

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS SUBMETIDOS
À DEFORMAÇÕES FINITAS

por

Igor Fernando Rodrigues

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2013.

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS SUBMETIDOS
À DEFORMAÇÕES FINITAS

por

Igor Fernando Rodrigues

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Porto Alegre, 11 de novembro de 2013.

Aos meus pais

RODRIGUES, I. F. **Caracterização do comportamento de termoplásticos submetidos a deformações finitas**. 2013. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Neste trabalho é realizada a caracterização de parâmetros constitutivos de um material termoplástico através do ajuste de um modelo numérico com dados provenientes de um ensaio de tração em um corpo de prova com entalhe. Para este estudo foi utilizado um modelo elastoplástico multilinear capaz de representar adequadamente a curva experimental de força e deslocamento obtida no ensaio. Informações adicionais sobre o campo de deslocamentos na região da estricção, obtidos através de um método de medição óptico, são utilizados no procedimento de identificação dos parâmetros. O estudo demonstra a importância de dados complementares aos tradicionalmente obtidos em uma máquina de ensaio quando o material é submetido à grandes deformações. Para isto, este estudo apresenta comparações feitas entre a escolha de diferentes pesos sobre os dados de força e deslocamentos transversais obtidos opticamente para a caracterização do modelo constitutivo.

PALAVRAS-CHAVE: Elastoplasticidade, Identificação de parâmetros, Material termoplástico.

RODRIGUES, I. F. **Characterization of thermoplastic's behavior under finite strains**. 2013. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

In this study, the parameters in a constitutive model for simulating the behavior of a thermoplastic material are determined by fitting a numerical model with experimental measurements in a tensile-testing machine using a notched specimen. A multi-linear elastoplastic model capable to represent the experimental load-displacement curve is used. Displacements field's information, measured optically over the surface of the sample across the necking area, is used to provide extra data in parameter determination. This study shows how valuable are this extra data in addition to those obtained from the tensile-testing machine, when the material is under large strain behavior. For that, a comparison between the choice of different weights in the strength and transversal displacement data measured optically used in the cost function is performed to characterize the constitutive model.

KEYWORDS: Elastoplasticity, Parameter Identification, Thermoplastic Material.

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1	POLÍMEROS	2
3.1.1	ESTRUTURA DOS POLÍMEROS	2
3.1.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS	2
3.1.3	PLASTICIDADE EM POLÍMEROS (TERMOPLÁSTICOS)	3
3.2	MODELOS CONSTITUTIVOS	4
3.3	TÉCNICAS DE ANÁLISES INVERSAS	5
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS	6
3.5	MÉTODOS ÓPTICOS	6
3.5.1	CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	6
4.	METODOLOGIA MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL	7
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	7
4.2	MODELO MATEMÁTICO	8
4.3	OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	9
5.	MODELO COMPUTACIONAL	9
5.1	MODELO CONSTITUTIVO MULTI-LINEAR ISOTRÓPICO ADOPTADO	9
5.2	AJUSTE DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS	10
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
7.	CONCLUSÕES	13
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	APÊNDICES	16

1. INTRODUÇÃO

O crescente uso dos polímeros na engenharia moderna traz consigo a necessidade de uma representação confiável das características mecânicas dos materiais utilizados. São as equações constitutivas que desempenham este papel, tornando-se componentes fundamentais para qualquer cálculo estrutural. Estas fornecem as relações indispensáveis entre tensões e deformações, que pode ser elástica linear ou não linear dependendo do material, ou ainda muito mais complexa no caso de análises envolvendo fenômenos dissipativos, como dependência no tempo ou outros comportamentos inerentes ao material. Materiais termoplásticos, objeto deste trabalho, possuem um comportamento mecânico complexo do ponto de vista numérico. Estes apresentam resposta não linear quando submetido a grandes deformações, sensibilidade a velocidade de deformação, temperatura, umidade, entre outros fenômenos inelásticos que necessitam de modelos numéricos adequados para representá-los.

Em resposta a isto, têm-se o desenvolvimento de modelos constitutivos cada vez mais aprimorados, que por sua vez, necessitam de informações do material capazes de caracterizar tal comportamento. A caracterização do material é realizada através da obtenção de constantes representativas específicas para cada modelo, denominadas parâmetros constitutivos. Alguns destes possuem sentido físico, como os módulos de elasticidade e de Poisson, outros possuem um sentido mais abstrato, como é o caso dos parâmetros de Ogden para hiperelasticidade. A obtenção destas constantes normalmente caracteriza-se como um problema de análise inversa e sua identificação está diretamente associada a dados experimentais, que devem ser obtidos através de ensaios mecânicos específicos. Dependendo do material e da lei constitutiva utilizada para representá-lo, pode ser necessária a realização de vários ensaios para obter dados adequados e suficientes para caracterizar o material.

O crescente avanço de tecnologia e o respectivo aumento da capacidade de processamento computacional têm permitido a realização de simulações numéricas com maior custo computacional, onde mais fatores podem ser considerados nas análises. Neste âmbito muitos autores têm utilizado técnicas para obter campos de deslocamento ao longo do corpo de prova e com isso gerar dados adicionais do comportamento do material, conferindo uma maior representatividade ao modelo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de um polímero termoplástico PVC submetido a deformações finitas. Para isto, será realizada uma caracterização numérico-experimental utilizando informações comumente obtidas de um ensaio de tração uniaxial, simultaneamente com dados de deslocamento de pontos na região de estrição obtidos opticamente. Assim, pretende-se implementar uma rotina para a identificação dos parâmetros constitutivos de um simples modelo elastoplástico multilinear, associando a resposta obtida de um modelo de elementos finitos com dados experimentais. Como um objetivo secundário, pretende-se estudar a influência do fenômeno de estrição na identificação dos parâmetros constitutivos do modelo representativo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 POLÍMEROS

Os polímeros têm sido cada vez mais aceitos na indústria e incluídos em projetos mecânicos em parte pela sua versatilidade de forma, pois podem, basicamente, serem sintetizados em qualquer forma desejada, e em parte pelas suas boas características em meios corrosivos. Este crescimento recente é guiado pelo desenvolvimento de recursos voltados a sinterização de polímeros em grande variedade e aplicação deste processo às mais diversas geometrias.

Polímeros são materiais constituídos por longas cadeias moleculares, chamadas de macromoléculas, onde estas são formadas pela repetição de uma unidade química chamada de monômero. Estes são utilizados desde a antiguidade, porém a síntese de polímeros tornou-se economicamente viável apenas no século XX, com a identificação do mecanismo da reação química de polimerização que faz com que pequenas moléculas se agrupem para formar as macro cadeias poliméricas.

3.1.1 ESTRUTURA DOS POLÍMEROS

A estrutura molecular dos polímeros pode ser diferida através do seu grau de cristalinidade entre estrutura amorfa, semicristalina ou cristalina, e a disposição da cadeia polimérica pode ser linear, ramificada, em rede ou união através de ligações cruzadas. Estruturalmente, os componentes fundamentais dos termoplásticos são macromoléculas com cadeias lineares ou ramificadas, sem ligações cruzadas - entre as cadeias poliméricas diferentes só existem interações intermoleculares secundárias. Este processo de ramificação caracteriza-se pela formação de uma cadeia secundária derivada a partir da estrutura principal. A presença destas derivações gera diferenças consideráveis no comportamento mecânico, quando comparado com a mesma cadeia disposta de forma não ramificada, assim como na sua distribuição de massa. [Rodolfo et. al., 2006; Saeki, 2002] expõem os principais mecanismos de polimerização do PVC como sendo: Mecanismo de polimerização via radicais livres; Processos de polimerização em emulsão e micro-suspensão; Processo de polimerização em massa; Processo de polimerização em solução; Processo de polimerização em suspensão. Este último corresponde a produção de cerca de 80% do PVC consumido mundialmente.

