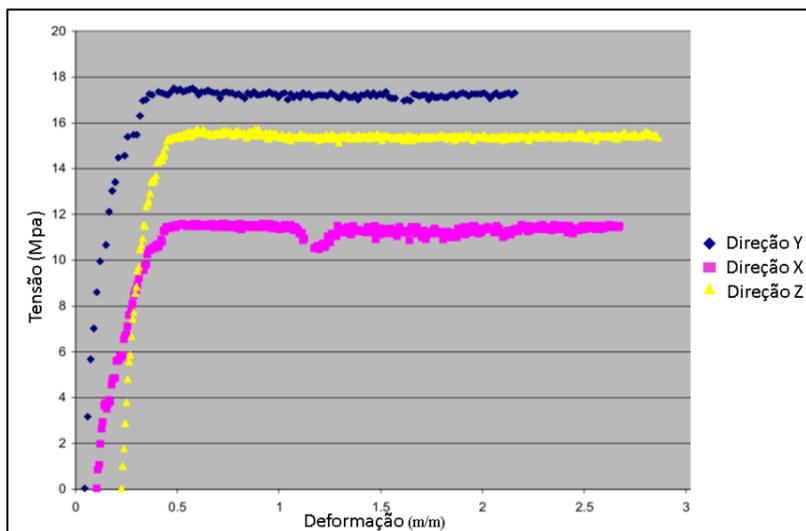


Figura 6 - Comparação entre as curvas tensão/deformação das amostras retiradas de diferentes direções de um tarugo extrudado [11].

2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Um ensaio mecânico consiste em carregar um corpo de prova de geometria padrão com esforços controlados. Estes esforços podem gerar tensão internas trativas, compressivas, cisalhantes ou combinação destas. O carregamento pode ser feito em uma direção apenas, no caso de ensaios uniaxiais, em duas direções, no caso de ensaio biaxial, ou então nas três direções do material para ensaios triaxiais.

Medindo os esforços envolvidos, podem ser obtidas curvas de tipo de força/deslocamento ou, mediante medições apropriadas das

dimensões do corpo de prova ao longo do ensaio, a curva tensão/deformação.

A curva tensão/deformação é a premissa para obter informações importantes quanto ao comportamento do material da qual possam ser extraídas propriedades vinculadas ao modelo do material como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, ou coeficiente de Poisson.

É importante destacar que os denominados parâmetros de material não são estritamente vinculados a este, mas ao modelo que o representa. Por exemplo, os parâmetros acima citados, são parâmetros de um modelo de elasticidade linear com limite de escoamento. Estes parâmetros, entretanto, poderão não ser úteis num modelo específico para um polímero como o polietileno em estudo.

Para a realização dos ensaios para polímeros, é necessário que os corpos de prova sejam confeccionados com antecedência e condicionados, segundo a Norma ASTM-D638 [12], por um tempo mínimo de 40h na temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50\pm 5\%$. Os ensaios devem ser realizados nas mesmas condições. Outros valores de temperatura e umidade podem ser adotados para ensaios específicos, desde que especificado no relatório. A Figura 7 ilustra as curvas do tipo tensão/deformação de termoplásticos, submetidos a um ensaio de tração em temperaturas distintas.

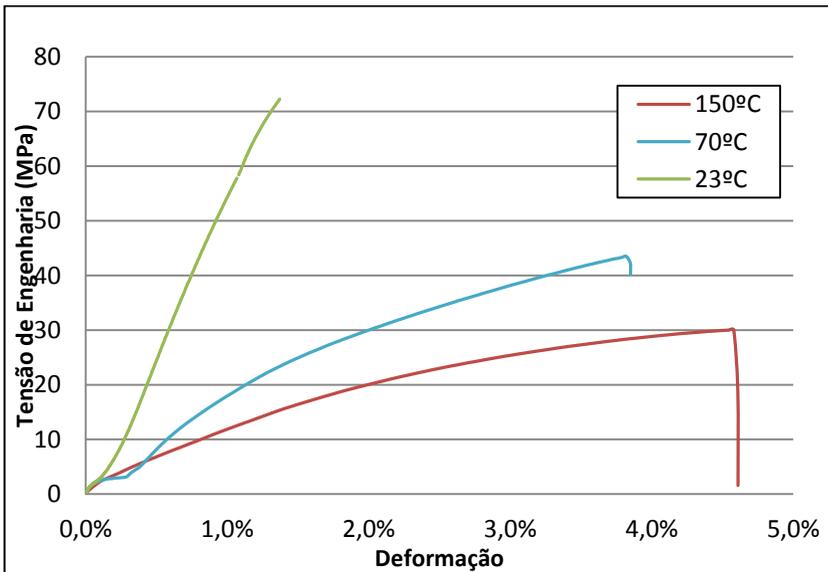


Figura 7 - Exemplo de curva tensão/deformação de polímeros.

Com os ensaios mecânicos, podem ser obtidos parâmetros de modelo do material. O modelo mais simples de caracterização do comportamento mecânico de um material é o modelo elástico linear de Hooke, que consiste em uma relação linear entre tensões e deformações mecânicas na forma particular para o caso uniaxial apresentada abaixo:

$$\sigma = E\varepsilon \text{ [MPa]}$$

Onde,

ε = Medida de deformação [adimensional]

σ = Medida de tensão [Força /Área]

E = Módulo de elasticidade [Força /Área]

Os valores entre colchetes indicam as respectivas grandezas físicas envolvidas.

No que se refere à influência da geometria do corpo de prova, [13] afirmam que, em um ensaio de tração, a presença de entalhes no corpo de prova mostrado na Figura 8 causa o aumento da triaxialidade no estado de tensões em amostras de uma liga de alumínio. Esse estudo motiva a importância na escolha da geometria dos corpos de prova, visto que um ensaio, mesmo que, objetivando a tração axial, pode haver outras componentes de tensões em outras direções que necessitam ser considerados na interpretação dos resultados.

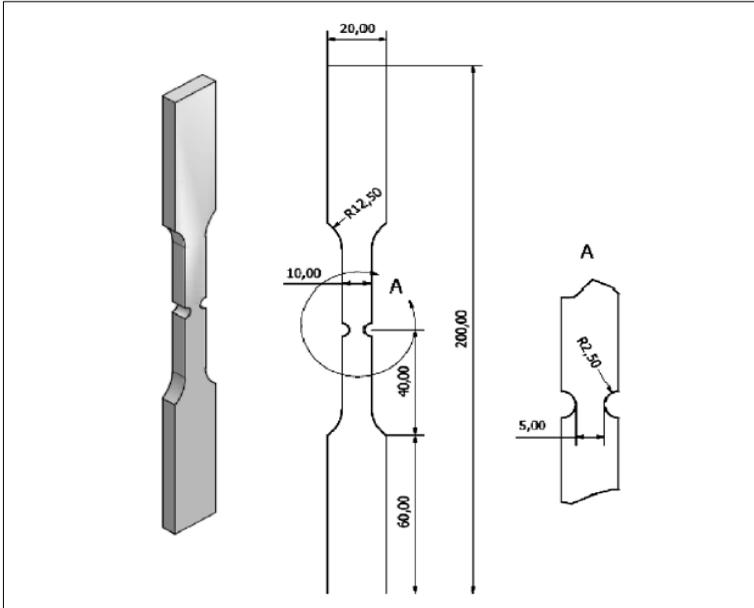


Figura 8 - Geometria tipo gravata para corpos de prova de tração [13]

Uma alternativa de geometria de corpo de prova denominada geometria de Arcan, ilustrada na Figura 9, permite obter dois estados de tensões distintos de acordo com a orientação da força na amostra. A amostra orientada na longitudinal, realiza-se um ensaio de tração, com tensão fortemente uniaxial. Com o corpo de prova orientado na transversal é realizado o ensaio de cisalhamento, com o aumento da triaxialidade no estado de tensões [13].

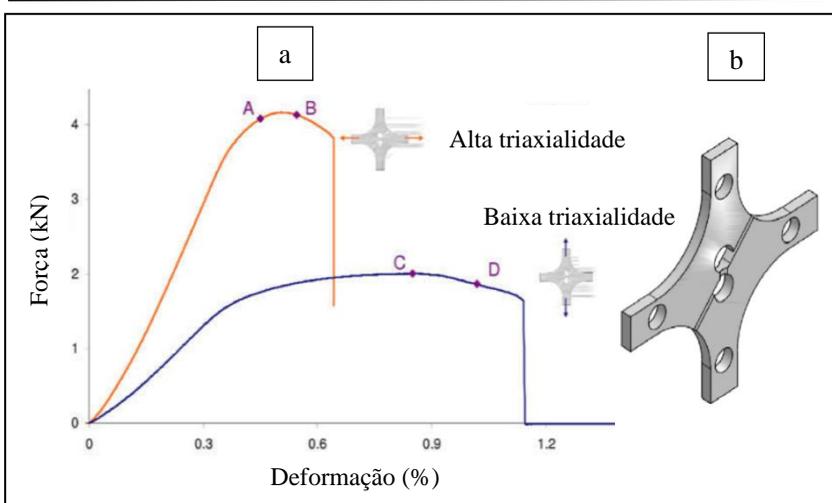


Figura 9 - Ensaio de tração e cisalhamento com geometria de Arcan. O nível de triaxialidade varia de acordo com a direção do carregamento no corpo de prova. (a) Curva força alongamento (b) geometria do corpo de prova de Arcan [13]

Outro aspecto que merece destaque diz respeito à localização da deformação, uma vez que há a necessidade do corpo de prova estar dentro da região de medição, diferente do ocorrido na Figura 10-a). Corpos de prova pré-entalhados, a exemplo da Figura 10-b), normalmente possuem uma região de ruptura bem localizada. Sendo assim, é importante a escolha adequada da geometria para evitar que a estricção, que forma o “pescoço” e fratura observados na Figura 10, ocorra fora da área de medição.

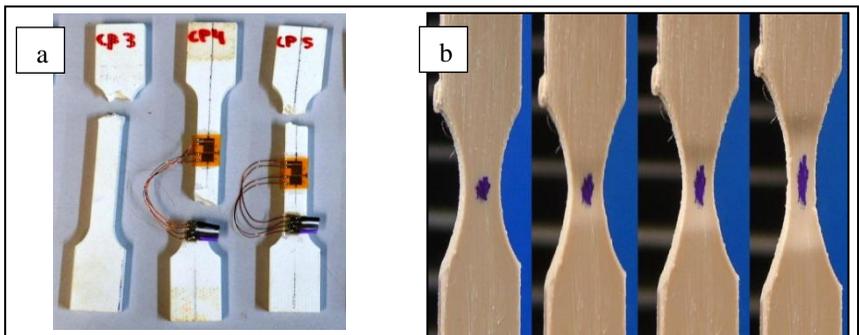


Figura 10 – a) Localização da ruptura fora da área de medição. b) Geometria de corpo de prova pré-entalhada.

Outra opção de ensaio para a caracterização do UHMWPE foi sugerida por [14], sendo denominada Small-punch regulamentado pela norma ASTM-2183. Os diferenciais do ensaio Small-punch é o carregamento biaxial e a pequena quantidade de material necessária para a confecção dos corpos de prova para esse fim, o que se torna importante devido ao alto custo do UHMWPE.

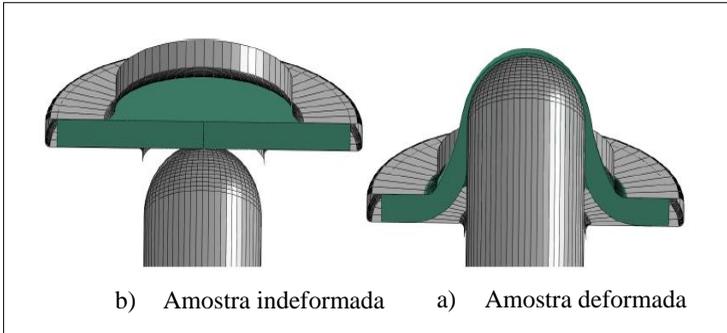


Figura 11 - Representação do ensaio Small punch. a) amostra sem carga b) amostra após ensaio. [14]

2.4.1 Ensaio de tração uniaxial

Um ensaio de tração uniaxial consiste em um corpo de prova, com geometria bem definida, submetido a um carregamento aplicado numa única direção, buscando produzir um estado uniaxial de tensões na região central do corpo de prova. Medindo a força e o deslocamento entre as garras da máquina, podemos obter a curva de tensão-deformação de engenharia estimada, que será demonstrada na seção 5.3. Efetuando a medição da deformação, nas direções axial e transversal da região central deste corpo de prova, é possível relacionar os valores das forças com as deformações medidas e assim gerar curvas do tipo tensão-deformação verdadeira, uma vez que o monitoramento das deformações transversais pode nos fornecer o valor instantâneo da área da secção transversal, possibilitando o cálculo da tensão real.

Para a correta execução do ensaio, uma das avaliações necessárias envolve o sistema de fixação e alinhamento da garra para garantir que o carregamento seja totalmente uniaxial. A norma ASTM-E1012 [15] sugere uma metodologia para verificar o alinhamento do corpo de prova para ensaio de tração, por meio de *strain gage* colocados em regiões bem definidas.

2.4.2 Ensaio de compressão uniaxial

Este ensaio é conceitualmente análogo ao anterior, se desejando produzir um estado de tensões uniaxiais compressivas. Para isto a montagem mais comum é a compressão com pratos de um cp cilíndrico ou prismático. Apesar de ser um ensaio aparentemente simples, sua execução envolve complicações, principalmente no que diz respeito a manutenção do alinhamento da amostra durante a compressão, garantindo assim a uniaxialidade dos esforços.

Para que a amostra experimente apenas deformação uniaxial, alguns cuidados devem ser tomados:

- 1) Os aparatos de compressão devem movimentar-se sem qualquer outra direção senão axialmente ao corpo de prova.
- 2) A superfície de contato tanto do corpo de prova quanto do aparato deve ser precisamente plana;
- 3) O contato entre o corpo de prova e a superfície do aparato deve gerar o mínimo atrito, evitando assim deformações em formato de barril, ou a ocorrência de deslocamento transversal.

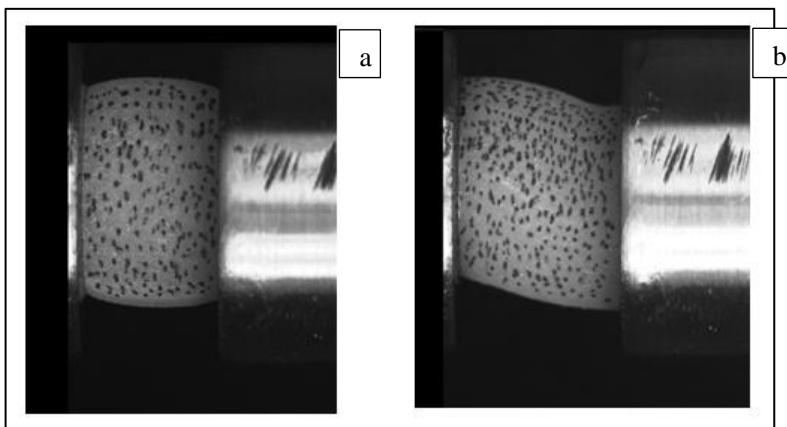


Figura 12 – a) Formato “barril” e b) Deslocamento transversal da amostra.

2.4.3 Ensaio multiaxial

Uma aproximação mais fidedigna dos fenômenos presentes em aplicações de próteses médicas, onde ocorre uma superposição de carregamentos distintos, pode ser obtida com ensaios multiaxiais.

É proposto por [16] uma nova geometria de corpo de prova e dispositivo de fixação em que é obtido carregamentos de tração, compressão e torção, combinados para o mesmo ensaio, conforme Figura 13.

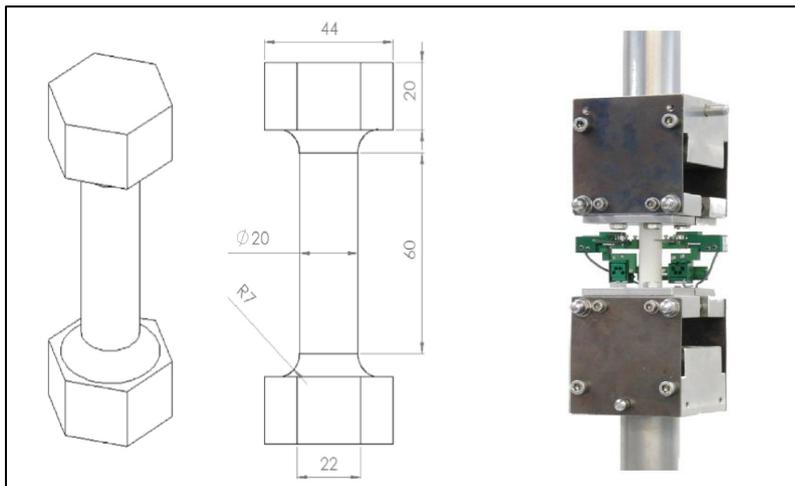


Figura 13 - Geometria de cp e dispositivo de fixação para carregamento multiaxial.[16]

3 DISPOSITIVOS DE ENSAIO

Para obter informações acerca do comportamento de materiais plásticos, com o objetivo de alimentar modelos constitutivos existentes ou ainda motivar o desenvolvimento de novos modelos, são propostos ensaios de caracterização mecânica, baseados não somente em métodos já conhecidos, mas também em novas concepções de dispositivos para diferentes tipos de carregamentos.

O comportamento de materiais plásticos sujeito a cargas tratativas, por exemplo, pode ser avaliado por meio de um ensaio de tração uniaxial, onde o procedimento bastante difundido é regulamentado através das normas ISO-527 e ASTM-D368 [13], por exemplo. Porém, especificidades de cada ensaio podem dificultar a obtenção de resultados robustos. Por exemplo, se a geometria do corpo de prova provocar grandes valores de concentração de tensão e deformação fora da área útil de medição, pode ocorrer falhas do cp antes da obtenção da curva completa do teste.

Outra observação referente a alguns dispositivos de fixação sugeridos em normas técnicas, é que as versões mais simples dificultam o posicionamento da amostra, prejudicando o seu alinhamento. Para atenuar este efeito e sua influência nos resultados, o presente trabalho propõe novas geometrias de corpo de prova e novos dispositivos para ensaio de tração e compressão uniaxial, e ensaio de compressão biaxial, conforme descrito nos capítulos subsequentes.

3.1 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Com o objetivo de atenuar possíveis concentrações de tensões, é proposta uma geometria de corpo de prova para ensaio de tração uniaxial, na qual a região de transição entre a área útil e a área de fixação do corpo de prova, tem geometria semi-elíptica, como apresentado na Figura 14. Esta geometria se torna interessante principalmente quando utilizado o processo de usinagem para a confecção das amostras. Para utilizar o processo de injeção, devem ser investigadas proibições devido a dificuldades causadas pela geometria sugerida.

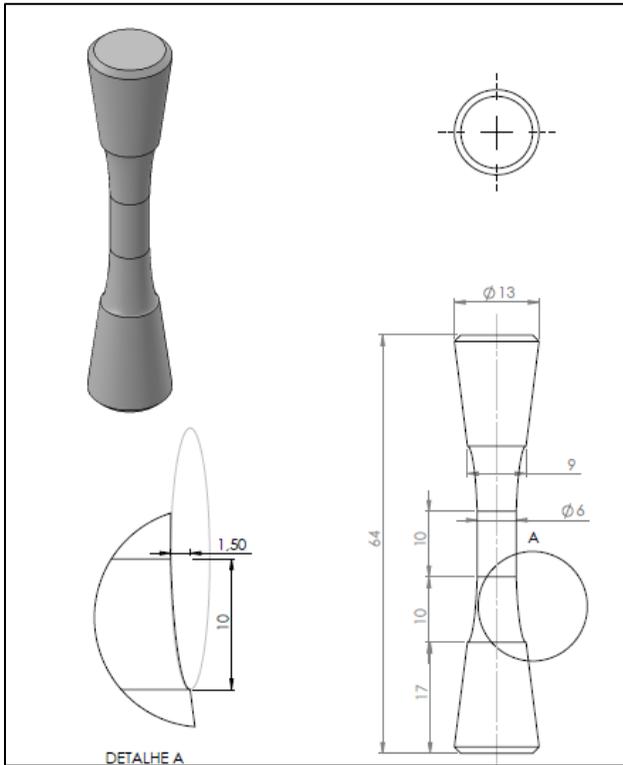


Figura 14 - Nova geometria de corpo de prova para ensaio de tração uniaxial.

Um diferencial desta geometria está na região de fixação, a qual possui formato cônico, que facilita o alinhamento do corpo de prova perante a máquina de ensaio. Com isto, também é minimizado o escorregamento em relação às garras, propiciando facilidades na medição de deslocamentos e deformações. Em garras convencionais, principalmente em corpos de prova com geometria plana, é comum ocorrer desalinhamento do mesmo, causando flexão indesejada, sendo que a amostra deveria experimentar apenas um carregamento puramente axial sem causar perturbações no estado de tensões.

