

**LUIZ FERNANDO MAIA DE ALMEIDA**

**SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE PUNCIONAMENTO  
ESFÉRICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2017**

**LUIZ FERNANDO MAIA DE ALMEIDA**

**SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE PUNCIONAMENTO ESFÉRICO  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Sonia A. Goulart Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco

**UBERLÂNDIA – MG**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A447s      Almeida, Luiz Fernando Maia de, 1992-  
2017      Simulação de ensaios de punctionamento esférico utilizando o  
método dos elementos finitos / Luiz Fernando Maia de Almeida. - 2017.  
86 f. : il.

Orientadora: Sonia Aparecida Goulart Oliveira.  
Coorientador: Sinésio Domingues Franco.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Métodos de simulação - Teses. 3.  
Método dos elementos finitos - Teses. I. Oliveira, Sonia Aparecida  
Goulart, 1959- II. Franco, Sinésio Domingues, 1962- III. Universidade  
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. IV. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, em especial meus pais, Neire e Luiz Antonio, e minha irmã, Andressa, pelo amor dedicado a mim, pelo apoio e carinho constantes, pela compreensão dos momentos que estive ausente e principalmente por sempre acreditarem em mim.

À professora Dra. Sonia A. Goulart de Oliveira, pela paciência, disposição e companheirismo demonstrados durante a orientação deste trabalho e por me manter sempre interessado pelos estudos e pela pesquisa.

Ao meu coorientador, professor Dr. Sinésio Domingues Franco, que se mostrou sempre disposto a contribuir com este projeto.

À minha namorada, Mariana, pelo carinho, paciência e companheirismo e principalmente por nunca deixar de me incentivar durante o período de realização deste trabalho.

Aos colegas da Sala FEMEC-CIMNE e do LTAD, que sempre estiveram dispostos a ajudar em cada desafio deste projeto.

Aos amigos que sempre estiveram presentes, mesmo quando eu estava ausente, por nunca deixarem de acreditar em mim.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar esta formação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os demais professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica.

ALMEIDA, L. F. M. **Simulação de Ensaios de Punctionamento Esférico Utilizando o Método dos Elementos Finitos.** 2017. 86 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O ensaio de punctionamento esférico, ainda pouco usado no Brasil, é utilizado como alternativa aos ensaios convencionais para avaliação de propriedades mecânicas, podendo ser considerado não destrutivo, uma vez que requer um corpo de prova de pequenas dimensões para ser testado. O objetivo deste trabalho é realizar simulações numéricas destes ensaios para analisar a técnica, bem como verificar a sensibilidade dos resultados à variação de alguns parâmetros. Os experimentos numéricos, quando bem validados, possibilitam a análise de diversos parâmetros de teste com maior facilidade, maior rapidez e menor custo. As simulações foram realizadas no programa comercial STAMPACK®, que faz uso do método dos elementos finitos com integração explícito-dinâmica na base do seu algoritmo. A validação do modelo numérico foi realizada com testes realizados em um equipamento de punctionamento instrumentado, no qual foram testados diferentes tipos de aço. Essa comparação permitiu estimar a complacência do equipamento, tornando possível a correção deste efeito nos resultados experimentais. Dentre os parâmetros do ensaio estudados neste trabalho, a carga de aperto apresentou pouca influência nos resultados dos testes, salvo nos casos extremos. Já a espessura dos corpos de prova tem influência direta no comportamento da curva de resposta, de modo que corpos de prova mais espessos apresentaram menor transição entre os diferentes estágios do ensaio e cargas maiores quando comparados aos corpos de prova menos espessos. Quanto ao atrito, observou-se que sua importância se dá apenas na parte final do ensaio, próximo à carga máxima, influenciando inclusive no comportamento do corpo de prova quanto à ruptura. Por fim, foram obtidas expressões para estimar o limite de escoamento e o limite de resistência, que mostraram bons resultados, principalmente para o limite de escoamento, para o qual os erros foram inferiores a 5%.

