

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

EDUARDO SHOITI SATO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E SIMULAÇÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DA POLIURETANA DERIVADO DO
ÓLEO DA MAMONA ENRIQUECIDO COM 10% DE CARBONATO DE
CÁLCIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

EDUARDO SHOITI SATO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E SIMULAÇÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DA POLIURETANA DERIVADO DO
ÓLEO DA MAMONA ENRIQUECIDO COM 10% DE CARBONATO DE
CÁLCIO**

Proposta de Trabalho Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Shoiti Sato

Caracterização mecânica e simulação do comportamento mecânico da poliuretana derivado do óleo da mamona enriquecido com 10% de carbonato de cálcio

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:0hs do dia 12/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Romeu Rony Cavalcante da Costa – Presidente (Orientador)
Prof.(a) Orientador(a)

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Ferneda – (Membro)

Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior – (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao Ikeda Sensei,
à minha família, minha eterna
companheira e todos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Tenho plena ciência de que este pequeno espaço e alguns parágrafos não são suficientes para agradecer a todas as pessoas que contribuíram, não só para a realização deste trabalho, mas também para a minha formação em todos os aspectos, os quais me permitiram cumprir mais uma etapa.

Primeiramente, agradeço ao meu mestre, Dr. Daisaku Ikeda, quem me ensinou o verdadeiro caminho da revolução humana e mostrou que é possível transformar e vencer qualquer situação, baseado na fé, ação corajosa e determinação.

Agradeço a toda minha família, a qual sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos para a materialização desta etapa.

Agradeço sinceramente aos meus pais, Kiyoshi Sato e Noêmia Tizuko Nakaie Sato que souberam, com o diálogo, postura e sabedoria, me mostrar o caminho da perseverança, honestidade e coragem. Agradeço profundamente todo o carinho, confiança e condições por todas as oportunidades proporcionadas sem poupar quaisquer esforços.

Ao meu irmão, Leandro Yuji Sato, por se fazer presente, mesmo em longínquas distâncias, pelo companheirismo e confiança em minha pessoa.

A minha companheira Amanda Sayuri Guimarães por todo amor, companheirismo e confiança dedicado principalmente à minha pessoa, transmitidos através de suas pequenas, grandes, porém nobres atitudes. Agradeço também, a todos seus familiares, Braga Barbosa Guimarães, Alice Fukuyo Guimarães, Thais e Gustavo por toda a compreensão e diálogos nesta fase.

Ao Professor Romeu Rony Cavalcante da Costa pela confiança e oportunidade dada em minha formação acadêmica, desde a orientação no projeto de iniciação científica, bem como no presente trabalho. Agradeço sinceramente toda a experiência e conhecimento repassados com sincero sentimento de formar pessoas de valor e toda a sua paciência durante este processo.

Ao Professor Amauri Bravo Ferneda pelas conversas e considerações sempre tão calorosas, as quais demonstram seu sincero respeito a todas as pessoas.

Ao Professor José Aparecido Lopes Júnior pela sua disposição, com sentimento de contribuir sempre que possível.

Ao amigo e colega de trabalho Marcos Vinícios Hiroshi Taguti pela amizade e paciência, bem como a transmissão de conhecimento e experiência.

A Soka Gakkai, organização que proporciona o meu desenvolvimento pessoal e a todos os companheiros que dela fazem parte, pela amizade e confiança em todos os momentos. Agradeço também, ao grupo Gajokai, no qual aprendi sobre o espírito de “Jamais ser derrotado!”; ao grupo YakuShin, grupo do Dinâmico Avanço formado por companheiros que fortalecem meu espírito e se faz presente em todos os momentos.

A UFSCAR e ao Professor Rodrigo Bresciani Canto pela permissão na utilização do software ABAQUS®.

Ao colega Danilo Montilha pelo ensinamento da técnica de correlação de imagens.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todas as condições oferecidas em prol da educação e formação profissional.

“A verdadeira grandiosidade significa que, mesmo que tenham se esquecido do que fizeram pelos outros, nunca se esqueçam do que os outros fizeram por você e sempre façam o máximo para pagar suas dívidas de gratidão. Pessoas assim irradiam integridade, profundidade de caráter, um coração nobre e encanto.”

(Jossei Toda)

“Seja como for, a grandiosa Revolução Humana de uma única pessoa irá um dia impulsionar a mudança total do destino de um país e, além disso, será capaz de transformar o destino de toda a humanidade!”

(Dr. Daisaku Ikeda)

“Jamais ser derrotado!”

RESUMO

SATO, Eduardo. S. **Caracterização mecânica e simulação do comportamento mecânico da poliuretana derivado do óleo da mamona enriquecido com 10% de carbonato de cálcio**. 2015. 108 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) em Engenharia Mecânica – Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Cada vez mais, buscam-se soluções para os problemas ambientais e de escassez de matéria prima para sua utilização no cotidiano. Assim, materiais obtidos de fontes renováveis vêm sendo estudados para uma possível substituição dos comercializados atualmente. Os polímeros apresentam uma vasta aplicação devido as suas propriedades e os biopolímeros atendem as necessidades provenientes do consumo e descarte exacerbado. Neste contexto, a poliuretana torna-se uma opção interessante, contudo para sua correta aplicação, faz-se necessário caracterizá-la e obter seu comportamento mecânico. Neste trabalho, foram realizadas análises a fim de compor um estudo da poliuretana enriquecida com 10% de carbonato de cálcio, através de ensaios monotônicos de tração, compressão e flexão, em conjunto de simulação em software computacional. Foram aplicados os modelos de Drucker-Prager, e o de von Mises, com critério para viscoplasticidade. Por fim, os resultados experimentais e obtidos por análise computacional foram comparados e a validação dos mesmos foi discutida.

Palavras-chaves: Biopolímero. Poliuretana. Carbonato de cálcio. Ensaio mecânicos. Comportamento mecânico. Extensometria óptica por correlação de imagens. Análise computacional.

ABSTRACT

SATO, Eduardo. S. **Mechanical characterization and simulation of the mechanical behavior of polyurethane derived from the castor oil enriched with 10% calcium carbonate.** 2015. 108 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) em Engenharia Mecânica – Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Increasingly, they are seeking solutions to environmental problems and shortage of raw materials for use in daily life. Thus, obtained from renewable materials have been studied for a possible replacement of currently marketed. The polymers have wide application due to their properties and biopolymers meet the needs arising from the use and disposal exacerbated. In this context, the polyurethane becomes an interesting option, but for its proper application, it is necessary to characterize it and get their mechanical behavior. In this work, we carried out analyzes in order to compose a study of polyurethane enriched with 10% calcium carbonate through monotonic testing of tensile, compression and bending simulation set in computer software. Models of Drucker-Prager were applied, and the von Mises criterion with Viscoplasticity. Finally, the experimental results obtained by computer analysis were compared and the validation thereof was discussed.

Keywords: Biopolymer. Polyurethane. Calcium carbonate. Mechanical tests. Mechanical behavior. Extensometry by optical correlation images. Computational analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do monômero e polímero de polietileno	21
Figura 2 - Reação de obtenção do uretano	22
Figura 3 - Reação de síntese do poliuretano	23
Figura 4 - Curva tensão-deformação sob tração	25
Figura 5 - Comportamento dúctil e frágil descritos na curva-deformação sob tração	26
Figura 6 - Efeito da taxa de deformação nas curvas tensão-deformação.....	27
Figura 7 - Modelo de Maxwell como elementos em série e resposta a uma solicitação de onda quadrada	29
Figura 8 - Modelo de Voigt como elementos em paralelo e resposta a uma solicitação de onda quadrada	31
Figura 9 - Modelo de Maxwell-Voigt e curva-resposta	32
Figura 10 - Superfície de fluência de von Mises	36
Figura 11 - (a) Estado triaxial de tensões (b) variação de volume (c) distorção	37
Figura 12 - Superfície de escoamento para o modelo Drucker Prager uniaxial e tridimensional	41
Figura 13 - Comparação entre a superfície de escoamento de von Mises e Drucker-Prager	42
Figura 14 - Estrutura para fabricação do molde de silicone	46
Figura 15 - Bomba de vácuo	47
Figura 16 - (a) Molde flexível de tração e sua matriz (b) Molde flexível de compressão e sua matriz (c) Molde flexível de flexão e sua matriz	48
Figura 17 - Dimensões do corpo de prova de tração - ASTM D638 (tipo 1)	52
Figura 18 - Posicionamento do CDP de tração na máquina de ensaios.....	53
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova de compressão - ASTM D695 - 96	54
Figura 20 - Dimensões do corpo de prova de flexão - ASTM D790	55
Figura 21 - Dispositivo de flexão	55
Figura 22 - Posicionamento das marcações utilizadas nos ensaios de (a) compressão e (b) flexão	57
Figura 23 - Superfície de escoamento do modelo de Drucker-Prager	60
Figura 24 - Geometria utilizada na simulação de tração	62
Figura 25 - Geometria utilizada na simulação de compressão	64
Figura 26 - Geometria utilizada na simulação de flexão	65
Figura 27 - Comparação entre as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira sob tração	69
Figura 28 - Obtenção do módulo de elasticidade através de ajuste linear	70
Figura 29 - Obtenção do coeficiente de Poisson através de ajuste linear	73
Figura 30 - Diagrama tensão-deformação verdadeira para todos os CDPs.	74
Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova de compressão antes e depois do ensaio ser realizado	75
Figura 32 - Diagrama tensão-deformação engenharia de compressão	76
Figura 33 - Variação da geometria do corpo de prova durante o ensaio de compressão.....	77
Figura 34 - Diagrama tensão-deformação verdadeira	78

Figura 35 - Comparação da curva tensão-deformação de engenharia e verdadeira.....	79
Figura 36 - Diagrama deformação transversal vs. deformação longitudinal verdadeira e ajuste linear para a obtenção do coeficiente de Poisson	80
Figura 37 - Deformação distribuída no corpo de prova de compressão	81
Figura 38 - Diagrama força-deslocamento gerado no ensaio de flexão	82
Figura 39 - Diagrama força-deslocamento de flexão após o ajuste polinomial.....	83
Figura 40 - Diagrama tensão-deformação de flexão.	85
Figura 41 - Comparação do deslocamento do travessão da máquina e o método de correlação de imagens para o ensaio de flexão	86
Figura 42 - Geometria utilizada na simulação de tração antes e depois da aplicação dos métodos	91
Figura 43 – Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob tração	92
Figura 44 - Geometria utilizada na simulação de compressão antes e depois da aplicação dos métodos	94
Figura 45 – Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob compressão	95
Figura 46 - Geometria utilizada na simulação de flexão antes e depois da aplicação dos métodos	97
Figura 47 - Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob flexão	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos moldes flexíveis.....	47
Tabela 2 - Valores das propriedades mecânicas de tração	73
Tabela 3 - Valores das propriedades mecânicas de compressão.....	80
Tabela 4 - Valores médios das propriedades obtidas nos ensaios de flexão.....	85
Tabela 5 - Valores médios obtidos pela extensometria óptica por correlação de imagens para ensaio de flexão.....	87
Tabela 6 - Parâmetros do modelo de Drucker-Prager	89
Tabela 7 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de tração	91
Tabela 8 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de compressão	94
Tabela 9 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de flexão	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ASTM - American Society for Testing and Materials

CDP - Corpo de prova

EVA - Espuma Vinílica Acetinada

MDI - Difenilmetano Diisocianato

MEF - Método de Elementos Finitos

PMMA - Polimetil-metacrilato

PU - Poliuretana

$CaCO_3$ - Carbonato de Cálcio

PU10% $CaCO_3$ - poliuretana com adição de 10% de carbonato de cálcio em massa

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{eng} - tensão de engenharia

ε_{eng} - deformação de engenharia

σ_v - tensão verdadeira

ε_v - deformação verdadeira

η - viscosidade

E - módulo de elasticidade ou módulo de Young

F - carga aplicada

A_0 - área da seção transversal inicial

A - área da seção transversal instantânea

w_i - largura instantânea

t_i - espessura instantânea

ν - coeficiente de Poisson

h_0 - comprimento inicial do corpo de prova;

Δh - variação do comprimento do corpo de prova.

D_0 - diâmetro inicial do corpo de prova;

D - diâmetro instantâneo do corpo de prova;

$\varepsilon_{long}^{c,v}$ - deformação longitudinal verdadeira sob compressão

$\varepsilon_{transv}^{c,v}$ - deformação transversal verdadeira sob compressão

σ_{verd}^c - tensão verdadeira sob compressão

σ^f - tensão devido à flexão

E^f - módulo de Elasticidade transversal devido à flexão

I - momento de inércia do corpo de prova.

ψ - ângulo de dilatação do material

β - ângulo de atrito interno do material

d - coesão do material

E^t - módulo de Elasticidade instantâneo

ε_p - deformação plástica

ε_t - deformação verdadeira total

σ_{av} - tensão verdadeira atuante no regime plástico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 Objetivo geral	20
1.1.2 Objetivos específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 POLIURETANO	21
2.2 BIOPOLÍMERO	23
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	24
2.4 MODELOS MECÂNICOS	27
2.4.1 Modelos reológicos	28
2.4.1.1 Modelo de Maxwell	29
2.4.1.2 Modelo de Voigt.....	30
2.4.1.3 Modelo de Maxwell-Voigt.....	32
2.4.2 Relações Constitutivas	33
2.4.2.1 Teoria da Plasticidade	34
2.4.2.2 Critério de plastificação de von Mises para modelo viscoplástico	35
2.4.2.3 Modelo de Drucker-Prager	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	43
3.1.1 Borracha de silicone.....	43
3.1.2 Poliuretana.....	44
3.1.3 Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$).....	44
3.2 METODOLOGIA	45
3.2.1 Fabricação dos moldes de silicone.....	46
3.2.2 Fabricação dos corpos de prova.....	49
3.2.3 Ensaio monotônicos.....	51
3.2.3.1 Ensaio monotônico de tração.....	51
3.2.3.2 Ensaio monotônico de compressão	53
3.2.3.3 Ensaio monotônico de flexão	54
3.2.4 Extensometria óptica por correção de imagens	56
3.2.5 Simulação computacional dos modelos de tração, compressão e flexão	59

3.2.5.1 Simulação do ensaio de tração.....	62
3.2.5.2 Simulação do ensaio de compressão.....	63
3.2.5.3 Simulação do ensaio de flexão.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÔNICOS.....	67
4.1.1 Resultados dos ensaios monotônicos de tração.....	67
4.1.2 Resultados dos ensaios monotônicos de compressão.....	74
4.1.3 Resultados dos ensaios monotônicos de flexão.....	81
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	87
4.2.1 Parâmetros para o modelo de Drucker-Prager.....	87
4.2.2 Parâmetros para o modelo de von Mises.....	89
4.2.3 Resultados das simulações de tração.....	90
4.2.4 Resultados das simulações de compressão.....	93
4.2.5 Resultados das simulações de flexão.....	96
5 CONCLUSÃO.....	100
REFERÊNCIAS.....	102
ANEXO A - FICHA DE INFORMAÇÕES SOBRE PRODUTOS QUÍMICOS CARBONATO DE CÁLCIO 105	
ANEXO B – TABELA DE EQUIVALÊNCIA DA ABERTURA DE MALHA E TAMIS.....	107

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros derivados do petróleo trouxeram uma solução à sociedade e esta originou um novo desafio. Seu elevado consumo e descarte incorreto tornou-se uma preocupação devido ao seu longo tempo de decomposição que vêm gerando impactos negativos ao meio ambiente.

Antes da primeira Revolução Industrial o lixo produzido nas residências era composto basicamente de matéria orgânica, dessa forma era fácil eliminá-los, bastava enterrar, além disso, as cidades eram menores e o número da população restrita. (SANTOS, 2010). A industrialização trouxe consigo a produção em larga escala, como também o aumento de produtos consumidos que conseqüentemente geram maior quantidade de resíduos.

O plástico representa um grande avanço tecnológico e estima-se que sua produção mundial seja de 200 milhões de toneladas por ano. Não é sem razão que já se convencionou chamar o nosso tempo de “Era do Plástico”. O plástico evoluiu da posição de sucedâneo à de matéria prima essencial para uns cem números de especificações, e a cada nova necessidade da vida moderna logo emerge das provetas um material sintético mais racional, mais abundante, mais uniforme, mais econômico (RAMALHO, 2009).

A maioria dos plásticos não são biodegradáveis o que significa que eles levarão um longo tempo para se decomporem. Além disso, é preciso quantidades significativas de combustível fóssil para fazer plásticos, tanto como matéria prima como energia para fabricá-los. Sua fabricação exige uma boa quantidade de água, produzindo resíduos e a emissão de gases estufa (SANTANA, 2009). Sua utilização incorreta e seu tempo de degradação têm gerado sérios danos ao meio ambiente.

Por isso, têm-se buscado a utilização por materiais poliméricos de fontes renováveis e de compostos inorgânicos derivadas de fontes vegetais, tornando-se uma das maiores áreas de interesse (SILVA, 2003). Preocupando-se com este cenário atual, a cobrança das leis ambientais foi outro motivo que intensificou ainda mais essa busca.

As plantas oleaginosas tem sido uma boa alternativa. O óleo de soja é utilizado na produção de biodiesel, podendo ser misturado em altas proporções no diesel de petróleo, diminuindo assim significativamente a emissão de poluentes na atmosfera (MARQUES, 2009).

Nesse sentido, os materiais derivados de fontes renováveis, como os poliuretanos derivado do óleo de mamona, mostram-se promissor no desenvolvimento de compósitos para aplicação como material de engenharia, devido a sua densidade e capacidade de isolamento térmico ser compatíveis com as encontradas nos poliuretanos derivados do petróleo (PLEPIS, 1991; NETO, 1997).

Em 1984, o Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos da USP iniciou estudos e pesquisas com polímeros oriundos de matérias-primas renováveis, sendo coordenado pelo professor Gilberto Chierici. O poliuretano derivado do óleo da mamona é o principal deles. Atualmente o poliuretano é fornecido pela empresa POLIQUIL®, desde 1993, na qual o produto primordial de pesquisas e desenvolvimento é o “Composto Ósseo de Rícino – COR”, um biopolímero de poliuretana produzido a partir do óleo vegetal da mamona - *Ricinus communis* e atua como um enxerto ósseo por substituição metabólica.

Além disso, a mamona (*Ricinus communis* L.), pertence à família Euphorbiaceae, que engloba vasto número de tipos de plantas nativas da região tropical. O óleo de mamona ou de rícino, extraído pela prensagem das sementes, contém 90% de ácido graxo ricinoléico, o que confere ao óleo suas características singulares, possibilitando ampla gama de utilização industrial, tornando a cultura da mamoneira importante potencial econômico e estratégico ao País. (SAVY, 2001).

Pelos motivos acima citados, este trabalho visa coletar as propriedades mecânicas de tração, compressão e flexão do poliuretano derivado do óleo da mamona sendo associado em sua composição o carbonato de cálcio, formando assim um novo compósito, e simulá-lo com o auxílio de ferramentas computacionais confrontando o estudo teórico com o experimental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é caracterizar o poliuretano derivado do óleo de mamona enriquecido com 10% de carbonato de cálcio, através de ensaios monotônicos de tração, compressão e flexão. Em seguida, simular o comportamento mecânico do material em um pacote computacional (disponível na instituição, Ex.: Solidworks) que possibilite comparar os resultados numéricos com os experimentais.

1.1.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, devem-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Fabricar moldes abertos flexíveis em silicone translúcido;
- Produzir os corpos de prova em poliuretano enriquecido com 10% de carbonato de cálcio;
- Realizar ensaios experimentais monotônicos de tração utilizando extensômetros eletrônicos e ensaios experimentais de compressão e flexão com auxílio da extensometria óptica por correlação de imagens;
- Analisar os dados obtidos;
- Simular dados com auxílio computacional;
- Confrontar resultados teóricos obtidos da simulação e resultados experimentais obtidos dos ensaios monoatômicos de tração realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLIURETANO

A fim de ressaltar a versatilidade do material para uma abordagem não somente científica, mas de custos e problemas socioambientais, CANGEMI (2009) abordou sobre o surgimento do poliuretano e suas mais recentes aplicações.

Conhecidos como PUs, os poliuretanos são combinações de diversas moléculas mais simples (monômeros) que dão origem a compostos mais complexos nomeados de ligação uretana, Figura 1. Os monômeros mais utilizados são os isocianatos e polióis (CORDEIRO, 2010).

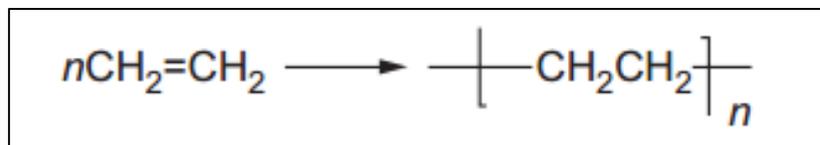


Figura 1 - Representação do monômero e polímero de polietileno
Fonte: Natural and Synthetic Biomedical Polymers (2014)

Em 1849, foi divulgado por Wurtz a síntese em laboratório de uma substância que denominou uretano (ou uretana), sendo este o produto da reação química entre um grupo de isocianato e outra substância com o grupo hidroxila (VILAR, 1999). A seguir, a reação de obtenção do uretano apresentada na Figura 2.

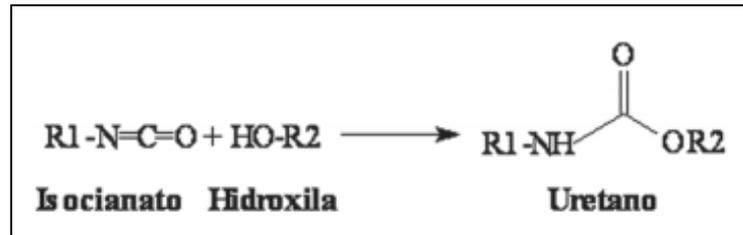


Figura 2 - Reação de obtenção do uretano

Fonte: Natural and Synthetic Biomedical Polymers (2014)

Apesar dessa descoberta, esta teve sua aplicação somente no século XX, após Otto Bayer desenvolver na Alemanha os primeiros polímeros PUs na década de 40. A quantidade de materiais desenvolvidos com esse tipo de polimerização cresceu enormemente, a ponto de abranger diferentes segmentos de aplicações no mais variados ramos da indústria. Após obter a fórmula exata, em meados de 1950, foi possível confeccionar espumas flexíveis para colchões e acolchoados e rígidas para aplicações técnicas. Apenas uma década depois, foi possível fabricar um material que serviria de isolante térmico ao acrescentar clorofluorcarbonos (CFC) nas espumas rígidas. Década após década, setores como o automobilístico, moldagem por injeção e reação (RIM) fez com que os PUs tivessem uma grande importância comercial. Nos anos 1990, iniciou-se a preocupação com o meio ambiente e o CFC foi renunciado pelas empresas, por ser considerados danosos à camada de ozônio estratosférico (VILAR, 1999). A inflamabilidade do material, outro aspecto este que assustava as pessoas encontra-se sanado, atendendo a todos os padrões de segurança contra fogo, que têm se tornado cada vez mais rigoroso (EMSLEY, 2001). A síntese da poliuretana é composta do diisocianato adicionado ao polioliol, como mostrado na Figura 3.