Na Figura 15 são apresentados os resultados das simulações destacando o valor da tensão principal em duas regiões importantes: a região de medição e a transição desta com a região de fixação da garra, para a geometria proposta e também, para a geometria do tipo IV da norma ASTM D638 [13], largamente utilizada para ensaios de tração em polímeros. Um modelo elástico linear foi utilizado em ambas às

simulações, apenas para efeito de comparação, em regime de pequenas deformações, do estado de tensões entre as duas geometrias de corpo de prova.

Na geometria da norma (Figura 15-a), a maior tensão principal é aproximadamente 6,0% maior que na região de medição. Na geometria proposta (Figura 15-b), é encontrado um valor de tensão 3,6% maior em comparação das mesmas regiões. Esta melhoria na geometria proposta fica mais evidente em materiais frágeis, evitando rupturas prematuras que comprometem o resultado.

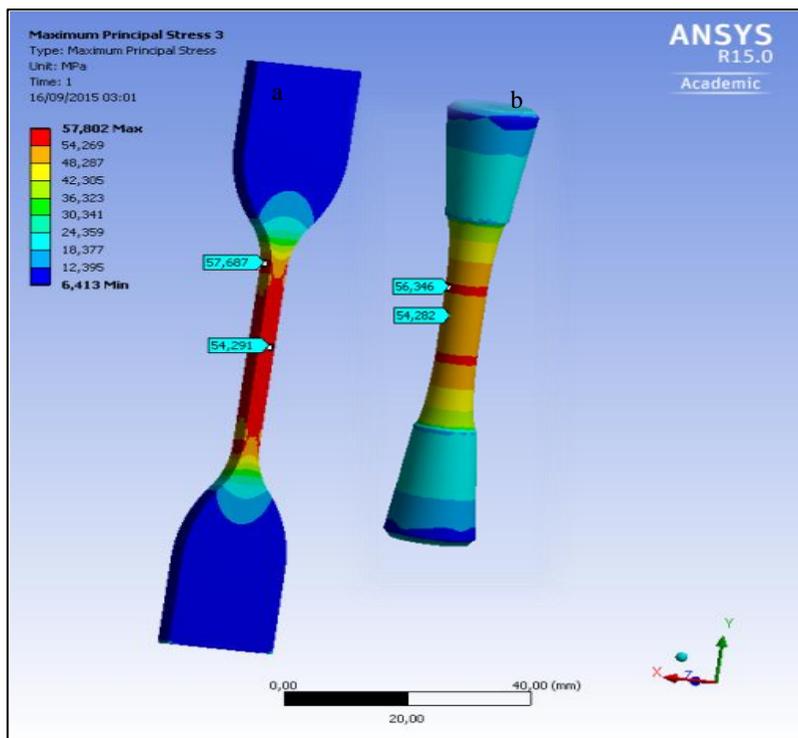


Figura 15 – Comparação das tensões principais das geometrias a) Geometria tipo IV da norma ASTM-D638 b) Geometria proposta.

Para a fixação do corpo de prova proposto na máquina de ensaio, foi desenvolvido o dispositivo apresentado na Figura 16, que possibilita ensaios de tração uniaxial com limite de carga de até 5 kN, composto pelas seguintes peças:

- 1. Conexão para Célula de Carga:** possui fuso compatível com a célula de carga para a fixação superior do dispositivo e para a parte inferior, fuso compatível com a base fixa da máquina de ensaio;
- 2. Copo Principal:** trata-se de uma câmara que abriga as demais peças e possui uma janela de acesso para auxiliar a montagem do corpo de prova;
- 3. Rótulas esféricas:** Rótula comercial, modelo GE17DO, que auxilia no alinhamento do corpo de prova suportando a pinça de fixação;
- 4. Pinça de fixação:** posicionada dentro da rótula esférica, é a peça de contato que mantém o corpo de prova ao copo principal. Possui um rebaixo com formato cônico em seu interior tendo o mesmo ângulo da cabeça cônica do corpo de prova;
- 5. Corpo de prova:** Como apresentado na Figura 14, deve ter as extremidades de fixação em formato cônico com o mesmo ângulo do cone interno da pinça de fixação, para garantir um acoplamento com o mínimo de escorregamento.

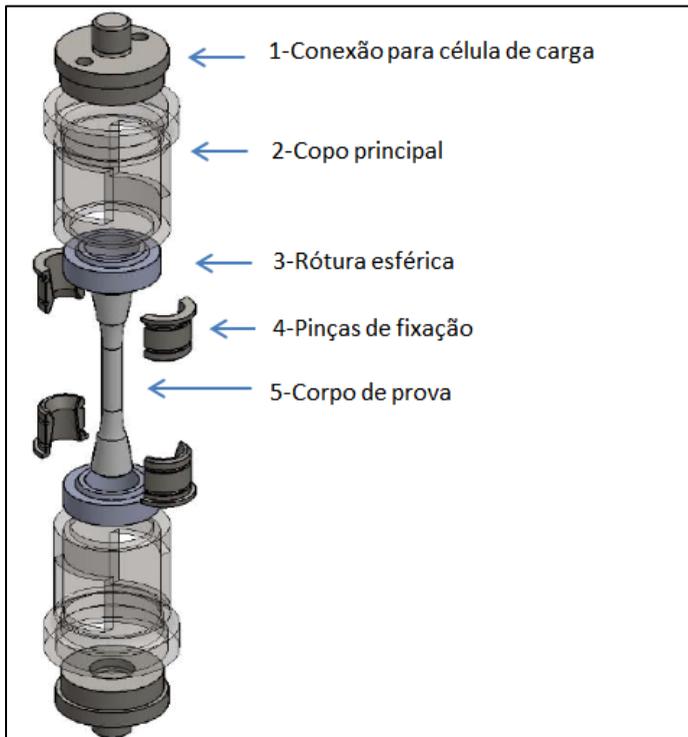


Figura 16 - Proposta de Geometria de corpo de prova e dispositivo de fixação.

O dispositivo completo é posicionado entre a base fixa da máquina de ensaio e a célula de carga que, por sua vez, é fixada ao travessão móvel da máquina (Figura 17).

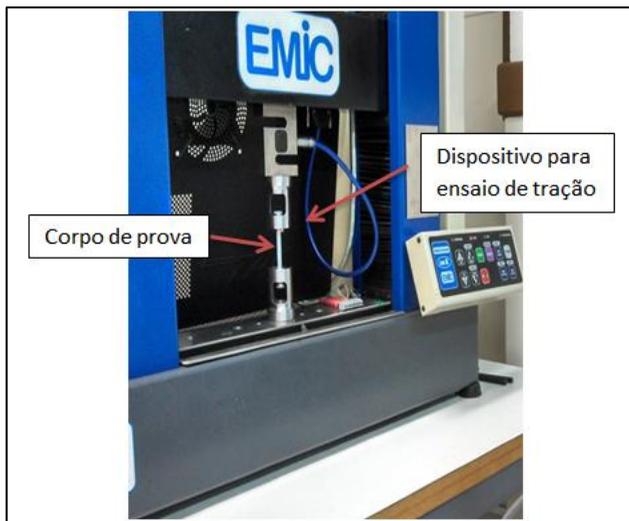


Figura 17 - Exemplo de aplicação do dispositivo de tração.

3.2 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

No ensaio de compressão, assim como no ensaio de tração, é preciso garantir que o material experimente um carregamento unicamente axial, para obter o campo de tensões mais homogêneo possível. Para isto, sugere-se um dispositivo universal para ensaios de cargas compressivas com limite de carga de até 5 kN e que possibilite um movimento coplanar ao corpo de prova, ilustrado na Figura 18 e composto pelas seguintes peças:

- 1. Punção superior** - Em uma das extremidades possui um fuso de fixação com o mesmo padrão de rosca da célula de carga e na outra, um formato esférico para transmitir o carregamento à haste;
- 2. Haste** - Haste cilíndrica móvel com 30 mm de diâmetro, posicionada no interior da rótula esférica. Sua superfície superior é plana e pressionada pelo contato com a punção superior. Na superfície inferior, possui um furo central com rosca, possibilitando o uso de várias

geometrias de punção, fazendo com que todo o aparato permita a execução de diversos tipos de ensaios com cargas compressivas.

3. Rolamento linear – Permite o livre movimento axial da haste de compressão, restringindo qualquer outro movimento como flexão, deslocamento axial, etc.

4. Punção de contato - Geometria de compressão que entra em contato com o corpo de prova. Pode ser substituído para permitir diferentes geometrias de corpo de prova para compressão uniaxial ou para ensaios com outros carregamentos.

5. Copo principal - Estrutura robusta cilíndrica, onde são acomodadas todas as outras peças, garantindo o alinhamento do ensaio. Possui uma janela para facilitar a troca de amostras e também permitir o uso de instrumentos de medida de deformação com e sem contato;

6. Conexão inferior - Tampa inferior com fuso de fixação com a base de máquina de ensaio.

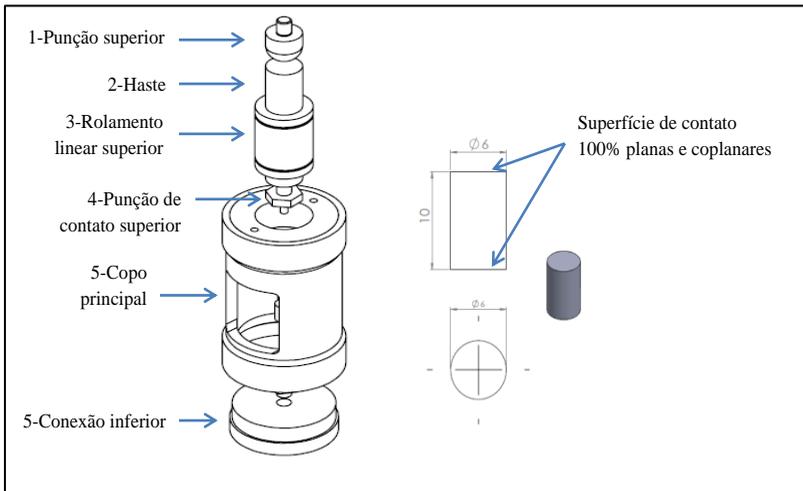


Figura 18 - Dispositivo para ensaios compressivos e geometria do corpo de prova.

Com o objetivo de avaliar a rigidez do dispositivo, o dispositivo foi carregado, com o mesmo procedimento de um ensaio de compressão, porém sem corpo de prova entre os punções de contato. Neste caso, todo o deslocamento mediante ao esforço aplicado é oriundo da deformação das peças que compõe o dispositivo. Com este procedimento, foi obtido a rigidez de 60,0 kN/mm para o dispositivo de compressão uniaxial. Para o ensaio de compressão uniaxial utilizando transdutor de

deslocamento externo, como LVDT ou o transdutor embutido da máquina de ensaio, no ensaio do polímero UHMWPE este valor de rigidez acarretaria num erro de 0,7%.

3.3 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO BIAxIAL

Para analisar o comportamento de materiais com esforços combinados, foi desenvolvido um dispositivo para ensaio de compressão com estado plano de deformações, para carregamento vertical de até 5 kN. Neste tipo de ensaio, o corpo de prova é deformado sob compressão na direção vertical devido a uma força axial. As paredes internas do dispositivo restringem o deslocamento do corpo de prova numa das direções transversais, mas permite a deformação na outra direção.

O dispositivo de compressão biaxial é fixado dentro do dispositivo de compressão uniaxial, conforme Figura 19, substituindo apenas o punção de contato para o modelo apropriado.

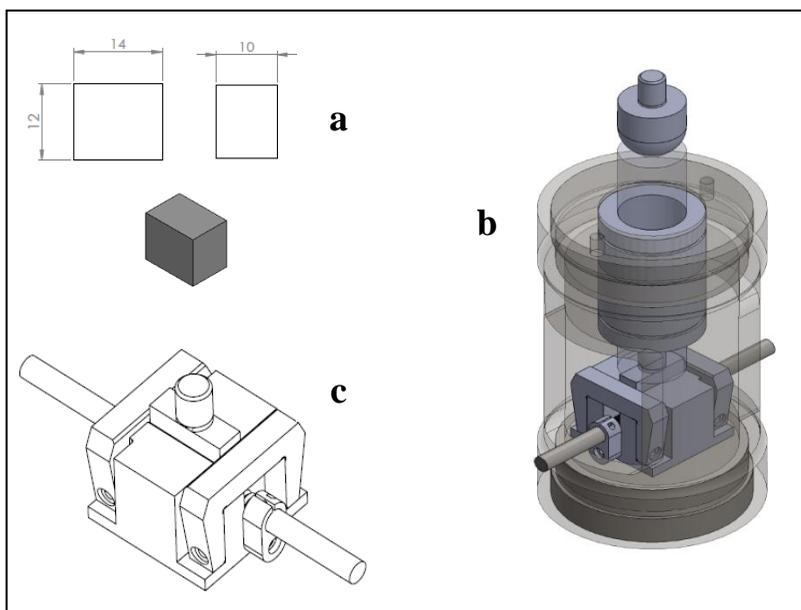


Figura 19 – Ensaio de compressão biaxial a) geometria do corpo de prova, b) dispositivo montado e c) posicionado dentro do dispositivo de compressão uniaxial.

As peças que compõe o dispositivo de compressão biaxial ilustrado na Figura 19c estão detalhadas abaixo:

- 1. Bloco vazado** – bloco composto por paredes extremamente espessas;
- 2. Alças de reforço** – alças de suporte para aumentar a rigidez ao bloco vazado, restringindo a deformação transversal do corpo de prova;
- 3. Punção de contato**- base retangular que pressiona verticalmente o corpo de prova;
- 4. Suporte de LVDT** – posiciona o LVDT na posição transversal;
- 5. LVDT** - instrumento para medida de deslocamento.

4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

Medição é uma técnica para atribuir um significado numérico a um evento ou objeto e, para tal, são utilizados sensores e/ou transdutores. Na maioria dos ensaios de caracterização mecânica, as duas principais grandezas a serem medidas são deslocamentos e força, que podem ser fornecidos pelo próprio *software* da máquina de ensaio através de transdutores que fazem parte do próprio equipamento. No caso da medição do deslocamento, quando este é obtido a partir do monitoramento da posição do travessão móvel, os valores medidos agregam efeitos da construção mecânica do equipamento de ensaio, tais como folgas entre as conexões e efeitos de rigidez do pórtico da máquina, causando erros de medida. Portanto, para uma medição mais confiável, dispositivos de medição dedicados apenas à região útil do corpo de prova devem ser utilizados.

Nesta metodologia de ensaios é proposta a utilização dos seguintes dispositivos de medição:

- Célula de carga;
- LVDT – Transformador Linear Diferencial Variável;
- *Clip-gage*;
- SCAD – Sistema de Condicionamento e Aquisição de Dados;
- DIC – Correlação de Imagens Digitais.



Figura 20 - Dispositivos para ensaio mecânico.

Células de carga: transdutor para a medição da força aplicada no corpo de prova, baseado no princípio ôhmico onde o carregamento provoca uma variação da resistência elétrica. Esta variação de resistência é medida através do uso de ponte de Wheatstone, amplificadores e filtros, e transformada em unidade de força por meio de uma calibração prévia. A célula de carga é ligada axialmente aos dispositivos de fixação do corpo de prova, experimentando assim toda a força de reação causada por este. É importante a aquisição dos valores de força, pois, a partir destes é possível calcular os a tensão mecânica para os ensaios de tração e compressão.

LVDT: Dispositivo baseado em transformador diferencial para a medição de deslocamento linear por contato. Consiste em um encapsulamento composto por dois enrolamentos, um primário e um secundário (normalmente duplo), posicionados co-axialmente compartilhando um núcleo móvel de material ferromagnético. O enrolamento primário é excitado com uma corrente alternada, normalmente com frequência entre 1kHz e 10Khz. Uma haste que recebe o movimento a ser medido, é ligada ao núcleo ferromagnético, que se desloca no interior dos enrolamentos, induzindo uma corrente linearmente proporcional a este no enrolamento secundário, o qual é medido e correlacionado, por meio parâmetros de calibração, com o deslocamento desta haste.

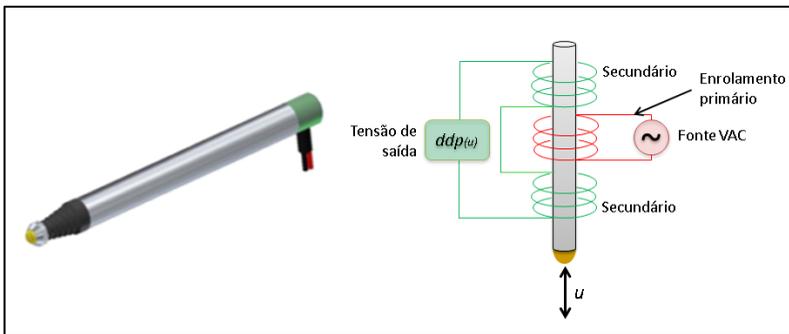


Figura 21 - dispositivo de deslocamento e seu princípio de funcionamento.

Clip-gage: é um transdutor de deslocamento local, fixado ao corpo de prova por dois braços espaçados de um comprimento inicial de referência, normalmente entre 25,0 mm ou 50,0 mm (Figura 22). Os braços acompanham o movimento do corpo de prova e a variação da

distância relativa acompanha a deformação do corpo de prova. Esse dispositivo tem como vantagem a possibilidade de reutilizá-lo em um grande número de amostras, tendo longa vida-útil se utilizado corretamente e calibrá-lo periodicamente conforme a norma vigente. No entanto, com este dispositivo é possível apenas estimar a deformação relativa à região interna aos dois pontos de contato no corpo de prova, e apenas em uma direção.

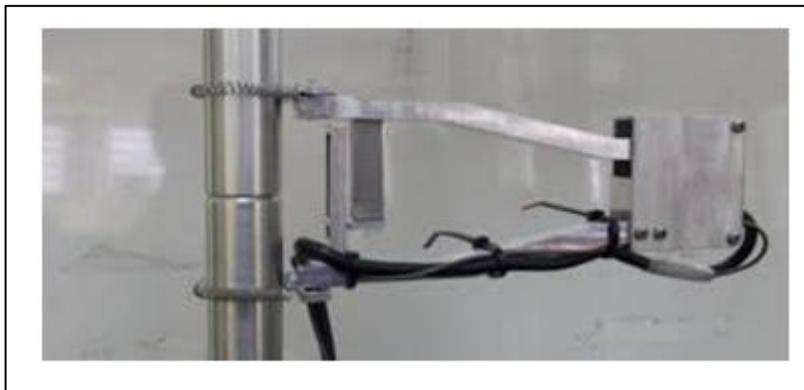


Figura 22 - *Clip-gage* em ensaio de tração uniaxial.

Com o objetivo de obter os valores da deformação transversal ou da área da seção transversal instantânea, é preciso acrescentar um segundo *clip-gage* na direção transversal, o que nem sempre é possível para pequenas geometrias de corpos de prova devido ao grande volume ocupado (Figura 23 a). Para isto, o presente trabalho apresenta um novo *clip-gage* biaxial, capaz de medir a deformação nas duas direções simultaneamente (Figura 23 b).

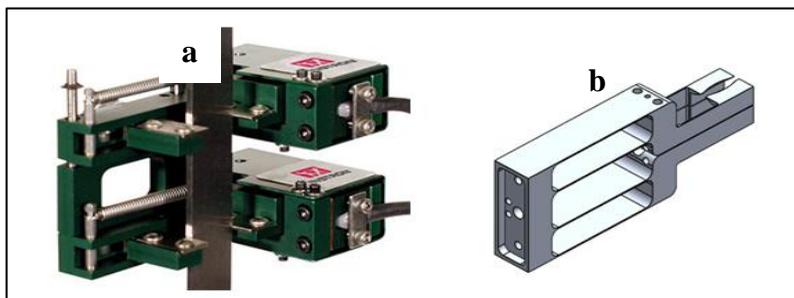


Figura 23 - *Clip-gage* biaxial: a) Convencional (fonte: www.instron.com) e b) proposto pelo presente trabalho.

Strain-gage: Esse transdutor é aderido na região de interesse com o uso de adesivos específicos para cada aplicação e descartado após cada amostra ensaiada. Sua vantagem é a possibilidade de medição localizada, de acordo com a dimensão da grade de medição.

Sistema de aquisição e condicionamento de dados: sistema com no mínimo quatro canais com entrada para uma ponte extensométrica (Wheatstone), para medição com o clip-gage e célula de carga, e entrada de nível de tensão (0-10V), para ligação do aquisitor do LVDT.

DIC (Digital Image Correlation): Ferramenta de medição sem contato, capaz de obter o campo de deslocamento em uma superfície através de uma ou mais câmeras filmadoras.

Um algoritmo de correlação mapeia o deslocamento de pontos de referências na superfície da amostra ao longo do ensaio. Na medição com DIC, as amostras a serem ensaiadas recebem marcações, pulverizando pigmentos de forma a produzir um padrão heterogêneo e aleatório de pontos pretos.