---

*Palavras Chave: Ensaio de Punctionamento Esférico. Propriedades Mecânicas. Método dos Elementos Finitos.*

ALMEIDA, L. F. M. **Small Punch Test Simulation Using the Finite Element Method**. 2017.  
86 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

The Small Punch Test, a technique that is not very used in Brazil yet, presents as an alternative to conventional tests for the evaluation of mechanical properties and can be considered non-destructive, since it requires small specimen to be tested. The objective of this study is to perform numerical simulations of these tests to analyze this technique, as well as verify the sensitivity of the results to the variation of some parameters. Numerical experiments, when well validated, allow the analysis of several test parameters in an easier, faster and less expensive way than physical experiments. The simulations were performed using STAMPACK®, a finite element software which uses explicit-dynamic integration in its algorithm. The numerical model was validated with Small Punch Tests carried out on instrumented equipment, in which different steels were tested. This comparison allowed equipment compliance to be estimated, making it possible to correct this effect in the experimental results. Among the test parameters evaluated in this study, the clamping force showed little influence on the results, except for extreme cases. Specimen thickness had influenced on the behavior of the test curve, so that thicker specimens led to lower transition between the test stages as well as higher loads, when compared to thinner specimens. As for the friction, it was observed that only the last part of the test, close to the maximum load, was affected. Its effect also changed the specimen behavior in the rupture. Finally, expressions were obtained to estimate yield strength and ultimate tensile strength. They showed good results, mainly for the yield strength, for which the errors were less than 5%.

## Lista de Figuras

Figura 2.1	Escala de um corpo de prova usado no ensaio mini Charpy (LUCAS, 1983) .....	8
Figura 2.2	Corpos de prova de ensaios de tração convencional, de tamanho reduzido e em miniatura. (KUMAR; POOLEERY; MADHUSOODANAN, 2014) .....	8
Figura 2.3	(a) Dispositivo do Shear Punch Test. (b) Esquema do Shear Punch Test. (GUDURU et al., 2005) .....	9
Figura 2.4	(a) Esquema do Impression Creep Test. (HYDE; SUN; BECKER, 1996) (b) Corpo de prova após o Impression Creep Test (SUN; HYDE; BRETT, 2008) .....	9
Figura 2.5	(a) Esquema para o ensaio. (b) curva de força por deslocamento obtida no ensaio com diferentes temperaturas e diâmetros do punção. (MANAHAN et al., 1981) .....	10
Figura 2.6	Máquina de extração de amostras do tipo concha SSam™-2 desenvolvida pela Rolls-Royce® e amostras obtidas. (ROLLS-ROYCE POWER ENGINEERING PLC, 2010) .....	12
Figura 2.7	Princípio de funcionamento da máquina de extração de amostras. (ROLLS-ROYCE POWER ENGINEERING PLC, 2010) .....	12
Figura 2.8	Corpos de prova obtidos de uma amostra extraída pela SSam™-2 (MATOCHA; PURMENSKÝ, 2009) .....	12
Figura 2.9	Princípio de funcionamento do equipamento de remoção por descarga elétrica. (a) primeira fase da operação. (b) segunda fase da operação. (c) operação executada. (OKAMOTO et al., 2009) .....	13
Figura 2.10	Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT. (WANG et al., 2008) .....	14
Figura 2.11	Corpos de Prova de ensaios SPT (a) de geometria quadrangular. (JU; JANG; KWON, 2003) (b) de geometria circular (HU; LING, 2009) .....	15
Figura 2.12	Curva carga x deslocamento típica dos ensaios SPT (WANG et al., 2008) .....	16
Figura 2.13	Diferentes propostas para determinar $P_y$ (GARCÍA et al., 2014) .....	18