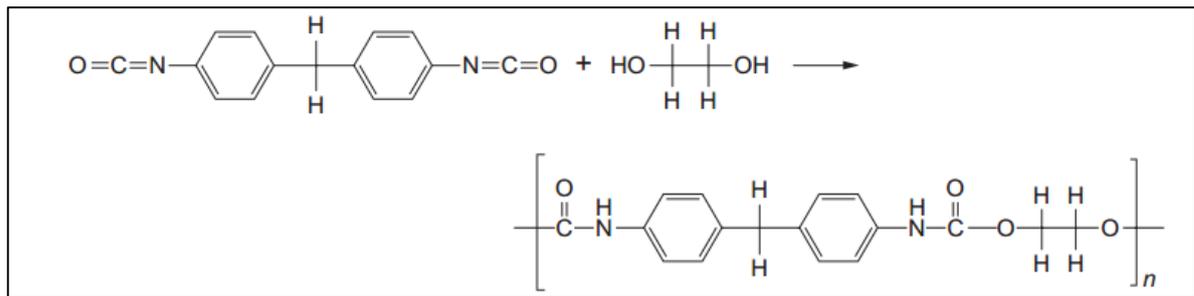


Figura 3 - Reação de síntese do poliuretano

Fonte: Natural and Synthetic Biomedical Polymers (2014)

A aplicação mais recente é a utilização do poliuretano como biomaterial. A dificuldade de se encontrar um material que apresente compatibilidade com o organismo humano se constitui num grande desafio para pesquisadores de novos materiais. O objetivo desses estudos está no desenvolvimento de materiais com propriedades químicas e mecânicas semelhantes no organismo.

2.2 BIOPOLÍMERO

O Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP – USP-São Carlos), desde 1984, desenvolve pesquisa pioneira com polímeros poliuretanos derivados do óleo de mamona com destaque para a aplicação na área médica. Esse material se demonstrou totalmente compatível com organismos vivos, não apresentando qualquer tipo de rejeição (OHARA e cols., 1995). Uma das aplicações desse polímero como biomaterial é seu uso como cimento ósseo para implantes de próteses e reparador de perdas ósseas (IGNÁCIO e cols., 1996).

Diferentemente de quando se está parado ao exercer um movimento, para caminhar, os pés recebem uma carga de compressão superior ao peso do corpo. Durante uma corrida, a força exercida pode ser cinco vezes superior ao peso corporal (VIDAL, 2014)

O cloreto de polivinila (PVC) apresenta algumas vantagens na sua aplicação em ortopedia como rigidez, modelagem de um formato específico durante o ato cirúrgico, estabilidade no processo de esterilização no calor e baixo custo. Contudo, este composto, PVC, desencadeia reações inflamatórias crônicas granulomatosas no tecido fibroso que envolve o implante, bem como sinais de toxicidade local no osso adjacente, sistêmico e no baço. Os metais, as cerâmicas e os polímeros tem uma atenção maior dentre os biopolímeros empregados na área médica. Estudos realizados apresentam um grande avanço no campo de biopolímeros como o polimetilmetacrilato, cloreto de polivinila (PVC) e o polímero extraído do óleo da mamona (*Ricinus comunis*), todos com vasta aplicação nas áreas médica, odontológica e biológica.

Mesmo não existindo um biopolímero ideal, por apresentar inúmeras vantagens, a resina do óleo da mamona tem sido foco de estudo de muitos pesquisadores. Sua fácil processabilidade, boa flexibilidade, excelentes propriedades estruturais, ausência de vapores irritantes e de reações inflamatórias do tipo corpo estranho, ausência de toxicidade, baixíssima hidrofília, pouca aderência bacteriana e fácil esterilização, é um material de excelente biocompatibilidade e de perfeita interação com o organismo (STURION, 1999).

A adição do carbonato de cálcio tem a função de fornecer os íons de cálcio, facilitando a troca iônica na interface do contato osso-resina. Além disso, por ser uma substância com pH alcalino, o mineral estimularia a resposta orgânica, liberando íons ácidos para normalizar a variação no pH.

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

De acordo com CANEVAROLO Jr., (2006), existem vários tipos de ensaios para caracterizar um material polimérico através da obtenção de suas propriedades mecânicas. Estes ensaios podem ser estáticos, dinâmicos, destrutivos, não-

destrutivos, de curta duração, de longa duração, entre outros. Grande parte dos ensaios mecânicos registram valores que compõem a curva tensão-deformação.

Os ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão são alguns dos tipos de ensaios mecânicos que fornece a curva tensão-deformação de forma estática. Os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica de modo a quantificar a resistência mecânica dos polímeros nestes tipos de ensaios são: o Módulo de Young ou de elasticidade (E), tensão de escoamento (σ_{esc}), tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e tenacidade. A Figura 4 representa os pontos importantes para obtenção desses parâmetros.

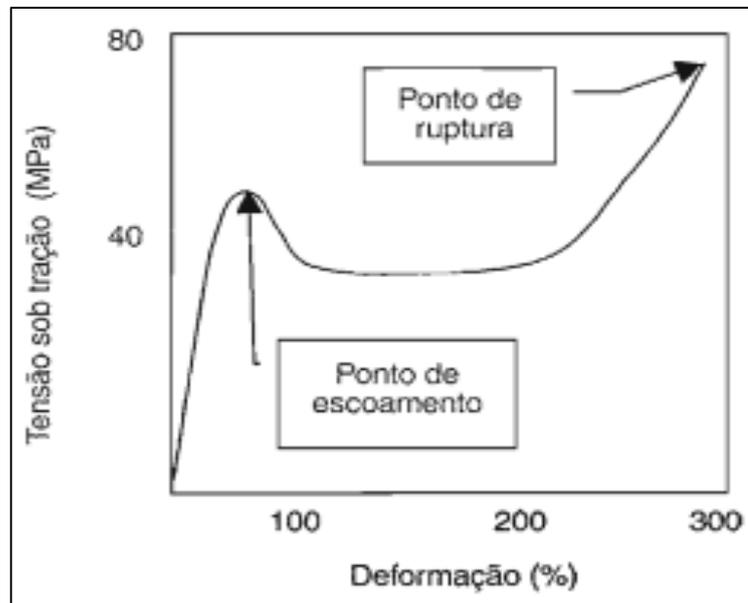


Figura 4 - Curva tensão-deformação sob tração

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

As tensões em qualquer região da curva são calculadas utilizando a razão entre a carga aplicada e a área de seção transversal. A tensão nominal ou de engenharia é composta por valores da área inicial, enquanto que a tensão verdadeira utiliza valores da área instantânea a aplicação da carga.

O módulo de Young ou de elasticidade (E) está diretamente ligado com a rigidez do polímero, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, maior sua rigidez.

Este é obtido pela inclinação da curva tensão-deformação em baixas deformações, ou seja, até aproximadamente 0,5% de deformação.

O comportamento mecânico dos polímeros pode ser facilmente visualizado observando a curva tensão-deformação. A Figura 5 ilustra dois diferentes tipos de polímeros sob tração, um com comportamento frágil e outro de comportamento dúctil.

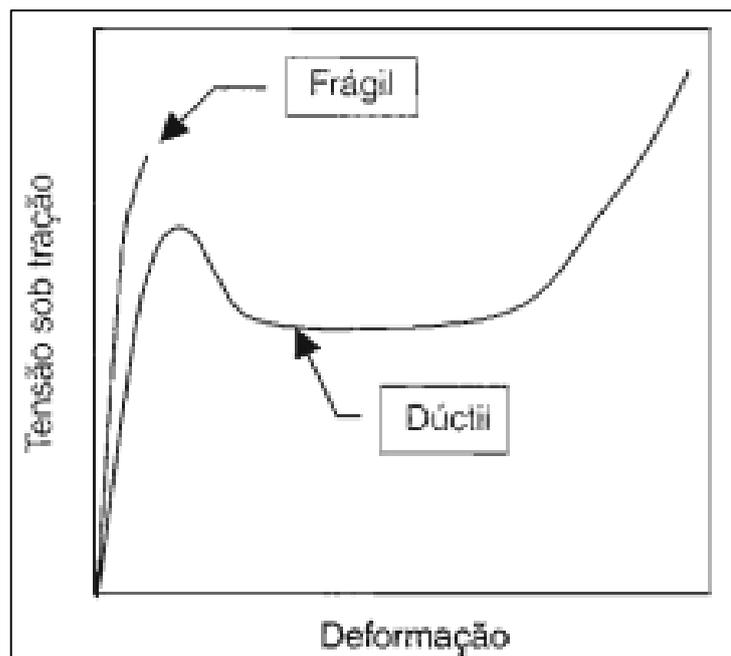


Figura 5 - Comportamento dúctil e frágil descritos na curva-deformação sob tração

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

O comportamento viscoelástico dos polímeros faz parâmetros, tais como tempo, temperatura e ambiente, afetem diretamente as propriedades dos polímeros. A influência do tempo, ou seja, da taxa de deformação sobre as curvas tensão-deformação, pode ser observado na Figura 6 e percebe-se que a tensão de escoamento cresce linearmente com o aumento do logaritmo da taxa de deformação. Quanto mais rápido o movimento de deformação, maior o módulo obtido.

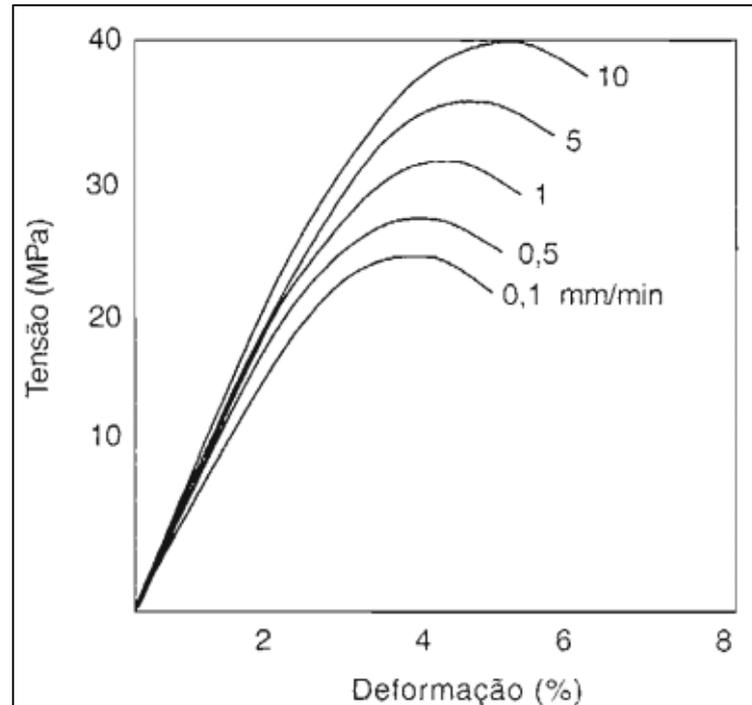


Figura 6 - Efeito da taxa de deformação nas curvas tensão-deformação
Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

2.4 MODELOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo como estes materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo ser do tipo tensão ou deformação. A resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e condições como histórico de processamento do polímero.

A estrutura molecular dos polímeros promove um comportamento viscoso como os líquidos, superposto com um comportamento elástico, como os sólidos Hookeanos (CANEVAROLO Jr., 2006). Assim define-se o comportamento viscoelástico dos polímeros que ocorre para plásticos e fibras.

Para representar fisicamente o comportamento viscoelástico de um polímero foram desenvolvidos modelos matemáticos. A fração elástica da deformação é

representado por uma mola, devido ao seu comportamento Hookeano, ($F = Kx$) que sofre uma deformação diretamente proporcional a tensão aplicada.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Já a fração plástica normalmente é representada por um amortecedor que utiliza o comportamento Newtoniano, ou seja, a tensão está diretamente relacionado com a taxa de deformação.

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

A tensão (σ) representa o amortecedor (pistão com fluido), a deformação (ε) refere-se à solicitação e o coeficiente viscoso (η) está relacionado ao atrito entre as moléculas poliméricas geradas durante a deformação. Os principais modelos são simplificados, porém permitem fazer uma previsão aproximada do comportamento físico-mecânico dos materiais poliméricos.

2.4.1 Modelos reológicos

A reologia investiga e expressa a relação entre tensão, deformação e velocidade de deformação. Pode-se prever o comportamento dos materiais submetidos a tensão, analisando os resultados sem se importar com a microestrutura do material. Assim, os modelos reológicos vêm para explicar o comportamento de um material representando por modelos simples (utilização de apenas um componente) ou combinações de modelos simples (utilização de componentes combinados). Os

modelos reológicos simples são formados por um só elemento como mola elástica (modelo de Hooke) ou pistão contendo líquido viscoso em seu interior (modelo de Newton). A seguir serão apresentados os modelos que combinam esses elementos, descritos pelo modelado de Maxwell, Kelvin e Maxwell-Voigt.

2.4.1.1 Modelo de Maxwell

Sugerida por Maxwell, o comportamento viscoelástico, dependente de duas componentes da deformação (elástica e plástica), o modelo é representado por uma associação em série de uma mola e um amortecedor como mostrado na Figura 7.

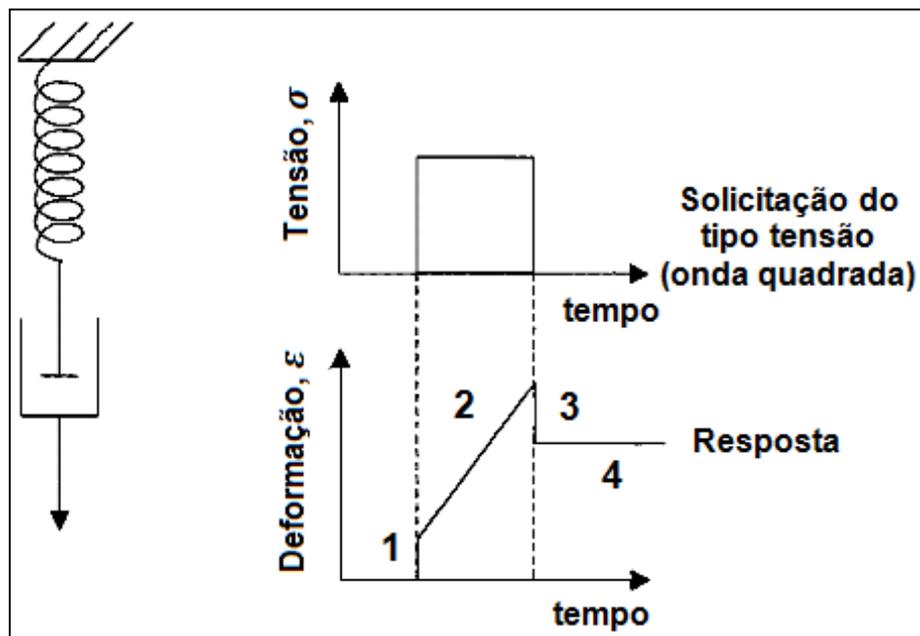


Figura 7 - Modelo de Maxwell como elementos em série e resposta a uma solicitação de onda quadrada

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

As porções enumeradas da curva deformação-tempo ($\varepsilon \times t$) são as respostas de modo independente de cada elemento, atribuídas:

1. Deformação elástica instantânea, referente à mola;
2. Deformação plástica dependente do tempo, referente ao amortecedor;
3. Recuperação elástica instantâneo total, referente à mola;
4. Deformação plástica residual (irrecuperável) referente ao amortecedor;

2.4.1.2 Modelo de Voigt

Outra maneira de associar os dois elementos, mola e amortecedor, é a proposta de Voigt que sugere a associação em paralelo. Quando aplicada a mesma solitação utilizada em Maxwell (tensão constante durante um intervalo de tempo), obtém-se a curva resposta na qual há a variação da deformação com o tempo como mostrado na Figura 8.

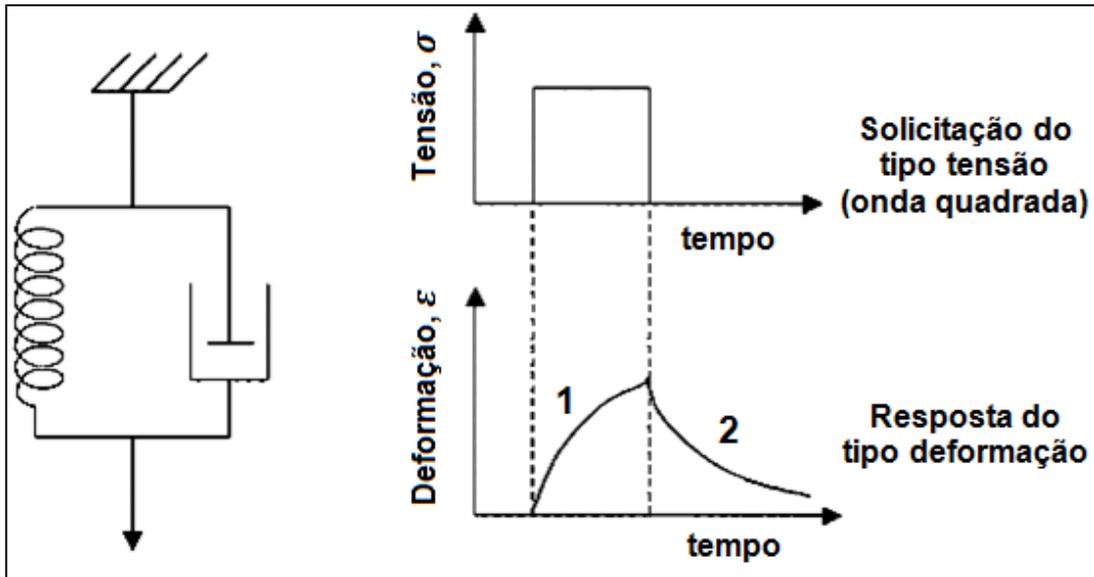


Figura 8 - Modelo de Voigt como elementos em paralelo e resposta a uma solicitação de onda quadrada

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

Cada porção da curva $\epsilon \times t$ é função da ação conjunta dos dois elementos, com as seguintes atribuições:

1. Deformação elástica retardada, por uma componente viscosa;
2. Recuperação elástica retardada pela mesma componente viscosa;

A recuperação total da deformação pode ocorrer, mas somente com um tempo muito longo, teoricamente infinito ($t \rightarrow \infty$).

2.4.1.3 Modelo de Maxwell-Voigt

Para aproximar ainda mais o comportamento real dos fluidos viscoelásticos, sugeriu-se a associação dos dois modelos apresentados anteriormente em série. Aplicada a mesma solicitação (tensão constante em um dado intervalo de tempo), obtém-se a curva $\varepsilon \times t$ representada na Figura 9.

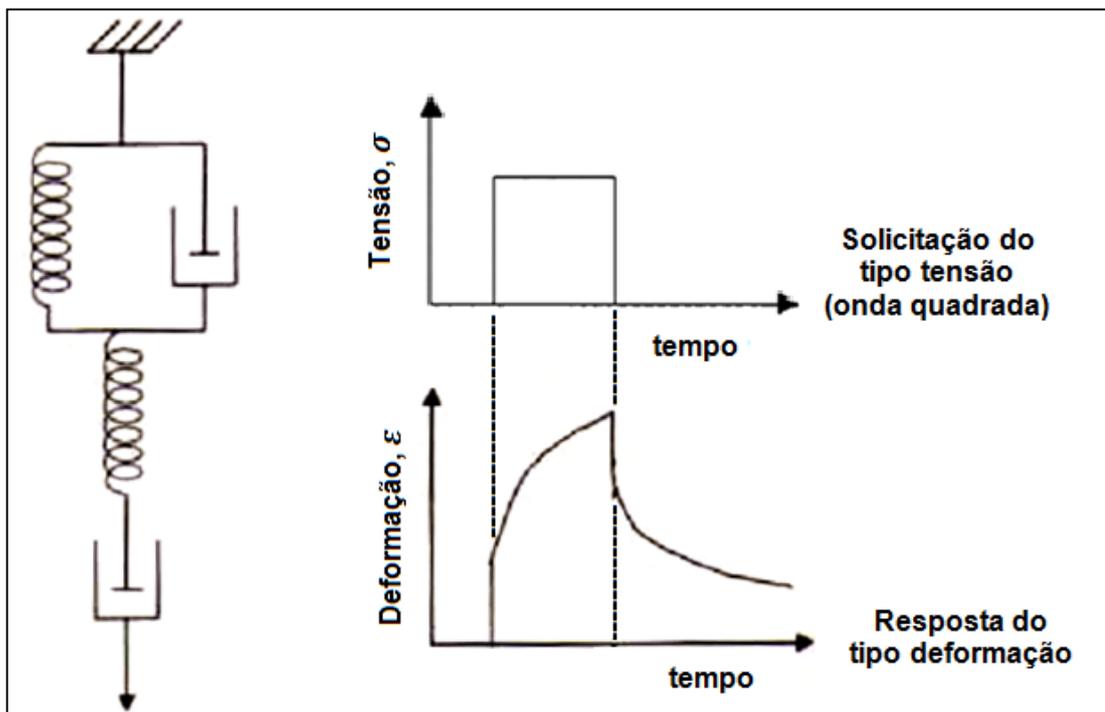


Figura 9 - Modelo de Maxwell-Voigt e curva-resposta

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

Cada porção da curva resposta é função de um elemento individual ou da ação conjunta de dois elementos. Esse modelo está mais próximo do comportamento real, que leva em conta a existência de uma resposta elástica instantânea e uma deformação plástica residual.

2.4.2 Relações Constitutivas

A solução linear de um problema pode ser obtida de tal forma que as equações de equilíbrio são verificadas na configuração final. Na engenharia, grande parte dos problemas devem ser analisados considerando a não-linearidade do material, o qual apresentam soluções mais complexas e ao contrário das soluções lineares, podem não apresentar uma solução única.

Como as características tensão-deformação dos materiais reais são demasiadamente complexas e suscetíveis a interferência de fatores como tempo, temperatura, condições ambientais, bem como as condições de análises (estático, dinâmico), então são utilizados diferentes modelos e estes devem ser idealizados para cada material levando em consideração as equações que descrevem o modelo matemático aplicado a modelagem.

Logo, a solução de problemas não-lineares é empregada em simulações numéricas e o conjunto destas relações matemáticas, ou equações constitutivas, denomina-se Relações Constitutivas.

As relações constitutivas baseiam-se em duas categorias:

- Modelos independentes do tempo: elasticidade e plasticidade;
- Modelos dependentes do tempo: viscoelasticidade e viscoplasticidade;

A seguir será apresentado um breve histórico da Teoria da Plasticidade, considerando alguns fundamentos até a aplicação de critérios utilizados na modelagem numérica e simulação.

2.4.2.1 Teoria da Plasticidade

Atualmente a aplicação da modelagem numérica e simulação atuam como uma grande ferramenta que visa facilitar as análises necessárias para descrever o comportamento dos materiais. Para os estudos do comportamento mecânico de um dado material, considerando os critérios de falhas foi desenvolvido a Teoria da Plasticidade, na qual está fundamentada nos trabalhos propostos por Henri Tresca, em 1868, onde os problemas de perfuração e extrusão levaram ao desenvolvimento do seu critério de escoamento (GOMES, I. F, 2006).