Uma ou mais câmeras capturam imagens ao longo do ensaio e pontos de referência são definidos com informações na sua vizinhança criando certa identidade única para cada ponto. Um algoritmo de correlação através da conversão da imagem em códigos de 8 bits em escala de cinza identifica os pontos de referência e acompanha seus movimentos nas imagens seguinte, ilustrado na Figura 24, calculando uma matriz de deslocamentos. Os dados de deslocamento gerados pelo DIC possui como unidade de medida o pixel, se necessário, uma calibração antes do ensaio pode converter para a unidade métrica.

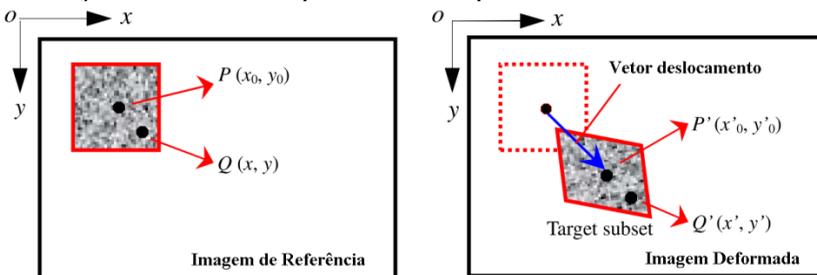


Figura 24 - Representação dos pontos de referência e a procura do mesmo no próximo instante de tempo através da correlação de imagem.[17]

Com essa técnica é possível a medição vetorial das deformações em duas ou três dimensões, possibilitando mapear o gradiente de deformação, de tensão. No exemplo de aplicação, ilustrado na Figura 25, é comparado o resultado de uma análise de dano, onde o gradiente de deslocamento obtido com a técnica DIC foi utilizado por [18] para alimentar um modelo constitutivo.

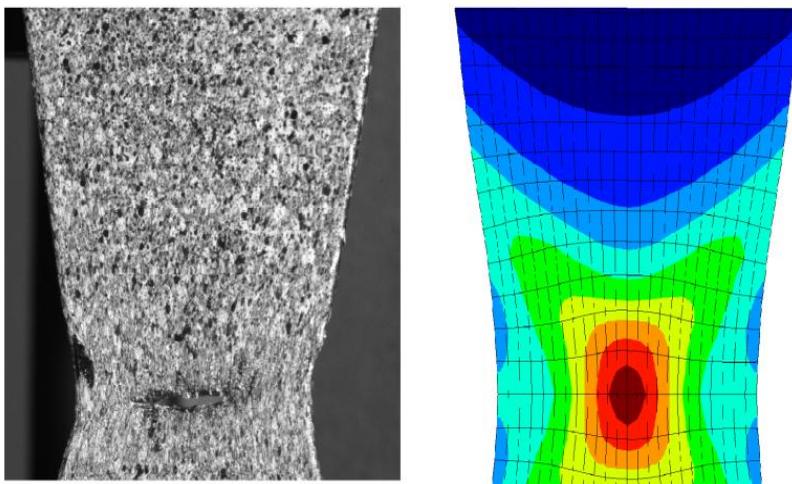


Figura 25 - O gradiente de deslocamento obtido com DIC foi utilizado para alimentar um modelo constitutivo de dano [18].

Segundo [19] “é de suma importância à realização do teste após a pintura para que a tinta se deforme com a superfície, uma vez que ao secar, irá craquelar durante a deformação da mesma”, além disto, o autor sugere que o tamanho médio dos pontos da marcação seja menor que 20 pixels.

4.1 FORÇA E TENSÃO REAL

A conhecida Tensão de Engenharia obtida num clássico ensaio de tensão uniaxial trata-se simplesmente do quociente entre a força axial instantânea e o valor (constante) da área inicial da seção transversal. Embora de fácil aquisição, este quociente só faz jus à tensão verdadeiramente atuante na seção transversal quando a sua área muda muito pouco durante o ensaio. Esta hipótese, entretanto, não é aplicável para o material em estudo. Devido a sua grande flexibilidade, a área da

seção transversal muda significativamente inclusive antes de atingir níveis de tensão próximos a região de deformações permanentes. Nestes casos a medição da área da seção transversal instantânea torna-se essencial para uma correta avaliação do ensaio.

Na máquina de ensaio de tração, a célula de carga é montada axialmente ao corpo de prova, medindo assim a reação do mesmo, frente ao movimento do travessão móvel da máquina de ensaio. A Figura 26 ilustra a força de reação, em relação ao tempo, de um ensaio cíclico de tração uniaxial de um termoplástico.

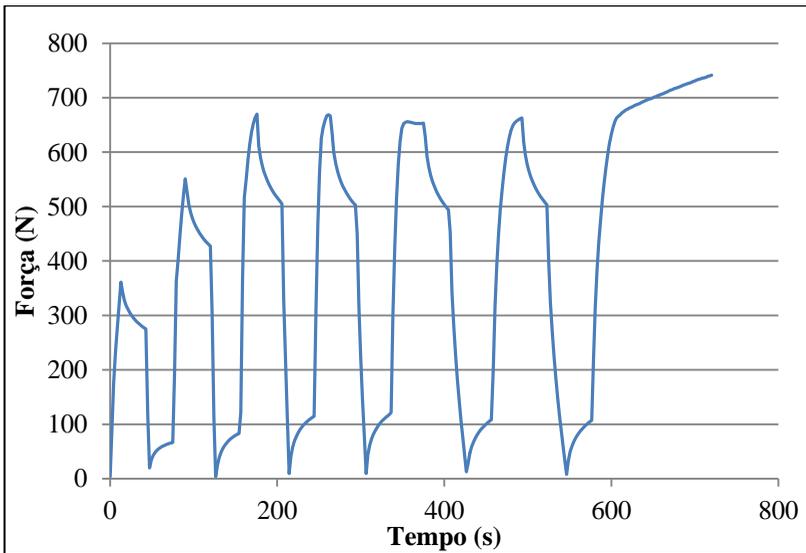


Figura 26 - Exemplo da curva força em função do tempo de um ensaio de tração uniaxial de um termoplástico.

Ao dividirmos os valores de força pela área da seção transversal do corpo de prova indeformado, obtemos os valores de tensão de engenharia.

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

Com a medição continua da área de seção transversal, podemos obter a tensão real, ou tensão de Cauchy, definida como:

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

Em um ensaio de tração uniaxial, para a maioria dos materiais, a tensão real é maior que a tensão de engenharia, pois conforme o corpo de prova é carregado, sua seção transversal diminui. No caso de um ensaio de compressão uniaxial, a tensão real é geralmente menor que a de engenharia, pois a área aumenta com o carregamento.

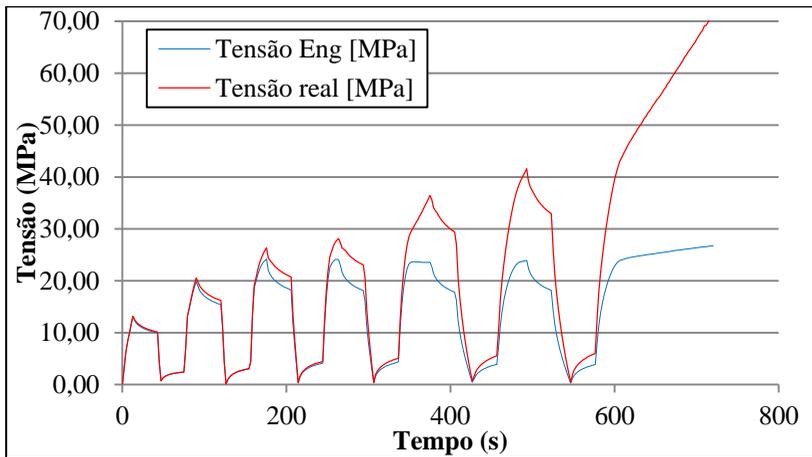


Figura 27 - Diferença entre as tensões reais e de engenharia em um ensaio de tração.

4.2 DESLOCAMENTOS E MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO

Os dados dos transdutores fornecem valores de deslocamento relativo entre dois pontos de contato, ou posição dos *markers*, de acordo com o dispositivo utilizado. No caso do ensaio de tração uniaxial, fazendo a aquisição dos dados dos transdutores de deslocamento nas duas direções principais do corpo de prova ao longo do ensaio, são obtidos os gráficos da Figura 28. Em um ensaio uniaxial o valor de deslocamento axial tem sinal oposto em relação ao deslocamento transversal, porém no gráfico apresentado, os valores de deslocamento são absolutos para facilitar a comparação entre as curvas.

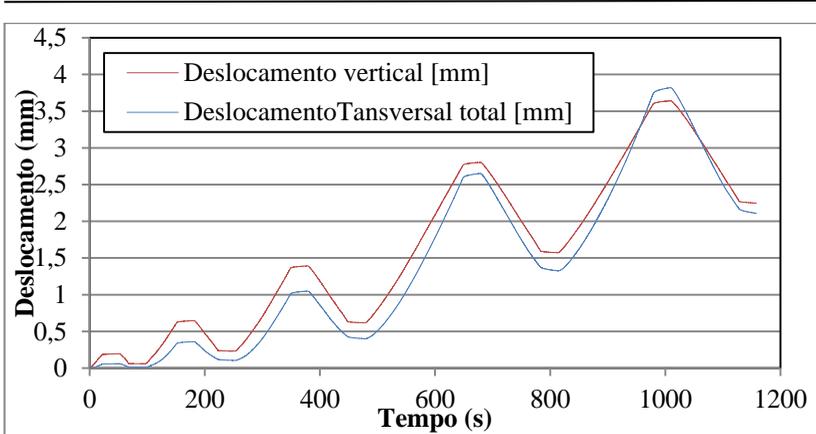


Figura 28 - Gráfico de deslocamento ao longo do tempo nas direções Axial e Transversal.

A Figura 29 ilustra um corpo inicialmente em repouso no instante $t=0$. Após receber um carregamento trativo, este corpo tem um aumento no valor do comprimento inicial devido a deformação axial.

Em ensaios mecânicos é utilizado amplamente dois tipos de deformação, a real e a de engenharia.

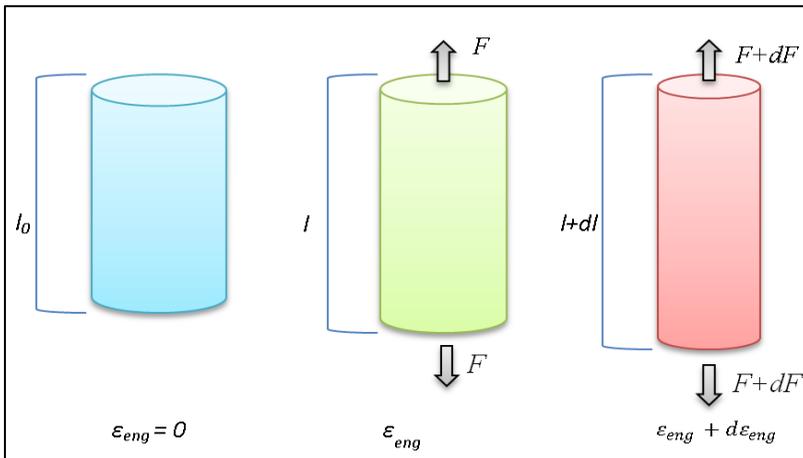


Figura 29 - Deformação causada por uma força.

A definição da deformação de engenharia é o quociente deste aumento infinitesimal do comprimento inicial pelo próprio comprimento inicial.

$$d\varepsilon_{eng} = \frac{dl}{l_0}$$

A deformação de engenharia pode ser calculada por

$$\varepsilon_{eng} = \int_{l_0}^l d\varepsilon_{eng} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_0} = \frac{1}{l_0} [l]_{l_0}^l = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Onde ε_{eng} é a deformação de engenharia e Δl é o deslocamento instantâneo em relação ao comprimento inicial l_0 .

Quanto à deformação de engenharia, cabe aqui o mesmo comentário que no caso da tensão. Esta medida é adequada para deformações pequenas, comumente encontradas em materiais muito rígidos como materiais metálicos. No caso do presente polímero, o comprimento do corpo de prova aumenta significativamente ao longo do ensaio de maneira a descaracterizar a medida de deformação acima definida. Uma medida de deformação mais adequada é a deformação logarítmica ou deformação real definida por:

$$d\varepsilon_{real} = \frac{dl}{l}$$

A deformação real é obtida pelo cálculo a seguir:

$$\varepsilon_{real} = \int_{l_0}^{l_i} d\varepsilon_{real} = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln l \Big|_{l_0}^{l_i} = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

Onde,

- ε_{real} Deformação real
- dl : Variação instantânea do comprimento
- l_0 : Comprimento útil inicial do corpo de prova
- l_i : Comprimento instantâneo

O comprimento instantâneo pode ser capturado pelos dados do LVDT, clip-gage ou mesmo do DIC. É importante mencionar que a deformação calculada corresponde a uma das seis componentes do

Tensor Deformação Logarítmico $\boldsymbol{\varepsilon}_{real}$ associado à região em estudo. Este tensor é calculado mediante a operação:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{real} = \frac{1}{2} \ln(\mathbf{C})$$

Onde,

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^t \mathbf{F}$$

é o tensor de deformação *Cauchy Green* à direita e

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, t) = \frac{\delta \boldsymbol{\chi}(\mathbf{X}, t)}{\delta \mathbf{X}} = \text{Grad} \boldsymbol{\chi}(\mathbf{X}, t)$$

é o denominado gradiente do mapeamento $\boldsymbol{\chi}(\mathbf{X}, t)$ que define a posição instantânea \mathbf{x} dos pontos originalmente localizados na posição \mathbf{X} :

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\chi}(\mathbf{X}, t)$$

Este tipo de cálculo é possível apenas quando se conhece o campo de deslocamentos completo do corpo de prova (ou ao menos da sua superfície), informação que é obtível mediante a técnica óptica DIC. Ressalta-se, entretanto, que o valor da componente uniaxial em ambos os casos é idêntica.

A Figura 30 ilustra a pintura do corpo de prova que, devido seu padrão aleatório, cria uma identidade visual única para cada um dos 35 markers utilizados neste exemplo. Na região de medição, destacada pelo retângulo branco, é desejada que tivesse deformação homogênea ao longo do ensaio.

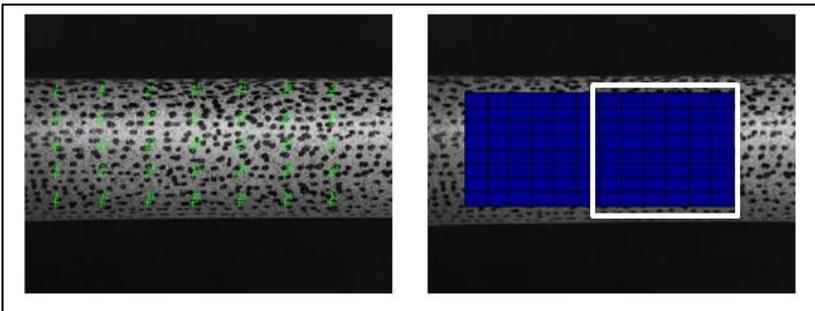


Figura 30 - Posição dos *markers* e gradiente de deformação real em corpo de prova indeformado.

A Figura 31 ilustra o resultado de uma análise com o DIC, onde pode ser observado o gradiente de deformação. Com auxílio de uma escala gráfica, podemos observar valores máximos na cor vermelha (a). A cor azul indica o menor valor de deformação, sendo este valor negativo no caso da medição no sentido transversal ilustrado na Figura 31 (b). Pode ser observado um comportamento homogêneo das deformações na região central, denominada região de medição. Fora desta região, na transição com a de fixação das garras, a deformação perde claramente esta homogeneidade, devido tensões multiaxiais.

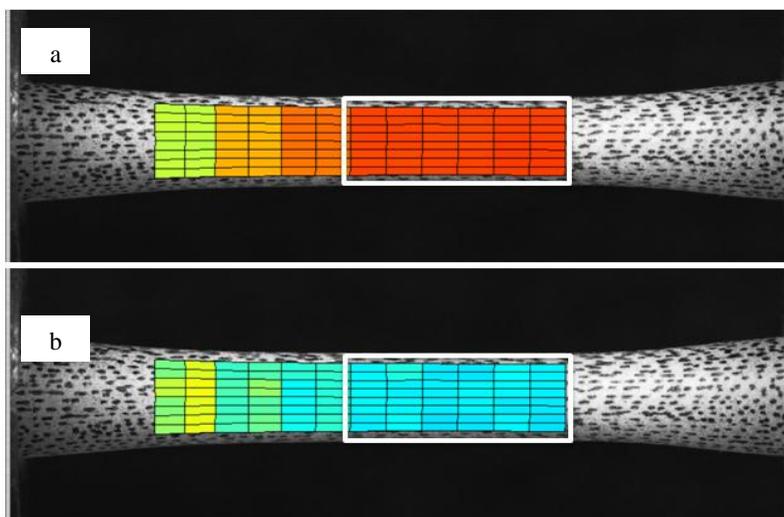


Figura 31 - Gradiente de deformação real, a) direção Axial e b) transversal.

A diferença entre as curvas ditas “de engenharia” e as reais fica mais evidente no gráfico da tensão versus deformação. Neste gráfico (tração uniaxial) é possível observar valores de tensão real maiores que a de engenharia em consequência da redução da área da seção transversal. Já a deformação real, mostra valores menores que a de engenharia, pois o cálculo é feito considerando o comprimento progressivamente maior do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 32.

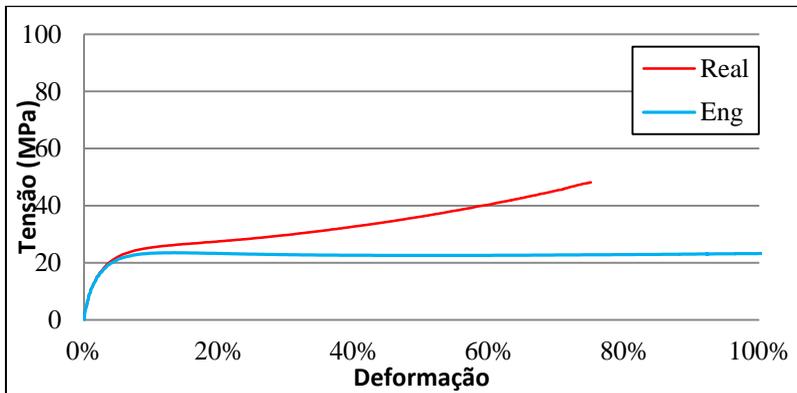


Figura 32 - Curva Tensão - Deformação para ensaio de tração.

No ensaio uniaxial de compressão se observa um comportamento inverso. A deformação de engenharia é menor em módulo que a deformação real, já a tensão de engenharia, é maior que a tensão real em decorrência do aumento da área. (ver Figura 33).

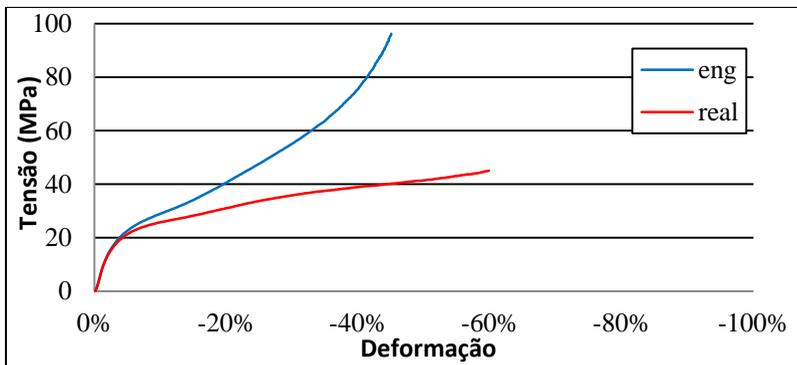


Figura 33 - Curva Tensão-Deformação para ensaio de compressão.

A partir dos dados obtidos, diversas informações podem ser extraídas tanto qualitativas como quantitativas. Dentre estas últimas destacam-se os parâmetros de modelos de material. Como já apontado acima, cada modelo de material, também chamado modelo constitutivo, utiliza um conjunto de constantes ou parâmetros que devem ser ajustados para reproduzir, mesmo que aproximadamente, o comportamento macroscópico do material estudado. Em mecânica dos sólidos, o modelo de material mais simples existente é o modelo de Elasticidade Linear Isotrópica, caracterizado por apenas dois

coeficientes a ser determinados via ensaio: o Módulo de Elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν . Caso este material possua um limite de esforço a partir do qual passa a ter deformações permanentes, surge mais um parâmetro (isto dependerá do modelo) sinalizando este limite, como por exemplo uma Tensão de Escoamento σ_y .

A frequência com que o modelo de Elasticidade Linear Isotrópica é utilizado, devido a ser representativo da grande maioria dos materiais quando submetidos a carregamentos suficientemente pequenos, faz que os coeficientes E, ν, σ_y sejam confundidos, na compreensão comum, com uma propriedade do material e não do modelo. Esta diferença torna-se evidente nos problemas como o analisado no presente caso, devido a que a resposta de material (a verificar nos resultados expostos nas seções a seguir) é altamente não linear e não apresenta uma tangente única, mas dependente do estado de deformação. Uma alternativa para obter valores comparáveis ao parâmetro módulo de elasticidade é dividir a parte inicial da curva tensão deformação real em três retas, todas iniciando no zero e passando por 0,5%, 1,0%, 2,0% e 3,0% de deformação. A inclinação de cada uma destas retas (isto é, sua secante) representa uma medida da rigidez do material.