Figura 2.14	Esquema de malha utilizada para análise em MEF. (MANAHAN et al., 1981) .....	21
Figura 2.15	Curva carga x deslocamento comparando comportamento plástico perfeitamente rígido com o experimental (MAO; SHOJI; TAKAHASHI, 1987) .....	22
Figura 2.16	Modelo axissimétrico obtido no Abaqus para o SPT (CAMPITELLI et al., 2004) .....	22
Figura 2.17	Curvas Força x Deslocamento experimentais e calculadas para amostras de diferentes espessuras do aço 316L. (CAMPITELLI et al., 2004) .....	23
Figura 2.18	Modelo em elementos finitos 3D para a simulação do SPT (HU; LING, 2009) .....	24
Figura 2.19	Deslocamento do punção até a falha (HU; LING, 2009) .....	24
Figura 3.1	Ilustração da malha de um modelo de elementos finitos. (BUDYNAS, 2011) .....	26
Figura 3.2	Exemplos de elementos a) unidimensional. b) bidimensional. c) tridimensional. (AZEVEDO, 2014) .....	26
Figura 3.3	Fluxograma do processo de análise por MEF (BATHE, 1996) .....	27
Figura 3.4	Sequência básica para aplicação computacional do MEF. (ALVES, 2007) .....	28
Figura 3.5	Esquema das ferramentas usadas em uma conformação de chapas. (STAMPACK, 2014) .....	31
Figura 4.1	Equipamento utilizado nos testes experimentais .....	36
Figura 4.2	Componentes do dispositivo de punctionamento .....	36
Figura 4.3	Modelo da região de ensaio .....	37
Figura 4.4	Imagen da tela do programa de aquisição e controle do teste .....	37
Figura 4.5	Dimensões do corpo de prova (em milímetros) .....	38
Figura 4.6	Suporte utilizado no processo de lixamento dos CP's .....	38
Figura 4.7	Corpo de prova (a) antes do ensaio. (b) depois do ensaio .....	39
Figura 4.8	Modelo axissimétrico do equipamento de ensaio obtido no STAMPACK ..	40
Figura 4.9	Gráfico de convergência da malha .....	42
Figura 4.10	Deformação plástica efetiva considerando (a) 5 elementos; (b) 12 elementos; (c) 20 elementos; (d) 30 elementos na espessura .....	43
Figura 4.11	Curva de resposta da simulação considerando 20 elementos na espessura .....	44
Figura 4.12	Curva de resposta da simulação considerando 30 elementos na espessura .....	44

Figura 4.13	Malha de elementos finitas utilizada com detalhe ampliado .....	45
Figura 4.14	Comparação das curvas de resposta das simulações com e sem escala geométrica .....	46
Figura 4.15	Fotomicrografias do aço L80 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos). (NICOLOSI, 2015) .....	50
Figura 4.16	Fotomicrografias do aço P110 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos). (NICOLOSI, 2015) .....	50
Figura 5.1	Comparação das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço 1010 .....	54
Figura 5.2	Destaque das curvas na transição entre a fase elástica e plástica .....	54
Figura 5.3	Perfil da matriz medido em um interferômetro .....	55
Figura 5.4	Comparação das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço L80 .....	55
Figura 5.5	Comparação das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço P110 .....	56
Figura 5.6	Gráfico de obtenção da complacência para o aço P110 .....	57
Figura 5.7	Efeito da correção da complacência para o aço L80 .....	58
Figura 5.8	Efeito da correção da complacência para o aço P110 .....	58
Figura 5.9	Figura 5.9 – Gráficos comparativos das curvas obtidas na simulação e no experimento, já corrigida a complacência para os materiais (a) D. (b) E. (c) F. (d) G. ....	59
Figura 5.10	Comparação dos resultados obtidos nas simulações variando a carga de aperto .....	60
Figura 5.11	Deformações obtidas nas simulações considerando a carga de aperto de (a) 5 kN. (b) 1 kN. ....	61
Figura 5.12	Curvas de resposta das simulações com espessuras variadas para o aço L80 .....	62
Figura 5.13	Curvas de resposta das simulações com espessuras variadas para o aço P110 .....	62
Figura 5.14	Obtenção de $P_y$ na curva de resposta do aço L80 com espessura 0,250 mm .....	63
Figura 5.15	Gráficos de influência da espessura nos cálculos das propriedades mecânicas .....	64
Figura 5.16	Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,250 mm de espessura para um deslocamento do punção de 0,09 mm .....	65