3.1.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS

Materiais poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados como uma alternativa aos metais, fato este justificável quando avaliadas as suas boas propriedades mecânicas, que cobrem uma vasta gama de aplicações, aliadas ao seu baixo custo de produção. O comportamento mecânico dos materiais poliméricos pode ser descrito com o auxílio de modelos matemáticos, que relacionam os estados de tensões e deformações.

Segundo [Rodolfo et. al., 2006], os polímeros podem ser divididos em três grupos, de acordo com suas características mecânicas: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Os termoplásticos correspondem à maioria dos plásticos encontrados no mercado, são capazes de ser repetidamente amolecidos pelo aumento da temperatura e endurecidos pela diminuição desta. Essa alteração reversível é física e não química, mas pode provocar alguma degradação no termoplástico, para um número elevado de ciclos de aquecimento e de resfriamento. Os termoplásticos podem ser convencionais (polietileno, polipropileno, poli cloreto de vinil - PVC) de engenharia (náilons) ou especiais.

Muitos materiais possuem comportamento elástico apenas para pequenos valores de deformação, após os quais o material atinge a superfície de escoamento. No caso dos

polímeros, pode-se dividir sua curva característica de engenharia, representada pela Figura 3.1, em três estágios diferentes: no primeiro ocorre a deformação elástica linear seguida por uma deformação não linear, onde ambos os processos são reversíveis; após o primeiro estágio a tensão atinge um valor máximo (tensão de escoamento), onde ocorre a formação da estricção seguida por uma queda pronunciada – estágio II. No terceiro estágio ocorre a estabilização da estricção e propagação desta por toda a extensão do corpo de prova. No quarto estágio têm-se deformação homogênea até a ruptura.

Este processo de formação, estabilização e propagação da estricção faz com que a curva de engenharia obtida em ensaios de tração uniaxial não seja representativa do comportamento constitutivo do material (curva real), podendo levar a erros grosseiros de análise de tensões. Para o fenômeno de propagação de estricção observada nestes materiais acontecer a curva real deveria apresentar um endurecimento pronunciado em grandes deformações, o que não se observa em uma curva de engenharia.

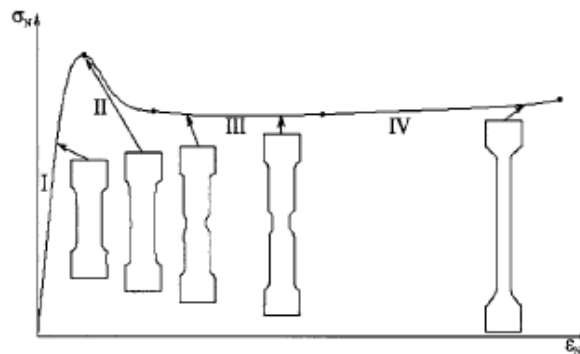


Figura 3.1 – Curva característica de engenharia de materiais poliméricos.

3.1.3 PLASTICIDADE EM POLÍMEROS (TERMOPLÁSTICOS)

O primeiro estágio da Figura 3.1 é caracterizado como comportamento elástico, e os demais estágios (II ao IV) são caracterizados como um estado de plasticidade, onde a deformação mecânica torna-se irreversível, devido ao escorregamento não reversível das cadeias poliméricas.

O ponto de máximo na curva tensão-deformação equivale ao limite de escoamento, é um tipo de transição heterogênea localizada entre a deformação elástica e a deformação plástica. Para os metais, este ponto normalmente é adotado como critério de limite para a resistência do material em projetos mecânicos. Quando há um escoamento nítido, a deformação plástica ocorre em um ou alguns pontos localizados e espalha-se por toda a parte útil do corpo de prova. No caso dos polímeros, quando se possui um corpo de prova uniforme, a deformação plástica pode ocorrer simultaneamente em diversos pontos do corpo de prova, necessitando a criação de um intensificador de tensões quando se deseja a existência de uma plastificação localizada.

Após ultrapassar a superfície de escoamento, o material encontra-se na zona plástica, que se caracteriza pela deformação permanente e endurecimento por deformação a frio, denominada encruamento do material. O grau de encruamento de um material determina a forma de sua curva do diagrama tensão-deformação na zona plástica. Enquanto que na zona elástica linear, cada igual acréscimo de tensão, produz um aumento igual de deformação, na zona plástica esta relação não é mais válida. O encruamento em polímeros tem como explicação a ocorrência de uma reorientação das cadeias poliméricas no sentido longitudinal da fibra, aumentando sua rigidez.

Na maior parte das teorias de plasticidade para materiais dúcteis, assume-se que as deformações plásticas são totalmente de natureza desviadora, e que a deformação volumétrica é totalmente elástica. Porém, no caso dos polímeros, estudos foram feitos por [Donato e

Bianchi, 2011; Farrokh e Khan, 2010] avaliando a influência da pressão hidrostática no critério de escoamento em polímeros. Farrokh e Khan, 2010, estudaram o comportamento do escoamento em polímeros semicristalinos como uma função da taxa de deformação, propondo uma equação dependente da pressão hidrostática. É discutido por Caddell et. al., 1974, o fato de que muitos critérios foram propostos para considerar o efeito hidrostático no escoamento em polímeros, mas que é difícil realizar uma distinção entre eles utilizando apenas dados extraídos de testes convencionais, necessitando de dados produzidos por experimentos que realcem este efeito, como feito por Kim et. al., 2013, que aplica testes hidrostáticos em uma geometria desenvolvida especialmente para este fim.

Hill, 1948, propõe uma teoria que descreve, de modo macroscópico, o escoamento e a plasticidade em materiais anisotrópicos, e explica que mesmo para materiais isotrópicos, deformações elevadas levam a existência de uma orientação preferencial. É demonstrado por Raghava e Caddel, 1973, que o critério de von Mises modificado demonstra bons resultados para polímeros vítreos amorfos, e questiona a necessidade do exaustivo emprego de diferentes critérios para diferentes polímeros.

Ainda existe muita discussão sobre o comportamento mecânico de plastificação de termoplásticos, demonstrando estes não possuem um tratamento consolidado, ou seja, ainda existe muito trabalho a ser realizado sobre o tema.

Como seria muito laboriosa a consideração numérica e experimental de todos os fenômenos mecânicos observados no comportamento de termoplásticos, neste trabalho apenas será considerado o comportamento elastoplástico não linear, sem a dependência da velocidade de deformação, temperatura ou dano mecânico.

3.2 MODELOS CONSTITUTIVOS

Modelos constitutivos servem para representar o comportamento mecânico de um material de acordo com suas características, relacionando o estado de tensões atuantes com seu respectivo estado de deformações. O conhecimento de uma equação constitutiva apropriada para representar um determinado modelo de um material é fundamental na realização de qualquer cálculo estrutural.

Os modelos utilizados para caracterização dos polímeros se diferem entre duas abordagens principais: os modelos micromecânicos, que são modelos estatísticos desenvolvidos baseados na observação da estrutura atômica do material; e os modelos fenomenológicos, baseados na observação do comportamento do material durante testes. Sendo este último o mais utilizado devido a sua abordagem mais simples, visto que não é necessário um entendimento sobre todos os mecanismos moleculares do material.

As teorias mais simples de plasticidade excluem o tempo como variável e ignoram qualquer característica do comportamento que ocorre além do ponto de escoamento. Zienkiewicz e Taylor, 2005, afirmam que o comportamento plástico clássico dos sólidos é caracterizado por uma relação de tensão-deformação que é independente da taxa de carregamento, mas depende da sequência (que pode ser convenientemente representada como um processo no tempo). Esta dependência pode ser vista em Zhou et. al., 2002, que mostra que a deformação plástica não é apenas dependente das propriedades do material, mas também do histórico de deformação plástica, propondo então um modelo constitutivo na sua forma integral.