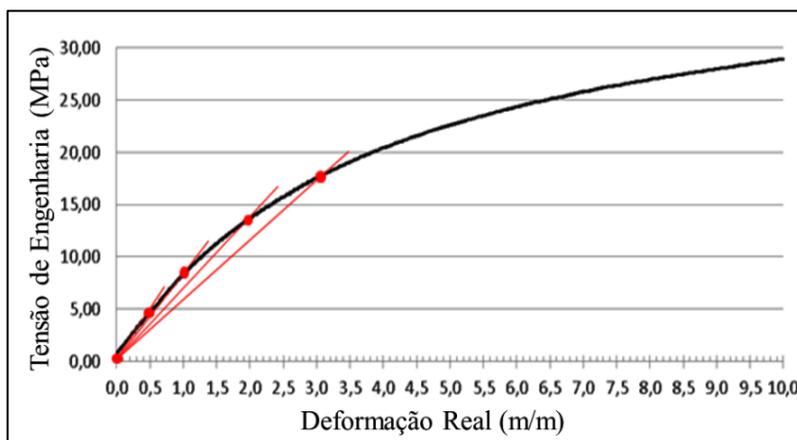


Figura 34 - Módulo secante do material em 4MPa, 8Mpa, 14Mpa e 18Mpa.

O coeficiente de Poisson é outro parâmetro importante, pois traz significado quanto à deformação volumétrica, citada na revisão bibliográfica, onde um coeficiente próximo a 0,5 indica um comportamento isocórico do material, ou seja, ocorre a conservação do

volume. O coeficiente de Poisson deve ser obtido na curva das deformações reais, conforme ilustra a Figura 35.

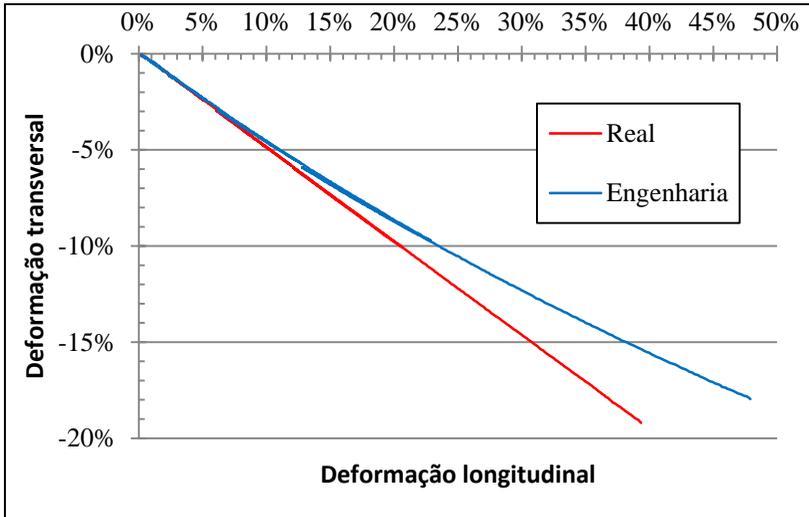


Figura 35 - Deformação transversal em função da deformação axial. Comparação entre curva real e de engenharia.

Para a maioria dos polímeros, o comportamento do material é fortemente influenciado pela taxa de deformação [8]. Como na maioria das máquinas de ensaio mecânico não é possível controlar a taxa de deformação, podendo-se apenas definir a velocidade de deslocamento, ocorre uma grande variação da taxa de deformação ao longo do ensaio. Este efeito indesejado é amplificado com o aumento da velocidade, como ocorreu no ensaio de tração com velocidade de 100m/min da Figura 36.

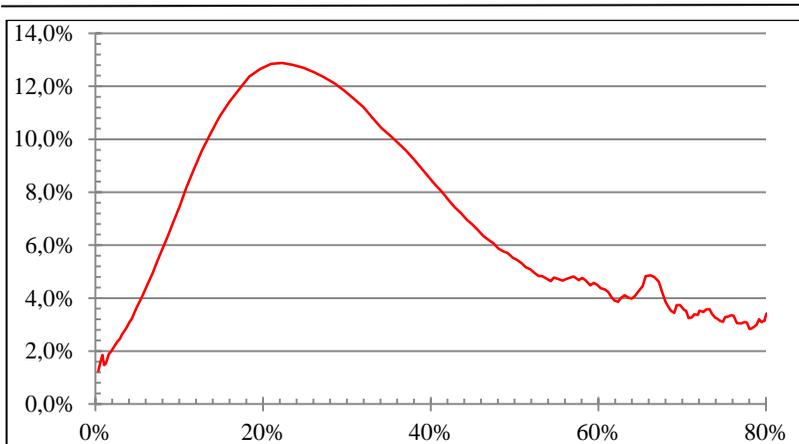


Figura 36 - Curva da taxa de deformação [%/s] em relação à deformação real para ensaio de tração com velocidade de 100mm/min..

5 ESTUDO DE CASO

Para a confecção das amostras do estudo de caso foi cogitado inicialmente utilizar o processo de moldagem por injeção, porém as dimensões do corpo de prova de tração, principalmente referente a seu diâmetro, onde o núcleo poderia demandar muito mais tempo para resfriar do que o restante do material, abriu espaço para a escolha de outro procedimento. Na sessão trabalhos futuros fica sugerido o teste do processo de injeção com análise morfológica das amostras.

O procedimento escolhido foi a usinagem pelo processo de corte via jato d'água e a extração das amostras foram feitas a partir de uma barra circular do material UHMWPE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, não reticulado, do fabricante britânico Orthoplastics, do lote 12105M, da linha específica para a produção de próteses e fabricado pelo processo de extrusão denominado *Ram Extrusion*. Este material foi doado pela empresa MDT - Indústria Comércio Importação e Exportação de Implantes SA.

O material foi recebido em formato de uma barra de secção circular com diâmetro de $65,0 \pm 0,1$ mm e comprimento de 400 ± 1 mm.

5.1 EXTRAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram extraídas da barra cilíndrica pelo processo de corte via jato d'água o qual utiliza um jato de água com partículas de sílica (para efeito abrasivo) que atinge o material a uma pressão aproximada de 60.000 psi, resultando em um fio de corte, com espessura, de 0,5 mm e capacidade de cortar e/ou, perfurar materiais de até 250 mm de espessura. A barra cilíndrica de 400 mm de comprimento foi primeiramente fatiado em doze partes com espessuras variadas conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de amostras

Tipo de Ensaio	Qtde Fatias	Espessura (mm)	Amostras extraídas	Amostras Ensaçadas
Tração Uniaxial	04	70	24	12
Compressão cp Axial	03	12	105	18
Compressão cp Transversal	02	10	61	12
Compressão Biaxial	03	14	30	12

A Figura 37 ilustra como foi realizado o processo de corte em fatias por meio de jato d'água, onde o tarugo original ficou enclausurado e fixo em uma base rígida, com o intuito que os cortes promovam superfícies totalmente coplanares nas extremidades.

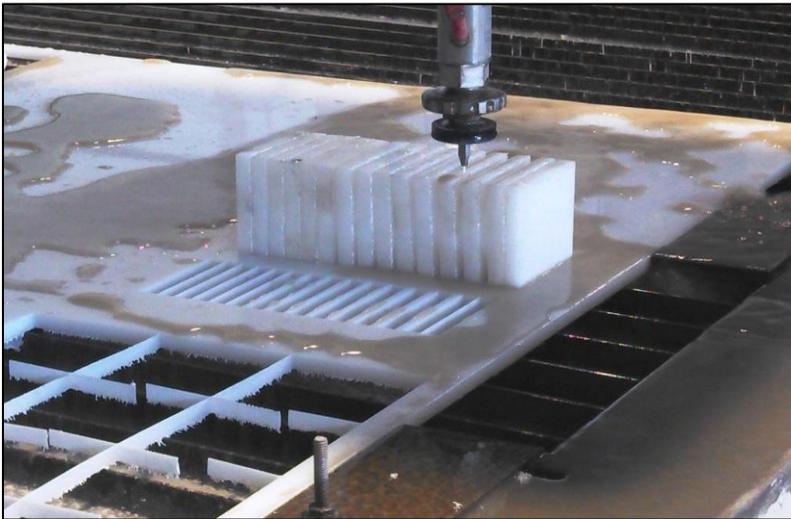


Figura 37 - Corte do tarugo em fatias.

Após o corte em secção do tarugo, cada fatia cilíndrica foi posicionada com a face plana voltada para a base da máquina e, finalmente, extraídos os cilindros que resultaram nos corpos de prova. O posicionamento das amostras foi mapeado conforme a Figura 38.

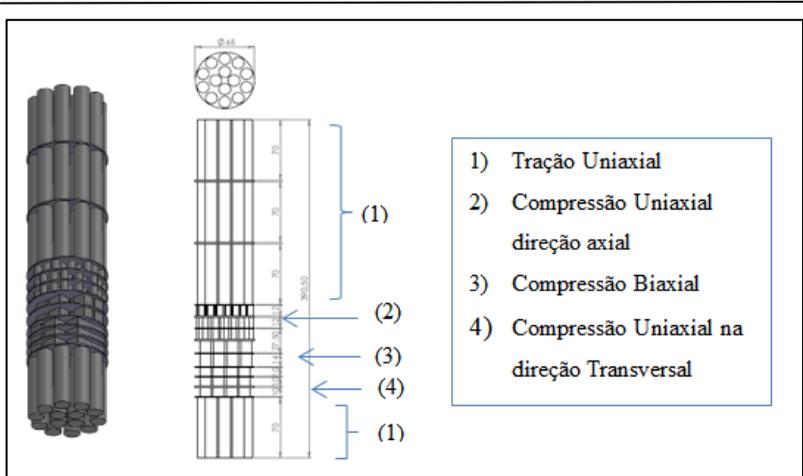


Figura 38- Disposição das amostras extraídas no tarugo de 400 mm.

Foram extraídos, de três discos de 10 mm de espessura, 63 corpos de prova para os ensaios de compressão uniaxial, com carregamento no sentido da extrusão, conforme a Figura 39.

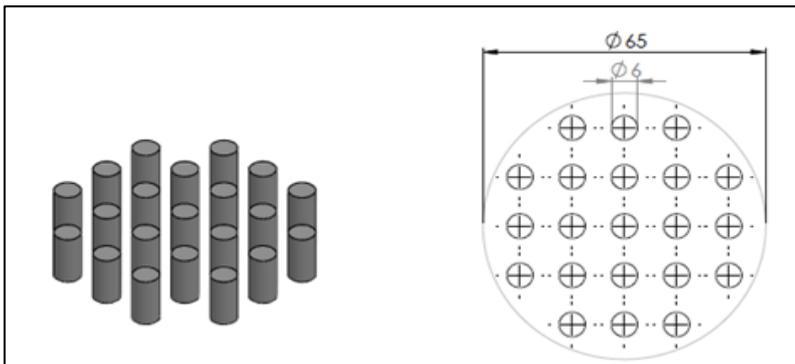


Figura 39 - Extração das amostras para compressão uniaxial.

Para o ensaio de compressão uniaxial com amostras na direção transversal à extrusão, primeiramente foram extraídos blocos retangulares para, posteriormente extrair os corpos de prova de formato cilíndrico, conforme ilustra a Figura 40.

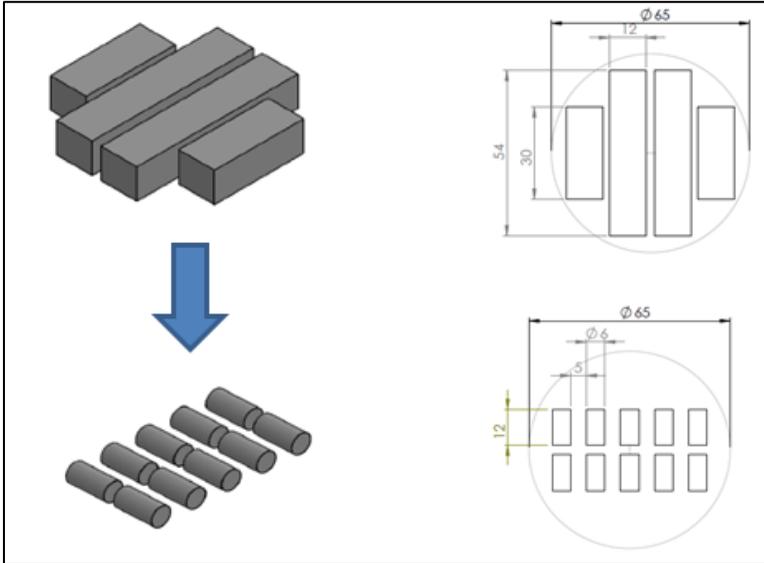


Figura 40 - Extração dos blocos para cps transversais e cps extraídos.

Os corpos de prova para o ensaio de compressão biaxial haviam sido extraídos do tarugo original com a espessura própria para o ensaio, sendo necessário apenas fazer os cortes retangulares, conforme ilustrado Figura 41.

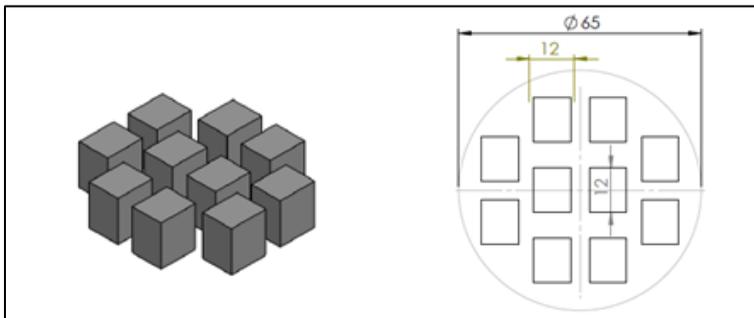


Figura 41 - Amostras para ensaio de compressão biaxial.

Quando se trabalha com corte a jato d'água, é preciso primeiramente definir uma região de sacrifício, a qual deve estar afastada da geometria de corte, sempre em que um novo corte é iniciado, uma vez que uma região do material próximo ao jato inicial é

danificada. A partir desta região, o jato segue, em linha reta, a geometria de corte. A Figura 42 contém o desenho topográfico dos cortes.

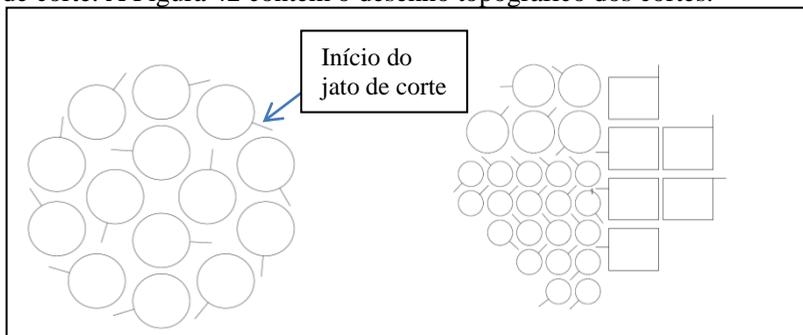


Figura 42 - Desenho de corte com jato inicial afastado da geometria da amostra.

O serviço de corte a jato d'água foi prestado pela empresa Qualyjet Sistema de Corte Ltda. de São José dos Pinhais – PR, sendo que para serem obtidas as amostras com qualidade aceitável para a realização dos ensaios, diversos parâmetros foram controlados como: velocidade de corte, diâmetro do orifício do bico de pressão e quantidade de material abrasivo no jato. Para isto, uma parte do material disponível precisou ser sacrificada, conforme a ilustra a Figura 43.

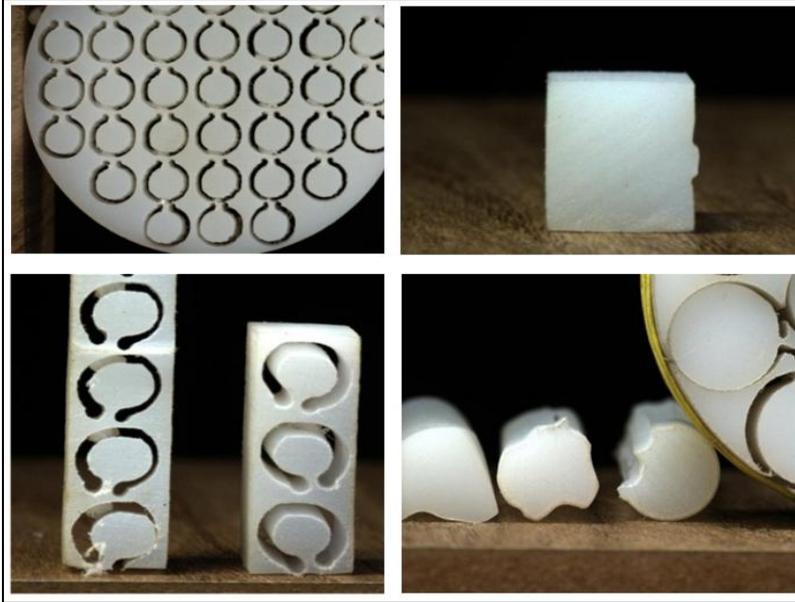


Figura 43 - Material sacrificado no ajuste de parâmetros da máquina de corte.

O exemplo de um corte, que foi realizado com os parâmetros da máquina calibrados para o material, pode ser observado na Figura 44, onde:

1. A espessura de fio de corte ficou bastante reduzida;
2. Não há presença de rebarba do material na saída do jato;
3. O fio de suporte foi desenhado de forma a não invadir a circunferência do corpo de prova.

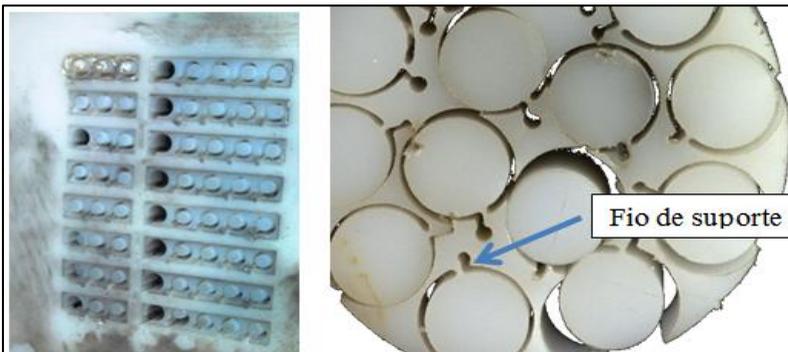


Figura 44 - Extração das amostras bem sucedida por corte a jato d'água.

Após o processo de corte, as amostras foram destacadas do fio de suporte com o auxílio de um bisturi e, por meio de uma lixa de gramatura 400, foi realizado um acabamento superficial.

Para os corpos de prova do ensaio de tração, foi necessária uma posterior usinagem em torno CNC, obtendo assim a geometria proposta no capítulo 4. Com o intuito de possibilitar a fixação do material no torno, foi mantido um sobrematerial de 10 mm no comprimento em cada amostra.

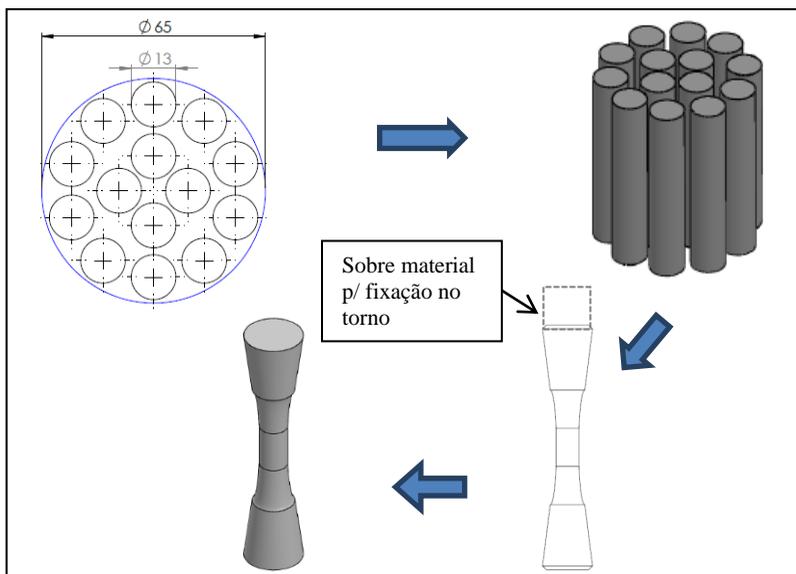


Figura 45 - Tarugos a serem confeccionados os corpos de prova na nova geometria sugerida para ensaio de tração.

5.2 ENSAIOS E TIPOS DE CARREGAMENTO

Foram realizados os ensaios de um total de 120 amostras, dos quais 55,0% foram utilizadas para teste e validação dos dispositivos, e 54 para os resultados do estudo de caso.