Figura 5.17	Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,500 mm de espessura para um deslocamento do punção de 0,16 mm .....	65
Figura 5.18	Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,250 mm de espessura para um deslocamento do punção de 1,06 mm .....	66
Figura 5.19	Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,500 mm de espessura para um deslocamento do punção de 1,06 mm .....	67
Figura 5.20	Curvas de resposta das simulações de L80 variando o atrito .....	68
Figura 5.21	Curvas de resposta das simulações de P110 variando o atrito .....	68
Figura 5.22	Deformações plásticas efetivas obtidas nas simulações com coeficiente de atrito (a) 0,1. (b) 0,3. (c) 0,5. (d) 0,7. ....	70
Figura 5.23	Relação entre o limite de escoamento e $(P_y/t^2)$ para os diferentes materiais .....	71
Figura 5.24	Relação entre o limite de resistência e $(P_m/t^2)$ para os diferentes materiais .....	72
Figura 5.25	Relação entre o limite de resistência e $(P_m/t)$ para os diferentes materiais .....	73
Figura 5.26	Relação entre o limite de resistência e $(P_m/(t \cdot dm))$ para os diferentes materiais .....	73
Figura 5.27	Relação entre o limite de resistência e $(P_m/(t \cdot dm))$ para os diferentes materiais, não considerando a correção da complacência .....	75
Figura 5.28	Relação entre o limite de resistência e $(P_m/(t \cdot dm))$ utilizando mais materiais .....	76

## **Lista de Tabelas**

Tabela 4.1	Número de elementos ao longo da espessura e total de cada simulação .....	42
Tabela 4.2	Propriedades dos materiais utilizados nos ensaios e nas simulações .....	47
Tabela 4.3	Composições químicas dos aços "D" a "G" (% em peso). (NICOLOSI, 2015)	48
Tabela 4.4	Microestruturas dos aços "D" a "G". (NICOLOSI, 2015) .....	48
Tabela 4.5	Composição química do aço L80 (% em peso). (NICOLOSI, 2015) .....	49
Tabela 4.6	Composição química do aço P110 (% em peso). (NICOLOSI, 2015) .....	49
Tabela 4.7	Variação da carga de aperto .....	51
Tabela 4.8	Variação da espessura .....	51
Tabela 4.9	Variação do atrito .....	51
Tabela 5.1	Valores de $P_y$ e $P_m$ obtidos para cada espessura para os aços L80 e P110 ..	64
Tabela 5.2	Valores de $\sigma_{ut}$ calculados pelos três métodos para os materiais F e G .....	74

## Lista de Símbolos e Siglas

$A(%)$	Alongamento
$c$	Velocidade do som no material
$C$	Constante de amortecimento
$C_e$	Complacência do equipamento
$d$	Deslocamento do punção
$d_{cp}$	Deflexão do corpo de prova
$d_e$	Deslocamento elástico do equipamento
$d_f$	Diâmetro do furo da matriz inferior
$d_m$	Deslocamento do punção na carga máxima
$d_{med}$	Deslocamento medido
$d_p$	Diâmetro do punção
$E$	Módulo de elasticidade
$f(u, t)$	Forças externas
$H$	Altura do elemento
$J_{IC}$	Tenacidade à fratura
$K$	Coeficiente de resistência
$L$	Comprimento característico do menor elemento
$M$	Matriz de massa da estrutura
$n$	Expoente de encruamento
$P$	Força
$P_m$	Carga máxima do SPT
$p(u, \dot{u})$	Forças internas
$P_y$	Carga equivalente ao início da deformação plástica
$r_0, r_{45}$ e $r_{90}$	Coeficientes de Lankford
$r_m$	Raio de curvatura da matriz inferior
$RA$	Razão de aspecto
$t$	Espessura do corpo de prova