O critério de fluência foi observado por Coulomb em meados de 1773 com a definição de ruptura em um plano e sua aplicação no estudo de pressões de terra e muro de arrimo. Mais tarde, um novo critério para fluência foi enunciado por von Mises em 1913.

Os trabalhos de Mohr descreviam que os limites do comportamento elástico eram regidos pela combinação de tensões normais e cisalhantes, já uma abrangência maior para a teoria da plasticidade pode ser encontrado também, nos trabalhos de Prager (1959), Hogde (1959), Martin (1975), Johnson e Mellor (1983), entre outros. A aplicação da Teoria da Plasticidade nos métodos de elementos finitos (MEF) teve início por estudos realizados por Marçal e King (1967).

Após ser submetido a solicitações externas, o material sofre deformações reversíveis e irreversíveis ou de grande tempo de recuperação, estas caracterizadas pelas fases elástica e plástica, respectivamente. Pode-se dizer então, que o material apresenta um comportamento elastoplástico. Este tipo de comportamento elastoplástico é modelado de forma incremental, onde a carga total é aplicada em subpassos em conjunto a uma variável de tempo t , que descreve o regime da carga e o deslocamento do material.

Em uma análise elastoplástica necessita-se empregar conceitos do modelo elástico em conjunto de critérios da Teoria da Plasticidade. Consideram-se então algumas hipóteses básicas para a formulação dessa teoria, sendo essas:

- Decomposição Aditiva da Deformação;
- Caracterização elástica do modelo;
- Características plásticas do modelo (região das tensões plasticamente admissíveis);
- Evolução da Deformação plástica;
- Condições de Complementaridade e condições de consistência;

2.4.2.2 Critério de plastificação de von Mises para modelo viscoplástico

Como já visto, a Teoria da Plasticidade visa caracterizar um material e apresenta uma variedade de critérios elaborados após os estudos propostos por Tresca.

O critério de von Mises é um modelo de plasticidade associada e independente do terceiro invariante (ângulo de Lode). Este modelo é aplicado a materiais dúcteis como os metais, nos quais a plasticidade destes na superfície de fluência é independente da tensão média p , tendo como a seguinte função de fluência ($F(\sigma, \kappa)$), a equação abaixo.

$$F(\sigma, \kappa) = J - \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_y \quad (3)$$

Onde J representa a tensão desviadora, σ_y a tensão de fluência e κ o parâmetro de estado. A parcela $\sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_y$ representa o raio da superfície. A superfície de von Mises tem a forma de um cilindro circular no espaço de tensões principais, como apresentado na Figura 10.

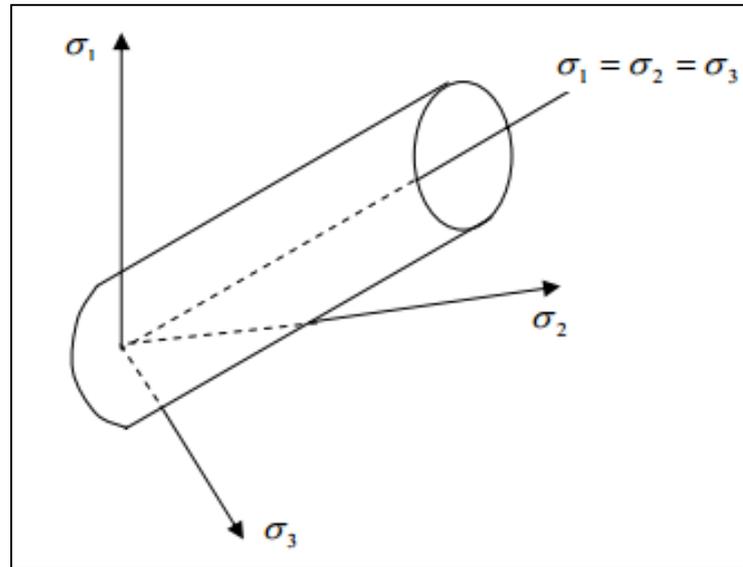


Figura 10 - Superfície de fluência de von Mises

Fonte: Gomes, I. F. (2006)

Assim, quando um material sofre deformação por carregamento externo, tende a armazenar energia internamente em seu volume. A energia por unidade de volume do material é chamada de densidade de energia de deformação e sujeita a uma tensão uniaxial, σ , essa densidade é escrita como:

$$u = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (4)$$

Como a densidade de deformação está submetida a três tensões principais σ_1, σ_2 e σ_3 , como apresentado na Figura 11:

$$U = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3 \quad (5)$$

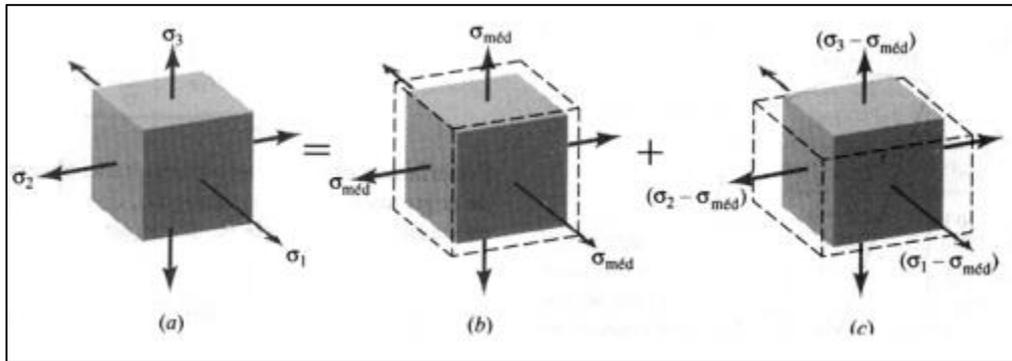


Figura 11 - (a) Estado triaxial de tensões (b) variação de volume (c) distorção

Fonte: Lima, L. R. O (2010)

Para o comportamento linear elástico o qual a Lei de Hooke pode ser aplicada e a nova expressão é dada por:

$$U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3\sigma_2)] \quad (6)$$

Esta equação da densidade de energia de deformação é considerada a soma de duas parcelas, uma das quais representa a energia necessária para provocar uma mudança de volume do elemento sem mudar sua forma; e a outra, a energia necessária para distorcer o elemento. A variação do volume é produzida pela tensão média, conhecido também por 1º invariante, dada por:

$$\sigma_{média} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (7)$$

Ensaio mostram que materiais não escoam quando submetido a pressões hidrostáticas, assim postulou-se que as tensões que realmente causam o escoamento são as tensões que produzem distorção. Tal hipótese constitui o critério de

escoamento (de falha) da energia de distorção máxima e quando as tensões que causam distorção são feitas as substituições, observar-se que:

$$U_d = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (8)$$

Como na tensão limite de escoamento, σ_{esc} , devido às considerações impostas de que $\sigma_1 = \sigma_{esc}$ e $\sigma_3 = 0$ a densidade de energia de distorção é:

$$(U_d)_{esc} = \frac{1}{6G} \sigma_{esc}^2 \quad (9)$$

Deste modo, o escoamento ocorre quando a energia de distorção para um carregamento geral iguala ou excede o valor de $(U_d)_{esc}$ resultando numa expressão final para o critério de falha de energia de distorção máxima que pode ser enunciada em termos de três tensões principais, também conhecida como 2º invariante:

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = \sigma_{esc}^2 \quad (10)$$

2.4.2.3 Modelo de Drucker-Prager

Para GARCIA (2009), o modelo constitutivo de Drucker-Prager consiste em modelos que descrever o comportamento elastoplástico, no qual o escoamento é controlado por uma combinação entre a tensão hidrostática e a tensão desviadora (desequilíbrio das tensões entre os diferentes eixos). Esse modelo é uma extensão e aperfeiçoamento do modelo de falha dos solos de Mohr-Coulomb (1773).

O comportamento plástico pode depender ou não da velocidade de aplicação da carga. Caso seja dependente da velocidade, denomina-se “rate dependent plasticity” ou viscoplástico. No caso independente da velocidade, denomina-se “rate independent plasticity”, caracterizados por deformações instantâneas e irreversíveis, sendo este o comportamento associado ao modelo de Drucker-Prager.

A caracterização do comportamento do modelo de Drucker-Prager necessita de três conceitos, sendo eles “yield criterion”, “flow rule” e “hardening rule” os uais podem ser traduzidos como critério de escoamento, fluência e endurecimento, respectivamente.

O critério de escoamento consiste em definir uma função de tensões que permita identificar se o material está no estado plástico ou elástico. No estado uniaxial, isto corresponde à condição $\sigma < \sigma_{esc}$. Para o caso do modelo tridimensional de Drucker-Prager, a superfície de escoamento pode ser definida como:

$$F = 3\alpha\sigma_m + \frac{\sigma_{eqv}}{\sqrt{3}} - \sigma_{esc} = 0 \quad (11)$$

sendo que:

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

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (13)$$

$$\sigma_{esc} = \frac{6(d)\cos\beta}{\sqrt{3}(3 - \text{sen } \beta)} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{2\text{sen}\beta}{\sqrt{3}(3 - \text{sen}\beta)} \quad (15)$$

Onde:

d : coesão do material;

β : ângulo de atrito interno;

A Figura 12, representa a forma da superfície de escoamento para o modelo de Drucker-Prager uniaxial e a superfície de escoamento no plano tridimensional das tensões principais.

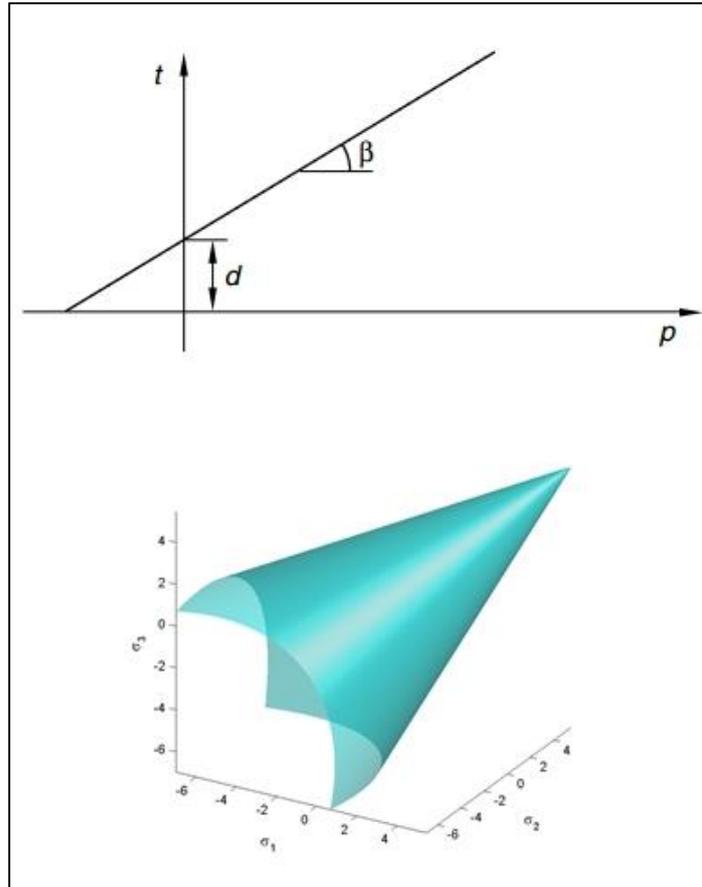


Figura 12 - Superfície de escoamento para o modelo Drucker Prager uniaxial e tridimensional

Fonte: ESSS (2009)

Pode-se fazer uma comparação da superfície de escoamento dos modelos de von Mises e Drucker-Prager, que estão representados na Figura 13.

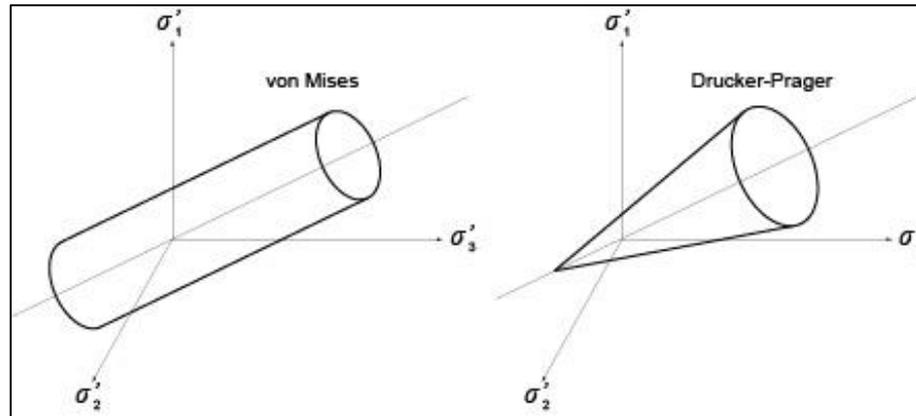


Figura 13 - Comparação entre a superfície de escoamento de von Mises e Drucker-Prager

Fonte: Gomes, I. F. (2006)

O segundo critério, denominado “flow rule”, corresponde à função que define a direção das deformações, no momento que o material alcança o estado de comportamento plástico. Em muitos casos, este parâmetro é igual ao critério de escoamento, denominando-se do tipo associativa, diferentemente do caso não associativa, quando os valores são diferentes.

O terceiro critério é o endurecimento o qual representa a mudança da superfície de escoamento de acordo com o incremento das deformações plásticas. Existem dois tipos de encruamento, o encruamento isotrópico e o encruamento cinemático. O comportamento elastoplástico corresponde a um encruamento nulo. Outro parâmetro importante é o ângulo de dilatação (ψ), gerado pela mudança volumétrica do material pelo crescimento das deformações plásticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Com a necessidade de realizar os ensaios de tração, compressão e flexão foram produzidos moldes abertos flexíveis de silicone translúcido a partir de uma matriz metálica, seguidas da fabricação dos corpos de prova adicionados de 10% de carbonato de cálcio. Para isso, utilizou como materiais a borracha de silicone, poliuretana derivada do óleo da mamona e o carbonato de cálcio.

3.1.1 Borracha de silicone

O silicone EZSIL – 44 é uma borracha de silicone translúcida de cura por poliadição, na forma de bicomponente, sendo a borracha de silicone (componente A) e catalisador (componente B), com dureza de 40 Shore A. Ideal para fabricar moldes que permitem a visibilidade caso seja necessário cortar ou retirar o modelo. Além disso, a borracha de silicone EZSIL – 44 apresenta grau alimentar, alta resistência química e mecânica, sendo indicada para a fundição de resinas de poliuretano, poliéster e epóxi. Sua composição apresenta-se na forma líquida, livre de toxinas e seu processo de fabricação consiste em se combinar os componentes A e componente B na proporção de 10:1, respectivamente.

3.1.2 Poliuretana

Os polióis (compostos hidroxilados) são componentes essenciais na síntese do poliuretano e são encontrados na forma de poliésteres. Sua estrutura produz poliuretanos que apresentam propriedades térmicas e tolerância a substâncias corrosivas. Juntamente com a massa molecular e a funcionalidade, a estrutura do poliéster são fatores principais na determinação das propriedades do polímero. (Silvestre Filho, 2001)

A poliuretana utilizada na fabricação dos corpos de provas foi sintetizada e fornecida pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos – USP. Classificado como um biopolímero, a poliuretana apresenta-se na forma de biocomponente, sendo elas, o polioliol e o pré-polímero que são identificadas pelo fornecedor como 471 e 329L, respectivamente. Após a cura, o biopolímero possui uma massa específica de aproximadamente 1,1 g/cm³.

O processo de pré-polimerização com um polioliol, aumenta sua massa molecular e deixa uma porcentagem de isocianato livre para reagir com o polioliol final. Os compostos que contêm grupos isocianatos são encontrados em duas classes distintas e o pré-polímero utilizado neste trabalho foi sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato (MDI) e de um polioliol derivado do óleo da mamona.

3.1.3 Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$)

O carbonato de cálcio utilizado como carga adicional, provém da marca SYNTH®, identificado pelo fabricante como 01C1004.01.AH, com peso molecular de 100,9 g/mol. Considerado um material branco, inodoro, não corrosivo, atóxico, não inflamável e de baixa solubilidade em água, caracteriza-se por ser um pó fino de densidade de 2,83 g/cm³, com ponto de fusão de 850 °C de número de registro 471-

34-1. Possui uma estrutura molecular tetraédrica e resulta da reação do óxido de cálcio com dióxido de carbono representada na Equação 16 abaixo. A ficha técnica com as demais informações do material se encontra no ANEXO A.



3.2 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho divide-se em diversas etapas e inicia-se com a fabricação dos moldes abertos flexíveis de silicone translúcido, dando assim possibilidade para a produção de três tipos de corpos de prova em poliuretana distintos, sendo estes, tração, compressão e flexão, enriquecidos com 10% de carbonato de cálcio.

Logo após o processo de fabricação empregado para a obtenção dos CDPs, foram realizados os devidos ensaios experimentais monotônicos de tração, compressão e flexão. Ressalta-se a extensometria óptica por correlação de imagens realizadas nos ensaios de compressão e flexão diferentemente dos ensaios de tração, que utilizou um extensômetro transversal e um longitudinal.

A próxima etapa consiste em uma análise computacional dos modelos para a validação dos mesmos.

3.2.1 Fabricação dos moldes de silicone

Para a fabricação dos corpos de prova de tração, compressão, e flexão confeccionam-se primeiramente os moldes flexíveis de silicone a partir de uma matriz metálica. Este processo foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) do Departamento da Mecânica, localizado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Neste processo, foi posicionada a matriz metálica em uma superfície de vidro e ao seu redor foi colado barras de alumínio visando delimitar a estrutura do molde. O modelo do corpo de prova foi lubrificado com vaselina para que o mesmo não grude com a mistura de silicone. A Figura 14 abaixo, mostra a montagem para o corpo de tração.



Figura 14 - Estrutura para fabricação do molde de silicone

Fonte: Autoria própria

Com uma balança de precisão SHIMADZU, modelo BL3200H, de capacidade mínima de 0,5g e máxima de 610g, com sensibilidade de 0,01g foi medido a quantidade de borracha de silicone (componente A) e o catalisador (componente B) em uma proporção estequiométrica de 10A: 1B, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição dos moldes flexíveis

Componente	Proporção	Massa (g)
Borracha de silicone	10	76
Catalisador	1	7,6

Fonte: Aatoria própria

Logo após, mistura-se manualmente até a completa homogeneização do composto silicone/catalisador e em seguida o coloca na bomba de vácuo EDWARDS, modelo RV8, de série A65401903, com capacidade de pressão de 0,2 MPa e vazão de ar 11,7m³/h, Figura 15, por cerca de três minutos para acelerar a formação de bolhas.



Figura 15 - Bomba de vácuo

Fonte: Aatoria própria

Por fim, aplica-se uma folha plástica na superfície da mistura com o objetivo de retirar o excesso de material, assegurando um bom acabamento e o submete à pressão positiva de 3 Kgf/cm² em um vaso de pressão com capacidade de 15 Kgf/cm², com a finalidade de diminuir ainda mais as bolhas formadas durante o processo de cura. A cura total do silicone foi de aproximadamente 9 horas.

Analogamente, os moldes flexíveis de compressão e flexão, foram também confeccionados a partir de uma matriz metálica apresentadas em conjunto com seus respectivos moldes flexíveis na Figura 16.

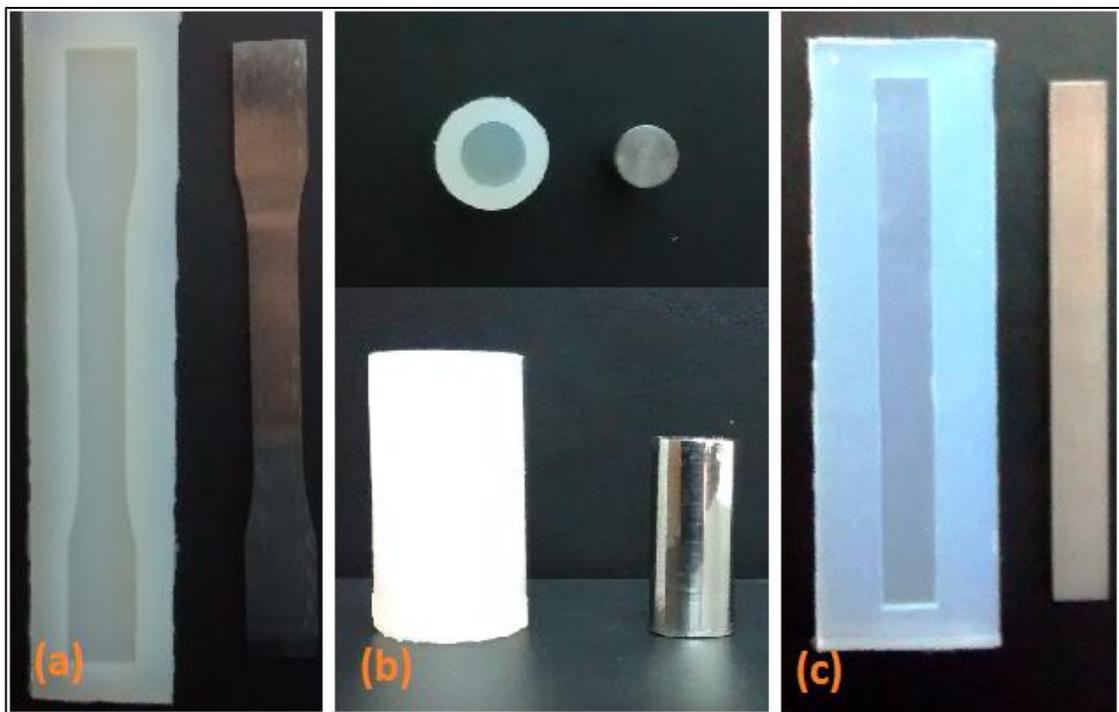


Figura 16 - (a) Molde flexível de tração e sua matriz (b) Molde flexível de compressão e sua matriz (c) Molde flexível de flexão e sua matriz

Fonte: Autoria própria

As matrizes metálicas de tração, compressão e flexão foram baseadas nas normas da ASTM – D638 96 (Tipo 1), ASTM – D695 96 e ASTM – D790 96a, respectivamente.

3.2.2 Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova foi também realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM). As amostras foram divididas em:

- a) CDP de tração (7 CDPs);
- b) CDP de compressão (7 CDPs);
- c) CDP de flexão (7 CDPs);

Para preservar a reação entre os componentes e procurando evitar a formação de bolhas dos corpos de prova, a fabricação destes foi realizada em temperatura ambiente (25°C) e umidade relativa do ar de no máximo 40%, sem a presença de qualquer equipamento de ventilação, desligados durante o processo. A exposição do carbonato e da poliuretana acima destes níveis de umidade dificulta a manipulação da mistura e esta é absorvida pelo carbonato formando aglomerados do mineral e também pela poliuretana acarretando bolhas. A ocorrência de bolhas prejudica a qualidade dos CDPs, pois atuam como concentradores de tensão, o que atrapalha a transmissão uniforme das cargas aplicadas durante o ensaio. Teve o cuidado também com o tempo de manipulação da mistura, devido à polimerização do mesmo.