É importante frisar que, apesar de serem mencionados e distinguidos os carregamentos em termo de taxa de deformação, assim como a maioria dos estudos referenciados, a taxa de deformação não é constante ao longo do ensaio, pois varia em função da deformação, visto que o controle das máquinas de ensaio é feito por deslocamento ou força. A taxa de deformação aqui mencionada tem objetivo apenas

comparativo, pois, a velocidade de cada amostra ensaiada foi ajustada para reproduzir, aproximadamente os seguintes valores:

- 0,1 %/s
- 1 %/s
- 10 %/s

Como houve uma pequena variação de comprimento entre as amostras do mesmo grupo, cada ensaio foi realizado com uma velocidade específica para reproduzir a taxa de deformação inicial mencionada. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios das velocidades para cada carregamento e taxa de deformação.

Tabela 2 – Velocidade de carregamento para obter taxa de deformação de referência estipuladas.

Tipo de Ensaio	Velocidade p/ 0,1%/s	Velocidade p/ 1%/s	Velocidade p/ 10%/s
Tração Uniaxial	1mm/min	10mm/min	100mm/min
Compressão Uniaxial	0,6mm/min	6mm/min	60mm/min
Compressão Biaxial	0,9mm/min	9mm/min	90mm/min

No ensaio de compressão uniaxial, foram realizados ensaios com dois grupos de amostras, divididos de acordo com o sentido de extrusão:

1. Carregamento na direção de extrusão do tarugo;
2. Carregamento na direção transversal.

Para cada condição de ensaio, foram realizados os seguintes tipos de carregamentos.

1. Monotônico;
2. Cíclico com platô de tempo (ver Figura 46).

A temperatura dos ensaios foi estabelecida em 23,5°C e controlada por meio de um sistema de condicionamento de ar do laboratório. Para cada ensaio a temperatura foi monitorada com a utilização de um termômetro da marca Minipa modelo MV363 com uma variação máxima de $\pm 1,0^\circ\text{C}$.

Todos os ensaios foram realizados com os dispositivos apresentados no capítulo 4, além do uso de uma máquina universal de ensaio da marca Emic, modelo DL3000, com capacidade de 30kN. Para análise da força, nos ensaios de compressão uniaxial e tração uniaxial, foi utilizada uma célula de carga da marca Emic, modelo CCE5kN de 5kN de capacidade e resolução de 0,1N.

Especialmente para o ensaio de compressão biaxial, além da célula de carga citada, que neste caso serviu apenas para controle de força da máquina de ensaio, foi acrescentada, em série, uma célula de carga Excel modelo KS1.000 com capacidade de 10kN, ligada a um sistema de aquisição da marca HBM modelo Spider8-600Hz. O Spider8 possui um conversor analógico-digital de 16bit, possibilitando uma resolução de medida de 0,2N.

Para a medição da deformação, foi utilizado o sistema DIC composto por uma câmera Flea3-SW-14S3C-C da marca Point Grey.

Para o ensaio de compressão biaxial, foram utilizados três LVDTs da marca ômega, modelo LD-310-5 e LD-310-1.5 ligados a três condicionadores de sinais, de cinco dígitos, modelo DPL53, também da marca Omega.

5.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova foram submetidos à tração uniaxial, até a ruptura, nas seguintes condições de carregamento:

Tabela 3 - Carregamentos dos ensaios de tração uniaxial.

Amostra	Carregamento	Taxa de deformação (%/s)
Tm01	Monotônico	0,1
Tm1	Monotônico	1
Tm10	Monotônico	10
Tc01	Cíclico-platô	0,1
Tc1	Cíclico-platô	1
Tc10	Cíclico-platô	10

A velocidade de carregamento é igual, em módulo, à velocidade de descarga para a mesma amostra. Nos ensaios com carregamento cíclico, a garra é mantida por 30 segundo com movimento nulo no intervalo entre carga e descarga, conforme ilustra a Figura 46.

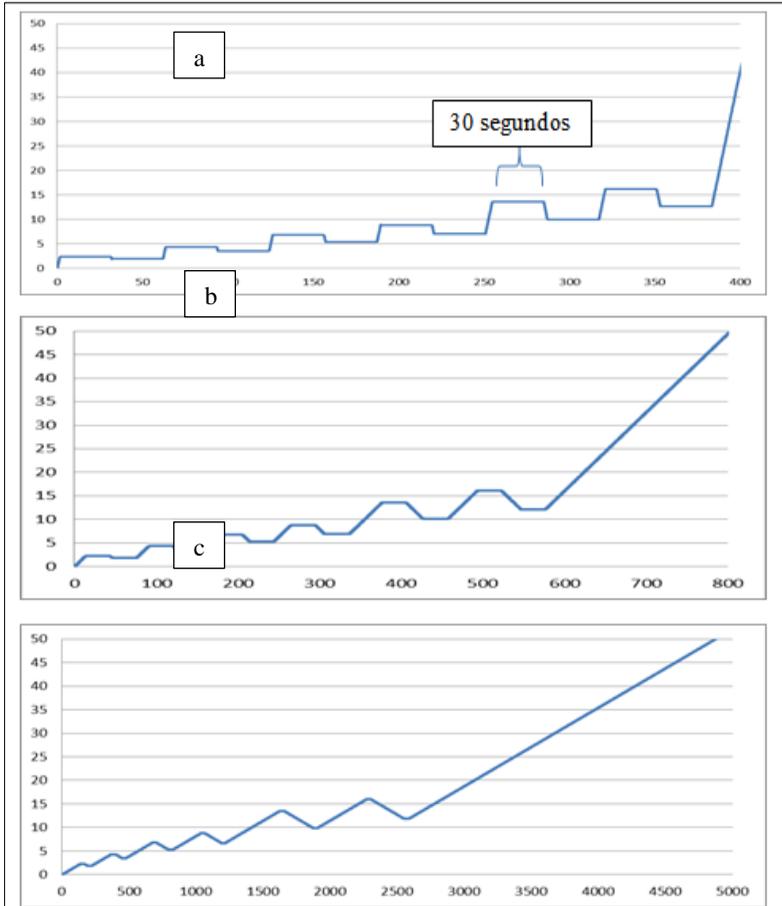


Figura 46 - Gráfico Deslocamento-Tempo das amostras a) trc01 (0,1mm/s), b) trc1(1mm/s) e c) trc10 (10mm/s).

Utilizando os dados fornecidos pela máquina de ensaio são calculadas curvas de deformação estimada (de engenharia) versus tempo segundo a seguinte expressão:

$$\varepsilon_{est} = \frac{u}{l_0}$$

Onde,

- ε_{est} : Deformação estimada
- u : Distância instantânea entre garras
- l_0 : Comprimento útil inicial do corpo de prova

De maneira análoga, são registrados da célula de carga os dados de força em relação ao tempo ilustrados na Figura 47.

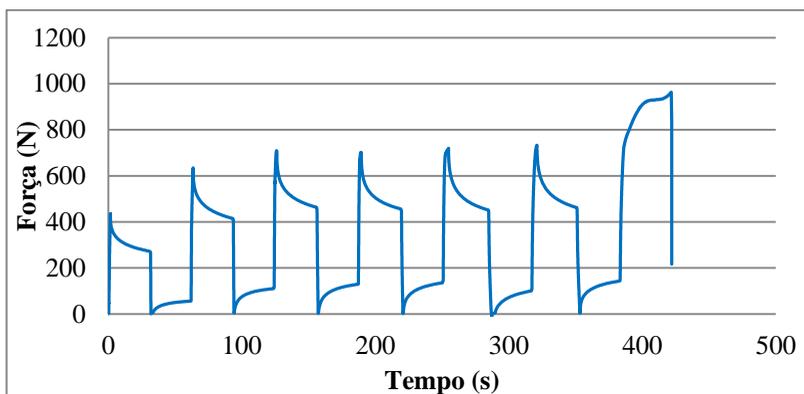


Figura 47 - Curva temporal da força de reação dos corpos de prova no ensaio cíclico.

As curvas estimadas de tensão-deformação de engenharia, nas três taxas de deformação, obtidas com o equipamento Emic DL-3000, podem ser observadas na Figura 48.

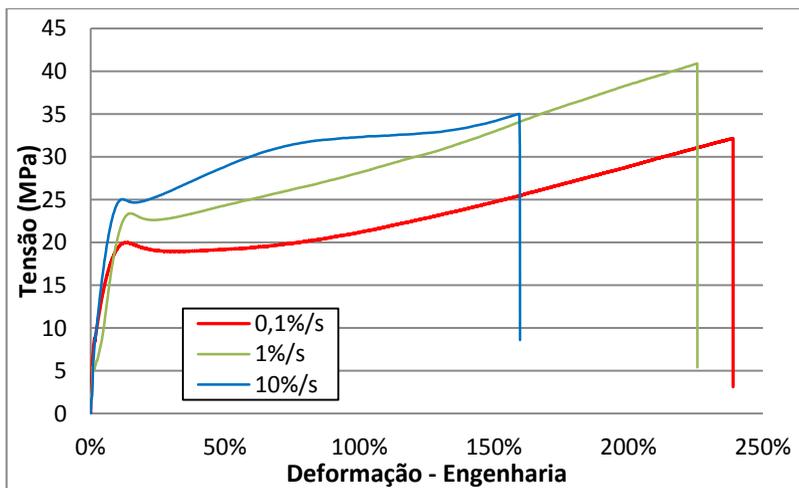


Figura 48 – Curva de engenharia - comparação entre velocidade de carregamento.

Na Figura 49, comparando os ensaios de tração monotônico e cíclico com a taxa de deformação estimada de 0,1%/s, são observadas as semelhanças entre as duas. Este resultado expõe que o carregamento cíclico não influenciou expressivamente na resposta do material, em comparação com o carregamento monotônico.

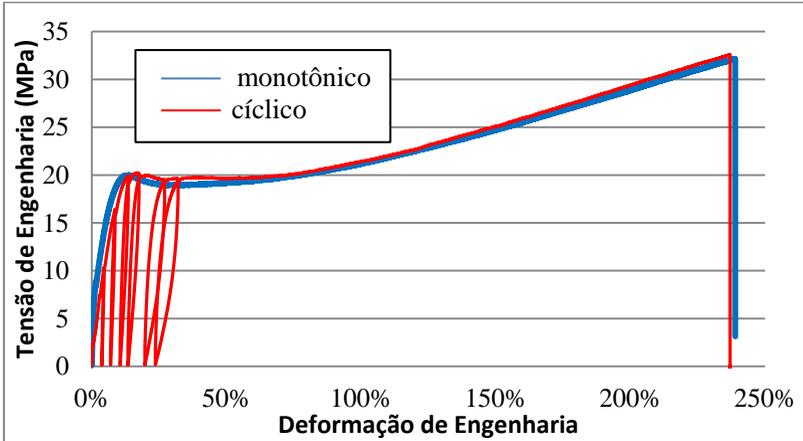


Figura 49 - Comparação entre as curvas tensão-deformação de engenharia em carregamentos monotônico e cíclico do ensaio de tração uniaxial.

Utilizando agora os dados de deformação axial e transversal instantânea (logarítmica), obtidos neste ensaio com a técnica de correlação de imagens digitais (DIC) foi possível calcular a tensão real:

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A}$$

Sendo,

F : Força axial

σ_{real} : Tensão real calculada com a atualização do diâmetro

A : Área instantânea calculada considerando o diâmetro variando ao longo do ensaio

Na Figura 50 estão representadas as curvas de tensão-deformação real e de engenharia para carregamento monotônico, e na Figura 51 as curvas com carregamento cíclico, onde podem ser observadas nitidamente as diferenças, principalmente em termos de tensão e deformação máxima.

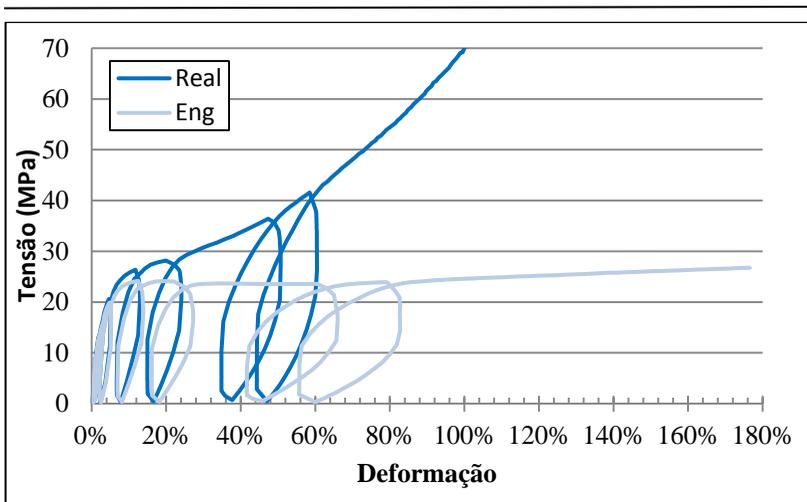


Figura 50 - Comparação entre curvas tensão-deformação real e de engenharia, em ensaio de tração com carregamento cíclico.

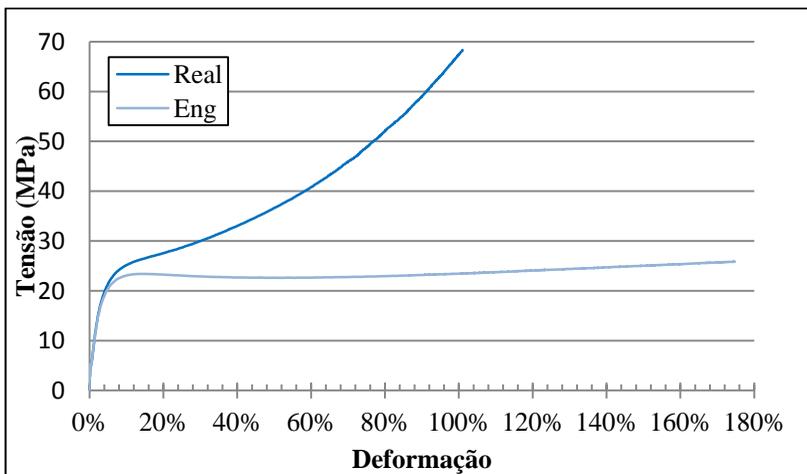


Figura 51 - Comparação entre curvas tensão-deformação real e de engenharia, em ensaio de tração com carregamento monotônico.

As Figura 52 e Figura 53 mostram o resultado dos ensaios com carregamento monotônico e cíclico nas velocidades propostas, constatando-se o comportamento esperado no qual os valores de tensão, para a mesma deformação, crescem com o aumento da velocidade de carregamento.

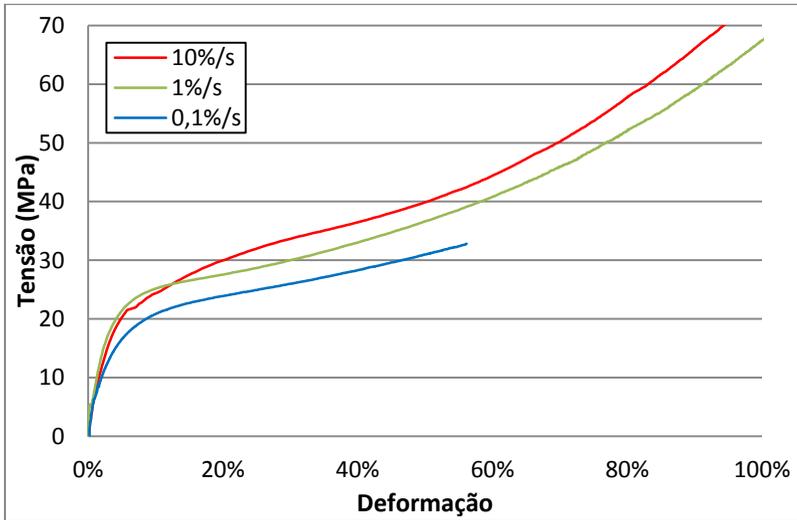


Figura 52 - Tensão Real/Deformação LN das amostras de UHMWPE em ensaio de tração nas três velocidades de carregamento monotônico.

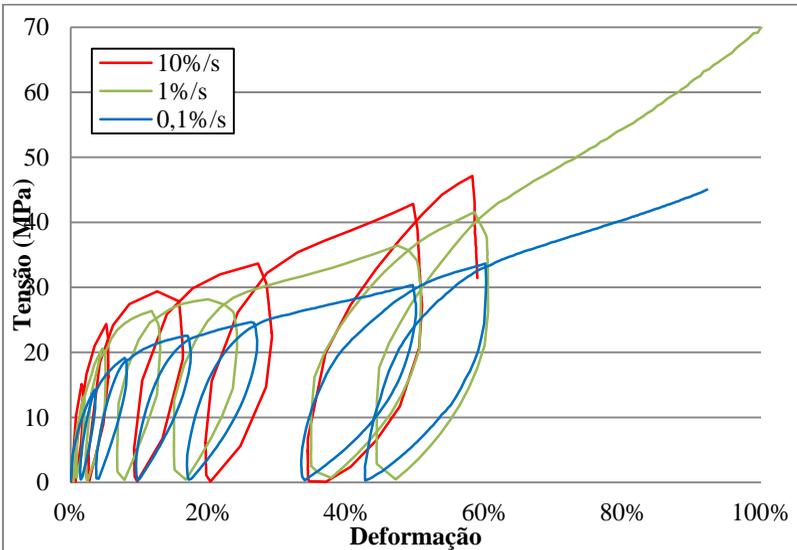


Figura 53 - Tensão real-deformação LN das amostras de UHMWPE em ensaio de tração nas três velocidades de carregamento cíclico.

Uma ressalva importante a respeito dos gráficos que contém os dados obtidos com o sistema DIC é que o truncamento de alguma curva

no gráfico não corresponde ao final do ensaio por ruptura, mas sim ao fato de que o algoritmo de correlação de imagens não obteve um índice de correlação aceitável para prosseguir para a próxima imagem do ensaio e, conseqüentemente, não é possível obter informações de deformação para o restante do ensaio.

A Figura 54 apresenta a curva da deformação transversal em função da deformação axial para o ensaio de tração monotônico de 1%/s. Nesta, pode-se observar que a curva real apresenta um comportamento fortemente linear. Este fenômeno ocorreu para todas as demais amostras ensaiadas.

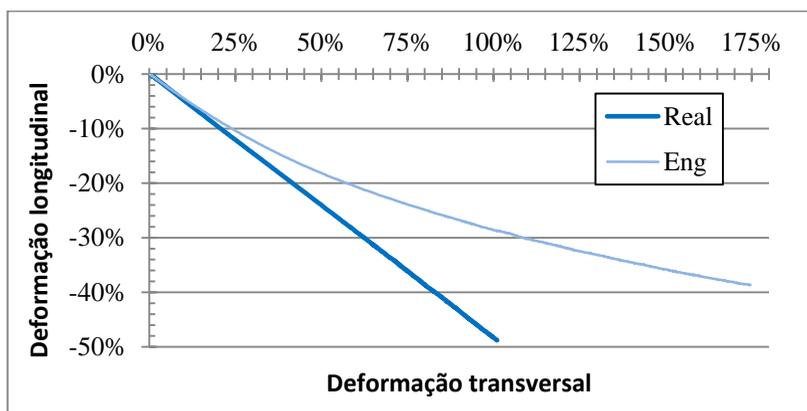


Figura 54 - Relação entre deformação transversal e axial para as curvas real e de engenharia.

A regressão linear destas curvas possui uma inclinação que define o coeficiente de Poisson, cujo valor para uma serie de ensaios são apresentados na Tabela 4, a qual contém também os módulos secantes das curvas tensão-deformação com aproximações lineares das quatro retas dos ensaios de tração monotônico nos carregamentos de 0,1%/s, 1,0%/s e 10,0%/s. A obtenção das secantes está representada na Figura 34 no capítulo 4.

Tabela 4 – Coeficiente de Poisson e Módulo Secante para ensaio de tração.

Amostra	Poisson	Secante 6MPa	Secante 10MPa	Secante 14MPa	Secante 18MPa
0,1 mono	0,490	504,79	438,98	340,15	242,79
1,0 mono	0,483	657,91	590,84	582,85	517,76
10 mono	0,481	1033,2	972,75	747,79	605,92
0,1 ciclo	0,490	*	*	*	*
1,0 ciclo	0,484	*	*	*	*
10 ciclo	0,486	*	*	*	*

(*) Parâmetros extraídos apenas para ensaios com carregamento monotônico.

5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAIXIAL COM CARREGAMENTO NA DIREÇÃO DA EXTRUSÃO

São apresentados os resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados com as amostras extraídas no sentido da extrusão.

Na Figura 55, comparando as curvas tensão-deformação de engenharia com a curva tensão-deformação real, pode ser observado que a tensão de engenharia é maior que a tensão real ao longo de todo o ensaio, isto se deve ao fato do aumento da área da seção transversal com o movimento compressivo do corpo de prova, conforme mencionado na seção 4.1.