$t_n$	Passo de tempo qualquer $n$
$t_{n+1}$	Passo de tempo seguinte ao $t_n$
$u$	Vetor deslocamento
$\dot{u}$	Vetor velocidade
$\ddot{u}$	Vetor aceleração
$u_{n+1}$	Deslocamento seguinte ao $u_n$
$\alpha_1, \alpha_2$	Constantes usadas no cálculo do limite de escoamento
$\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2, \beta''_1, \beta''_2$	Constantes usadas no cálculo do limite de resistência
$\gamma, \gamma'$	Constantes usadas no cálculo do alongamento
$\Delta t$	Passo de tempo
$\Delta t_{crit}$	Tempo crítico
$\varepsilon_{ps}$	Deformação plástica equivalente
$\mu$	Coeficiente de atrito
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\rho$	Densidade
$\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$	Componentes do tensor tensão
$\sigma_e$	Limite elástico
$\sigma_{eq}$	Tensão equivalente
$\sigma_p$	Limite de proporcionalidade
$\sigma_{ut}$	Limite de resistência
$\sigma_y$	Limite de escoamento
$\sigma_{y0}$	Tensão de escoamento inicial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comissão Europeia de Normalização
CP	Corpo de Prova
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
SEA	Sistema de Equações Algébrico
SPBT	Small Punch Bulge Test
SPDT	Small Punch Drawing Test
SPT	Small Punch Test
ZTA	Zona Termicamente Afetada

# SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II – ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	
2.1. Ensaios para avaliar propriedades mecânicas dos materiais .....	5
2.2. Ensaio de Punctionamento Esférico ( <i>Small Punch Test</i> ) .....	10
2.2.1 <i>Princípio de Funcionamento</i> .....	13
2.2.2 <i>Curva Força x Deslocamento e Cálculo das Propriedades</i> .....	15
2.3. Método dos elementos finitos associado ao SPT .....	20
CAPÍTULO III – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	
3.1. Introdução .....	25
3.2. Solução por integração explícita no tempo .....	29
3.3. O programa STAMPACK® .....	30
3.3.1 <i>Comportamento mecânico dos materiais</i> .....	33
CAPÍTULO IV – METODOLOGIA .....	
4.1. Procedimento experimental .....	35
4.2. Obtenção do modelo em elementos finitos .....	39
4.3. Preparação do modelo em elementos finitos .....	40
4.3.1 <i>Teste de convergência da malha</i> .....	41
4.3.2 <i>Escala geométrica</i> .....	45
4.4. Planejamento das simulações e materiais utilizados .....	47
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	
5.1. Validação do modelo em MEF e avaliação da complacência .....	53
5.2. Variação da carga de aperto .....	59

<b>5.3. Variação da espessura dos corpos de prova .....</b>	<b>61</b>
<b>5.4. Variação do coeficiente de atrito .....</b>	<b>67</b>
<b>5.5. Expressões para o cálculo das propriedades .....</b>	<b>70</b>
<b>5.5.1 Expressão para o limite de escoamento .....</b>	<b>71</b>
<b>5.5.2 Expressão para o limite de resistência .....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>78</b>
<b>CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Os equipamentos da indústria de processos estão frequentemente sujeitos a condições de operação que introduzem fenômenos de degradação ao longo do tempo, como grandes variações de temperatura, ambientes corrosivos e elevados estados de tensão. Sendo assim, emitir um parecer em relação ao estado de um equipamento que se aproxima do final de vida não é tarefa fácil, uma vez que não se dispõe de parâmetros que caracterizam seu nível de degradação. Algumas vezes, por falta de informação, é realizada a substituição prematura de equipamentos devido ao risco que eles representam.

A avaliação da vida residual e o potencial de possíveis falhas de componentes em operação são questões críticas na análise de segurança e confiabilidade de instalações industriais no geral, em especial para as centrais elétricas em operação e indústrias petroquímicas que se aproximam do fim de suas vidas de projeto (HURST; MATOCHA, 2012).