Para a obtenção dos corpos de prova de tração, compressão e flexão seguem as seguintes etapas:

- a) **Tratamento e manipulação do carbonato de cálcio:** Após ser devidamente pesado em uma balança de precisão, da marca SHIMADZU®, modelo BL3200H, o mineral foi levado a uma estufa à vácuo a 70°C, por 30 minutos, com o intuito de retirar a possível umidade nele ainda existente;
- b) **Peneiramento:** O carbonato de cálcio passou por um processo de peneiramento em uma peneira BERTEL, de análise granulométrica, com

norma de abertura ABNT/ASTM/TYLER 30. Visando separar seus aglomerados, este processo evitou a atuação destes como concentradores de tensão, que poderiam fragilizar o corpo de prova. As informações sobre as normas para abertura encontram-se no ANEXO B;

c) **Formação da poliuretana enriquecida com carbonato de cálcio:** O mineral é adicionado em uma proporção de 10% da mistura de pré-polímero e polioliol, que se encontra na razão estequiométrica de 1:0,7, respectivamente. Durante esta etapa, há a formação natural de bolhas formadas pela reação química entre os componentes e a agitação manual da mistura;

d) **Tratamento da poliuretana:** Visando expulsar a maior quantidade de bolhas formadas durante o processo de homogeneização dos componentes, a mistura foi levada a um dessecador acoplado com uma bomba de vácuo, da marca EDWARDS, modelo RV8, com capacidade de pressão de 0,2 MPa e vazão de ar de 11,7m³/h, onde foi mantido por aproximadamente cinco minutos antes do polímero exceder seu pot life (período o qual os produtos químicos permanecem utilizáveis quando misturados).

e) **Vaso de pressão positiva:** A mistura foi vertida nos moldes fabricados de silicone sendo vedado com uma folha plástica e uma peça em vidro para assegurar um bom acabamento superficial. Finaliza-se, colocando os moldes com a mistura em um vaso de pressão positiva sob uma pressão de 3 Kgf/cm², durante aproximadamente nove horas, até a cura da poliuretana.

f) **Catálogo dos CDP's:** Após a completa cura do material e sua retirada do vaso de pressão e dos moldes de silicone, foi realizada a catalogação individual dos corpos de prova contendo a data da moldagem, numeração, proporção de carbonato de cálcio (%) e pressão submetida no vaso de pressão;

g) **Usinagem dos corpos de prova:** Por fim, os corpos de prova foram fresados com o objetivo de se garantir a uniformidade das dimensões estabelecidas nas normas, em todos os corpos de prova.

3.2.3 Ensaio monotônicos

Após a fabricação dos corpos de prova foram realizados ensaios mecânicos experimentais do tipo monotônico de tração, compressão e flexão a fim de caracterizar o material em estudo, levantando suas propriedades mecânicas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio e Análises de Materiais (LEAM), do Departamento de Engenharia Mecânica, localizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR – CP. Foi utilizado uma máquina universal de ensaios, da marca Time Group, modelo WDW-100, com capacidade de 10 toneladas, associada ao sistema de coleta de dados WinWDW Software. Os ensaios de tração, compressão e flexão foram realizados seguindo suas respectivas normas, baseadas na ASTM (American Society for Testing and Materials), que propõe os parâmetros para a realização de ensaios mecânicos aplicados a materiais poliméricos. Por fim, obtiveram-se curvas de força-deslocamento e tensão-deformação possibilitando a caracterização do material.

3.2.3.1 Ensaio monotônico de tração

Para o ensaio de tração foi seguida a ASTM D638 – 96 (Tipo I), a qual sugere o corpo de prova do tipo gravata com geometrias e dimensões especificadas na Figura 17, abaixo. A velocidade sugerida pela norma, tanto quanto utilizada neste trabalho foi de 5 mm/min.

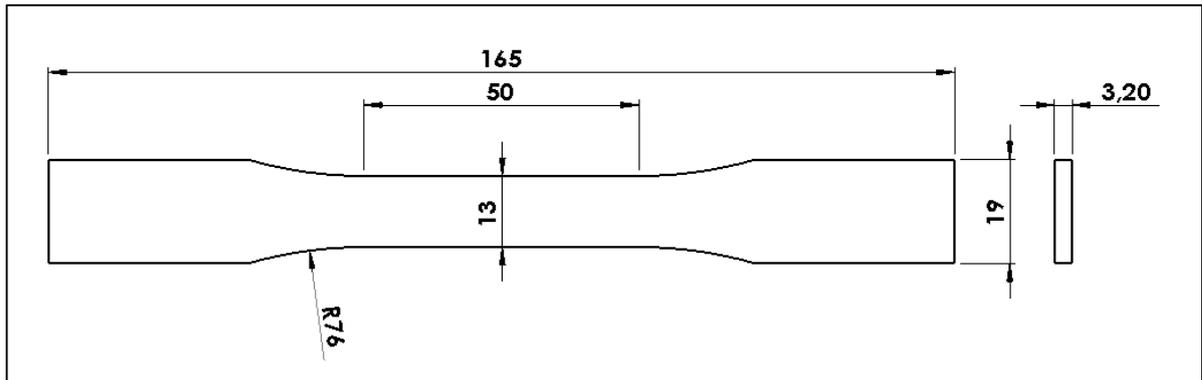


Figura 17 - Dimensões do corpo de prova de tração - ASTM D638 (tipo 1)

Fonte: Autoria própria

O corpo de prova foi posicionado conforme mostrado na Figura 18 e nele foi aplicado dois extensômetros, sendo um transversal e outro longitudinal, do tipo clipe para medir as deformações do mesmo. Com a obtenção desses dados pode-se estabelecer o coeficiente de Poisson (ν), que é a relação entre a deformação transversal pela deformação longitudinal. O extensômetro longitudinal foi colocado no comprimento útil de medição do corpo de prova, com comprimento de 50 milímetros e o extensômetro transversal, posicionado transversalmente. Com este ensaio pode-se também estabelecer o módulo de elasticidade (E), a tensão de escoamento ($\sigma_{máx}$) e o limite de resistência à tração.



Figura 18 - Posicionamento do CDP de tração na máquina de ensaios
Fonte: Autoria própria

3.2.3.2 Ensaio monotônico de compressão

O ensaio de compressão seguiu a ASTM D695 – 96, a qual sugere corpo-de-prova cilíndrico de 12,7 [mm] de diâmetro e 25,4 [mm] de comprimento, Figura 19. A velocidade de ensaio estabelecida por norma e que foi usada neste trabalho foi de 1,3 mm/min, com deslocamento de 10 milímetros do travessão da máquina.

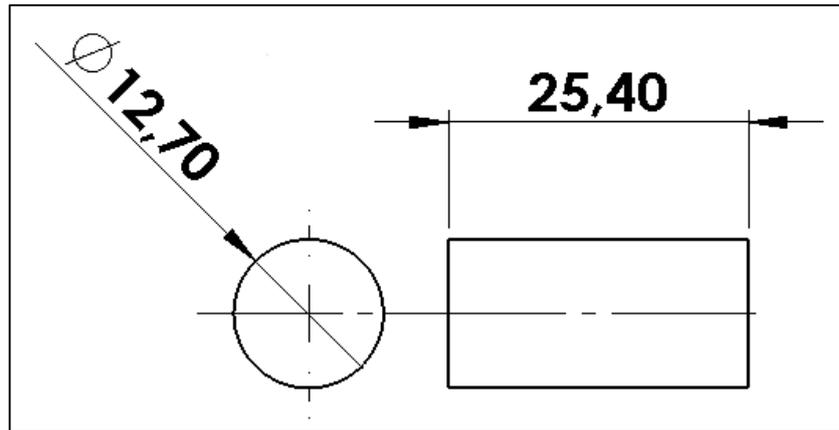


Figura 19 - Dimensões do corpo de prova de compressão - ASTM D695 - 96

Fonte: Autoria própria

O deslocamento e as medições das deformações dos corpos de prova de compressão foram obtidos com a aplicação da técnica de extensometria óptica por correlação de imagens e tais valores foram comparados com o deslocamento do travessão da máquina universal de ensaios.

Desta maneira, propriedades como módulo de elasticidade à compressão, tensão de escoamento em compressão e deformação na tensão de escoamento, podem ser obtidos.

3.2.3.3 Ensaio monotônico de flexão

Neste ensaio foi utilizada a norma ASTM D790 – 96 (método I) com geometrias e dimensões apresentadas de acordo com a Figura 20. A velocidade aplicada ao ensaio foi de 1.3 mm/min, com deslocamento de 10 milímetros do travessão da máquina de ensaios. Por norma, o ensaio é realizado até a ruptura da superfície oposta à aplicação da carga ou até a deformação de 5%. Neste trabalho, optou-se pela segunda opção, o qual se seguiu a norma para 5% de deformação do CDP.

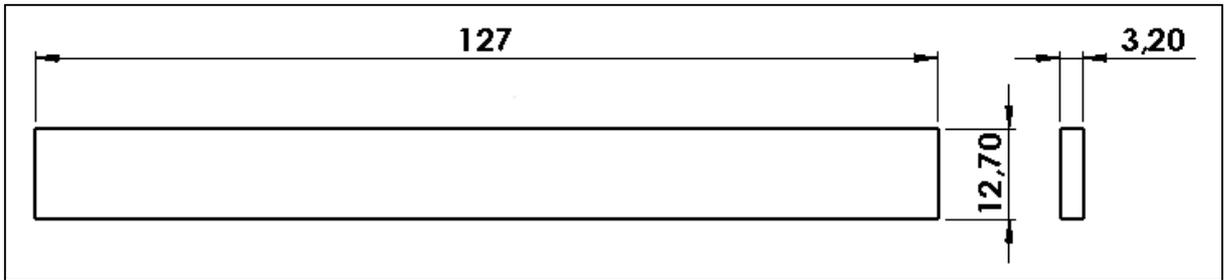


Figura 20 - Dimensões do corpo de prova de flexão - ASTM D790

Fonte: Autoria própria

Foi utilizado no ensaio de flexão, um conjunto contendo um aplicador de carga e dois apoios, ambos com cilindros de 10 milímetros de diâmetro. Posicionou-se cada apoio no limite do comprimento útil do corpo de prova (span), tendo entre eles 51 milímetros. O aplicador foi posicionado no centro dessa região do span. A montagem da estrutura, corpo de prova/apoios/aplicador, pode ser observado na Figura 21.

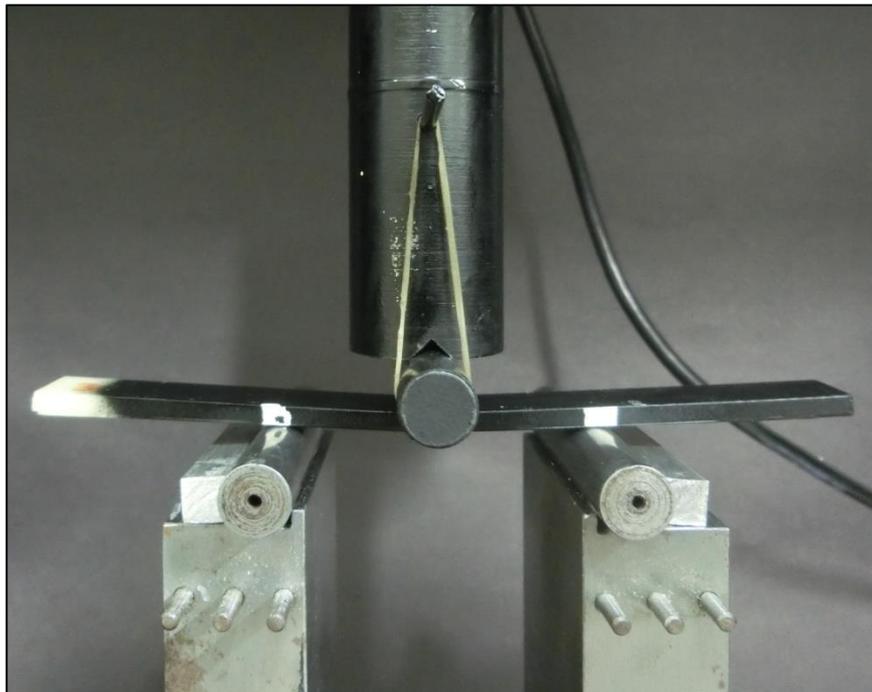


Figura 21 - Dispositivo de flexão

Fonte: Autoria própria

No ensaio de flexão também foi utilizado a técnica de extensometria óptica por correlação de imagens, a fim de comparar os resultados obtidos com o deslocamento do travessão da máquina de ensaios. Com os dados obtidos neste ensaio, pode-se também obter as curvas tensão-deformação e propriedades como tensão devido à flexão (σ^f), deformação devido à flexão (ε^f) e o módulo de elasticidade transversal devido à flexão (E^f).

3.2.4 Extensometria óptica por correção de imagens

A correlação de imagens faz parte de um conjunto de métodos desenvolvidos que compõe a técnica de extensometria óptica, utilizada para se mensurar o deslocamento e a deformação de um determinado corpo (FRANÇA, J.M.B)

Conhecendo-se as dimensões do corpo ensaiado, baseado em um ponto de referência no mesmo, essa técnica permite determinar o estado de deformação em cada instante, a partir da captura de imagens realizada por uma máquina fotográfica. Essas imagens são capturadas ao longo do ensaio e com o auxílio de programas computacionais, realiza-se a comparação de seus campos de deformação.

Neste presente trabalho utilizou-se o método implementado em uma rotina no software MATLAB® desenvolvida por LEONARDI, D. (2015), nos ensaios de compressão e flexão três pontos. O programa analisa a imagem e capta as cores em escalas de preto e branco. Por esta razão, foi necessário utilizar marcações nos corpos de provas ensaiados, para destacar o alvo da análise. Assim, os corpos de prova foram pintados de preto e neles foram feitas marcações em branco. Nos corpos de prova de compressão, foram posicionadas duas marcações laterais modeladas de espuma vinílica acetinada (EVA), que serviram de referência para a medição da variação do diâmetro e uma marcação no centro para captar-se a variação da altura o mesmo. Já nos corpos de prova de flexão, três marcações foram feitas, sendo duas

nos limites do span, localizadas em cada apoio e a última no centro, alinhado ao aplicador da carga. Devido a sua geometria, nas amostras de flexão foi possível fazer as marcações com tinta branca. Ao fundo do ambiente de ensaio foi fixado um papel cartolina de cor preta, para evitar qualquer interferência por outras escalas de cores durante a gravação e posteriormente na análise. Em razão da necessidade de se ter um ambiente escuro para a captura de imagens durante a gravação e evitar qualquer objeto da cor branca que venha a interferir por meio de sombra ou reflexo na análise por correlação de imagens, foi necessário utilizar uma iluminação controlada, constituída de duas lâmpadas fluorescentes do tipo 3U de 9 watts cada. Abaixo, na Figura 22 pode-se visualizar as marcações feitas nas amostras e as devidas condições citadas acima.

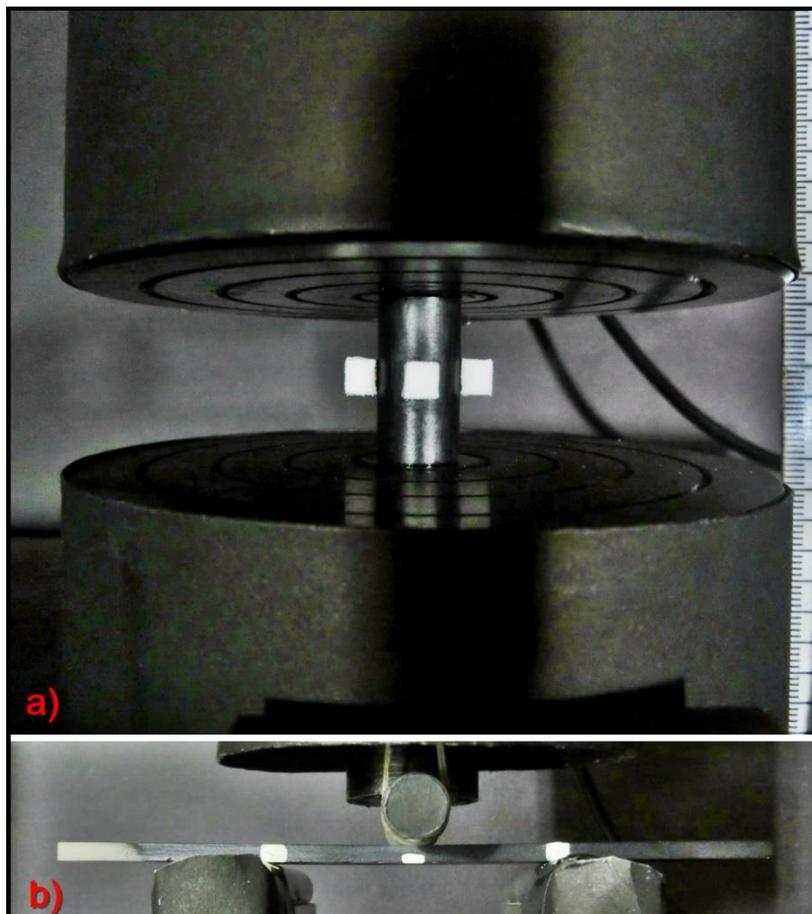


Figura 22 - Posicionamento das marcações utilizadas nos ensaios de (a) compressão e (b) flexão

Fonte: Autoria própria

Os ensaios foram filmados com uma câmera da marca CASIO® modelo EXILIM EX-ZR700, 16.1 megapixels com qualidade de gravação de alta definição 1920x1080 pixels. A câmera foi posicionada na base da máquina de ensaios, aproximadamente 100 milímetros do corpo de prova. Faz-se a análise do arquivo de vídeo gerado no programa, que analisa frame a frame sincronizado na mesma frequência da máquina de ensaios. Por este motivo ressalta-se a importância da sincronização do início da gravação, com o início do ensaio. Os dados foram gerados a uma taxa de duas imagens por segundo, ou seja, uma frequência de 500 milissegundos.

O ponto de referência necessário adotado para a análise por correlação de imagens neste trabalho, devido às condições do programa utilizado, foi o centroide da amostra. O programa capta os deslocamentos sofridos em relação a posição inicial, pelas marcações feitas, em pixels. Por isso, faz-se necessário o posicionamento da escala, nos mesmos planos das marcações, cobrindo todo o comprimento vertical da tela do vídeo. Dessa maneira o programa relaciona o número de pixels pelo comprimento da tela, que ao fim fornece o deslocamento das marcações em milímetros. Para os ensaios de compressão foram necessários duas escalas, pois o plano das marcações laterais difere em relação ao plano da marcação frontal. Já para os ensaios de flexão apenas uma escala foi necessária, pois suas marcações encontram-se no mesmo plano.

Tanto nos ensaios de compressão, quanto nos ensaios de flexão, os dados como deslocamentos axiais obtidos pela correlação de imagens possibilitou a comparação com os valores do deslocamento do travessão da máquina de ensaios. O deslocamento das marcações laterais dos corpos de prova de compressão foi utilizado para determinar a variação diametral e cálculo das deformações transversais, causados pelo carregamento. Ambas as análises permitiu a comparação das deformações originadas devido aos seus deslocamentos e também de suas propriedades, que foram obtidas a partir destes dados.

3.2.5 Simulação computacional dos modelos de tração, compressão e flexão

Após a obtenção e análise dos dados experimentais, torna-se possível retirar as propriedades do material e utilizá-los para análise computacional, por meio do Método de Elementos Finitos. Este processo foi realizado tendo como ferramenta o software comercial ABAQUS®.

Podem-se utilizar modelos existentes no software, calibrando-os com os resultados dos ensaios monotônicos para obter parâmetros e verificar se tais modelos implementados representam o comportamento do material, baseando sua comparação nos diagramas tensão-deformação obtidos experimentalmente com os ensaios mecânicos realizados. Este trabalho utilizou os modelos de Drucker-Prager e o de von Mises com critério de viscoplasticidade.

Os parâmetros necessários para a calibração do modelo de Drucker-Prager consiste no ângulo de atrito interno do material, ângulo de dilatação e a coesão do material. Estes parâmetros foram calculados com base nos dados obtidos pelos ensaios de tração e deformação, a partir da reta referente à superfície de escoamento, Figura 23.

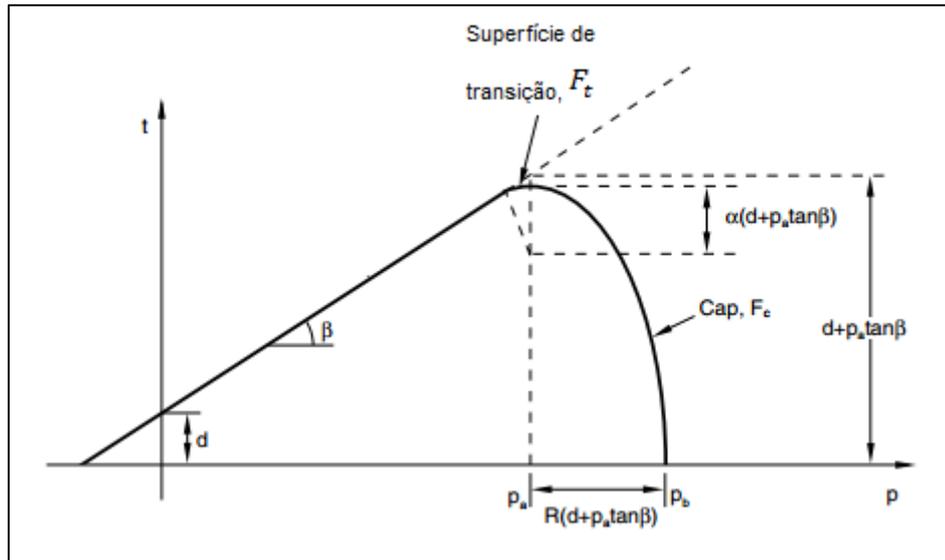


Figura 23 - Superfície de escoamento do modelo de Drucker-Prager

Fonte: Autoria própria

No modelo de Drucker-Prager, foi utilizado a opção Drucker-Prager Hardening, onde foram inseridos os dados plásticos obtidos nos ensaios experimentais e a lei de fluxo associativa.

Para o ajuste do modelo de von Mises, critério viscoplástico são necessários quatro parâmetros (f , A , m e n), sendo que o parâmetro f é determinado a partir de métodos experimentais, enquanto os outros três por tentativa e erro. Para se determinar o parâmetro f , foi necessário se obter o módulo de elasticidade da amostra, sob diferentes velocidades de ensaio (5 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min, 200 mm/min e 500 mm/min) e analisar o intervalo no qual não há mais variação efetiva do mesmo. Para a análise foi utilizado a Equação 17:

$$f = \frac{E - E^t}{E} \quad (17)$$

na qual a variável f é dada pelo módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de velocidade mais alta (E) e o módulo de elasticidade instantâneo de menor valor (E^t).

Ambos os modelos, Drucker-Prager e Viscoplastico de von Mises, dividem a análise entre o regime elástico e o regime plástico. No regime elástico, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson regem o comportamento do material até o fim da linearidade da curva tensão-deformação. Para o comportamento plástico foram selecionados alguns pares de pontos como o limite de escoamento, o início do softening e do hardening, os quais caracterizam o regime plástico do material. A deformação plástica (ε_p) é dada pela Equação 18:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_t - \left(\frac{\sigma_{av}}{E}\right) \quad (18)$$

A deformação verdadeira total (ε_t) e a tensão verdadeira atuante no regime plástico (σ_{av}) descrevem a deformação plástica (ε_p). Foi utilizada neste modelo, a lei da deformação.