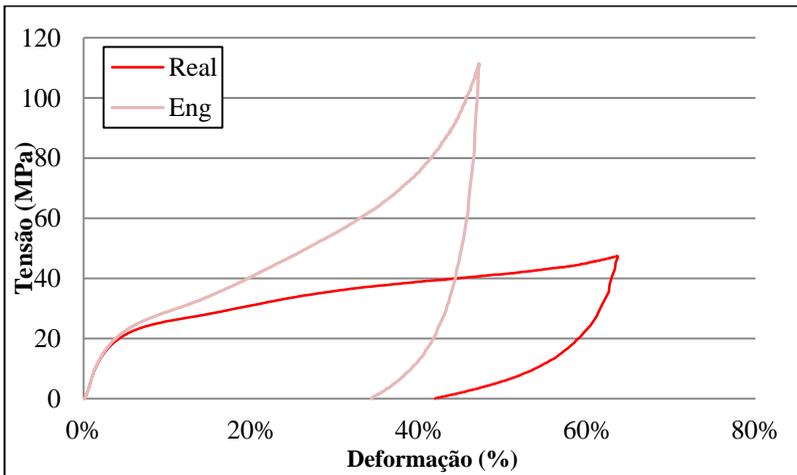


Figura 55 - Comparação entre curva real (logarítmica) e de curva de engenharia.

Na Figura 56 podem ser observadas as diferenças em função da taxa de deformação. Assim como nos resultados do ensaio de tração, os valores de tensão crescem com o aumento da velocidade de carregamento.

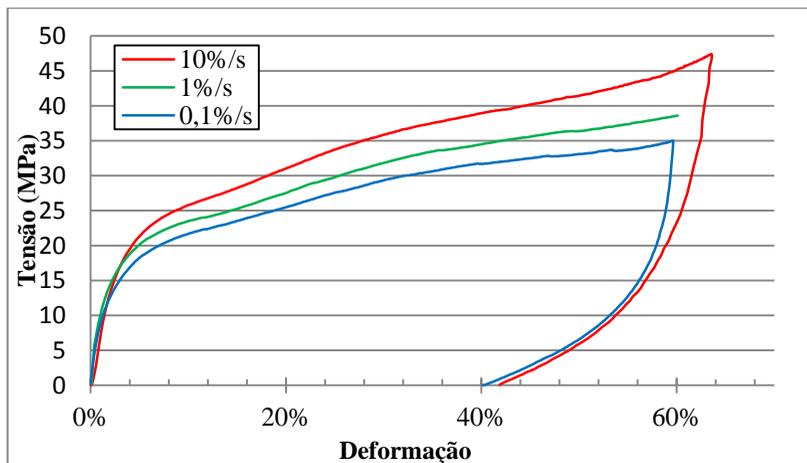


Figura 56 - Curva tensão–deformação logarítmica para carregamento compressivo monotônico nas três velocidades.

A Figura 57 contém as curvas de resposta do material para ensaio de compressão uniaxial com carregamento cíclico nas três velocidades. As curvas são parecidas para o caso de carregamento trativo e, assim como este, a deformação residual após descarregamento, aumenta com a velocidade.

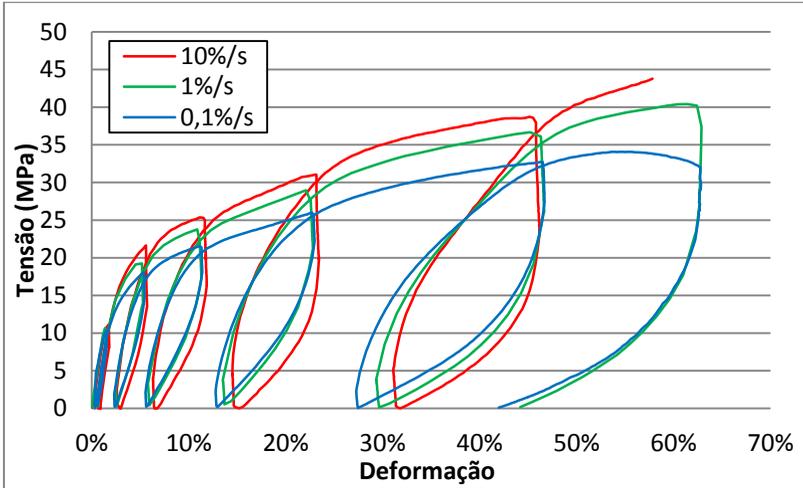


Figura 57 - Curva tensão-deformação para carregamento cíclico em três velocidades

A curva tensão-deformação verdadeira do UHMWPE submetido a carregamento compressivo, puramente axial, ficou muito próxima da curva do ensaio de tração, corroborando os resultados de [10]. Na Figura 58 é feita a comparação com as curvas de tração e compressão, onde o traço tracejado corresponde à curva de compressão com a referência invertida, assim como nos demais gráficos com carregamento compressivo.

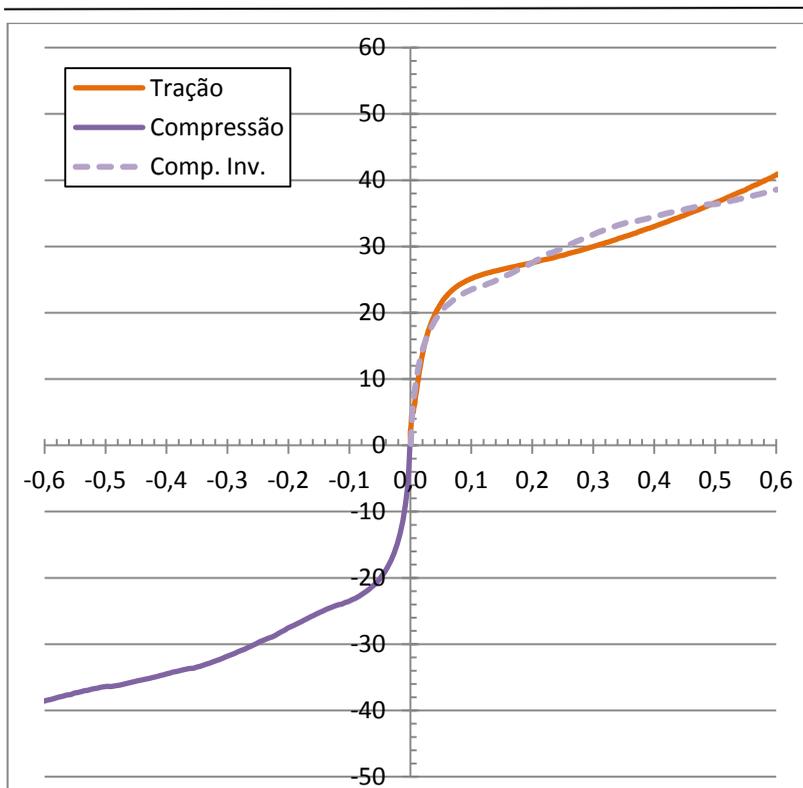


Figura 58 - Curva tensão-deformação verdadeira para os ensaios com carregamento compressivo e trativo.

5.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM CARREGAMENTO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL À EXTRUSÃO

As curvas dos ensaios de compressão uniaxial, das amostras extraídas na direção transversal da extrusão, com taxa de deformação de 0,1%/s, 1%/s e 10%/s, podem ser observadas na Figura 59. A diferença entre as curvas com velocidade de 1,0 e 10%/s ficou mais sutil se comparada ao ensaio tração e compressão no sentido de extrusão.

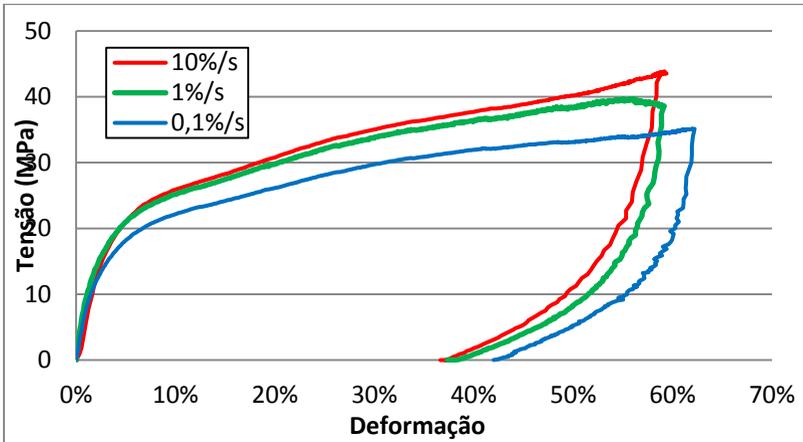


Figura 59 - Curva tensão Real–deformação LN dos ensaios de compressão.

A Figura 60 contém as curvas de tensão-deformação para ensaios de compressão uniaxial nas duas direções (axial e transversal em relação à extrusão). Ambos os ensaios foram realizados com a taxa de deformação de (1%/s). É possível perceber que as curvas das amostras extraídas na direção transversal à extrusão são sensivelmente maiores, em termos de tensão, que as amostras extraídas na direção de extrusão.

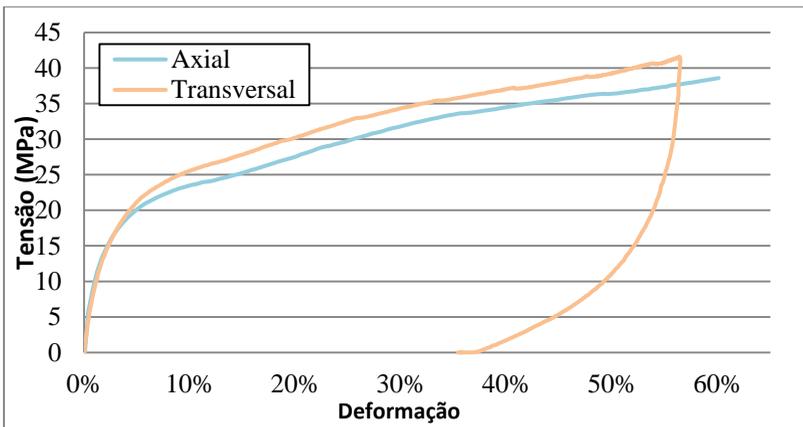


Figura 60 - Curva tensão–deformação das amostras axial e transversal no ensaio de compressão uniaxial com taxa de deformação de 1%/s.

5.6 - Compressão Biaxial – Canaleta “U”

Para o ensaio de compressão biaxial foram realizados os ensaios com velocidade de carregamento de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões das amostras e carregamento dos ensaios de compressão biaxial.

cp	Amostra	Espessura	Largura	Altura	Carregamento	tx def (%/s)
1	v1	10,18	12,25	15,29	monotônico	0,1
2	v2	10,25	12,32	14,99	monotônico	1,0
3	v3	10,22	12,32	14,84	monotônico	10,0
4	v4	10,16	12,30	14,75	ciclo/plato	0,1
5	v5	10,19	12,31	14,99	ciclo/plato	1,0
6	v6	10,20	12,25	14,69	Monotônico	0,1
7	v7	10,24	12,32	14,82	ciclo/plato	0,1
8	v8	10,17	12,36	14,92	ciclo/plato	0,1
9	v9	10,20	12,29	14,82	ciclo/plato	1,0
10	v10	10,18	12,24	14,93	monotônico	1,0
11	v11	10,13	12,29	14,95	monotônico	1,0

A rigidez da estrutura foi medida por meio da reprodução de um ensaio de compressão biaxial com carregamento monotônico, porém sem corpo de prova, onde todo o deslocamento medido é devido à deformação dos dispositivos da máquina de ensaio. Pode ser observado um comportamento bilinear no comportamento da estrutura, conforme ilustrado na Figura 61, onde a rigidez inicial do dispositivo é de 59,5 [kN/mm] e quando o carregamento atinge 1,3kN, a rigidez da estrutura atinge o valor de 230,3 [kN/mm].

O deslocamento de corpo rígido causado pela deformação da estrutura gera erros relativos de aproximadamente 9% no início do ensaio e 4% para força acima de 1,3kN. Conhecendo a resposta na rigidez da estrutura, pode ser realizada a correção deste erro subtraindo esta parcela no deslocamento.

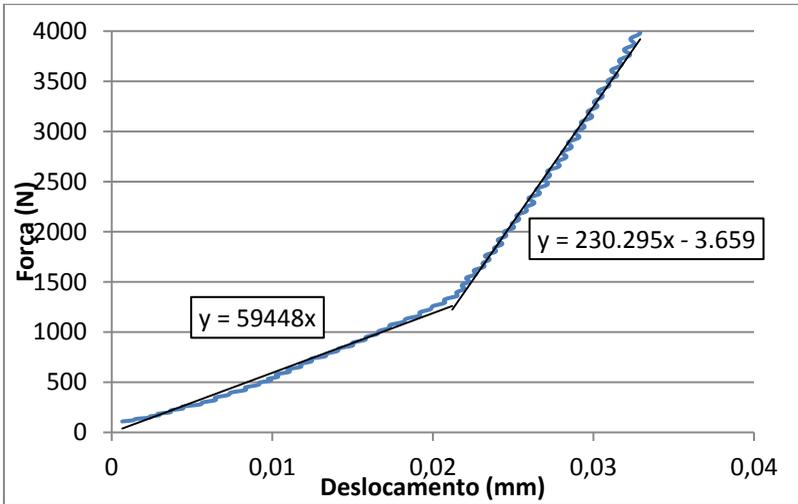


Figura 61 - Rigidez do dispositivo de compressão biaxial.

Na Figura 62 são apresentadas as curvas Tensão-Deformação verdadeira, para carregamento monotônico, sendo a tensão na direção do carregamento e as deformações nas direções axial e transversal a esta. Na terceira direção é considerado como deformação nula, devido às restrições de movimento que as paredes do dispositivo impõem, conforme apresentado na seção 3.3.

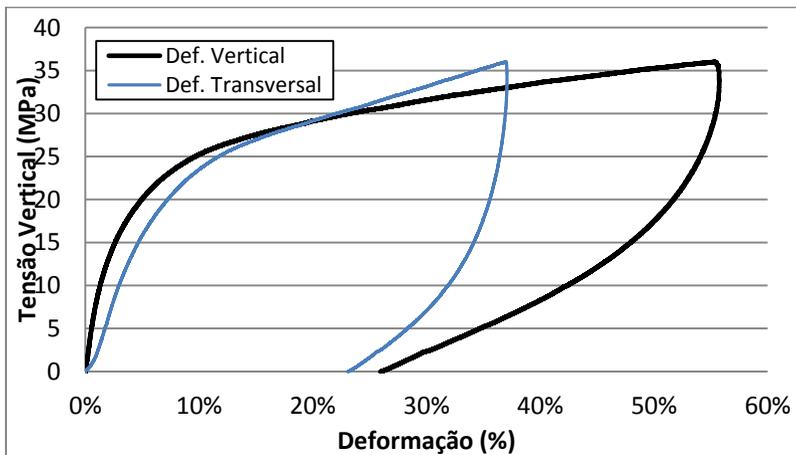


Figura 62- Curva tensão-deformação (Vertical e Transversal) para carregamento monotônico de 0,1%/s.

Na Figura 63, pode ser observado o comportamento do material para carregamento cíclico no ensaio.

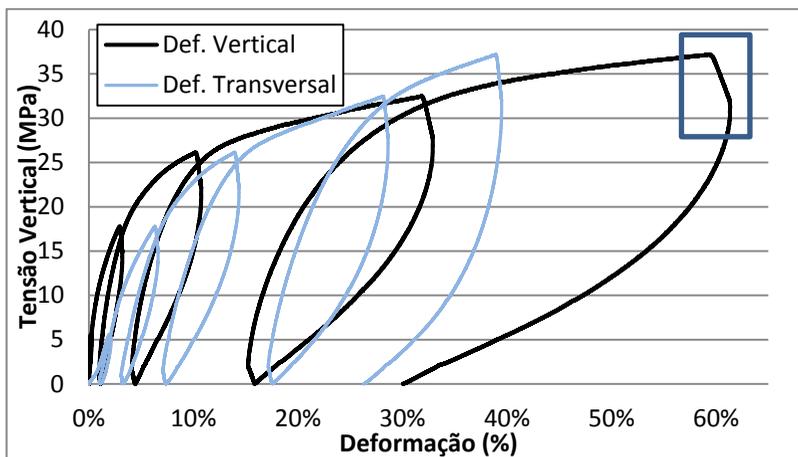


Figura 63 - Curva tensão–deformação para carregamento cíclico de 0,1%/s.

Observado a região destacada, pode-se verificar um aparente amolecimento, que a priori, foi motivado pela falta de rigidez da máquina de ensaio durante o tempo de espera entre os ciclos. O dados de medição de deslocamento com o lvdt indicaram um pequeno movimento em relação ao posicionamento do travessão principal da máquina conforme apresentado na Figura 64.

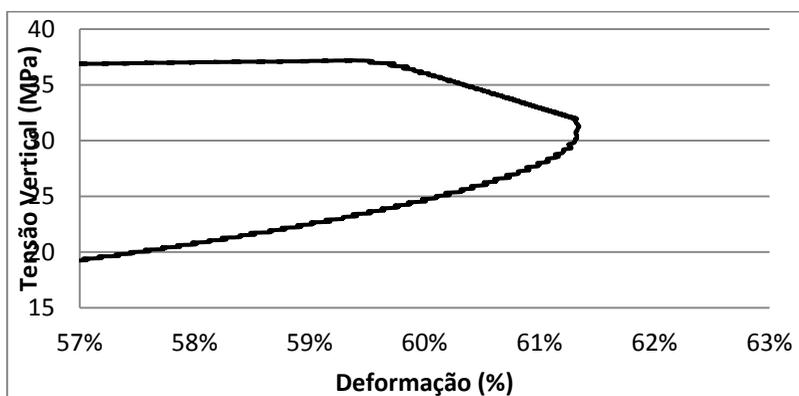


Figura 64 – Região da curva da Figura 63 durante o intervalo de deslocamento nulo para ensaio com velocidade de 0,1%/s.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados mais de 150 ensaios mecânicos, utilizando os dispositivos aqui propostos, e apresentados os resultados do trabalho de caracterização do comportamento mecânico do material UHMWPE em carregamentos cíclicos e monotônicos nas três variações:

- Tração Uniaxial;
- Compressão Uniaxial;
- Compressão Biaxial

Os dispositivos apresentaram excelente rigidez e alinhamento, garantindo assim respostas homogêneas de deformação mesmo no regime de grandes deformações do material UHMWPE. O dispositivo de tração criado pelo presente trabalho, demonstrou ser superior a dispositivos tradicionais, com geometria cunha, para o materiais de baixo atrito, como o UHMWPE devido a garras convencionais necessitarem de boa aderência na região de contato com o corpo de prova.

Corroborando os resultados obtidos em [10], a curva tensão-deformação verdadeira do UHMWPE com carregamento trativo se assemelha com a curva do carregamento compressivo. A diferença das curvas tensão-deformação do UHMWPE para velocidade de carregamentos distintos também foi observado conforme [8], tanto para ensaio de tração quanto para ensaio de compressão.

Para o dispositivo DIC, após vários testes com tipos de pinturas para a marcação dos pontos de referência, foi concluído que, particularmente para o material UHMWPE, o uso de uma caneta hidrográfica, com ponta 0,5mm e tinta preta, teve maior efetividade.

As principais curvas obtidas nos ensaios encontram-se no documento e os desenhos técnicos completos dos dispositivos e geometria de corpos de prova desenvolvidos neste trabalho estão contidos no apêndice. Curvas completas e todos os arquivos dos resultados dos ensaios podem ser obtidos, por meio de livre acesso ao site: www.grante.ufsc.br

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São propostas cinco sugestões para os dispositivos e continuação dos ensaios do estudo de caso:

- Reprodução dos ensaios desta dissertação com maior número de amostras para avaliação estatística;
- Investigar a existência de restrições para o uso do processo de injeção para a confecção de corpo de prova de tração. Esta investigação deverá ser realizada por meio de análise morfológica, verificando o gradiente de resfriamento e a existência de contração diferenciada causado pela geometria de grande espessura do corpo de prova;
- Os ensaios de tração e compressão uniaxial foram realizados de forma independente, devido utilizar dispositivos distintos. Para uma caracterização contínua, na transição entre cargas trativas e compressivas, é sugerida uma adaptações no dispositivo de tração, possibilitando este à receber carregamento compressivo, com exemplo em [16]. Com este “*upgrade*” será possível também a realização de ensaio de fadiga;
- Para estudo de caso, além dos testes aqui realizados, é sugerida a reprodução dos ensaios em outros valores de temperatura, como por exemplo, 37°C (temperatura corporal humana). Para tal, deve ser utilizada uma câmara de aquecimento, com janela translúcida de material com características ópticas especiais, permitindo medições com o dispositivo DIC;
- O desenvolvimento do transdutor de deslocamento *clip gage*, mencionado no capítulo 3, continua em andamento. Aplicá-lo aos ensaios simultaneamente com o dispositivo DIC é a sugestão para a validação do dispositivo.

REFERÊNCIAS

[1] RAMAKRISHNA, S; MAYER, J; WINTERMANTEL, E; LEONG, K. Biomedical applications of polymer-composites materials: a review. *Composites Scie. and Tech.*, Barking, v. 61, p. 118-1224, 2001.

[2] RODRIGUES, L. B. Aplicações de biomateriais em ortopedia. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v. 9, n. 2, p. 63–76, 2013.

[3] MEDEL, J. et al. Microstructure change of extruded ultra high molecular weight polyethylene after gamma irradiation and shelf-aging. *Polymer Degradation and Stability*, v. 88, p. 435–443, 2005.