Nos modelos elastoplásticos assume-se uma transição de um comportamento de deformação em elástica para plástica, com duas etapas bem definidas. No primeiro o material apresenta um comportamento perfeitamente elástico e reversível e seu domínio é definido pela superfície de escoamento, já a deformação plástica ocorrerá somente se a tensão se igualar ou ultrapassar esta superfície.

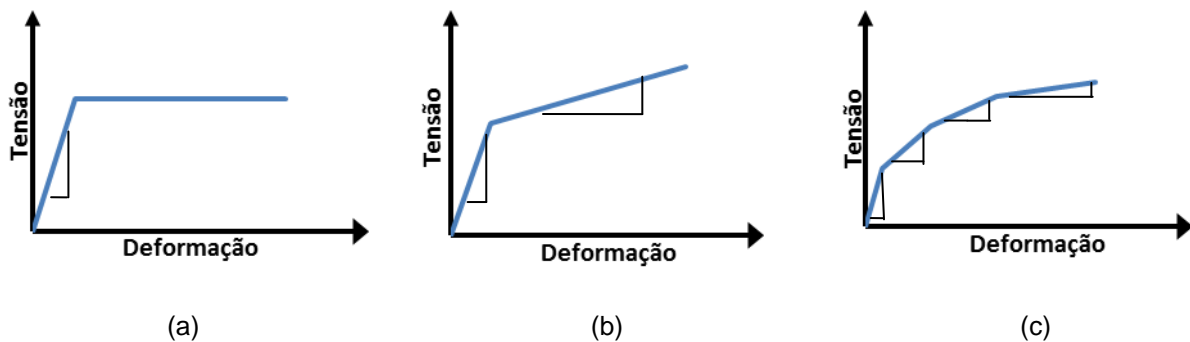


Figura 3.2 – Representações dos modelos constitutivos: elasto-plástico (a), bilinear (b) e multilinear (c).

Existem diversos modelos elastoplásticos em literatura. Os mais simples são os modelos lineares. Com o modelo elastoplástico perfeito da Figura 3.2 (a) surgem outros modelos lineares, que se destacam pela sua simplicidade de implementação. No modelo bilinear da Figura 3.2(b) ao ultrapassar a fronteira do escoamento, a deformação é regida por uma regra de escoamento diretamente proporcional ao aumento da tensão e inversamente proporcional ao módulo tangente. Meuwissen et. al., 1998, utiliza este modelo para estimar as propriedades do material com o auxílio de medidas óticas do campo de deformações, e ainda as compara a um modelo não linear. Pelletier et. al., 2000, utiliza este modelo para simular a impressão causada por um penetrador em medições de dureza em materiais e mostra que o modelo não consegue descrever o complexo campo de tensões produzido durante a penetração, sugerindo a utilização de um modelo multilinear. O modelo multilinear da Figura 3.2(c) nada mais é que uma expansão do modelo bilinear, utilizando um número maior de relações lineares e, conseqüentemente, um número maior de parâmetros, resultando em um aumento da representatividade do modelo. É utilizado por Vassoler e Fanello, 2011, em um estudo preliminar para caracterização de materiais sob carregamentos monotônicos e cíclicos.

3.3 TÉCNICAS DE ANALISES INVERSAS

Os problemas inversos podem ser descritos basicamente como problemas cuja resposta é conhecida, mas não a pergunta, ou ainda onde os resultados ou consequências são conhecidos, mas não as causas. É uma classe de problemas muito interessante e comum na engenharia.

Possui como características o fato de que sua solução pode ser muito sensível aos dados de entrada, onde mesmo pequenas variações nestes podem vir a gerar grandes oscilações na resposta da solução, e também o fato de que normalmente eles apresentam mais de um tipo de solução.

No ramo da mecânica dos sólidos, a análise inversa é formulada como, partindo de uma equação conhecida, buscar um conjunto de parâmetros que minimizem uma função objetivo representada pela diferença entre dados numéricos e experimentais. Na análise clássica, os parâmetros constitutivos são obtidos diretamente de testes experimentais, retirando-os da curva de tensão-deformação, por análise gráfica ou regressão linear, onde normalmente algumas considerações devem ser feitas com respeito às condições do ensaio. Porém para muitos casos encontrados em aplicações industriais, estes modelos analíticos não são válidos, necessitando a aplicação de um método de análise inversa que é normalmente um problema não linear, onde o algoritmo base é composto por um modelo de análise direta, valores experimentais e técnicas de otimização.

Para este tipo de problema, Gavrus et. al., 1996, faz um estudo de análise inversa em elementos finitos e expõe o fato do algoritmo de procura de parâmetros (otimização) estar fortemente ligado à simulação numérica. Este cita que na existência de poucos parâmetros, um

método de tentativa e erro poder ser utilizado na busca dos parâmetros que realizam o melhor ajuste. Porém quando este número aumenta, o nível de dificuldade associada ao processo também aumenta, necessitando o uso de uma abordagem mais sistemática, onde o método de elementos finitos pode ser utilizado em conjunto com um método de otimização.

O método FEMU (Finite Element Model Updating) é um método de análise inversa utilizado na identificação de parâmetros constitutivos, onde através da variação dos parâmetros constitutivos de uma simulação numérica em elementos finitos, compara-se a resposta desta com dados obtidos de ensaios experimentais e através de uma função objetivo são estimados novos parâmetros através de um processo iterativo, que repete-se até que uma tolerância mínima seja satisfeita.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Para a correta caracterização do material é indispensável a realização de ensaios experimentais para obter a sua curva tensão e deformação. O ensaio de tração uniaxial é o mais conhecido de todos, e também é o mais simples de ser executado. Este tipo de ensaio consiste em submeter o corpo de prova, que geralmente possui dimensões e formas padronizadas, a um esforço de tração até a sua ruptura. A resposta é expressa em forma de deformação e tensão. A tensão nominal (de engenharia) é a forma mais usual de representação, pois utiliza a área original da seção transversal do corpo de prova. Já a tensão real, aquela que efetivamente ocorre, necessita do cálculo da área instantânea da seção transversal. A obtenção da tensão real é uma tarefa muito laboriosa e necessita de dados adicionais aos obtidos comumente de um ensaio de tração, ou seja, necessita de informação localizada na região de estrição. Uma revisão completa sobre os mais diversos tipos de ensaios mecânicos e suas generalidades, aplicações, conceitos e erros associados, é apresentada por de Souza, 1982.

3.5 MÉTODOS ÓPTICOS

A utilização de extensômetros de resistência elétrica (strain gauges) para determinar as deformações em polímeros possui alguns reverses. Estes possuem uma rigidez considerável quando comparada a do polímero, não podem ser utilizados em grandes deformações e são capazes apenas de obterem informações localizadas. Como alternativa são apresentados métodos de medidas que não utilizam contato com a peça, normalmente métodos ópticos baseados na gravação digital de imagens contendo dados de medidas, que são capazes de obter a resposta de pontos na superfície do corpo de prova.

3.5.1 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Com a utilização de imagens digitais para mensurar dados em ensaios experimentais, veio a dificuldade encontrada no pós-processamento destes dados, o que levou ao desenvolvimento de abordagens para automação do processo, como algoritmos para realizar a análise destas imagens e extrair os dados de medida desejados.

A correlação de imagem digital (do inglês Digital Image Correlation - DIC), tem se mostrado uma ferramenta útil para quantificar medidas de deslocamento e deformações, tanto planares (2D) quanto espaciais (3D). Este método vem sendo amplamente utilizado na mecânica experimental devido a sua versatilidade. Tem seu princípio na aquisição sequencial de imagens da região de interesse do corpo de prova, que pode ser facilmente sincronizada com os sinais adquiridos de uma máquina de ensaio, onde pontos pré-definidos na imagem indeformada têm seu deslocamento rastreado são rastreados nas imagens deformadas (Figura 3.3).