3.2.5.1 Simulação do ensaio de tração

A geometria utilizada na análise do comportamento mecânico da amostra sob tração, foi referente ao comprimento útil do corpo de prova, a qual também foi aplicada os extensômetros para medir sua variação. Devido à simetria existente nesta região, pode-se considerar 1/8 do volume útil, resultando assim em um comprimento de 25 milímetros, largura de 6,5 milímetros e espessura de 1,6 milímetros, como pode ser observado na Figura 24.

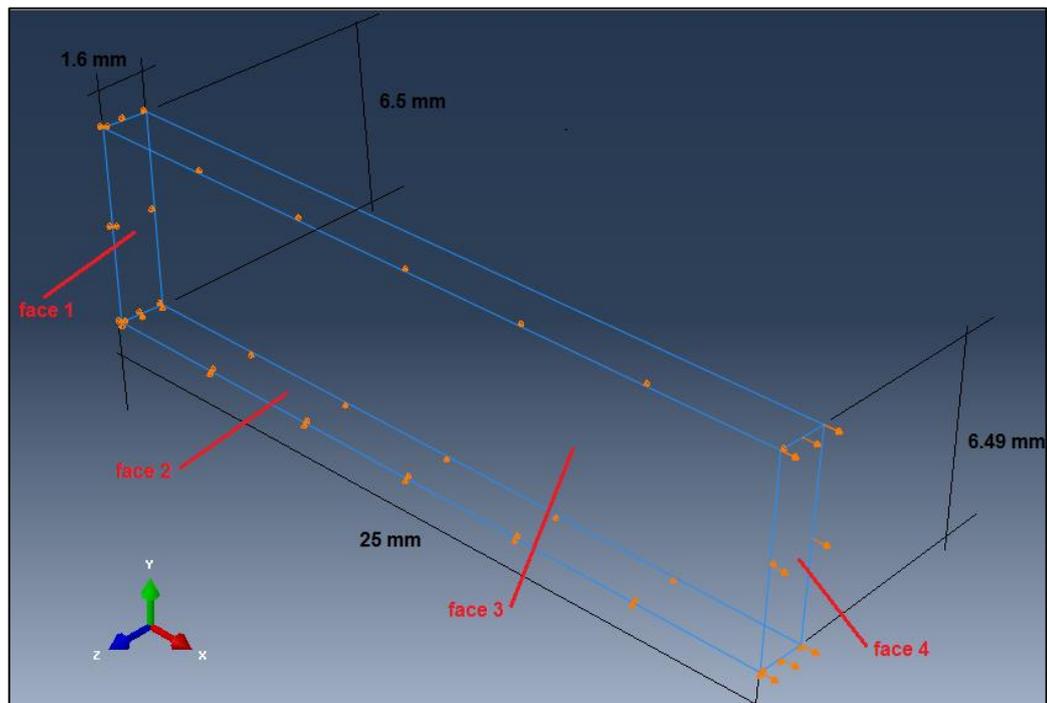


Figura 24 - Geometria utilizada na simulação de tração

Fonte: Autoria própria

Fica evidente que essa convenção diminui o tempo de processamento da simulação, sem interferir nos resultados obtidos. As condições de contorno foram aplicadas com base nas mesmas condições dos ensaios realizados, de modo a representar precisamente as deformações do corpo de prova. Sendo assim, aplicaram-se as seguintes restrições:

- Deslocamento da face 1 restringida ao eixo X;
- Deslocamento da face 2 restringida ao eixo Y;
- Deslocamento da face 3 restringida ao eixo Z;
- Deslocamento de 5 milímetros na face 4 na direção do eixo X;

O efeito de estricção foi representado, reduzindo um dos lados da geometria do corpo de prova. Os elementos utilizados na simulação do corpo de prova de tração são do tipo sólido hexaédricos do tipo C3D8R, os quais possuem oito nós com três graus de liberdade cada (translação nos eixos x, y e z).

3.2.5.2 Simulação do ensaio de compressão

Seguindo-se a geometria do corpo de prova de compressão, o qual possui as dimensões de 25,4 milímetros de comprimento e 12,7 de diâmetro, este foi modelado juntamente com os aplicadores de carga. Os aplicadores foram considerados superfícies rígidas, sendo que o aplicador inferior foi mantido engastado, não sofrendo qualquer tipo de movimentação e/ou deformação e o aplicador superior com movimentação livre na direção vertical. Dessa maneira, foram aplicadas as seguintes condições de contorno:

- Deslocamento restringido nos eixos X e Z;
- Descolamento de -10 milímetros no eixo Y, devido à ação do aplicador superior;

Com os deslocamentos restringidos nos eixos X e Z, a amostra simulada pode se expandir, nos mesmos, e se contrair em Y como mostra a Figura 25.

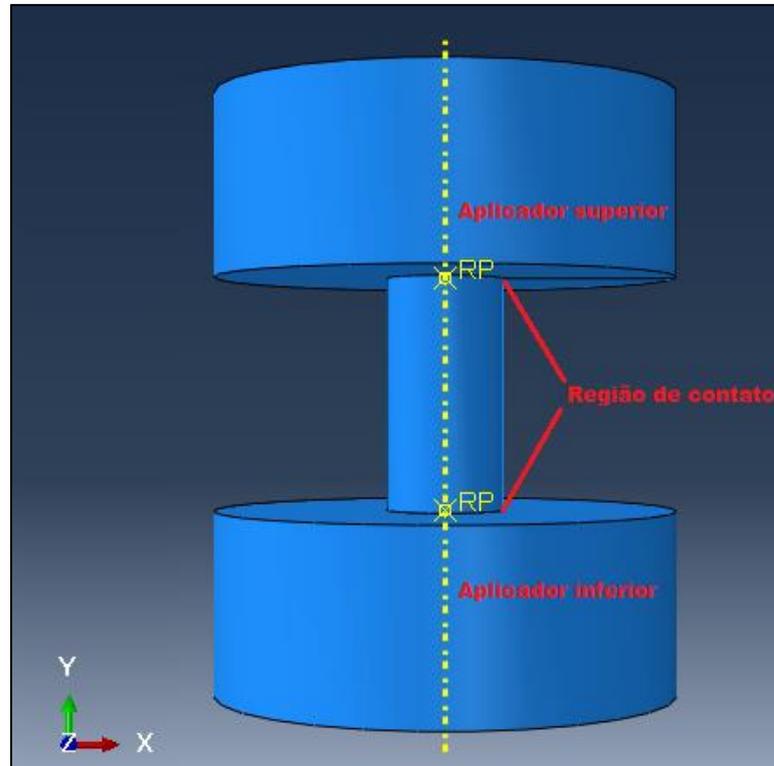


Figura 25 - Geometria utilizada na simulação de compressão
Fonte: Autoria própria

Além das condições de contorno citadas acima, foi imposto também, a condição de contato entre o aplicador e o corpo de prova, assim como mostra os pontos de referências.

Os elementos utilizados na simulação do corpo de prova de compressão também são do tipo sólido hexaédricos do tipo C3D8R, os quais possuem oito nós com três graus de liberdade cada (translação nos eixos x, y e z).

3.2.5.3 Simulação do ensaio de flexão

O modelo de flexão seguiu a norma de ensaios ASTM D790 – 96 (método I), com 127 milímetros de comprimento, 12,7 milímetros de largura, 3,2 milímetros de espessura e assim como nos corpos de provas fabricados, distanciou-se 51 milímetros entre os apoios, como demonstrado na Figura 26 abaixo.

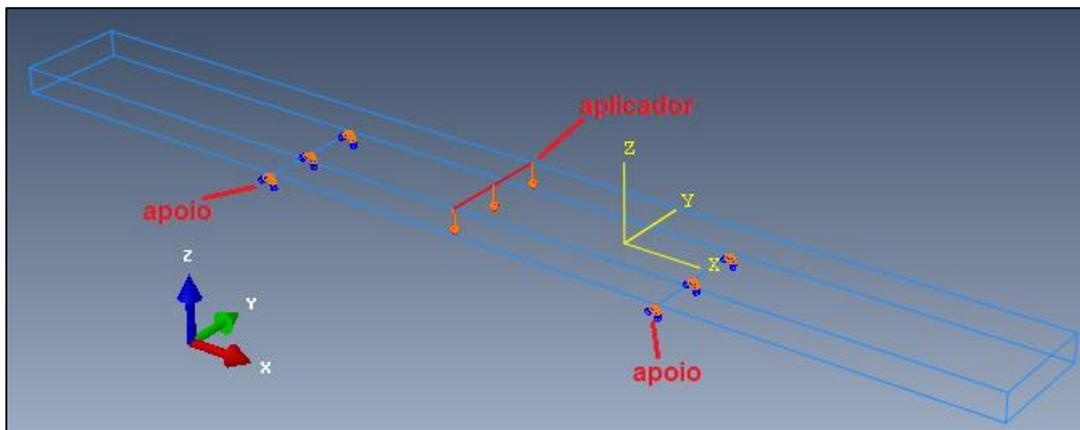


Figura 26 - Geometria utilizada na simulação de flexão

Fonte: Autoria própria

Analogamente como nos outros dois modelos simulados citados, também foi imposto condições de contorno para o modelo de flexão, tendo como seguintes parâmetros:

- Deslocamento restringido nos eixos Y e Z nas regiões de contato com os apoios;
- Deslocamento de -10 milímetros no eixo Z na região de contato entre o aplicador e o corpo de prova;
- Deslocamento restringido nos eixos X e Y na região de contato entre o aplicador e o corpo de prova;

O primeiro parâmetro deixou livre o movimento no eixo X, o que permitiu simular o deslizamento sofrido pelo corpo de prova neste eixo.

Os modelos utilizados foram constituídos por elementos do tipo hexaédricos do tipo C3D8R, que possuem 8 nós com 3 graus de liberdade cada (translação em x, y e z).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos experimentais de tração, compressão e flexão realizadas nos corpos de prova de poliuretana enriquecidos com 10% de carbonato de cálcio, como também os resultados da extensometria óptica por correlação de imagens e simulação dos modelos por análise computacional. De posse desses dados poderá ser realizadas comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados computacionais, verificando a validade dos modelos utilizados especificamente para o comportamento do material em estudo. Como em todo processo de estudo e desenvolvimento de projeto, houve algumas dificuldades, as quais também serão relatadas neste capítulo.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÔNICOS

4.1.1 Resultados dos ensaios monotônicos de tração

Com base na norma ASTM D638-96 (tipo-1), os ensaios monotônicos de tração foram realizados a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min. Como já foi citado na seção 3.2.3.1, foram utilizados extensômetros para se obter as variações da amostra e suas deformações tanto no sentido transversal, quanto no sentido longitudinal.

Deseja-se caracterizar a poliuretana enriquecida com 10% de carbonato de cálcio e para isso faz-se necessário ter conhecimento de variáveis que descrevem o comportamento dos materiais em geral. Tais variáveis são apresentadas como:

- Tensão de engenharia (σ_{eng});
- Deformação de engenharia (ε_{eng});
- Tensão verdadeira (σ_v);
- Deformação verdadeira (ε_v);

Esses parâmetros precisam ser calculados tanto para a direção longitudinal quanto para a direção transversal. Dessa forma podem-se obter também propriedades mecânicas, tais como a tensão de escoamento (σ_y), módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν).

Para a obtenção da tensão de engenharia (σ_{eng}) e deformação de engenharia (ε_{eng}) foram utilizadas as seguintes Equações (19) e (20):

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{eng} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (20)$$

onde:

F - valor da força aplicada;

A_0 - área da seção transversal inicial do corpo de prova;

l_0 - comprimento inicial;

Já para o cálculo da tensão verdadeira (σ_v) e da deformação verdadeira (ε_v) as Equações (21) e (22) foram utilizadas:

$$\sigma_v = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (21)$$

$$\varepsilon_v = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (22)$$

As equações das tensões e deformações apresentadas pelas Equações (21) e (22) utilizam os valores obtidos pelo extensômetro longitudinal.

A Figura 27 representa a comparação dos diagramas tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira para a poliuretana enriquecida com 10% de carbonato de cálcio. Nota-se a convergência do regime elástico, o que não ocorre no regime plástico. Além disso, fica evidente também uma diferença entre os limites de resistência, sendo apresentada uma maior tensão de escoamento na curva tensão-deformação verdadeira.

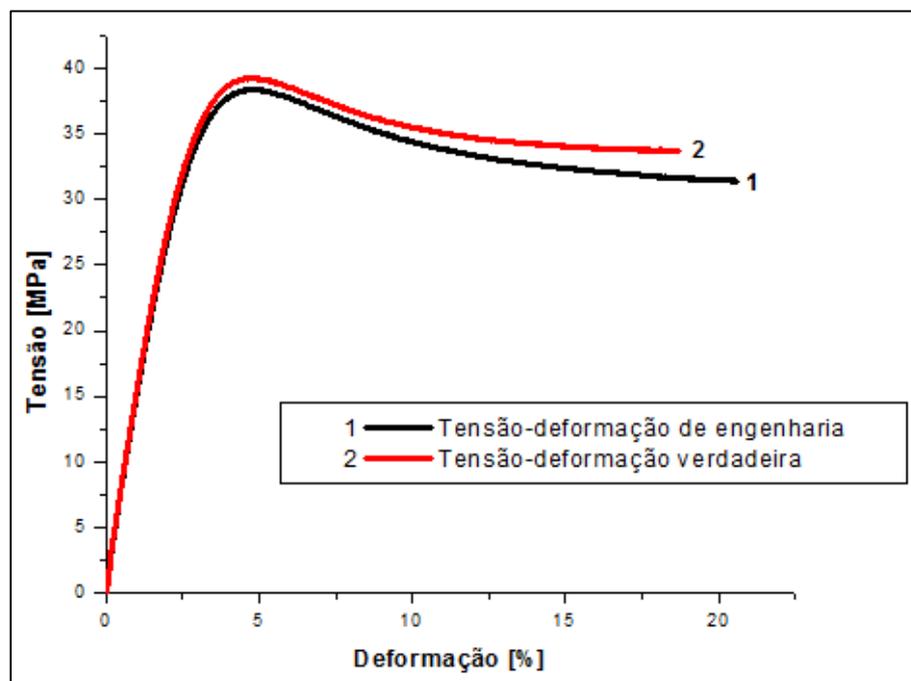


Figura 27 - Comparação entre as curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira sob tração

Fonte: Autoria própria

Após 5% de deformação observa-se a ocorrência do softening, caracterizando uma perda da rigidez e presença do hardening, causado pelo encruamento do material.

O módulo de elasticidade (E) é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material sólido, quantificado pela razão entre a tensão e a deformação, sendo a tensão máxima suportada pelo material sem sofrer deformação permanente (HIBBELER, 2004). Sendo assim, para o cálculo do módulo de elasticidade da poliuretana enriquecida com 10% de carbonato de cálcio, a partir do diagrama tensão-deformação gerado com os dados obtidos pelos ensaios mecânicos realizados, foi feito um ajuste linear do início do regime elástico até 0,5% de deformação como mostra a Figura 28.

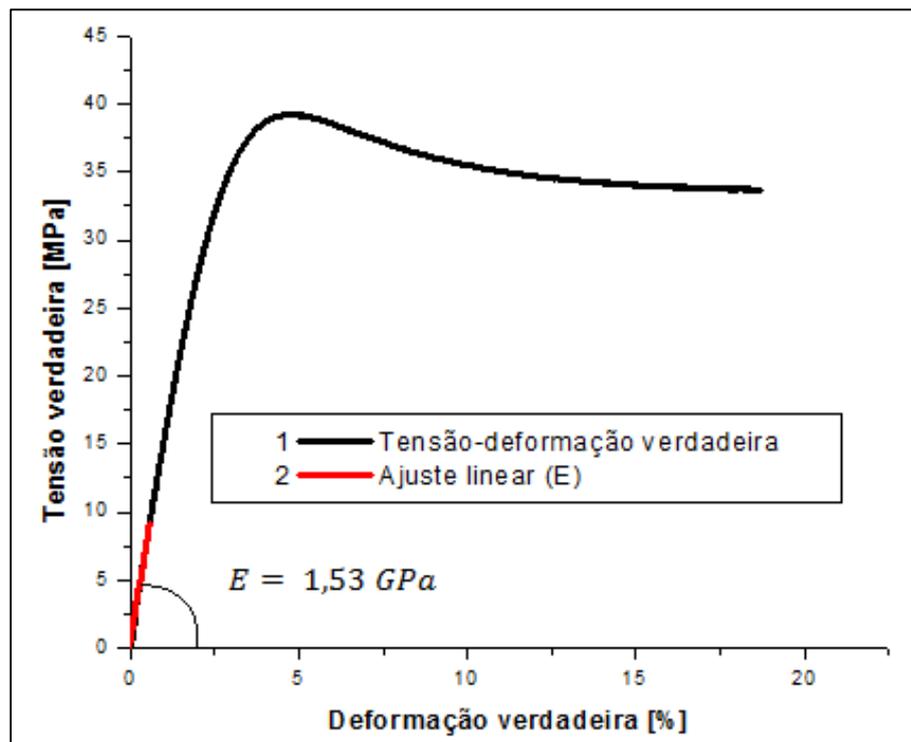


Figura 28 - Obtenção do módulo de elasticidade através de ajuste linear

Fonte: Autoria própria

O segundo extensômetro captou as deformações no sentido transversal, para a aplicação da seguinte Equação (23):

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \quad (23)$$

onde:

A - área da seção transversal instantânea do corpo de prova.

A área instantânea A é dada pela expressão (24):

$$A = w_i \cdot t_i \quad (24)$$

Na qual a largura instantânea (w_i) e a espessura instantânea (t_i) são obtidas através das Equações (25) e (26):

$$w_i = w_0 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_v^{trans}}{100} \right) \quad (25)$$

$$t_i = t_0 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_v^{trans}}{100} \right) \quad (26)$$

Que por sua vez, w_0 representa a largura inicial e t_0 a espessura inicial do corpo de prova de tração.

A deformação transversal verdadeira (ε_v^{trans}) pôde ser calculada utilizando valores obtidos pelo segundo extensômetro, posicionado transversalmente, e este é dividido por 100, pois seus valores são calculados em porcentagem.

Para uma análise ainda mais aproximada do real comportamento do material, haveria a necessidade de se obter dados das deformações da espessura da amostra, assim como foi realizada para o comprimento (longitudinal) e largura (transversal). Como não foi possível a obtenção desses dados, adotou-se a hipótese de que o material é transversalmente isotrópico.

O coeficiente de Poisson foi calculado a partir dos valores coletados pelos extensômetros e calculado pela Equação (27):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} \quad (27)$$

O coeficiente de Poisson também pode ser calculado a partir de um ajuste linear da curva que relaciona as deformações transversais e longitudinais, na qual o coeficiente de Poisson é o coeficiente angular da reta ajustada linearmente, como apresentado na Figura 29.

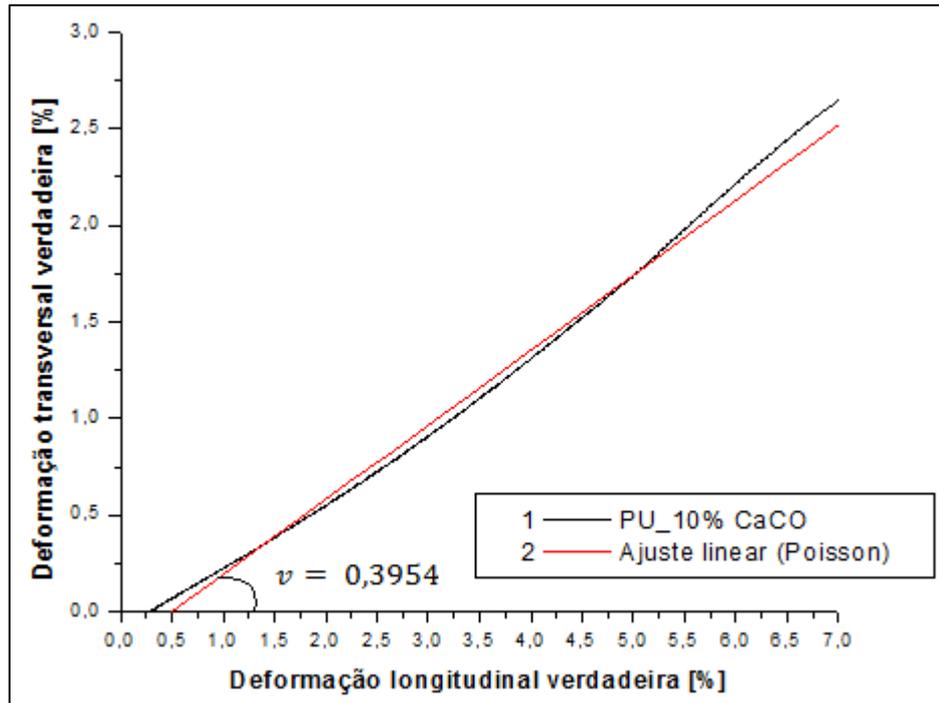


Figura 29 - Obtenção do coeficiente de Poisson através de ajuste linear

Fonte: Autoria própria

Com a análise dos parâmetros apresentados, torna-se possível estabelecer valores das propriedades da poliuretana que as caracteriza. Os valores médios são apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Valores das propriedades mecânicas de tração

Propriedades mecânicas	Resultados
Tensão de escoamento [MPa]	38,8
Módulo de elasticidade [GPa]	1,53
Coefficiente de Poisson	0,3954

Fonte: Autoria própria

Na Figura 30 abaixo, estão representados os resultados das curvas tensão-deformação para os sete corpos de prova ensaiados.

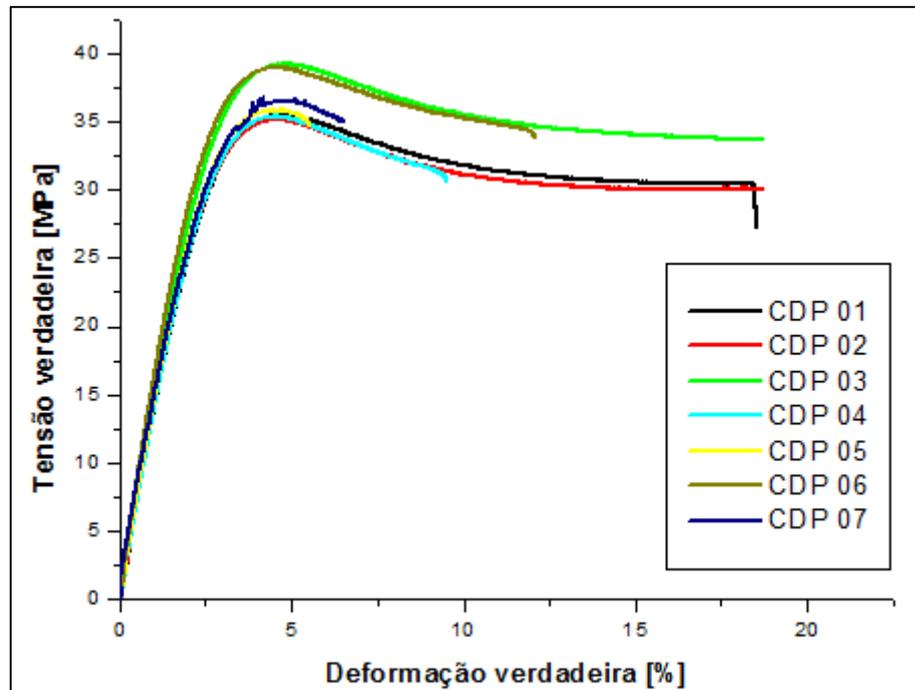


Figura 30 - Diagrama tensão-deformação verdadeira para todos os CDPs.