[4] CALLISTER, J. R. W. D. - *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 5a. ed. John Wiley & Sons, New York, 1999

[5] ROCHA, M. Análise e caracterização do polietileno de ultra-elevado peso molecular para aplicação em prótese total de joelho. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2006.

[6] LI, S. Ultra high molecular weight polyethylen : from charnley to cross-linked. *Operative Techniques in Orthopaedics*, v. 11, n. 4, p. 288-295, 2001.

[7] SANTOS, I. Materiais poliméricos reforçados para aplicações biomédicas. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Aveiro*, 2009.

[8] GOMAA, S.; LEISINGER, S. testing and modeling the nonlinear behavior of uhmwpe used in orthopaedic implants. *SOURCE Conference Proceedings of the Annual Meeting of the American Soc*, January 2010.

[9] LOBO, B. C. AND H. MECHANICAL AND VISCO-ELASTIC PROPERTIES OF UHMWPE FOR IN-VIVO. [s.d.]

[10] KURTZ, S. M.; PRUITT, L.; JEWETT, C. W.; CRAWFORD, R. P.; CRANE, D. J.; EDIDIN, A. A. The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. *Biomaterials*, v.19, n. 21, p. 1989 – 2003, 1998.

[11] HARRIS, J. (n.d.). A study of the mechanical properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE).

[12] ASTM D638-03: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA 2004.

[13] DRIEMEIER, L; BRÜNIG, M; MICHELI, G; ALVES, M. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys. *Mechanics of Materials*, v. 42, n. 2, p. 207–217, 2010.

[14] BERGSTRÖM, J. S. Accurate Finite Element Simulations of PTFE Compon

[15] ASTM.E1012: Standard Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading. Current. ASTM International, West Conshohocken, PA1999.

[16] GUITTON, E; RIO, G; LAURENT, H. A new multiaxial loading test for investigating the mechanical behaviour of polymers. *Polymer Testing*, v. 36, p. 32–43, jun. 2014.

[17] PAN, B.; WANG, Z.; LU, Z. Genuine full-field deformation measurement of an object with complex shape using reliability-guided digital image correlation. *Optics express*, v. 18, n. 2, p. 1011–23, 18 jan. 2010

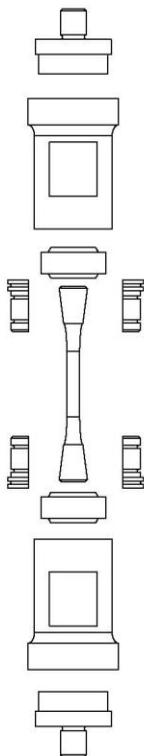
[18] CASTRO, P. B. - IDENTIFICATION OF CONSTITUTIVE PARAMETERS BY USING FULL-FIELD MEASUREMENTS: AN EXAMPLE OF APPLICATION TO AN ELASTOPLASTIC DAMAGE MODEL. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2012

[19] MOURA, R. - Modelagem e ensaios mecânicos de polímeros termoplásticos sob carregamentos quase-estáticos e dinâmico. (Tese de

Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

APÊNDICE – DESENHOS TÉCNICOS DOS DISPOSITIVOS DE ENSAIO

Na sequência são apresentados todos os desenhos técnicos necessários para a reprodução dos dispositivos de ensaio para caracterização mecânica de termoplásticos desenvolvidos no presente trabalho e utilizado para o estudo de caso deste. Os arquivos digitais contendo os desenhos técnicos em escala podem ser adquiridos gratuitamente no endereço www.grante.ufsc.br.

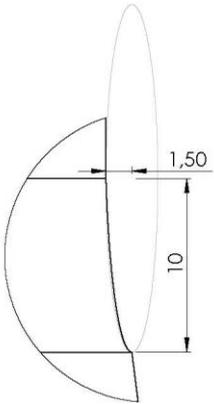
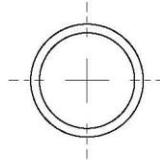
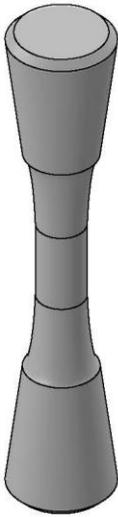


criação: 28/04/2014
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl

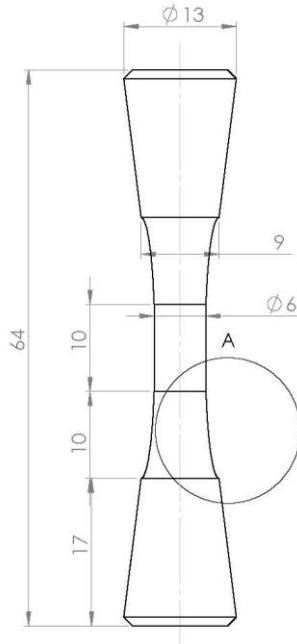
REVISÃO: 28/04/2014

Dispositivo para Ensaio de Tração

FOLHA: 01 de 07

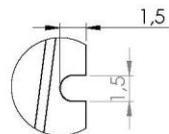
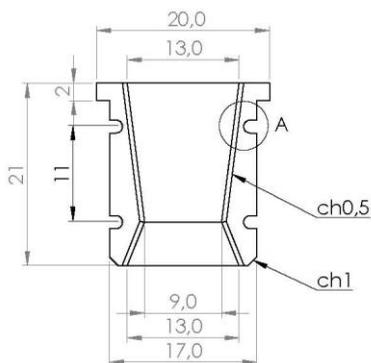


DETALHE A
ESCALA 4 : 1

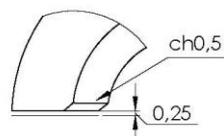
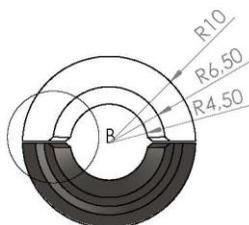


CRIAÇÃO: 28/04/2014 SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	REVISÃO: 28/04/2014 QUANTIDADE:	TÍTULO:
PROJETA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL:	DES. Nº: cp 64mm Desenho 01
MASSA:	ESCALA: 1:1	FOLHA: 02 de 07

A4



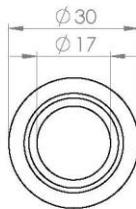
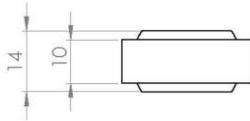
DETALHE A
ESCALA 4 : 1



DETALHE B
ESCALA 4 : 1

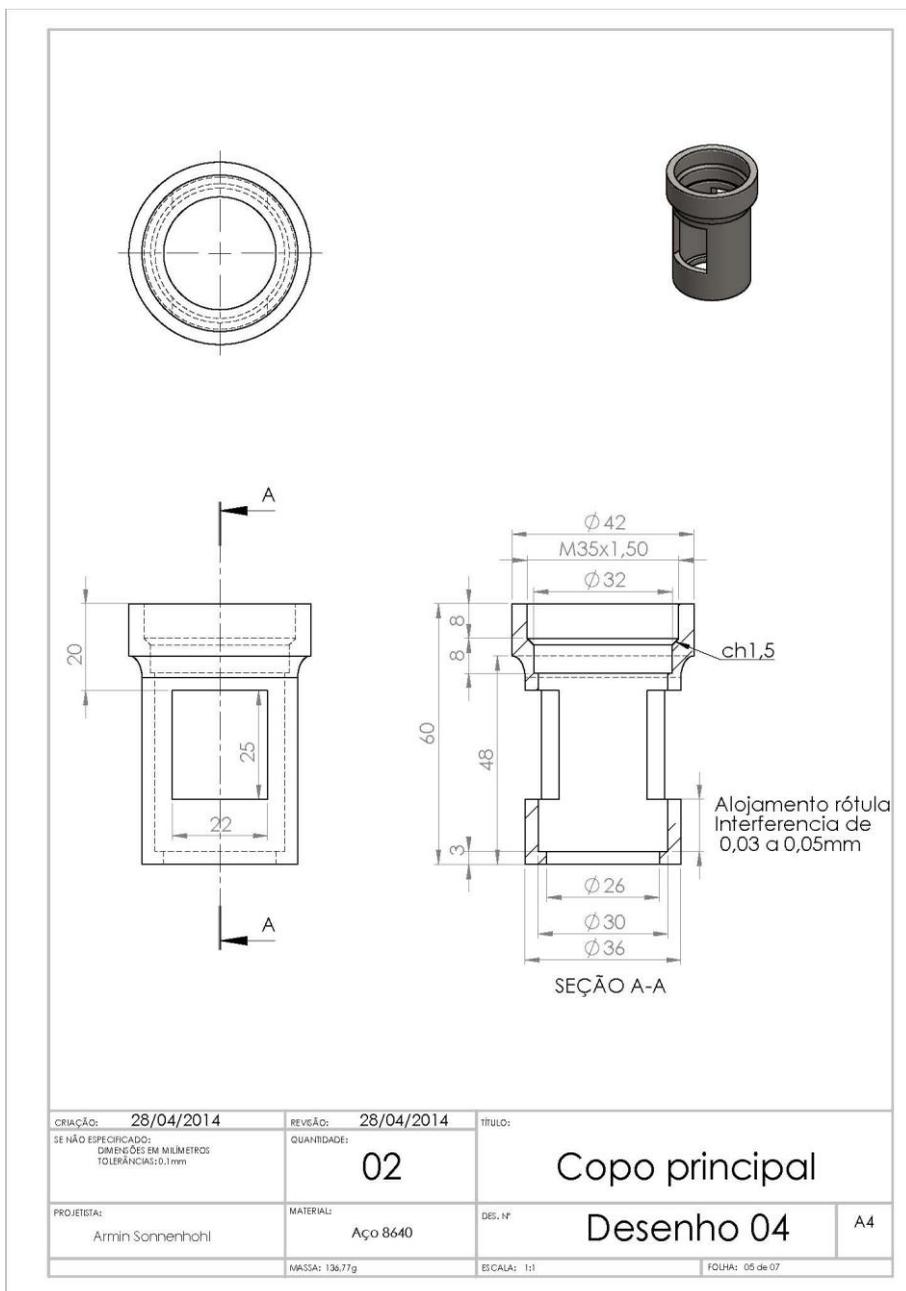
Observações:
- Ch0,5: apenas para tirar o canto vivo
- 0,25: referente ao fio de corte que divide a peça

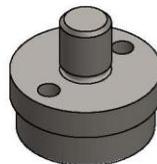
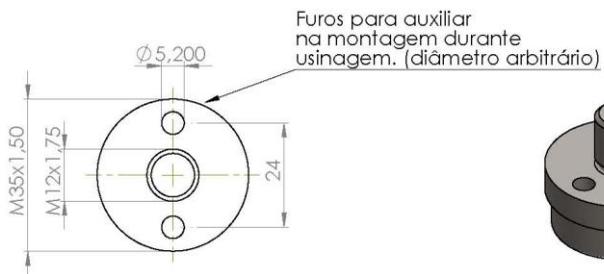
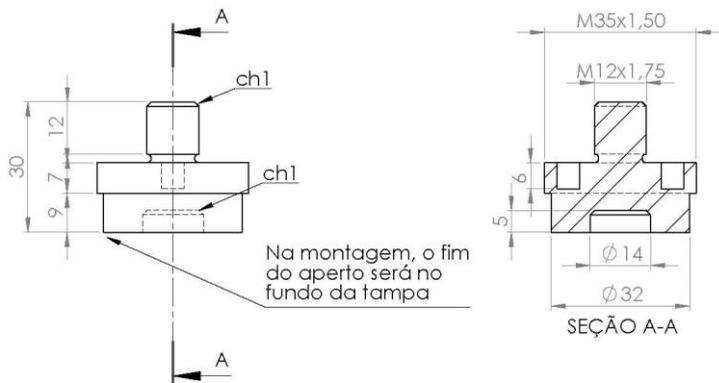
criação: 28/04/2014	revisão: 28/04/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	QUANTIDADE: 04	Pinça de fixação	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: Aço 8640	DES. Nº Desenho 02	A4
MASSA: 12,26g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 03 de 07	



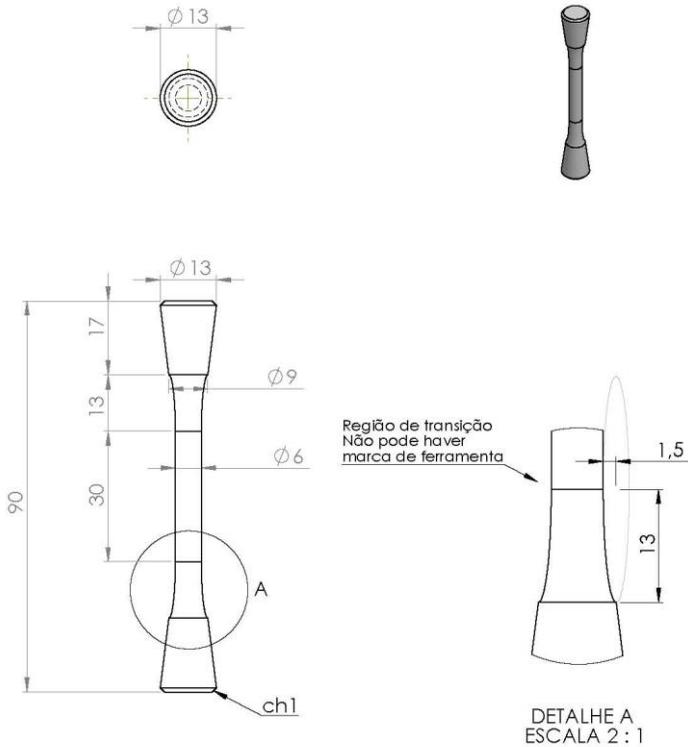
*Modelo comercial: GE17ES

criação: 28/04/2014	revisão: 28/04/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 02	Rótula Esférica	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: Aço	des. nº Desenho 03	A4
massa: 50g	escala: 1:1	folha: 04 de 07	

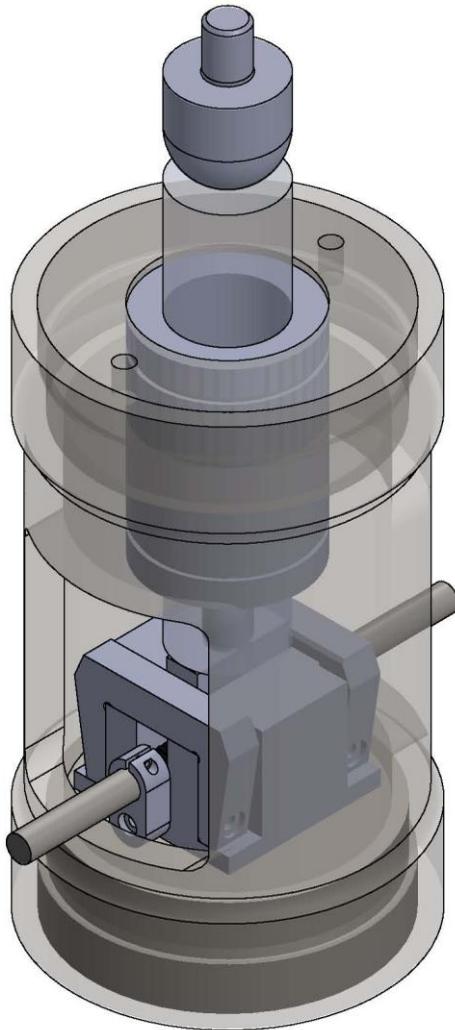




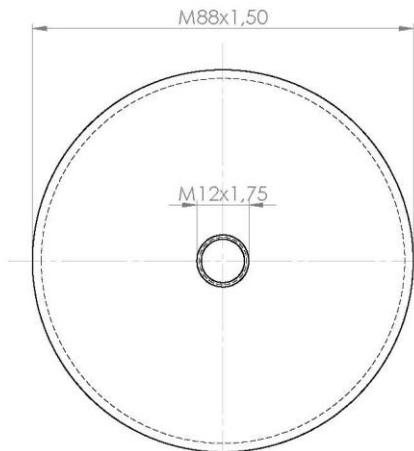
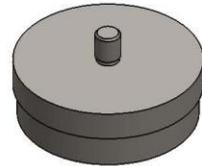
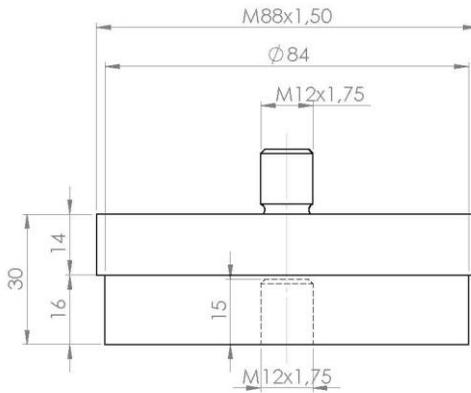
criação: 28/04/2014	revisão: 28/04/2014	título: Tampa / Conexão para célula de carga	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 02	DES. Nº Desenho 05	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: Aço 8640	ESCALA: 1:1	A4
MASSA: 102,66g		FOLHA: 06 de 07	



criação: 28/04/2014	revisão: 28/04/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade:	cp tipo II - 90mm	
projetista: Armin Sonnenhohl	materiais:	des. nº	A4
massa:	escala: 1:1	folha: 07 de 07	
		Desenho 06	

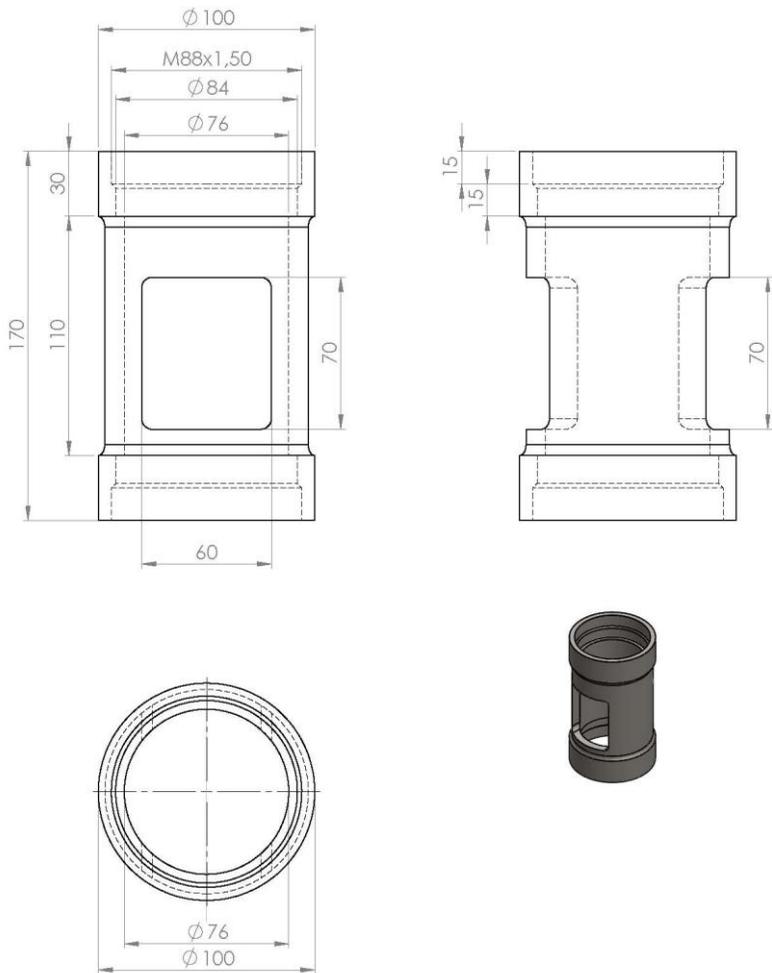


CRIAÇÃO: 28/05/2014	REVISÃO: 04/08/2014	TÍTULO:
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	QUANTIDADE: 01	Dipositivo para ensaios mecânicos de carregamentos compressivos
		FOLHA: 1 de 22

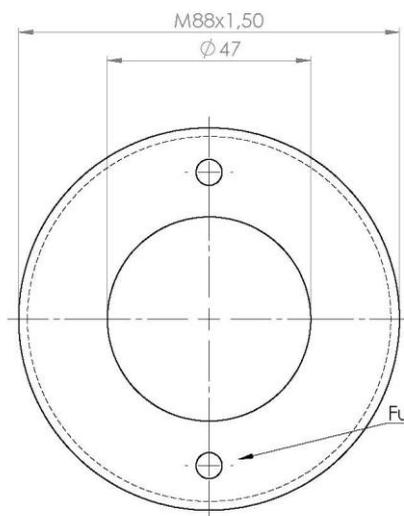
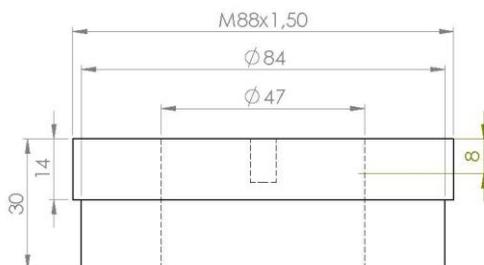