Pan et. al., 2009, aponta para alguns cuidados a serem tomados na utilização deste método 2D, como a necessidade da utilização de um corpo de prova com marcação superficial, para que seja possível realizar a identificação de pontos e padrões, e o cuidado com o posicionamento da câmera, que deve ser ajustado e mantido paralelo ao plano de ensaio durante todo o experimento.



Figura 3.3 – Correlação de imagens – imagem indeformada (a) e deformada (b).

Visto que para o caso 2D, são requeridos apenas deslocamentos e deformações no plano de estudo, qualquer movimento mesmo que pequeno fora deste plano podem introduzir erros na medição. Fazendo uso de 2 câmeras, o conceito do DIC-2D foi estendido com a introdução de princípios da estéreo visão, tornando-o assim um método 3D. [Sutton et. al., 2009; Sharpe, 2008] descrevem detalhadamente estes princípios.

4. METODOLOGIA MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

A metodologia numérico-experimental adotada propõe a identificação dos parâmetros representativos do material, através do uso de um modelo constitutivo elastoplástico multilinear isotrópico para descrever o comportamento de um corpo de prova de um PVC, através da realização de uma análise inversa utilizando um modelo em elementos finitos (Técnica FEMU).

Os dados experimentais utilizados neste estudo são: i) força obtida pelo software de aquisição da máquina de ensaio, através de célula de carga; ii) deslocamento longitudinal aplicado sobre o corpo de prova obtida pelo software de aquisição da máquina de ensaio; iii) o deslocamento tridimensional de pontos sobre a região de estrição do corpo de prova, obtidos opticamente. O dado de deslocamento longitudinal da máquina é aplicado como condição de contorno sobre o corpo de prova e a resposta do material, ou seja, os parâmetros constitutivos do modelo escolhido, serão obtidos através da resposta experimental de força e deslocamento tridimensional de pontos sobre a região de estrição.

Neste trabalho é implementada uma rotina para estudar diferentes situações de uso dos dados experimentais na caracterização dos parâmetros constitutivos do modelo elastoplástico multilinear. Primeiro será testado a identificação utilizando somente a curva de força-deslocamento obtido pela máquina de ensaio, pratica mais utilizada da identificação de parâmetros. Depois será estudado o efeito da inclusão dos dados obtidos pela medição óptica, considerando diferentes pesos, que modificarão sua influência no procedimento de identificação dos parâmetros.

Os fatores transientes do comportamento do material não foram considerados na análise, tornando-a independente do tempo. Porém a aplicação de deslocamento no modelo numérico é feita de forma incremental onde, por conveniência, tais incrementos são representados como tempos de análise.

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Com o intuito de delimitar a região onde ocorreria a estrição do corpo de prova, para que as medições ópticas de deslocamento pudessem ser realizadas nesta região de interesse,

a geometria do corpo de prova utilizada possui uma redução da seção transversal em sua região central, causando um efeito concentrador de tensões, fazendo com que neste ponto as tensões sejam mais elevadas e forçando com que a estricção ocorra neste lugar.

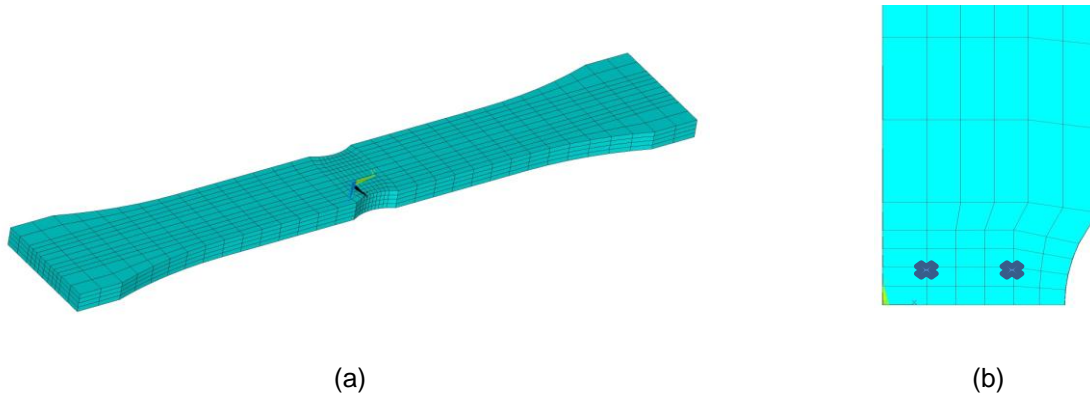


Figura 4.1 – Modelo representativo do corpo de testes.

Um modelo computacional tridimensional do corpo de prova ensaiado experimentalmente foi gerado para realizar testes com o objetivo de comparar os resultados numéricos e experimentais. A geometria utilizada pode ser vista na Figura 4.1(a). Foram utilizadas condições de simetria nos três planos principais, para reduzir o modelo a 1/8 do seu tamanho original. A localização dos pontos de controle utilizados para obter o campo de deslocamentos na região da estricção pode ser vista na Figura 4.1(b).

4.2 MODELO MATEMÁTICO

A análise foi processada em um software comercial de elementos finitos, ANSYS 14 (ANSYS, Inc., 2010). O software realiza a discretização do domínio contínuo, para resolver as equações de mecânica dos sólidos envolvidas na análise. A deformação total ε pode ser dividida em deformação elástica e deformação plástica, conforme (4.1).

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_p \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{el} = \sigma/E \quad (4.2)$$

A deformação elástica ε_{el} , descrita pela lei de Hooke (4.2) para o caso de deformações lineares, é um processo reversível que ocorre enquanto o material se encontra no regime elástico, delimitada por uma superfície de escoamento $\sigma_y = f(\sigma)$, onde $f(\sigma)$ é a função de escoamento adotada. Tem-se que o material entrará em regime plástico somente se a condição (4.3) for atendida.

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \lambda' \quad \text{se} \quad \begin{cases} f = 0 \\ f' = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\dot{\varepsilon}_p = 0 \quad \text{se} \quad f < 0 \quad \text{ou} \quad f' < 0 \quad (4.4)$$

onde λ é um parâmetro que determina a quantidade de deformação plástica e $\partial f(\sigma)/\partial \sigma$ determina a direção em que ela ocorrerá.

Na zona plástica a deformação depende da lei de encruamento utilizada. Para o caso de plasticidade linear adotado pode-se definir o módulo tangente (4.5), sendo o equivalente plástico ao módulo de Young para o regime elástico.

$$H = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_p} \quad (4.5)$$

Tais deformações são permanentes e consideram a premissas que o material possui um modelo de endurecimento isotrópico - a superfície de escoamento inicial se expande uniformemente sem que haja deformação e/ou translação - e incompressibilidade plástica, implicando no fato de as equações de plasticidade adotadas serem funções apenas da tensão desviadora. Para o modelo elastoplástico multilinear pode ser feita uma “extrapolação” destes conceitos lineares, onde vários módulos tangentes são utilizados visando uma melhor representação do comportamento não linear do material. Este modelo é válido para grandes deformações e aceita apenas valores positivos para o módulo tangente ($\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_p} \geq 0$).

4.3 OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

O corpo de prova utilizado no ensaio possui geometria com concentrador de tensões em sua região útil fazendo desta a região onde ocorrerá a estricção, para então registrar o campo de deslocamentos nesta região através do método DIC.

Os dados foram retirados de um ensaio de tração uniaxial realizado no laboratório GRANTE/UFSC, utilizando uma máquina universal de ensaio EMIC DL3000, com uma bancada óptica tridimensional, onde obteve-se a curva força-deslocamento do corpo de prova e através do DIC foram obtidas informações sobre o campo de deslocamentos na região da estricção.