Fonte: Autoria própria.

Como apresentado, algumas amostras sofreram rupturas assim que entraram no regime plástico, região de encruamento uniforme do material, devido a bolhas internas ou carbonato de cálcio não dissociado completamente, atuando como concentradores de tensão e ocasionando sua ruptura.

4.1.2 Resultados dos ensaios monotônicos de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados com base na norma ASTM D695-96 a uma velocidade de 1,3 mm/min e um deslocamento do travessão da máquina de ensaios de 10 milímetros negativos no eixo vertical. Isso promoveu, juntamente com o deslocamento longitudinal, uma expansão nas laterais da amostra e a formação de

um “S” no eixo vertical. Este comportamento deve-se ao fato da acomodação da amostra, que busca um plano de cisalhamento, como pode ser visualizado na Figura 31 abaixo:

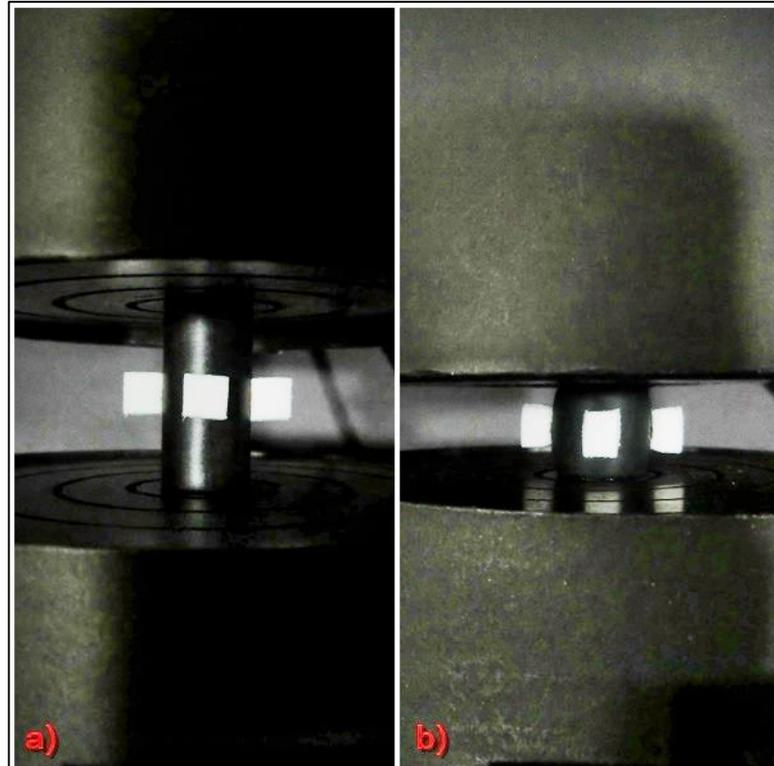


Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova de compressão antes e depois do ensaio ser realizado

Fonte: Autoria própria

Dessa forma foi possível calcular a tensão e deformação de engenharia pelas Equações (19) e (20) gerando o diagrama tensão-deformação de engenharia como apresentado na Figura 32.

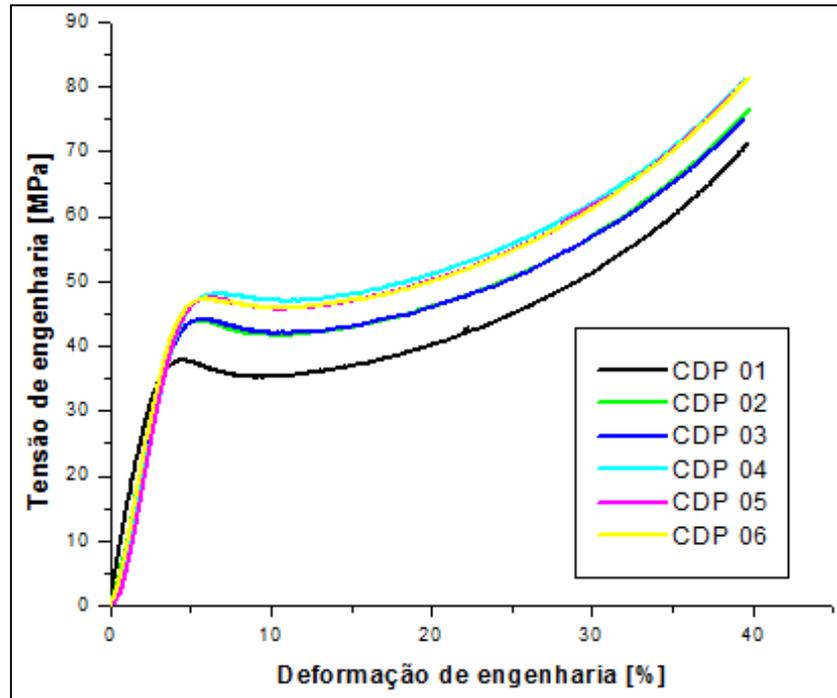


Figura 32 - Diagrama tensão-deformação engenharia de compressão

Fonte: Autoria própria

Tanto a tensão de engenharia, quanto a deformação de engenharia são parâmetros que consideram a geometria inicial da amostra e por isso não exibem os valores instantâneos capturados durante o ensaio. A fim de obter o real comportamento do material, considerando suas variações instantâneas que ocorrem na direção transversal (expansão) e longitudinal (deslocamento) do corpo de prova, foi utilizada a técnica de extensometria óptica por correlação de imagens. Aplicando a rotina implementada no software MATLAB®, torna-se possível analisar as mudanças que ocorrem na geometria do corpo de prova, devido o deslocamento de suas marcações apresentadas na Figura 33, frame a frame.

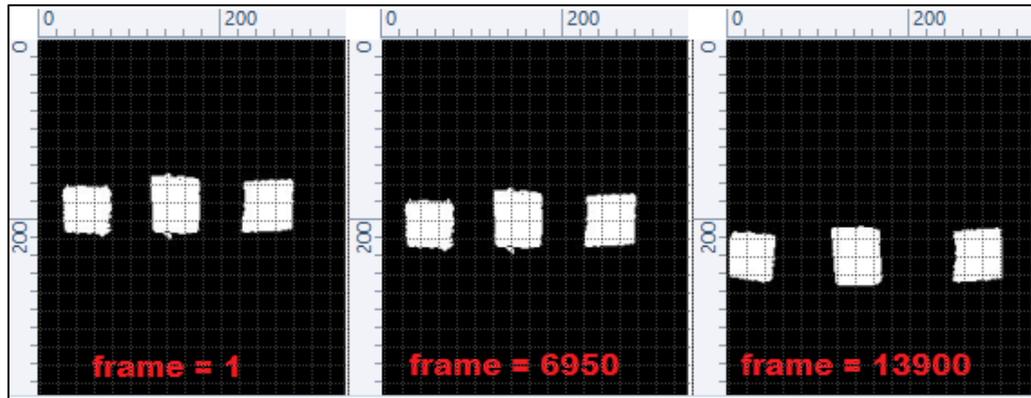


Figura 33 - Variação da geometria do corpo de prova durante o ensaio de compressão
Fonte: Autoria própria

Os deslocamentos longitudinais possibilitaram determinar a deformação longitudinal verdadeira ($\varepsilon_{long}^{c,v}$) a partir da Equação (28):

$$\varepsilon_{long}^{c,v} = 100 \cdot \ln \left(\frac{h_0 - \Delta h}{h_0} \right) \quad (28)$$

onde:

h_0 - comprimento inicial do corpo de prova;

Δh - variação do comprimento do corpo de prova.

Com as marcações laterais foram obtidas as variações dos diâmetros dos corpos de prova e desta forma foi possível calcular os valores da deformação transversal verdadeira ($\varepsilon_{transv}^{c,v}$) sob compressão e da tensão verdadeira (σ_{verd}^c) sob compressão dadas pela Equação (29) e Equação (30), respectivamente.

$$\varepsilon_{transv}^{c,v} = \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad (29)$$

$$\sigma_{verd}^c = \frac{4F}{\pi\left(D_0\left(1 + \frac{\varepsilon_{transv}^{c,v}}{100}\right)\right)^2} \quad (30)$$

sendo:

D_0 - diâmetro inicial do corpo de prova;

D - diâmetro instantâneo do corpo de prova;

De posse desses valores, foi possível gerar a curva tensão-deformação verdadeira, Figura 34, e compará-la com a curva tensão-deformação de engenharia, como apresentada na Figura 35.

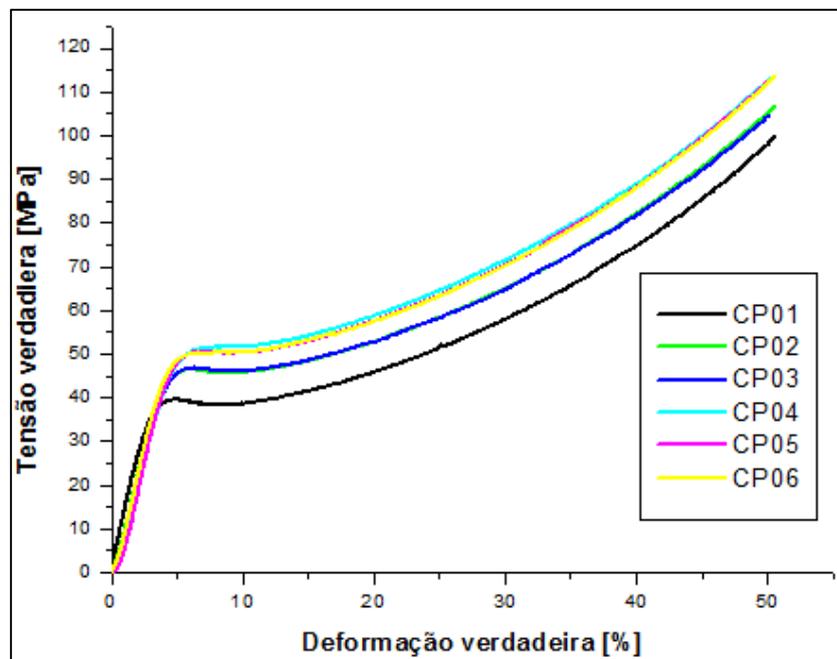


Figura 34 - Diagrama tensão-deformação verdadeira

Fonte: Autoria própria

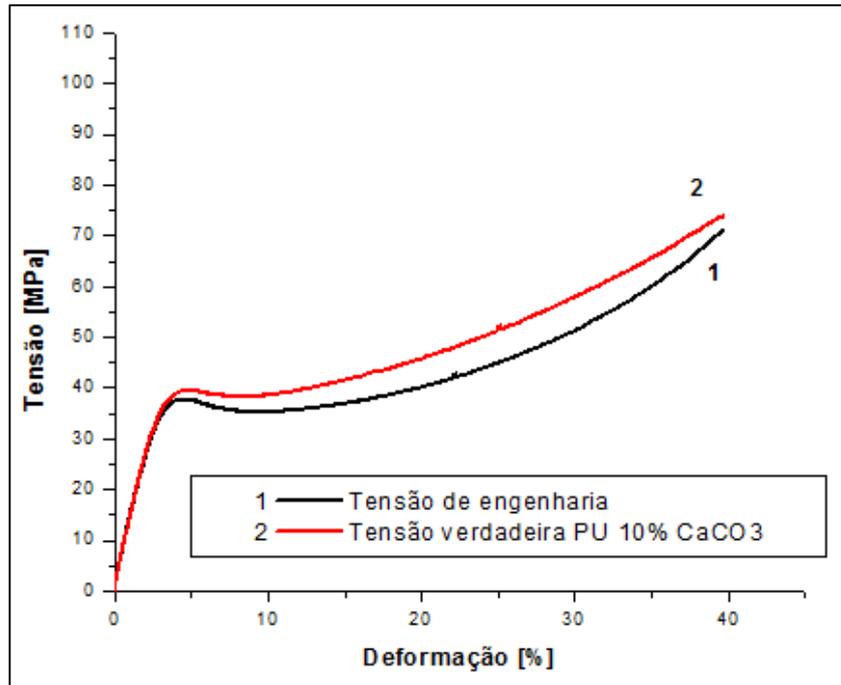


Figura 35 - Comparação da curva tensão-deformação de engenharia e verdadeira
Fonte: Autoria própria

Nota-se que o regime elástico das curvas se coincide, porém a curva tensão-deformação verdadeira apresenta maiores valores de tensão de escoamento, comparados com a curva tensão-deformação de engenharia.

Com os valores da deformação transversal verdadeira também foi obtido o valor para o coeficiente de Poisson pela Equação (27) e também através do gráfico composto pela razão da deformação transversal e deformação longitudinal verdadeira, no qual o coeficiente de Poisson é dado pelo coeficiente angular da reta. Na Figura 36 é possível perceber que houve uma pequena diferença entre o Poisson de compressão e o obtido sob tração.

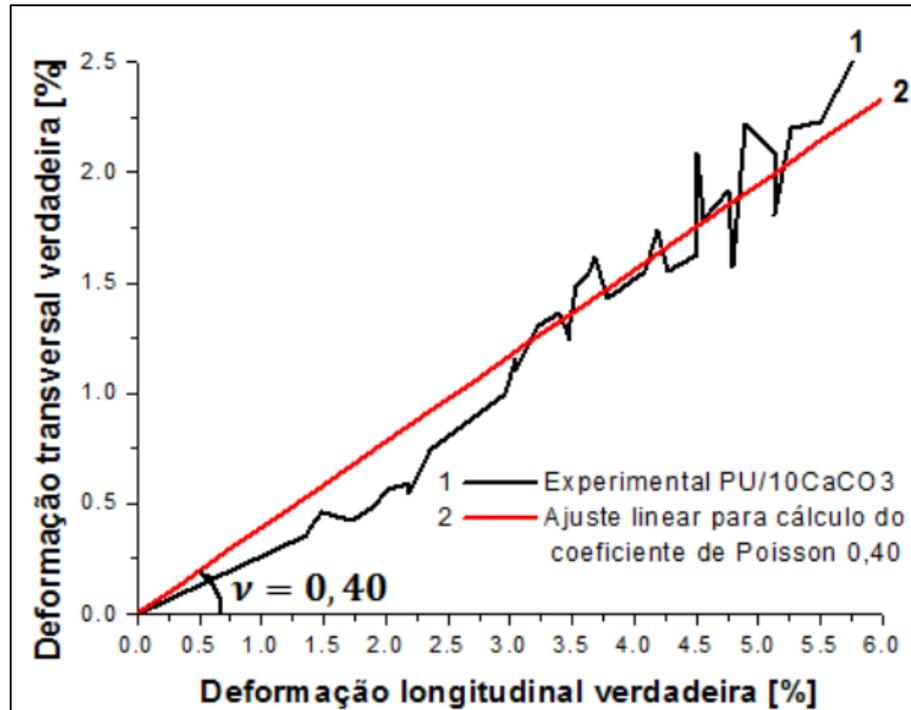


Figura 36 - Diagrama deformação transversal vs. deformação longitudinal verdadeira e ajuste linear para a obtenção do coeficiente de Poisson
 Fonte: Autoria própria

Os valores das propriedades médias da poliuretana enriquecida com 10% de $CaCO_3$ são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores das propriedades mecânicas de compressão

Propriedades	PU10% $CaCO_3$
Tensão de escoamento [MPa]	45,660
Deformação no escoamento [%]	5,587
Módulo de elasticidade [GPa]	1,162
Coeficiente de Poisson	0,40

Fonte: Autoria própria

Quando um corpo homogêneo e isotrópico sofre compressão, as deformações são igualmente distribuídas desde as superfícies de contato com o aplicador,

propagando-se por toda a amostra. Assim, dado um corpo de prova de compressão com uma marcação fixada no centro, quando a carga é aplicada, percebe-se que a marcação irá se deslocar metade do deslocamento imposto pela máquina de ensaios, assim como pode ser observado na Figura 37.

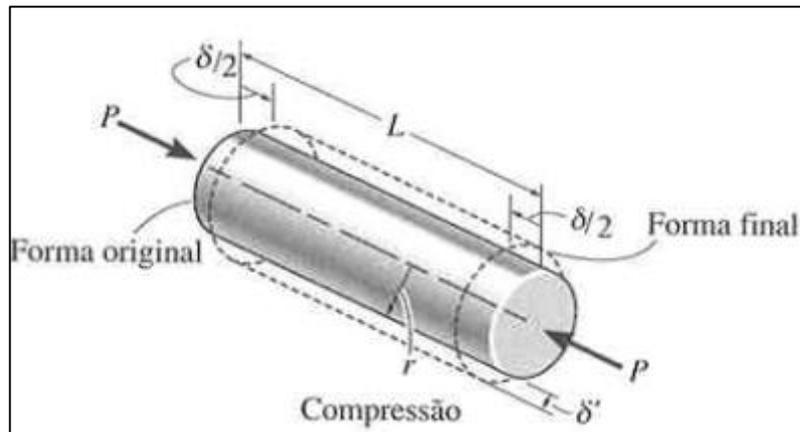


Figura 37 - Deformação distribuída no corpo de prova de compressão

Fonte: HIBBELER, 2004

Dessa forma, foi necessário duplicar os valores obtidos pela correlação de imagens para a marcação central e, conseqüentemente, os deslocamentos do travessão da máquina e os valores obtidos pela correlação de imagens, puderam ser comparados, registrado assim uma média relativa de 5,45% entre ambos. Essa divergência se dá devido a vários fatores, sendo alguns deles a iluminação durante o ensaio, a sombra formada pelo aplicador, o que vem a atrapalhar as futuras análises.

4.1.3 Resultados dos ensaios monotônicos de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados com base na norma ASTM D790-96, a qual as dimensões determinadas para o corpo de prova são 127 milímetros para seu

comprimento, 12,7 milímetros de largura e 3,2 milímetros para sua espessura, sugerindo também uma deformação máxima de 5%. Visando estabelecer as configurações ideais para uma melhor análise dos dados, foram realizados testes preliminares para estabelecer a velocidade de ensaio. Para isso foram testados alguns valores e constatou-se que em baixas velocidades a curva gerada é demasiadamente serrilhada, como apresentada na Figura 38. Por esta razão, optou-se por utilizar uma velocidade de 1,3 mm/min.

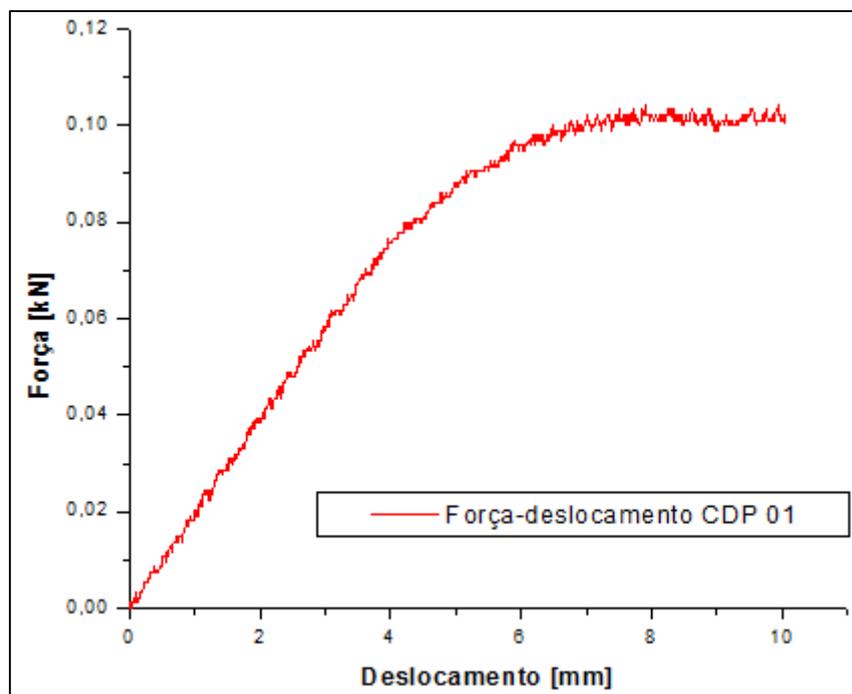


Figura 38 - Diagrama força-deslocamento gerado no ensaio de flexão

Fonte: Autoria própria

Com o intuito de suprimir o efeito serrilhado e obter uma curva nítida para futuras análises e uma melhor visualização desta, foi realizado um ajuste polinomial da curva, apresentada na Figura 39.

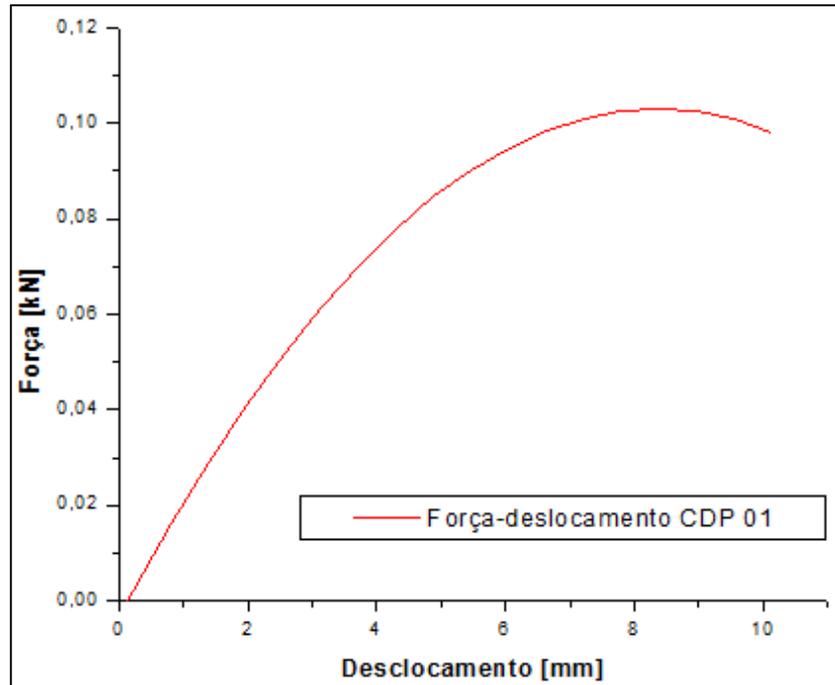


Figura 39 - Diagrama força-deslocamento de flexão após o ajuste polinomial
Fonte: Autoria própria

O aplicador e os dois apoios compõem o dispositivo utilizado para deformar o corpo de prova. Posiciona-se a origem do aplicador em contato com a superfície da amostra, promovendo um deslocamento de 10 milímetros negativos a partir de sua origem. Após o ensaio, os dados obtidos pela máquina são analisados de forma a extrair valores de parâmetros como a tensão devido à flexão, calculada pela Equação (31).

$$\sigma^f = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (31)$$

onde:

P = carga aplicada no centro do corpo de prova;

L = distância entre os apoios;

t = espessura do corpo de prova;

b = largura do corpo de prova.