O furo central M12x1,75 e o fuso central M12x1,75 devem ser feitos somente após a montagem das tampas na câmara, garantindo assim a cocêntrica do conjunto

criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	MATERIAL: 01	Tampa inferior	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: AÇO 8640	DES. Nº: Desenho 01	A4
MASSA: 1348,5g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 2 de 22	



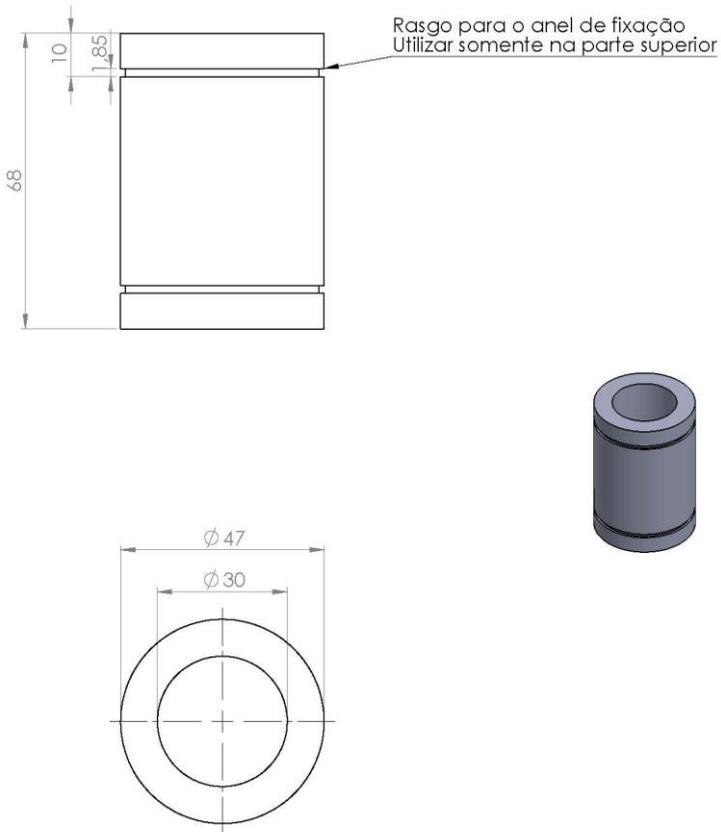
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 01	Câmara	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº: Desenho 02	A4
massa: 2424 g	escala: 1:1	folha: 3 de 22	



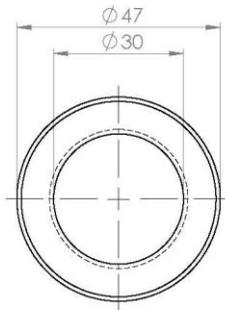
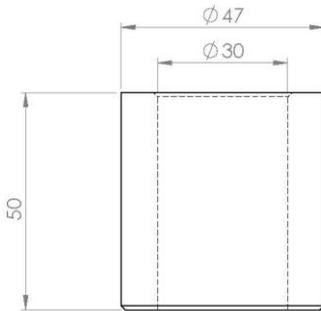
Furos auxiliares para montagem

O furo central de $\varnothing 47\text{mm}$ deve ser feito somente após a montagem das tampas na câmara, garantindo assim a cocêntrica do conjunto

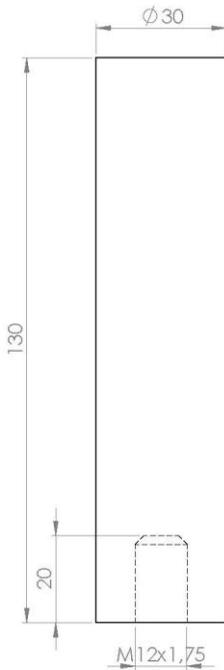
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	MATERIAL: 01	Tampa superior	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: AÇO 8640	DES. Nº	A4
MASSA: 951,5g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 4 de 22	
		Desenho 03	



criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	MATERIAL: 01	Rolamento KB30-PP-AS	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL:	DES. Nº Desenho 04a	A4
MASSA:	ESCALA: 1:1	FOLHA: 5 de 22	

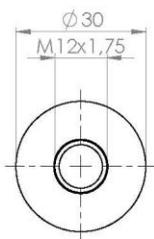
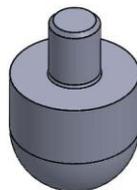
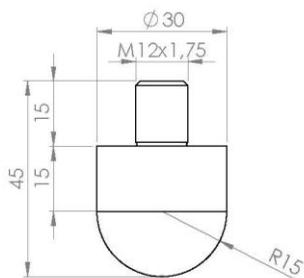


CRIAÇÃO: 28/05/2014 SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	REVISÃO: 04/08/2014 QUANTIDADE 01	TÍTULO: Bucha	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: BRONZE	DES. Nº Desenho 04b	A4
MASSA: 481 g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 6 de 22	

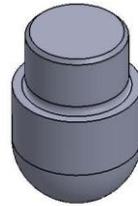
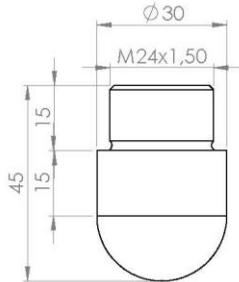


CRIAÇÃO: 28/05/2014 SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	REVISÃO: 04/08/2014 QUANTIDADE 01	TÍTULO: Eixo maciço W30h6
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: Aço	DES. Nº Desenho 05
MASSA: 89 g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 7 de 22

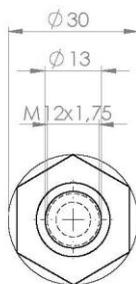
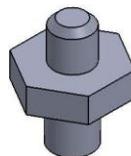
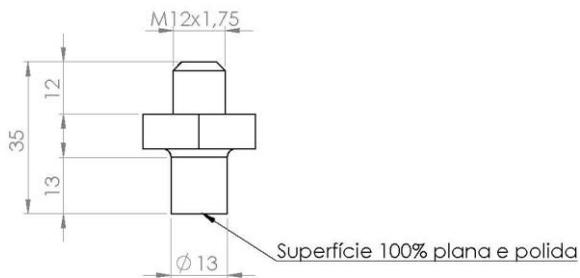
A4



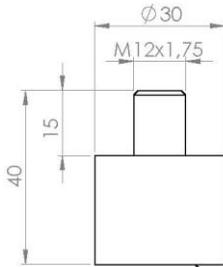
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 01	Semiesfera M12	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº Desenho 06a	A4
massa: 19 g	escala: 1:1	folha: 8 de 22	



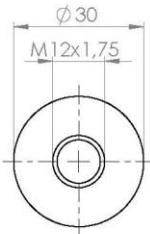
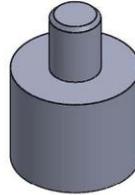
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 01	Semiesfera M24	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº Desenho 06b	A4
massa: 24g	escala: 1:1	folha: 9 de 22	



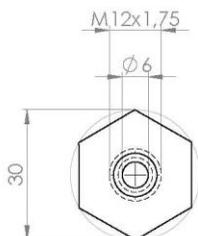
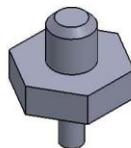
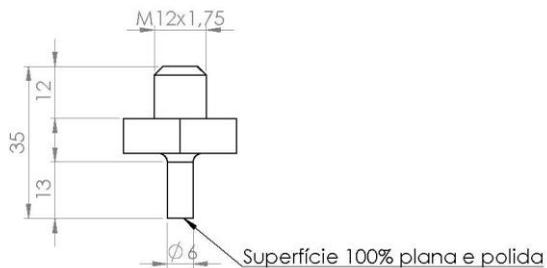
criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 02	Punção 13mm	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº Desenho 07a	A4
massa: 8 g	escala: 1:1	folha: 10 de 22	



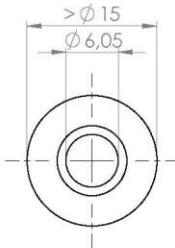
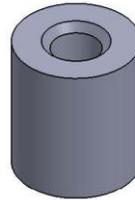
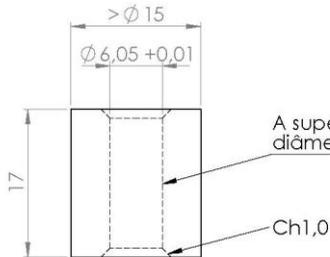
Superfície 100% plana e polida



criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 02	Punção 30mm	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº: Desenho 07b	A4
massa: 19 g	escala: 1:1	folha: 11 de 22	

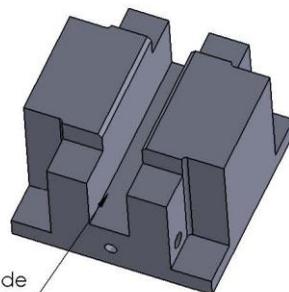
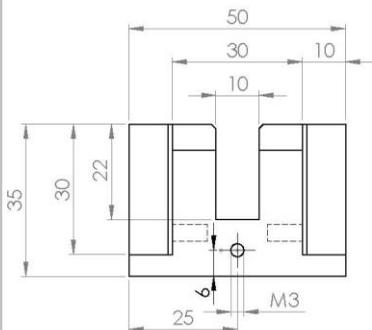
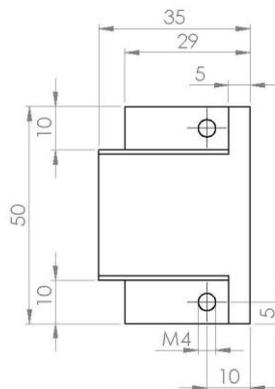
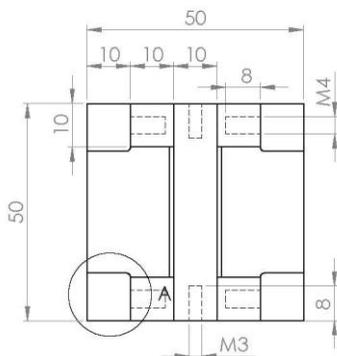


criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 02	Punção 6mm	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº: Desenho 07c	A4
massa: 6 g	escala: 1:1	folha: 12 de 22	

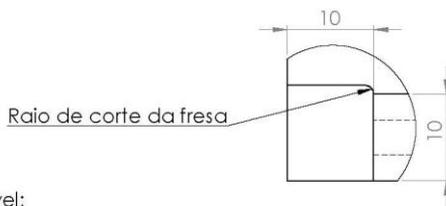


O diâmetro externo pode ser maior que os 15mm

criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 01	Camisa	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº: Desenho 08	A4
	massa: 2 g	escala: 2:1	folha: 13 de 22



Região de contato

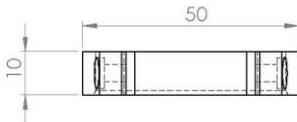
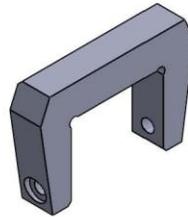
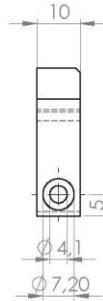
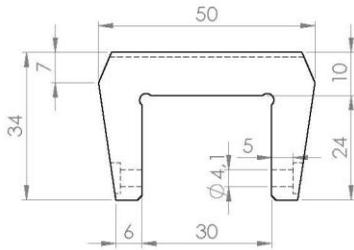


Raio de corte da fresa

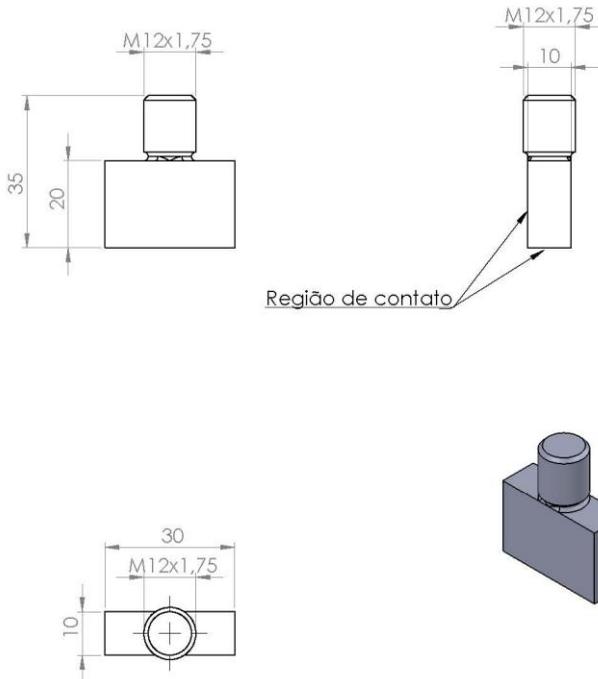
DETALHE A
ESCALA 2 : 1

Na região de contato, deve ser utilizada a menor tolerância possível; A superfície das três faces devem ser polidas e 100% planas

criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	QUANTIDADE: 01	Canaleta	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL: AÇO 8640	DES. Nº: Desenho 10a	A4
MASSA: 60,4 g	ESCALA: 1:1	FOLHA: 14 de 22	

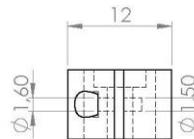
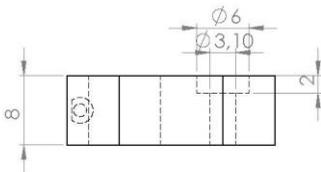
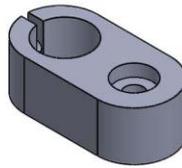
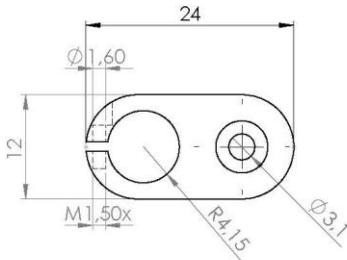


criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 02	Trava canaleta	
projetista: Armin Sonnenhohl	materiais: AÇO 8640	des. nº: Desenho 10b	A4
massa: 8 g	escala: 1:1	folha: 15 de 22	

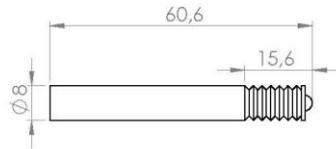


Na região de contato deve ser utilizada a menor tolerância possível;
A superfície das três faces devem ser polidas e 100% planas

criação: 28/05/2014	revisão: 05/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 01	Punção canaleta	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: AÇO 8640	des. nº Desenho 10c	A4
massa: 7 g	escala: 1:1	folha: 14 de 22	

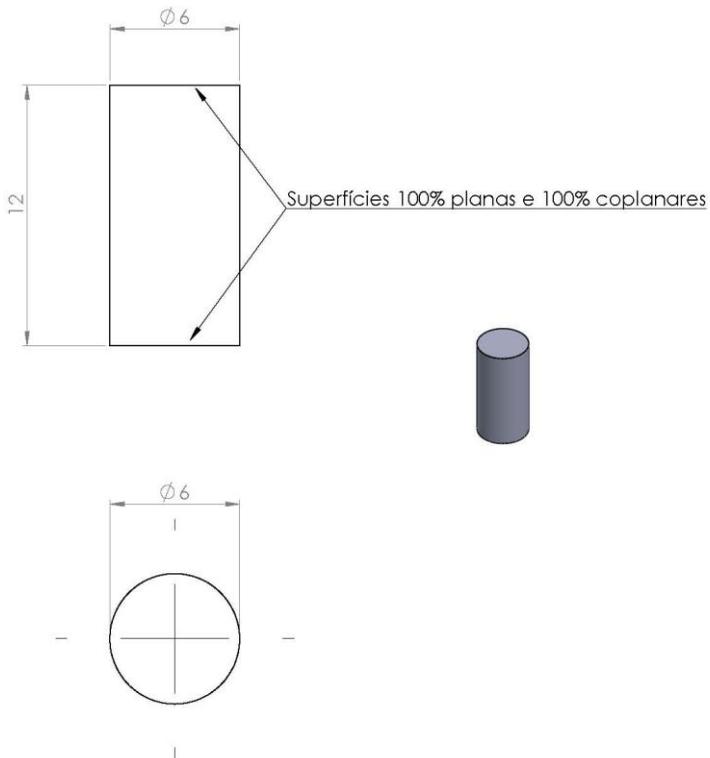


criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 02	Suporte Ivdt	
projetista: Armin Sonnenhohl	materia: AÇO	des. nº Desenho 10d	A4
massa: 1,5 g	escala: 1:1	folha: 17 de 22	

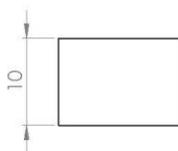
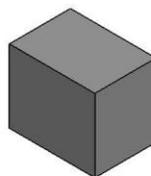
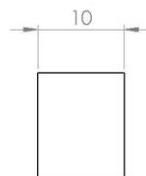
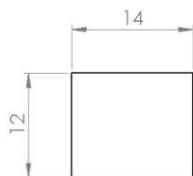


Desenho apenas para
referência.
Componente já comprado

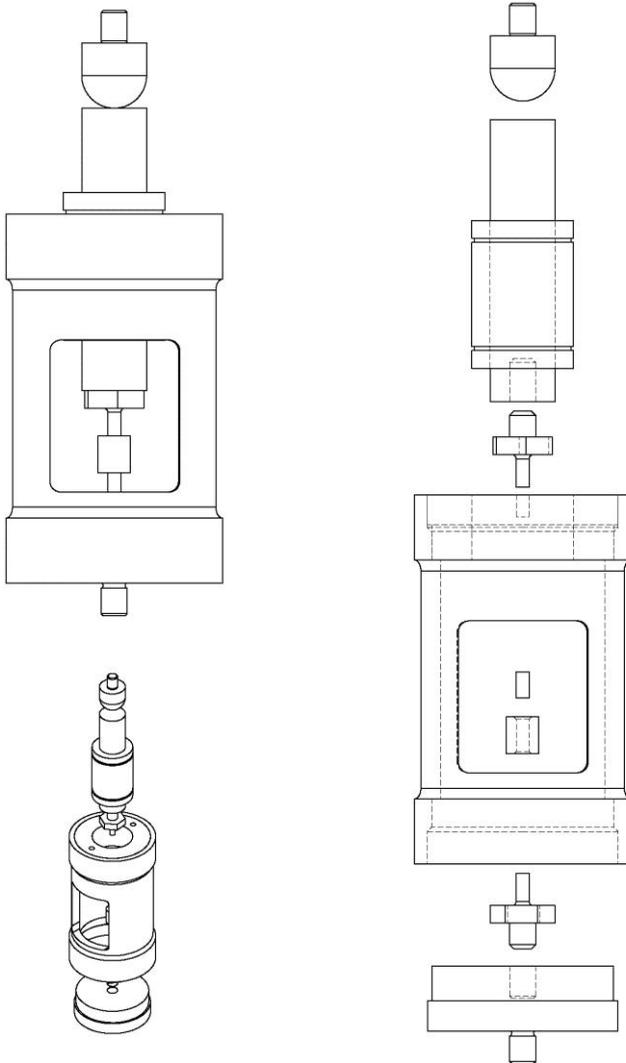
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 02	Lvdt	
projetista: Armin Sonnenhohl	materia:	des. nº Desenho 10e	A4
massa:	escala: 1:1	folha: 18 de 22	



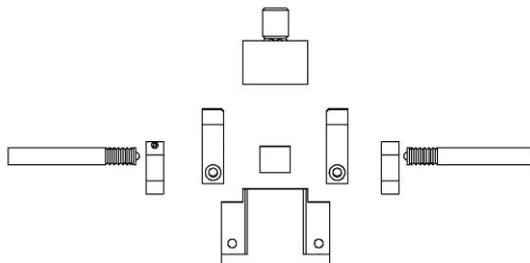
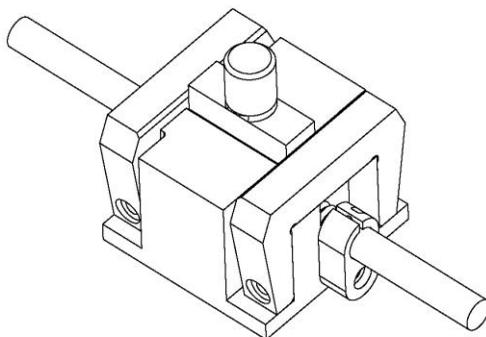
criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0.1mm	quantidade: 05	cp - compressão 6x12	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: UHMWPE	des. nº Desenho 11a	A4
massa: 0.3 g	escala: 5:1	folha: 19 de 22	



criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	quantidade: 05	CP - canaleta	
projetista: Armin Sonnenhohl	material: UHMWPE	des. nº Desenho 12a	A4
massa:	escala: 2:1	folha: 20 de 22	



CRIAÇÃO: 28/05/2014 SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: 0,1mm	REVISÃO: 04/08/2014 QUANTIDADE: 01	TÍTULO: Disp. Compressão	
PROJETISTA: Armin Sonnenhohl	MATERIAL:	DES. Nº Montagem 01	A4
	MASSA: 4897 g	ESCALA: 1:5	FOLHA: 21 de 22



criação: 28/05/2014	revisão: 04/08/2014	título:	
	quantidade: 01	Disp. Canaleta	
projetista: Armin Sonnenhohl	material:	des. nº	A4
massa: 94 g	escala: 1:2	folha: 22 de 22	