5. MODELO COMPUTACIONAL

5.1 MODELO CONSTITUTIVO MULTI-LINEAR ISOTRÓPICO ADOTADO

O modelo constitutivo adotado foi o modelo multilinear isotrópico [Vassoler e Fancello, 2011] esquematizado na Figura 5.1, devido a sua simplicidade e boa representatividade de modelos elastoplásticos não lineares. O modelo possui 8 parâmetros a serem definidos: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), tensão de escoamento (σ_y), incremento de tensão (Δ), três módulos tangentes (Φ , H e I), e o início do encruamento orientado (ε_p). Os dois primeiros parâmetros fazem parte do modelo elástico, enquanto os outros 6 representam a região multilinear plástica.

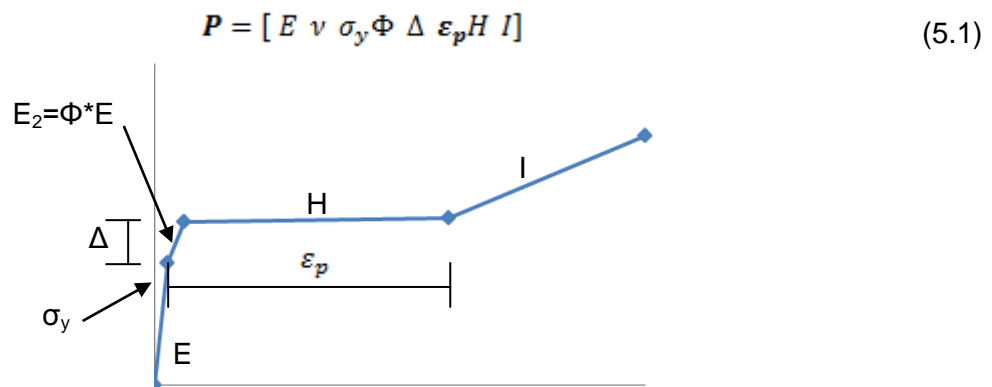


Figura 5.1 – Modelo Multilinear Isotrópico.

Este modelo utiliza o critério de escoamento de von Mises (Eq. 5.2) e encruamento isotrópico no regime plástico.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2 \quad (5.2)$$

Visando reduzir o custo computacional da análise e facilitar a convergência dos valores, optou-se pela determinação teórica de dois dos parâmetros constitutivos: E e σ_y . Os valores são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores teóricos para E e σ_y

Parâmetro	Valor
E	2260MPa
σ_y	42MPa

O módulo de elasticidade E , é definido como a inclinação da curva tensão x deformação em sua região linear, através da análise inversa pela lei de Hooke. Como descrito por Ward e Sweeney, 2004, não é conveniente considerar a tensão nominal no cálculo do módulo de elasticidade para polímeros, portanto uma análise em elementos finitos foi realizada para calcular a tensão real, considerando a variação da área na seção transversal durante a deformação.

A tensão de escoamento σ_y foi definida conforme proposto por Raghava e Caddel, 1973, através do método “offset” utilizando um valor de deformação plástica aceitável de 0,3%, para termoplásticos.

5.2 AJUSTE DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS

Para a identificação dos parâmetros representativos do material, foi criada uma rotina que realiza o ajuste da curva numérica com a experimental. Esta foi implementada pelo autor no software comercial MATLAB® (The MathWok, Inc. 2008), e segue a lógica do diagrama de blocos apresentado na

Figura 5.2, onde \mathbf{P} é o vetor de parâmetros do modelo constitutivo, \mathbf{u} representa o deslocamento imposto pela máquina de ensaio, \mathbf{r} representa a diferença (resíduo) entre os dados provindos do ensaio experimental \mathbf{e} e os dados da análise numérica $\mathbf{N} = \mathbf{f}(\mathbf{P})$, \mathbf{P}_0 é a estimativa inicial para o conjunto de parâmetros do material e \mathbf{S} representa a matriz de sensibilidade do modelo numérico, definida por (5.4).

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{f}(\mathbf{r}^F, \mathbf{r}^D) \quad \begin{cases} \mathbf{r}^F = \frac{\mathbf{e}_i^F - \mathbf{N}_i^F}{\max(\mathbf{e}_i^F)} \\ \mathbf{r}^D = \frac{\mathbf{e}_i^D - \mathbf{N}_i^D}{\max(\mathbf{e}_i^D)} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{S} = \frac{\delta \mathbf{N}}{\delta \mathbf{P}} \quad (5.4)$$

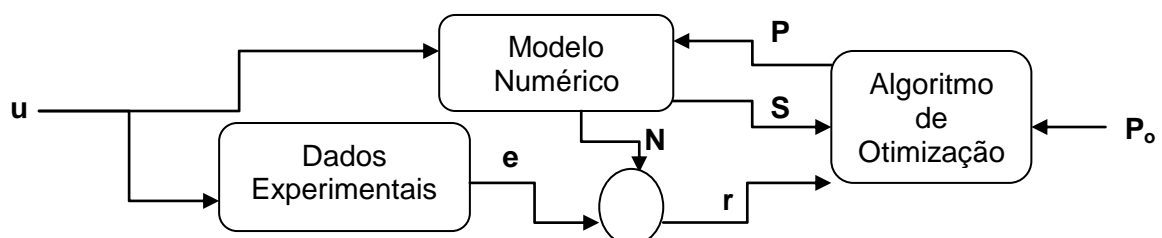


Figura 5.2 – Diagrama de blocos representativo do algoritmo de otimização.

Pode-se perceber três componentes fundamentais no método: os dados experimentais, que podem provir de um ou mais experimentos e servem como valores “ideais”; uma análise numérica em elementos finitos do experimento, a qual está acoplada ao modelo constitutivo para prever o comportamento do material; um algoritmo que fornece aproximações para os parâmetros do modelo constitutivo, baseado na minimização do resíduo da diferença dos valores numéricos e experimentais.

A implementação realizada no MATLAB gerencia todas as iterações necessárias para realizar a identificação de parâmetros, inclusive inicia a análise numérica no software ANSYS e lê os seus resultados para comparar com os dados numéricos e corrigir os parâmetros. Este último é um algoritmo iterativo e baseia-se no método dos mínimos quadráticos, onde a cada passo um novo conjunto de parâmetros \mathbf{P} é fornecido ao modelo numérico e um novo \mathbf{N} e \mathbf{S} são calculados, até que o resíduo de \mathbf{r} seja menor que um valor pré-estabelecido. A estimativa dos novos parâmetros é determinada pela minimização da função objetivo (5.5), onde W^F e W^D são pesos utilizados para aumentar ou diminuir a influência dos dados de força da máquina frente aos dados de deslocamento obtidos opticamente.

$$\Omega = W^F (\mathbf{r}^F)^2 + W^D (\mathbf{r}^D)^2 \quad (5.5)$$

A convergência do modelo numérico é realizada pelo método de Newton-Raphson (5.6), onde cada iteração envolve a solução aproximada considerando um sistema linear, utilizando o método dos gradientes conjugados pré-condicionado.

$$u_{n+1} = u_n + \Delta u \quad (5.6)$$

Para verificar a acuracidade do algoritmo, este foi testado com dados provindos de curvas teóricas - sabendo-se o valor exato dos parâmetros era causada uma perturbação nos valores para analisar se este era capaz de retornar aos valores iniciais. Neste teste o algoritmo exibiu um bom funcionamento, embora a sensibilidade em relação à estimativa inicial aumente com o acréscimo do número de parâmetros considerados na análise. A estabilidade do algoritmo o torna capaz de ser implementado utilizando dados reais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados de três casos de estudo: A identificação dos parâmetros sem contribuição dos dados ópticos ($W^F \gg W^D$), sem a contribuição dos dados de força da máquina ($W^F \ll W^D$) e com a contribuição de todos os dados experimentais obtidos (dados de força da máquina de ensaio e das medidas ópticas).

A Figura A.1 do Apêndice I mostra os resultados obtidos na identificação de parâmetros que melhor representam o comportamento força x deslocamento. Para isto foi utilizado $W^F \gg W^D$. Os parâmetros identificados encontram-se na Tabela 6.1.F.