O módulo de elasticidade transversal sob flexão pode também ser calculado a partir da seguinte expressão, dada pela Equação (32):

$$E^f = \frac{PL^3}{4bt^3y} \quad (32)$$

onde:

y = flecha formada pela deformação do corpo de prova. Este valor faz referência à medição realizada com base no deslocamento do travessão da máquina, como também, pela marcação centra no método de correlação de imagens.

Outro parâmetro que pôde ser obtido através de cálculos realizados foi a deformação sob flexão, dada pela Equação (33).

$$\varepsilon^f = \frac{PLt}{8E^fI} \quad (33)$$

onde:

I = momento de inércia do corpo de prova.

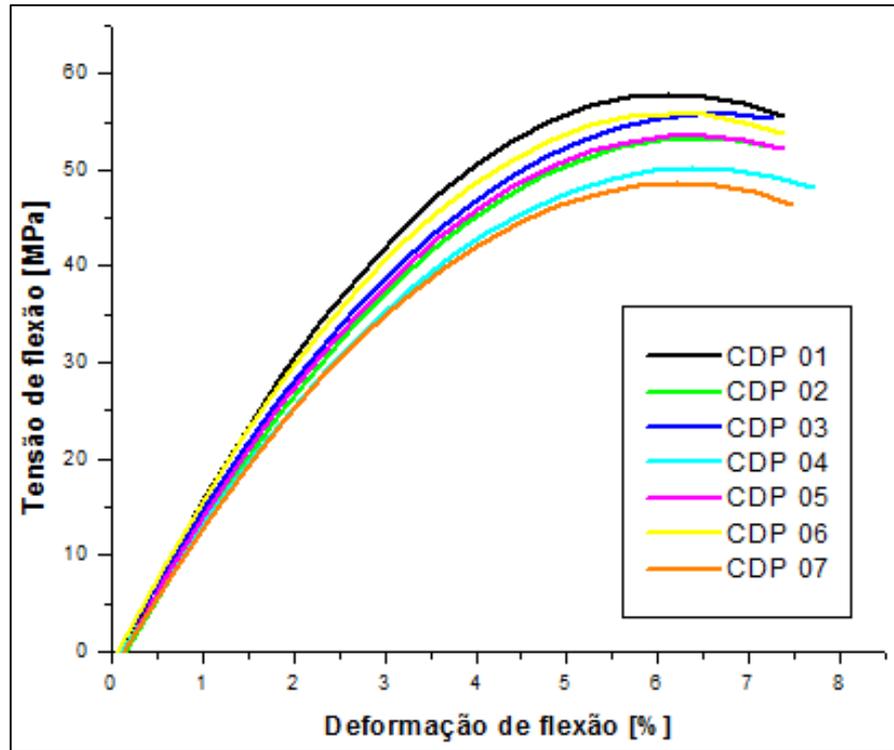


Figura 40 - Diagrama tensão-deformação de flexão.

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Figura 40, a poliuretana enriquecida com o carbonato de cálcio apresenta um comportamento não-linear. Os valores das propriedades para 0,5% de deformação dos corpos de prova ensaiados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios das propriedades obtidas nos ensaios de flexão

Propriedades	CDP 01	CDP 02	CDP 03	CDP 04	CDP05	CDP 06	CDP 07
Tensão de flexão para 0,5% de deformação [MPa]	7,768	5,553	6,756	6,042	5,976	7,173	6,571
Módulo de Elasticidade para 0,5% de deformação [GPa]	1,536	1,331	1,434	1,35	1,274	1,426	1,29

Fonte: Autoria própria.

Com o método da extensometria óptica por correlação de imagens foi possível obter valores do deslocamento da marcação central e confrontá-los com o deslocamento obtido pelo travessão da máquina de ensaios. A qualidade das gravações dos ensaios e suas condições como o manuseio realizado manualmente, desvio de foco pela câmera em um curto período de tempo, foram fatores que ocasionaram uma diferença média relativa de 1,95% entre os valores obtidos pelo travessão e pela correlação de imagens, conforme ilustra a Figura 41. Os valores do deslocamento da marcação central possibilitaram também obter a média do módulo de elasticidade para deformação de 0,5% de deformação das amostras ensaiadas e estes são apresentados na Tabela 5, assim como suas diferenças relativas.

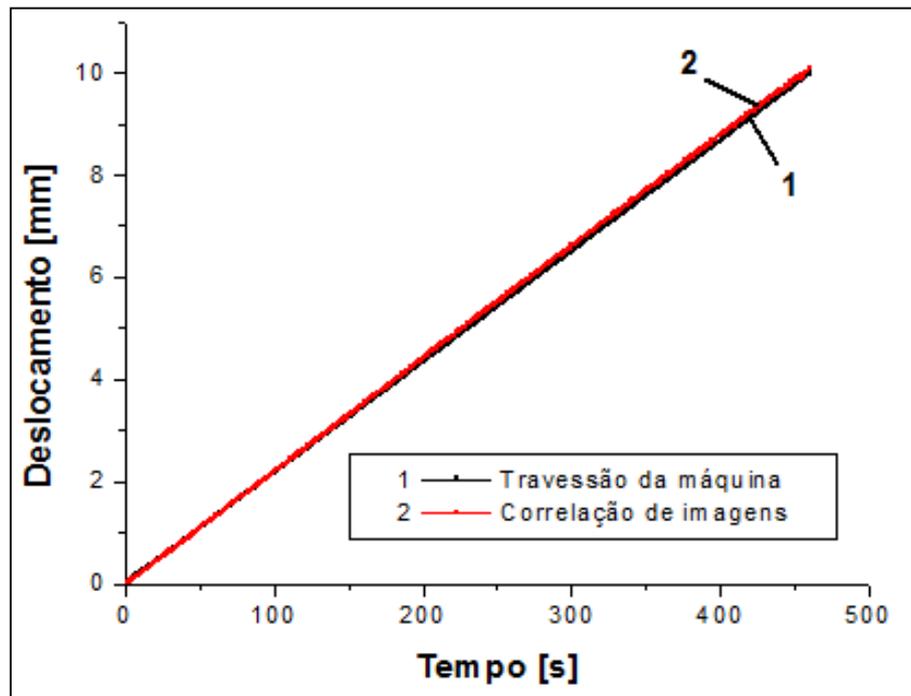


Figura 41 - Comparação do deslocamento do travessão da máquina e o método de correlação de imagens para o ensaio de flexão

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Valores médios obtidos pela extensometria óptica por correlação de imagens para ensaio de flexão

Propriedades	Valores médios
Média do módulo de elasticidade para 0,5% de deformação pelo travessão [GPa]	1,377
Média do módulo de elasticidade para 0,5% de deformação por correlação de imagens [GPa]	1,419
Diferença relativa entre módulo de elasticidade por travessão e correlação de imagens [%]	2,96

Fonte: A autoria própria

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4.2.1 Parâmetros para o modelo de Drucker-Prager

Considerado um modelo constitutivo, o modelo de Drucker-Prager consiste no comportamento elasto-plástico, onde o escoamento é controlado por uma tensão hidrostática e uma tensão desviadora (desequilíbrio das tensões entre os diferentes eixos). Este modelo é aplicado em materiais que apresentam tensão de escoamento de compressão maior que sob tração, o que foi possível se constatar no comportamento da poliuretana.

O modelo de Drucker-Prager consta como um dos demais modelos existentes no software ABAQUS®, e é utilizado juntamente com a modelo elástico. Para que a

simulação possa ser realizada, faz-se necessário ter posse dos dados das propriedades elásticas do material estudado, como o módulo de elasticidades (E) e o coeficiente de Poisson (ν) que irão descrever o comportamento da região elástica. A conclusão da simulação consiste em descrever o comportamento da região plástica, na qual o modelo de Drucker-Prager exige alguns parâmetros como o ângulo de dilatação do material (ψ), ângulo de atrito interno do material (β) e coesão (d). Para obter esses valores, primeiramente deve-se obter a reta que representa a superfície de escoamento, dada no espaço $p - t$. O ponto p é dado através da tensão média entre as tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), dado pela Equação (34).

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (34)$$

Neste trabalho, há a consideração do ensaio ser uniaxial e por esta razão os valores de σ_2 e σ_3 são nulos, gerando uma nova expressão devido à simplificação, representada pela Equação (35), abaixo.

$$p = -\frac{\sigma_1}{3} \quad (35)$$

Ressalta-se que o valor de σ_1 é positivo para tração e negativo para compressão.

Já o valor de t é dado pela tensão equivalente de von Mises, apresentado pela Equação (36).

$$t = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (36)$$

Considerando o caso uniaxial obtemos a Equação (37):

$$q = \sigma_1 \quad (37)$$

Os pares de pontos foram calculados através das tensões de escoamento sob tração e compressão, obtidos pelos ensaios experimentais e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros do modelo de Drucker-Prager

Parâmetro	Valores obtidos
Ângulo de atrito interno (β) [°]	19,63
Coesão (d)	41,835
Ângulo de dilatação (ψ) (Associatividade $\psi = \beta$)	19,63

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Parâmetros para o modelo de von Mises

Para o modelo viscoplástico foi utilizado o critério de von Mises que considera que o momento do escoamento ocorre quando a energia associada à mudança de forma da amostra sob carregamento multiaxial iguala-se à energia de deformação do corpo de prova. Sua aplicação no software ABAQUS® depende de quatro parâmetros, sendo eles f, A, n, m . O parâmetro f é determinado através da realização dos ensaios de tração sob diferentes velocidades, na qual se constrói a curva tensão-deformação verdadeira e determina o módulo de elasticidade (E) para cada velocidade de ensaio. Calcula-se f pela Equação (17), considerando os valores de módulo de elasticidade

que não sofrem bruscas variações. Para os demais parâmetros realiza-se o método de tentativa e erro, calibrando-os para representar a curva obtida experimentalmente.

4.2.3 Resultados das simulações de tração

A Figura 42 apresenta o modelo do corpo de tração a ser simulado no software ABAQUS®, em conjunto de sua malha e após a simulação ser realizada com o corpo já deformado.

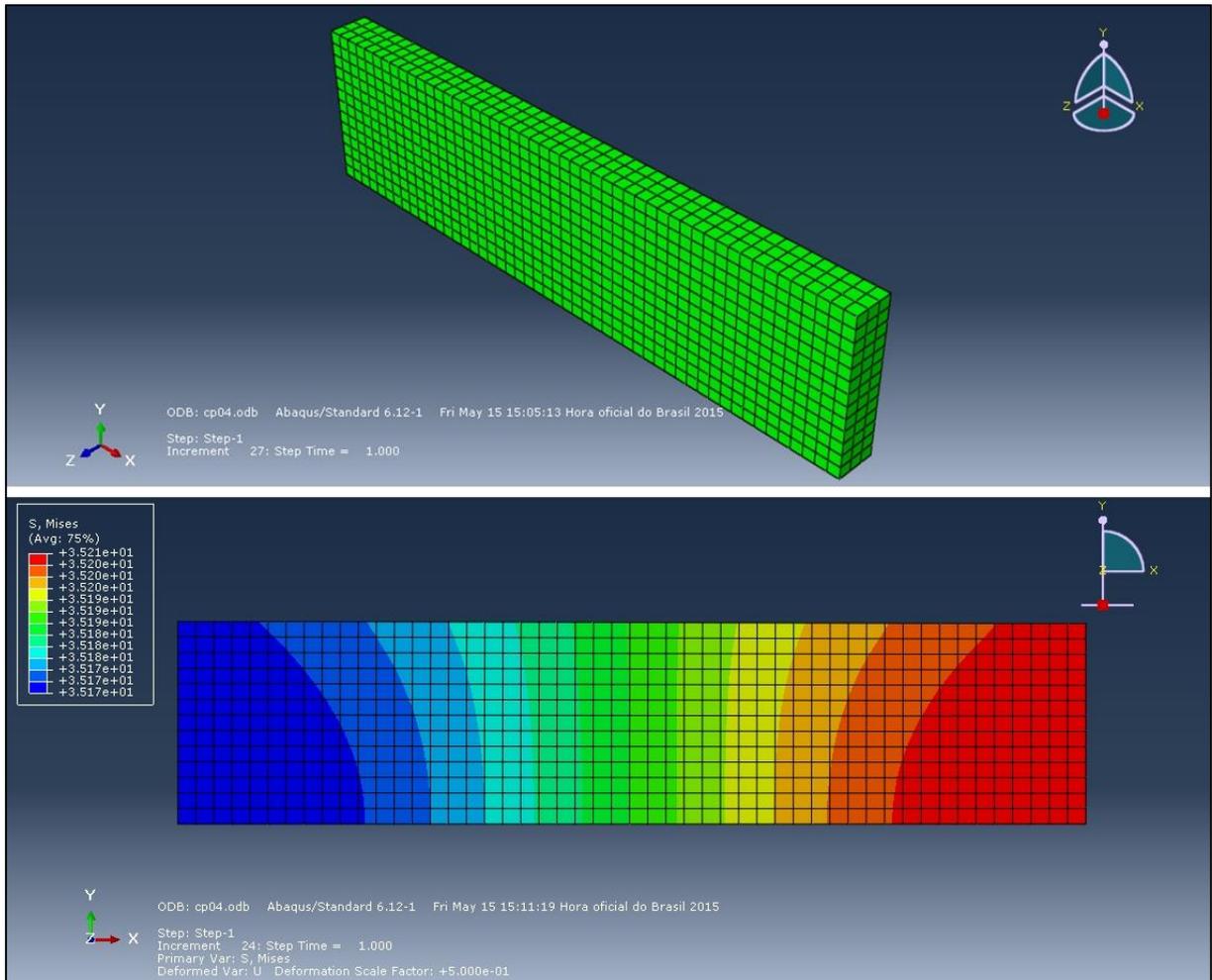


Figura 42 - Geometria utilizada na simulação de tração antes e depois da aplicação dos métodos
Fonte: Autoria própria

Para o modelo de Drucker-Prager, foram adotados os valores da Tabela 6. Já para o modelo viscoplástico, critério de von Mises foi calculado f a partir da Equação (17) e os demais parâmetros (A, n, m), foi utilizado os seguintes valores apresentados na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de tração

Parâmetros	f	A	n	m
PU10% $CaCO_3$	0,014	6	1,25	0

Fonte: Autoria própria

Após a conclusão da simulação foi possível comparar as curvas tensão-deformação obtidas experimentalmente e a partir dos modelos de Drucker-Prager e von Mises, critério viscoplástico. A Figura 43 apresenta o resultado da comparação.

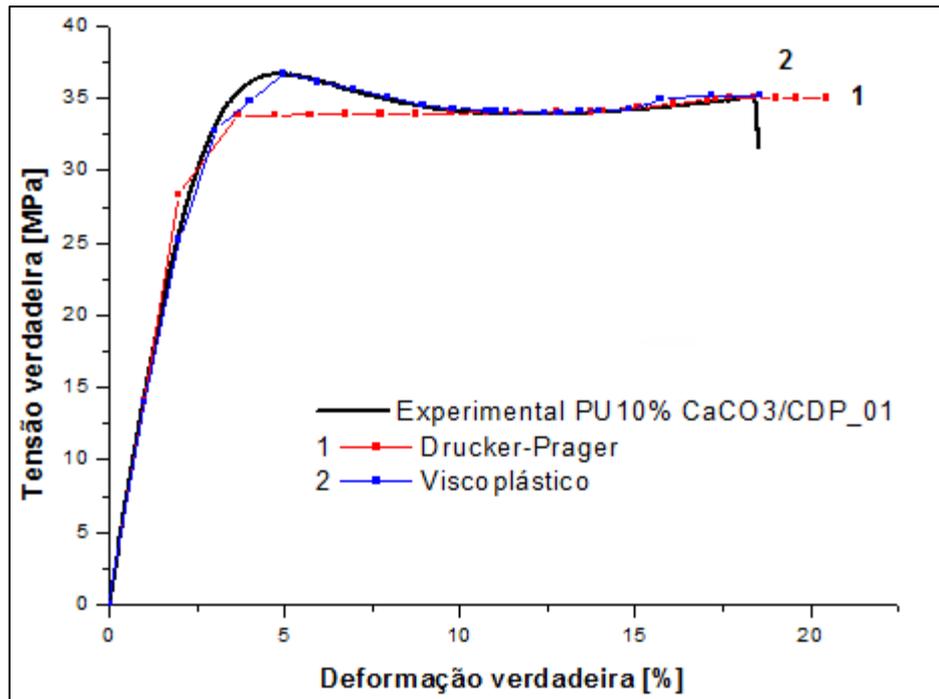


Figura 43 – Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob tração

Fonte: Autoria própria

A partir das curvas geradas, pode-se ressaltar que a simulação do modelo von Mises, critério viscoplástico representou melhor a curva tensão-deformação obtida experimentalmente, quando comparada com o modelo de Drucker-Prager.

O modelo de Drucker-Prager apresentou menores valores de tensão que a tensão obtida pelos ensaios, desenvolvendo uma representação mais próxima da curva experimental, na região do hardening do material. Isso mostra que o material estudado apresenta um comportamento dúctil.

Quando analisado, o modelo von Mises, critério viscoplástico apresenta uma melhor descrição da curva tensão-deformação obtida experimentalmente, com

exceção de uma pequena divergência na região da tensão de escoamento da poliuretana.

Essas informações ficam ainda mais evidentes e se comprovam quando uma análise estatística é realizada, demonstrando que o modelo de Drucker-Prager apresentou um erro relativo de 7,62% e o modelo de von Mises um erro de 1,06% quando comparados a curva experimental.

4.2.4 Resultados das simulações de compressão

A Figura 44 apresenta o modelo do corpo de compressão a ser simulado e após a simulação ser realizada com o corpo já deformado.

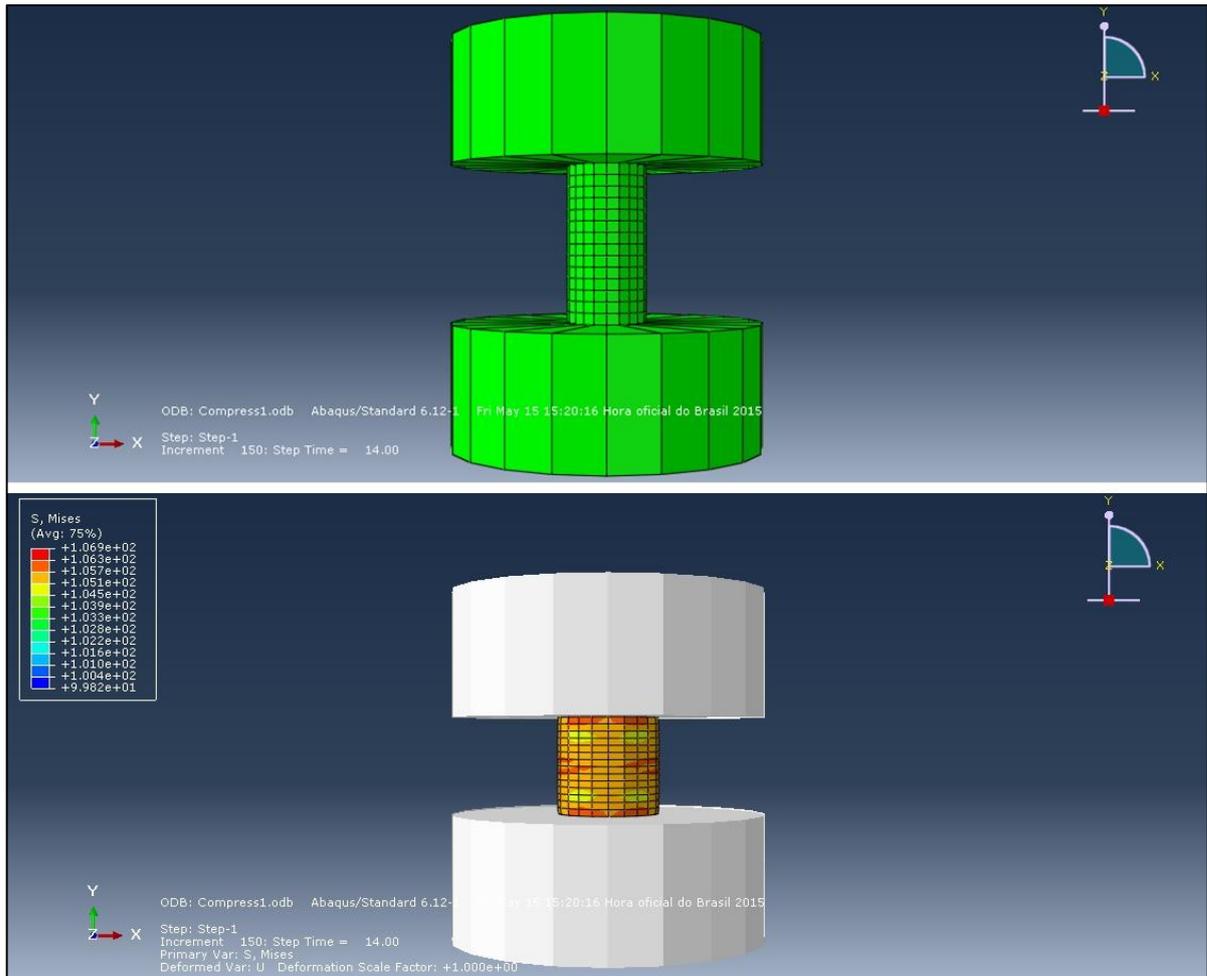


Figura 44 - Geometria utilizada na simulação de compressão antes e depois da aplicação dos métodos

Fonte: Autoria própria

O modelo de Drucker-Prager para as simulações de compressão também utilizou os parâmetros da Tabela 6, enquanto o modelo de von Mises calculou o parâmetro f e a partir deste, calibrou os valores de A, n, m , apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de compressão

Parâmetros	f	A	n	m
PU10% $CaCO_3$	0,014	6	1,25	0

Fonte: Autoria própria

Concidentemente, neste caso os parâmetros de tração e compressão resultaram os mesmo valores. Contudo vale lembrar que em uma situação adversa pode haver divergências entre os valores e este divergirem para cada ensaio. As curvas tensão-deformação para compressão estão representadas na Figura 45, abaixo.

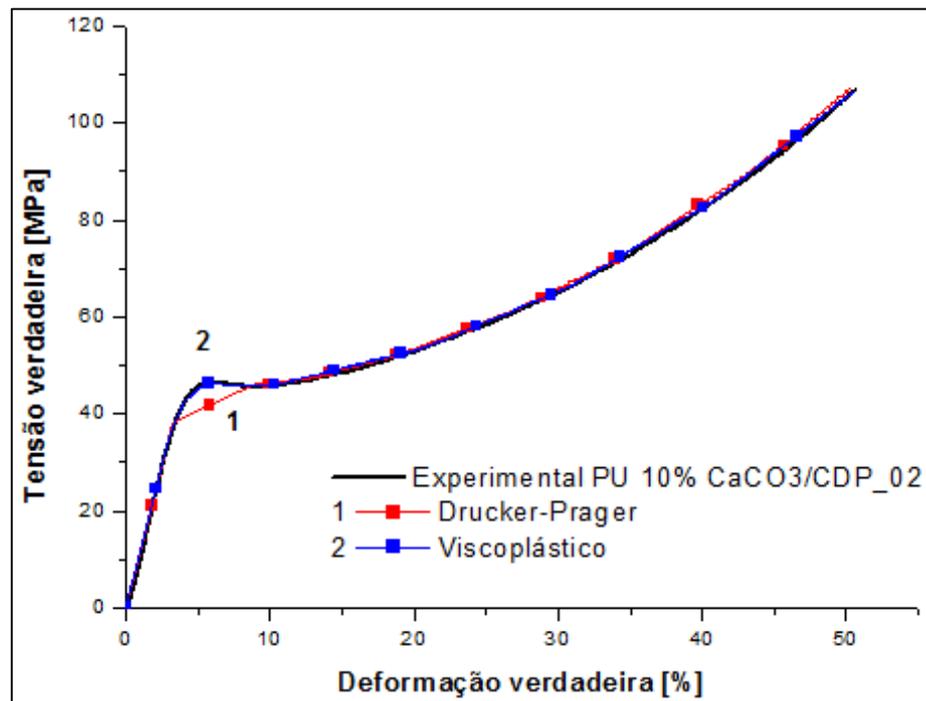


Figura 45 – Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob compressão

Fonte: Autoria própria

Nota-se que assim como os resultados obtidos para tração, as curvas tensão-deformação de ambos os modelos possuem uma linearidade bem representada e também, tal como nos resultados de tração, o modelo de von Mises, critério viscoplástico apresentou um comportamento mais próximo da curva experimental.

O modelo de Drucker-Prager apresentou maior divergência na região do escoamento, com uma região de softening bem definida e valores um pouco maiores que a curva obtida pelos ensaios monotônicos de compressão na região do hardening.

Para o modelo de von Mises, critério viscoplástico o comportamento da curva simulada se aproximou mais da curva experimental quando comparada ao modelo de Drucker-Prager.

Com a análise das tensões referentes à deformação na tensão de escoamento, o compósito PU 10% $CaCO_3$ apresentou um erro de 10,22% no modelo de Drucker-Prager e de 0,24% no modelo viscoplástico.

4.2.5 Resultados das simulações de flexão

A Figura 46 apresenta o modelo do corpo de compressão a ser simulado e após a simulação ser realizada com o corpo já deformado.

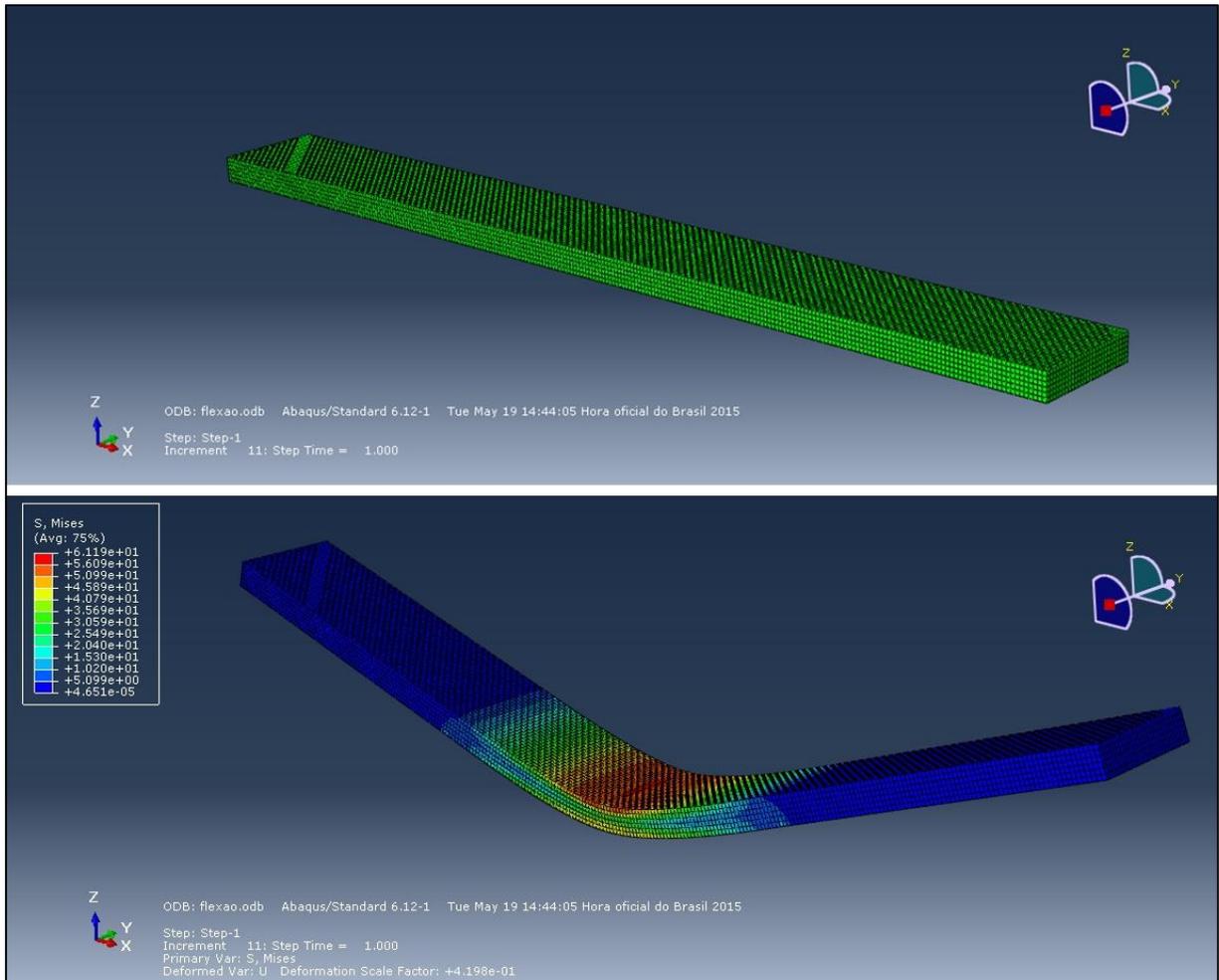


Figura 46 - Geometria utilizada na simulação de flexão antes e depois da aplicação dos métodos
Fonte: Autoria própria

Os parâmetros do modelo de Drucker-Prager para a simulação de flexão seguiram os valores da Tabela 6. Para o modelo de von Mises, os parâmetros foram determinados a partir do valor de f , calculado pela Equação (17). Os valores dos parâmetros do modelo viscoplástico estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros para o modelo de von Mises para simulação de flexão

Parâmetros	f	A	n	m
PU10% $CaCO_3$	0,014	0,15	1,25	0

Fonte: Autoria própria

A Figura 47 apresenta os resultados da simulação dos modelos quando comparados a curva obtida pelos ensaios monotônicos de flexão.

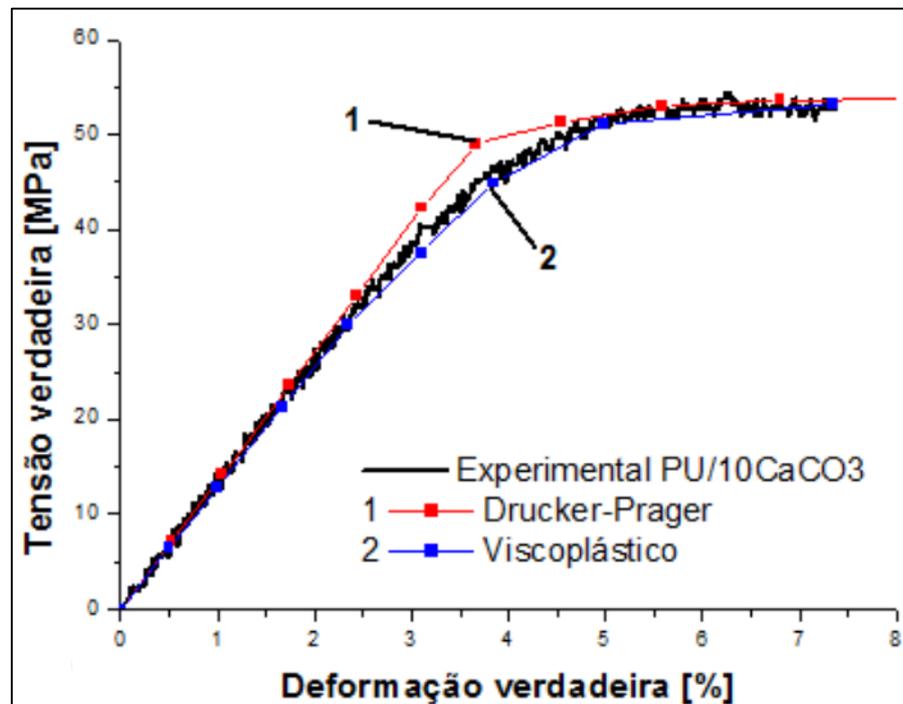


Figura 47 - Comparação da curva tensão-deformação experimental, de Drucker-Prager e modelo viscoplástico sob flexão

Fonte: Autoria própria

Assim para as simulações de tração e compressão, o modelo von Mises, critério viscoplástico foi o que melhor representou a curva tensão-deformação obtida nos ensaios monotônicos de flexão, a qual descreve o comportamento mecânico do compósito poliuretana enriquecida com 10% de $CaCO_3$ sob flexão. Também como nas simulações anteriores, a região elástica está bem definida e em particular, o modelo

de Drucker-Prager apresentou uma divergência considerável na região do escoamento.

5 CONCLUSÃO

De posse dos resultados analisados obtidos através dos ensaios mecânicos monotônicos realizados durante todo esse trabalho, torna-se possível caracterizar a poliuretana enriquecida com 10% de $CaCO_3$ e ressaltar alguns pontos.

O ensaio monotônico de tração apresentou um comportamento característico de materiais dúcteis, sendo composto de uma região de softening bem definida e de hardening levemente acentuado. Notou-se também que a curva tensão-deformação verdadeira apresentou valores superiores, quando relacionados com os valores de engenharia. Essa diferença ocorre, pois as expressões de engenharia utilizam valores iniciais da geometria do corpo de prova, enquanto que as equações da tensão e deformação verdadeira acompanham a deformação instantânea. Após ser realizados ensaios com diferentes taxas de deformação, foi possível notar que a velocidade do ensaio influencia no comportamento do compósito, o qual para cada velocidade apresenta diferentes módulos de elasticidade e conseqüentemente valores distintos de rigidez. O coeficiente de Poisson também pode ser determinado a partir dos valores retirados pelos extensômetros longitudinal e transversal e também pelo coeficiente angular da reta entre os valores de deformação. Os resultados apresentaram rupturas durante o ensaio e atribui-se a isso, a presença de bolhas internas ou carbonato de cálcio não dissociado completamente, que atuaram como concentradores de tensão. Contudo, os corpos de prova ensaiados mantiveram uma média de suas propriedades relativamente próxima aos valores obtidos por cada CDP.

O ensaio monotônico de compressão foi realizado com uma velocidade de ensaio de 1,3 mm/min, na qual se deslocou 10 milímetros do travessão da máquina. A medida a carga ia sendo aplicado e o corpo de prova sofria compressão, observou-se que o corpo se deformava formando um “S” na direção longitudinal. Isso ocorreu, pois na tentativa do corpo encontrar um plano de cisalhamento, o corpo acomodou-se alterando sua direção no eixo vertical. Como os CDPs de tração, as amostras de compressão também apresentaram valores superiores de tensão na curva tensão-deformação verdadeira, relacionadas com a curva gerada para os valores de

engenharia. Notou-se que os níveis de tensão sob compressão são maiores que os obtidos sob tração. Para a medida da deformação transversal e longitudinal, foi utilizada a técnica de correlação de imagens, a qual apresentou uma diferença relativa de 5,45% na direção longitudinal.

O ensaio monotônico de flexão tem como característica posicionar o corpo de prova sobre dois apoios e aplicar a carga na direção vertical. Em razão do corpo de prova não ser fixado nos apoios, há um escorregamento e este é registrado pela máquina de ensaios. Assim, apresenta-se uma curva serrilhada que foi melhorada por ajuste polinomial da curva. Assim como no ensaio de compressão, também foi aplicado um deslocamento de 10 milímetros para o aplicador de carga, a partir da origem. Dessa forma, foram obtidos dados como o módulo de elasticidade devido a flexão e a tensão de flexão para 0,5% de deformação. Para caráter comparativo, além dos dados obtidos pela máquina de ensaio, foi utilizada a técnica de correlação de imagens e obteve-se 1,95% de diferença relativa.

Os erros apresentados podem ser ocasionados por diversos motivos, desde a manipulação e configuração da câmera até a iluminação do ambiente. Além disso, as marcações utilizadas nos ensaios de compressão e flexão foram confeccionadas manualmente e mesmo que haja uma preocupação, não há uma boa confiabilidade em sua geometria.

Após os ensaios monotônicos de tração, compressão e flexão serem devidamente realizados e analisar os resultados obtidos, alguns parâmetros foram utilizados e tiveram a função de calibrar as simulações realizadas em software computacional. Para esta etapa, optou-se por utilizar dois modelos de simulação existentes no software: modelo de von Mises, com critério viscoplástico e modelo de Drucker-Prager. Ambos os modelos apresentaram uma boa convergência, tanto na fase elástica, quanto plástica ressaltando melhores resultados no modelo de von Mises, com critério viscoplástico. O modelo de Drucker-Prager apresentou uma pequena divergência não significativa no fim do regime elástico, a qual é compensada pela fácil manuseio do modelo sobre o modelo de von Mises. Por fim, a simulação dos modelos pode gerar melhor convergência à medida que se refina seus parâmetros.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D695 – 96**: standard test method for compressive properties of rigid plastics. West Conshohocken, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790 – 96**: standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 – 96**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 1996.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros. Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ed.** São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CANGEMI, J. M. **Poliuretano: De travesseiro a Preservativos, um Polímero Versátil**, Ribeirão Preto, SP, 2009.

CORDEIRO, G. G. **Caracterização físico mecânica de materiais utilizados em palmilhas para diabéticos.** 2010. 59. Dissertação (Mestre em Bioquímica) - Universidade do Vale do Paraíba, São José Lorena, São Paulo, 2010.

COSTA, R. R. C. **Aplicabilidade de modelos construtivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímero.** 2007. 171 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EMSLEY, J. **Moléculas em exposição.** São Paulo: Edgard Blucher, 2001. p. 120-121

FERNEDA, A. B. **Estudo teórico-experimental do comportamento elastoplástico do poliuretano derivado do óleo de mamona (Ricinus Communis).** 135 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FILHO, G. D. S. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril.** USP- São Carlos, 2001.

FRANÇA, J. M. B. **Using the correlation of images in the study of fracture mechanics in 8630 and A182 steels F22 used in the oil industry.** RunPetro, 2014.

GARCIA, A. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

GARCIA, **Zona de plastificação e escavação com pilares de suporte.** Artigo técnico, 2009

GOMES, I. F. **Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elastoplásticos e visco-elastoplásticos.** Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

GRAAF, G. M. M. V. **Avaliação da resistência mecânica à compressão axial de diferentes formulações de poliuretano de mamona com carbonato de cálcio e de quitosana com fosfato de cálcio.** USP, 2012

IGNÁCIO, H; MAZZER, N; BARBIERI, C.H. e CHIERICE, G.O. **Estudo sobre a aplicabilidade médica da poliuretano derivada da mamona.** Resenha Ortopédica, n. 6, 1996.

KUMBAR, S. G. **Natural and synthetic biomedical polymers.** Editora: Elsevier, 1º ed., 2014.

LIMA, L. R. O. **Critérios de resistência: Escoamento, plasticidade e ruptura.** Universidade de Coimbra, 2013.

MARQUES, B. R. **Poliuretano derivado de óleo de mamona: De Meio Ambiente a Biocompatibilidade,** Lins, 2009.

NETO, S. C. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1997.

OHARA, G.H.; KOJIMA, K.E. e ROSSI, J.C. **Estudo experimental da biocompatibilidade do polímero poliuretano da mamona implantado em coelhos.** Acta Ortopédica Brasileira, n. 3, p. 2, 1995.

PLEPIS, A. M. G. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1991.

RAMALHO, M. **Plásticos Biodegradáveis Provenientes da Cana de Açúcar**. São Paulo, Faculdade de Tecnologia da zona Leste, 2009 apud SILVA C. O. Universidade Estadual de Alagoas, 2013.

SANTANA, M. C. **Impacto ambiental causado pelo descarte de embalagens plásticas – Gerenciamento e riscos**. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, 2009.

SANTOS, H. M. M. **Disposição final dos resíduos sólidos em Maringá-PR: Impactos e soluções**. Dezembro 2010 apud SILVA C. O. Universidade Estadual de Alagoas, 2013.

SARAN, W. R. **Estudos de fenômenos de osteogênese em implantes de polímero vegetal**. USP-São Carlos, 2011.

SAVY FILHO, A. **Mamoneira: técnicas de cultivo**. *O Agrônomo*, n. 53, v.1, p.16-17, 2001.

SENA, L. V. T. **Análise do comportamento mecânico do concreto submetido ao ensaio de compressão diametral: análise experimental com o uso da técnica da correlação de imagens**. UFERSA, 2013.

SILVA, R. V. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2003.

STURION, D. J. **Uso de polímeros em Medicina Veterinária**. *Scientific Communication*. 1999.

VIDAL, A. C. **Preparação e caracterização de biocompósitos de poliuretano reforçados com fibras da palmeira para aplicação em palmilhas**. Artigo em revista do curso de mestrado da UniFOA, Volta Redonda, 2014.

VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro: Vilar, 1999.

**ANEXO A - FICHA DE INFORMAÇÕES SOBRE PRODUTOS QUÍMICOS
CARBONATO DE CÁLCIO**

	FICHA DE INFORMAÇÕES SOBRE PRODUTOS QUÍMICOS CARBONATO DE CÁLCIO	
	Rev.5 et.2007	Página 1 de 4

1 – IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome do Produto:	CARBONATO DE CÁLCIO
Estado Físico:	Pó fino
Cor:	Branco
Odor:	Inodoro
Número de Registro (CAS n°):	471-34-1

2 – COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

Tipo de produto: Substância

Nome químico comum ou genérico: Carbonato de cálcio

N° CAS: 471-34-1

3 – IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

Perigos mais importantes: Produto atóxico, não corrosivo, não inflamável, inodoro.

Efeitos ambientais: O produto não agressivo ao meio ambiente. Evitar penetração em cursos d'água natural.

Perigos específicos: Não aplicável, segundo o fabricante/fornecedor.

4 – MEDIDAS DE PRIMEIROS SOCORROS

Inalação:

Não é perigoso se inalado em pequenas quantidades.

Contato com a pele:

Lavar com água em abundância e sabão.

Contato com os olhos:

Lavar com água em abundância.

Ingestão:

Não é perigoso se ingerido em pequenas quantidades.

Proteção do prestador de primeiros-socorros:

Qualquer máscara indicada para manuseio de pó fino.

Notas para o médico: Este produto não é considerado insalubre, tóxico e não apresenta nenhum ingrediente perigoso em sua composição.

**ANEXO B – TABELA DE EQUIVALÊNCIA DA ABERTURA DE MALHA
E TAMIS**

ASTM USS	MESH TYLER	Abert. mm/ y	TOL. (malha)		Máx. até 6% + Z	Máx. indiv. + X	FIO mm.	TOL. (fio)	
			DE	ATÉ				DE	ATÉ
4"	****	100,00	97,06	102,94	103,38	103,82	6,30	5,4	7,2
3.1/2"	****	90,00	87,34	92,66	93,09	93,53	6,30	5,4	7,2
3"	****	75,00	72,78	77,22	77,65	78,09	6,30	5,4	7,2
2.1/2"	****	63,00	61,13	64,87	65,29	65,71	5,60	4,8	6,4
2"	****	50,00	48,51	51,49	51,89	52,29	5,00	4,3	5,8
1.3/4"	****	45,00	43,65	46,35	46,73	47,12	4,50	3,9	5,2
1.1/2"	****	37,50	36,37	38,63	38,99	39,35	4,50	3,8	5,2
1.1/4"	****	31,50	30,55	32,45	32,79	33,13	4,00	3,4	4,6
1"	****	25,00	24,24	25,76	26,07	26,38	3,55	3,0	4,1
3/4"	****	19,00	18,42	19,58	19,85	20,13	3,15	2,7	3,6
5/8"	****	16,00	15,51	16,49	16,74	16,99	3,15	2,7	3,6
1/2"	****	12,50	12,11	12,89	13,11	13,33	2,50	2,1	2,9
		10,00	9,69	10,31	10,51	10,71	2,50	2,1	2,9
3/8"	****	9,50	9,20	9,80	9,99	10,18	2,24	1,9	2,6
5/16"	****	8,00	7,75	8,25	8,43	8,60	2,00	1,7	2,3
1/4"	****	6,30	6,10	6,50	6,65	6,81	1,80	1,5	2,1
3,5	3,5	5,60	5,42	5,78	5,92	6,07	1,60	1,3	1,9
		5,00	4,84	5,16	5,29	5,43			
4	4	4,75	4,60	4,90	5,03	5,16	1,60	1,3	1,9
5	5	4,00	3,87	4,13	4,25	4,37	1,40	1,2	1,7
6	6	3,35	3,24	3,46	3,57	3,67	1,25	1,06	1,5
7	7	2,80	2,71	2,89	2,99	3,09	1,12	0,95	1,3
8	8	2,36	2,28	2,44	2,53	2,61	1,00	0,85	1,15
10	9	2,00	1,93	2,07	2,15	2,23	0,90	0,77	1,04
12	10	1,70	1,64	1,76	1,83	1,90	0,80	0,68	0,92
14	12	1,40	1,35	1,45	1,51	1,58	0,71	0,60	0,92
16	14	1,18	1,14	1,22	1,28	1,34	0,63	0,54	0,72
18	16	1,00	0,97	1,03	1,09	1,14	0,56	0,48	0,64
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
20	20	850	821	879	928	977	500	430	580
25	24	710	685	735	779	822	450	380	520
30	28	600	579	621	661	701	400	340	460
35	32	500	482	518	554	589	315	270	360
40	35	425	409	441	473	506	280	240	320
45	42	355	342	368	398	427	224	190	260
50	48	300	288	312	338	365	200	170	230
60	60	250	240,1	259,9	284	308	160	130	190
70	65	212	203,3	220,7	242	264	140	120	170
80	80	180	172,4	187,6	207	227	125	105	150
100	100	150	143,4	156,6	175	193	100	85	115
120	115	125	119,2	130,8	147	163	90	77	104
140	150	106	100,8	111,2	126	141	71	60	82
170	170	90	85,4	94,6	108	122	63	54	72
200	200	75	70,9	79,1	92	104	50	43	53
230	250	63	59,3	66,7	78	89	45	38	52
270	270	53	49,6	56,4	67	77	36	31	41
325	325	45	41,9	48,1	58	67	32	27	37
400	400	38	35,1	40,9	49	58	30	24	35
500	500	25	22	28	34	41	25		
635	635	20	17	23	29	36	25		