Este ajuste apresenta uma boa aproximação para representar o comportamento equivalente médio do corpo de prova obtido pela máquina de ensaio (curva de força-deslocamento). Porém ao comparar os dados de deslocamentos na direção vertical e horizontal de dois pontos na região de estrição, medidos através do DIC, com seus equivalentes numéricos (Figura A.1– Markers 1 e 2), percebe-se uma certa discrepância nos valores. Isto ocorre pelo fato de que os dados medidos pela máquina do ensaio de tração correspondem a uma média dos valores de toda a estrutura, e não são capazes de representar corretamente o campo de deslocamentos heterogêneos existente na estrição.

De posse dos valores de deslocamentos na região da estrição, alterou-se o algoritmo inicial para realizar o ajuste dos parâmetros visando à minimização do erro relativo entre estes

deslocamentos e os seus respectivos numéricos, fazendo $W^D \gg W^F$. O resultado do processo de otimização é visto na Figura A.2 do Apêndice I. Os parâmetros identificados encontram-se na Tabela 6.1.D.

Percebe-se neste caso uma melhoria no ajuste dos valores para o deslocamento, porém causando um aumento no erro relativo para os valores da força medidos na máquina de ensaio. Tais discrepâncias existentes tanto no ajuste da força quando no do deslocamento ocorrem pelo fato de que os dados da força foram obtidos do modelo global, onde parte do modelo está no regime de deformações elásticas e parte no regime de deformações plásticas, enquanto os dados do deslocamento foram obtidos de um modelo local que, após a ocorrência da estricção, está predominantemente em um regime plástico.

O modelo global não possui informações para representar de forma confiável o campo de deformações locais da estricção, nem o modelo local consegue representar adequadamente o comportamento do corpo de prova como um todo. Como alternativa foram estudadas combinações, onde diversas análises considerando diferentes valores para os pesos W^F e W^D foram realizadas. A escolha para os valores de peso da função objetivo mostra-se de caráter subjetivo, uma vez que valores de $W^F \gg W^D$ realizam um ajuste melhor na força, enquanto valores de $W^D \gg W^F$ ajustam melhor o deslocamento sobre pontos na região de estricção. A Figura 6.1 representa um modelo intermediário onde $W^F = \frac{7}{3}W^D$. Os parâmetros identificados encontram-se na Tabela 6.1.M, e a Figura A.3 apresenta o modelo completo com os dois pontos de controle.

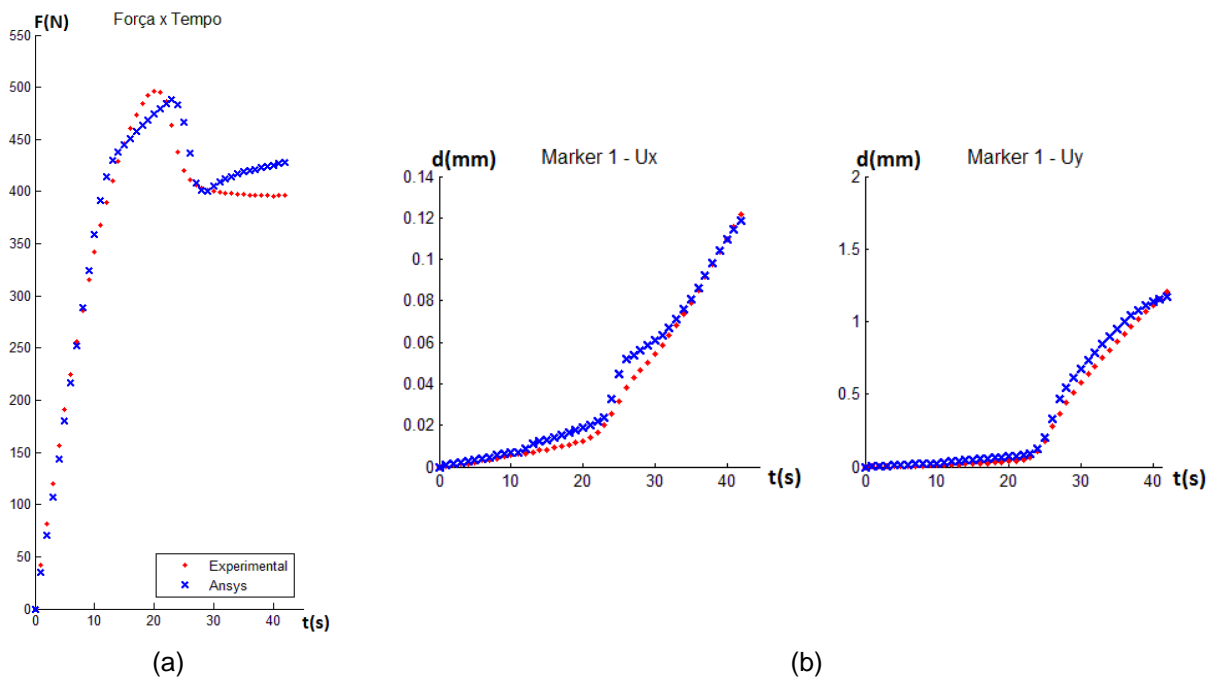


Figura 6.1 – Ajuste de curvas misto (M) com o modelo multilinear.

Comparando-se os resultados é visível que apesar de o modelo constitutivo multilinear com 8 parâmetros conseguir representar individualmente ambos os comportamentos, este se mostra incapaz de caracterizar satisfatoriamente os dados de força e deslocamentos da região de estricção, utilizando um único conjunto de parâmetros. A Figura 6.2 apresenta uma comparação entre os modelos constitutivos (curvas reais) obtidos para cada caso. Em todos os casos as curvas de tensão-deformação reais estão muito distantes da curva nominal.

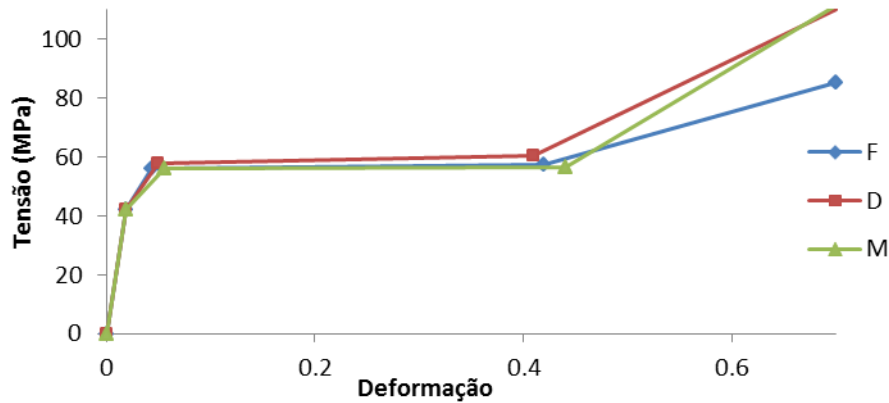


Figura 6.2 – Modelos constitutivos com os parâmetros identificados.

Tabela 6.1 – Parâmetros identificados

	E	ν	σ_y	Φ	Δ	ϵ_p	H	I
F	2260	0.42	42	0.25	14	0.42	3.5	100
D	2260	0.27	42	0.23	16	0.41	7	172
M	2260	0.39	42	0.17	14	0.44	1.3	211

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a identificação dos parâmetros de um modelo constitutivo elastoplástico multilinear para representar o comportamento de um termoplástico frente à ação de deformações finitas. Foram utilizados dados de força e deslocamento providos de um ensaio de tração, complementados por medições óticas do campo de deslocamentos heterogêneo na região da estrição.

Devido ao fato de que os dados obtidos pela máquina de ensaio de tração representam os valores médios resultantes sobre os dispositivos de medida, efeitos locais não são capturados, necessitando de informações adicionais. Os dados da região de estrição se mostraram capazes de prover tais informações.

No estudo buscou-se representar de forma adequada ambas respostas de força e deslocamentos da região de estrição com um modelo simples de elastoplasticidade, porém os resultados apresentaram uma grande discrepância, mostrando que o modelo multilinear adotado não é capaz de fornecer uma única resposta para ambos os objetivos e, conseqüentemente, não consegue representar adequadamente o comportamento do material para os casos analisados.

O estudo mostrou que apenas os dados de força e deslocamento provenientes da máquina de ensaio não são suficientes para a obtenção da curva real, onde é necessária uma metodologia que envolva métodos numéricos e ainda informações complementares do comportamento da região de estrição, uma vez que esta governa a resposta de plastificação do material. Este fenômeno, diferentemente do encontrado em metais, deve-se a fase de estabilização e propagação da estrição.

Como continuidade para este trabalho, sugere-se o estudo da utilização de modelos constitutivos mais aprimorados, como elastoplásticos não-lineares e/ou visco-elastoplásticos, para representar o comportamento do material.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc., 2010. *User guide for revision 12.1*. ANSYS, Inc. Pittsburgh, <http://www.ansys.com>.

Avril, S., Pierron, F., Sutton, M.A. and Yan, J. “**Identification of elasto-visco-plastic parameters and characterization of Lüders behavior using digital image correlation and the virtual fields method**”. *Mechanics of Materials*, Vol. 40, No. 9, pp. 729 – 742, 2008.

Caddel, R. M.; Raghava, R. S.; Atkins, A. G. “**Pressure dependent yield criteria for polymers**”. *Materials Science and Engineering*, Vol. 13, pp. 113-120, 1974.

Chaboche, J. L. “**A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories**”. *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, pp. 1642-1693, 2008.

de Souza, S.A. “**Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**”. Fundamentos teóricos e práticos, 1982.

Donato, G. H. B; Bianchi, M. “**Numerical modeling of uneven thermoplastic polymers behaviour using experimental stress-strain data and pressure dependent von Mises yield criteria to improve design practices**”. *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 1871-1876, 2011.

Drucker, D. C.; Prager, W. “**Soil mechanics and plastic analysis for limit design**”, *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 157–165, 1952.

Farroch, B.; Khan, A. S. “**A strain rate dependent yield criterion for isotropic polymers- Low to high rates of loading**”. *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 29, pp. 274-282, 2010.

Gavrus, A.; Massoni, E.; Chenot, J. L. “**An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters**”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 1-4, pp. 447 – 454. *Proceedings of the 6th International Conference on Metal Forming*, 1996.

Grédiac, M. Pierron, F. “**Applying the Virtual Fields Method to the identification of elasto-plastic constitutive parameters**”, *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, pp. 602-627, 2006.

Grédiac, M. Pierron, F. “**The Virtual Fields Method**”, Springer New York, 2012.

Heeres, O. M., Suiker, A. S. J., de Borst, R. “**A comparison between the Perzyna-viscoplastic model and the Consistency viscoplastic model**”, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 21, pp.1-12, 2002.

Hill, R. “**A Theory of the yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals**”, *Proceedings of the Royal Society*, pp. 281 – 297, 1948.

Kim, J. W.; Medvedev, G. A.; Caruthers, J. M. “**Observation of yield in triaxial deformation of glassy polymers**”. *Polymer*, Vol. 54, pp. 2821 – 2833, 2013.

Meuwissen, M.H.H., Oomens, C.W.J., Baaijens, F.P.T., Petterson, R. and Janssen, J.D. “**Determination of the elasto-plastic properties of aluminium using a mixed numerical-**

experimental method". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 75, No. 1-3, pp. 204 – 211, 1998.

Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A. "**Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review**", Measurement Science and Technology, Vol. 20, No. 6, pp. 062001(17pp), 2009.

Pelletier, H.; Krier, J.; Cornet, A.; Mille, P. "**Limits of using bilinear stress-strain curve for finite element modeling of nanoindentation response on bulk materials**", Thin Solid Films, Vol. 379, pp. 147-155, 2000.

Ragava, R. S.; Caddell, R. M. "**A Macroscopic yield criterion for crystalline polymers**", International Journal of Plasticity, Vol. 41, pp. 14-29, 2013.

Rezaiee-Pajand, M.; Sharifian, M.; Sharifian, M. "**Accurate and approximate integrations of Drucker-Prager plasticity with linear isotropic and kinematic hardening**" European Journal of Mechanics A/Solids, Vol. 30, pp.345-361, 2011.

Rodolfo Jr, A.; Nunes, L. R.; Ormanji, W. "**Tecnologia do PVC**", ProEditores Associados Ltda, 2nd edition, 2006.

Rozanski, A.; Galeski, A. "**Plastic yielding of semicrystalline polymers affected by amorphous phase**", International Journal of Plasticity, Vol. 41, pp. 14-29, 2013.

Saeki, Y.; Emura, T. "**Technical progresses for PVC production**", Progress in Polymer Science, 27, pp. 2055-2131, 2002

Savruk, M. P.; Shkarayev, S.; Madenci, E. "**Stress near apex of dissimilar material with bilinear behavior**", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 31, pp. 203-212, 1999.

Sharpe, W. N. Jr., "**Springer handbook of Experimental Solid Mechanics**" Springer Science+Business Media, LLC New York, 2008.

Sutton, M. A.; Orteu, J.J.; Schreier, H. W. "**Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements**", Springer Science+Business Media, LLC, 2009.

Vassoler, J.; Fancello, E. "**Identification of elastoplastic parameters under finite strain using a digital image correlation method**", Proceedings of COBEM 2011 21st International Congress of Mechanical Engineering Natal RN Brazil, October 2011.

Ward, I. M.; Sweeney, J. "**The Mechanical Properties of Solid Polymers**", John Wiley & Sons, 2nd edition, 2004.

Xia, Y.; Weng, S. Xu, Y-L. "**A Substructuring Method for Model Updating and Damage Identification**", Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 3095-3103, 2011.

Zhou, Z-D.; Zhao, S-X, Kuang, Z-B. "**An integral elasto-plastic constitutive theory**", International Journal of Plasticity, Vol. 19, pp. 1377-1400, 2003.

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. "**The Mechanical Finite Element Method for Solid and structural Mechanics**", Butterworth-Heinemann, 6th edition, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE I – Figuras e tabelas

Nas Figuras A.1, A.2 e A.3 estão os resultados obtidos na identificação de parâmetros realizada na seção 6 deste trabalho.

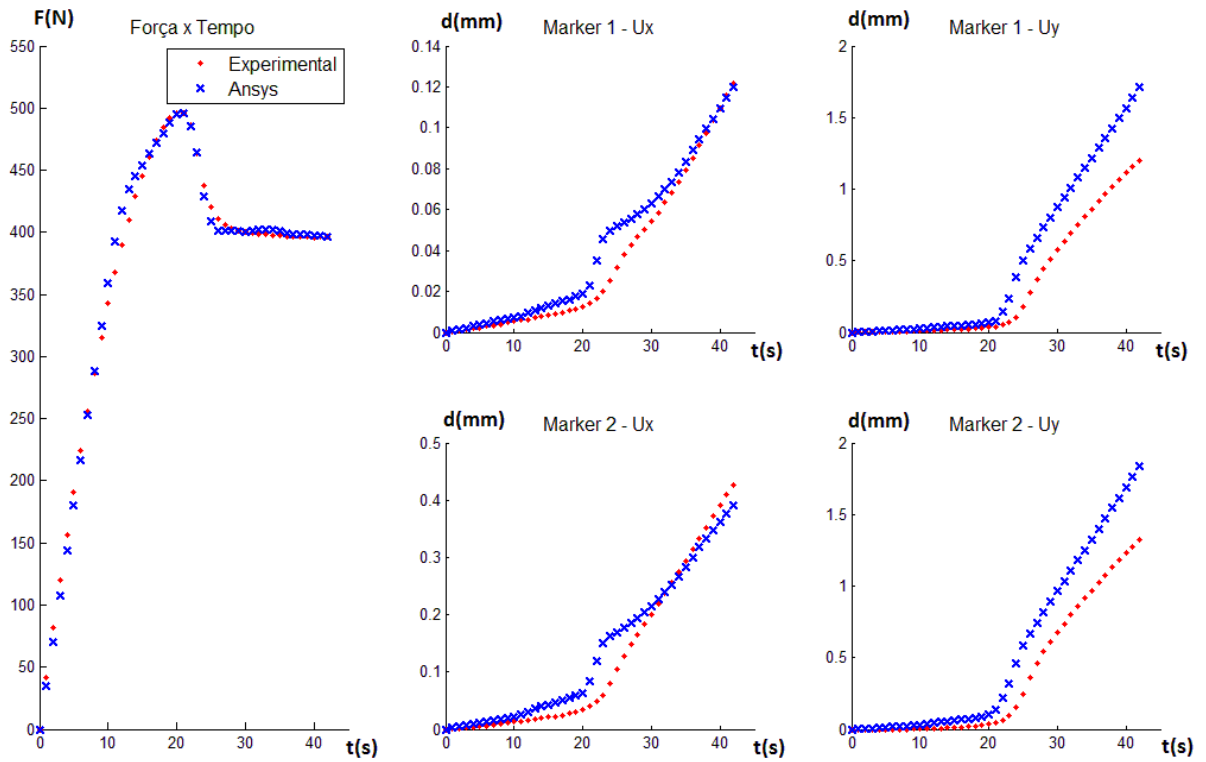


Figura A.1 – Ajuste da força (F) com o modelo multilinear.

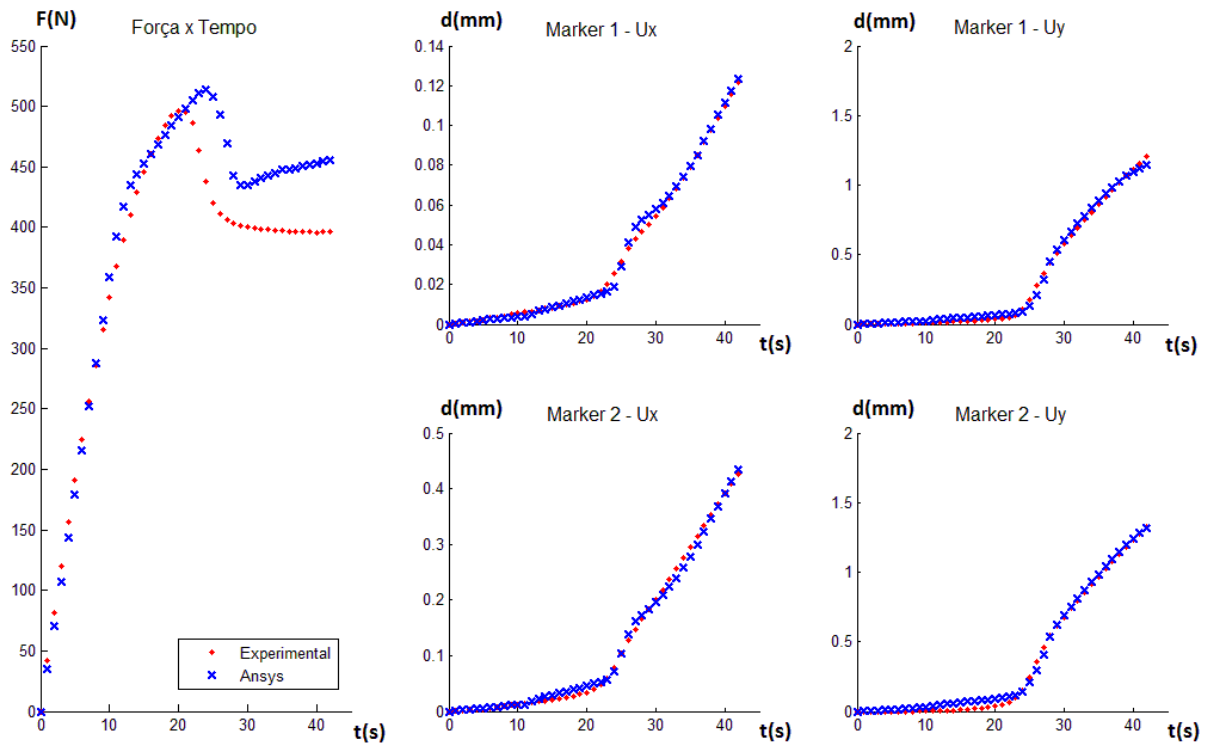


Figura A.2 – Ajuste do deslocamento (D) com o modelo multilinear.

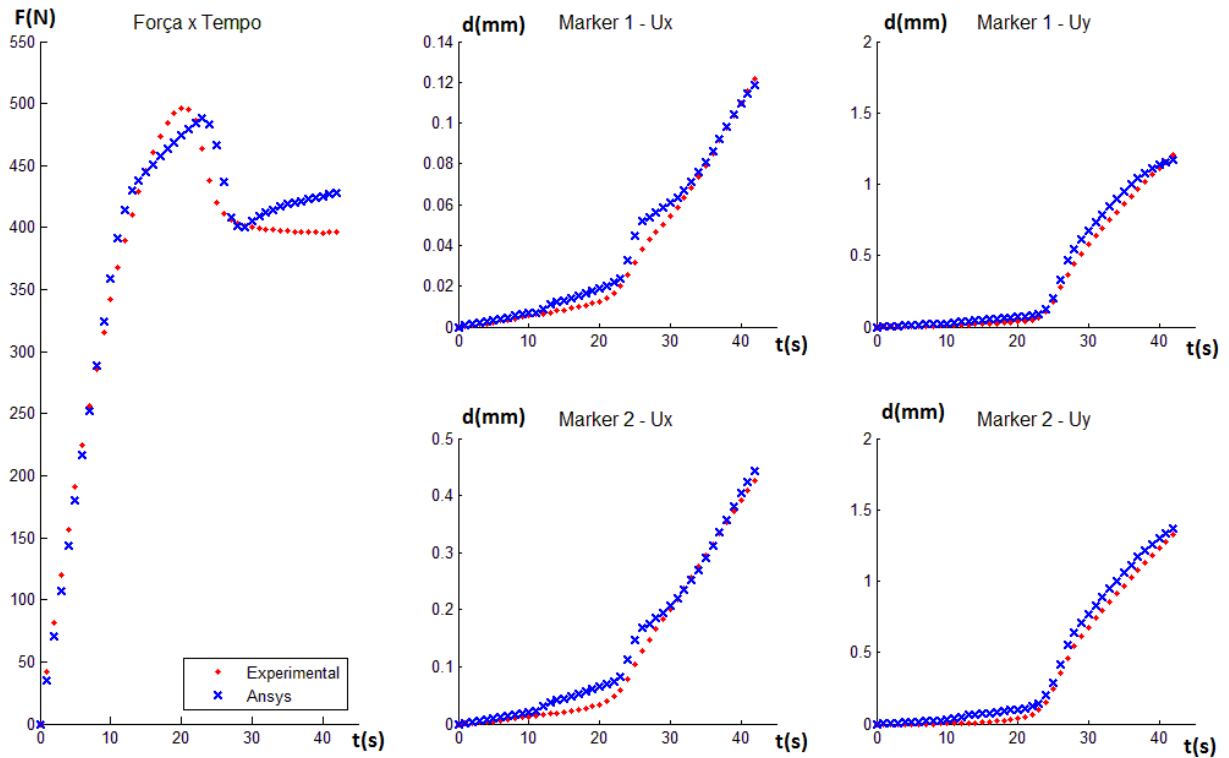


Figura A.3 – Ajuste de curvas misto (M) com o modelo multilinear.