De forma a otimizar as decisões relacionadas com a substituição ou extensão da vida dos equipamentos, são necessárias técnicas de monitoração da degradação dos materiais ao longo do ciclo de vida destes equipamentos. Desse modo, esta monitoração deve utilizar técnicas não destrutivas, que permitam determinar as propriedades relevantes dos materiais em operação, sem comprometer a sua continuidade em operação.

Os testes mecânicos convencionais requerem um volume relativamente grande de material a ser testado e, extraí-lo do componente em operação pode prejudicar sua integridade. Nessas situações, os ensaios mecânicos baseados em técnicas de ensaio em pequenas amostras se apresentam como soluções eficientes para caracterizar as propriedades mecânicas dos componentes. Tais técnicas vêm sendo estudadas nas últimas décadas e podem ser classificadas como "mini testes" (LUCAS, 1983; XU et al., 2000; KUMAR; MADHUSOODANAN; RUPANI, 2006), uma vez que se analisam pequenos

volumes de material, permitindo o uso de corpos de prova de pequenas dimensões, podendo, em alguns casos, serem considerados como ensaios não destrutivos.

No conjunto de "mini testes" se enquadram, por exemplo, o "mini Charpy" (KURISHITA et al., 1994), o ensaio de indentação instrumentada (BYUN et al., 1997), o ensaio de tração em corpos de prova miniaturizados (KUMAR; POOLEERY; MADHUSOODANAN, 2014) e o ensaio de punctionamento esférico, conhecido como *Small Punch Test* (SPT), dentre outros. Este último, o ensaio de punctionamento esférico, foi o objeto de estudo deste trabalho.

Como exemplo da vantagem do uso do ensaio de punctionamento em relação aos ensaios convencionais, foi publicado em 2015 na revista *Power Engineering* um estudo, onde foi testado o rotor de uma turbina de vapor de baixa pressão em funcionamento desde a década de 60. O SPT foi realizado com o objetivo de estimar os valores de resistência a fratura e concluiu-se que a turbina apresentava baixo risco de continuar em operação e que poderia operar por mais 5 anos antes da próxima inspeção (PURDY, 2015).

O SPT consiste em punctionar amostras em forma de disco, com espessuras da ordem de 500  $\mu\text{m}$  utilizando uma esfera de metal duro e diâmetro conhecido. Durante esse punctionamento, são medidos o deslocamento e a força até a ruptura da amostra. A partir da curva força por deslocamento são calculadas as propriedades mecânicas, tais como limite de escoamento, limite de resistência, tenacidade à fratura e propriedades de fluência.

Esta técnica tem aplicação prática em equipamentos que possuam componentes mecânicos de elevadas dimensões, que foram submetidos a processos que podem levar à degradação do material ao longo do tempo. A indústria petrolífera e a nuclear são as que mais alavancaram esta tecnologia e possibilitaram seu estudo e desenvolvimento. Um dos primeiros trabalhos publicados descrevendo a técnica foi elaborado por Manahan e coautores (1981), que sugeriram o SPT como uma alternativa aos métodos convencionais para avaliar as propriedades mecânicas de materiais presentes em componentes de equipamentos de centrais termonucleares.

Vários modelos de cálculos para as propriedades mecânicas vêm sendo estudados por alguns autores (FLEURY; HA, 1998; RODRÍGUEZ et al., 2009; GARCÍA et al., 2014), porém ainda existem aperfeiçoamentos que são necessários para reduzir os desvios e aumentar a confiabilidade dos resultados. O uso do método dos elementos finitos é interessante neste contexto, uma vez que os resultados mostram boas relações com os resultados experimentais (CAMPITELLI et al., 2004), apresentando a vantagem de se obter os resultados com maior rapidez e menor custo.

Sendo assim, a partir do estudo sobre o ensaio de punctionamento esférico, torna-se possível obter mais informações sobre o estado operacional dos equipamentos e oferecer melhores condições no que diz respeito às decisões relativas ao mesmo.

Este trabalho tem como principal objetivo realizar a simulação de ensaios de punctionamento esférico utilizando o método dos elementos finitos, gerando mais conhecimento sobre o ensaio, bem como sobre a sua sensibilidade à variação de alguns parâmetros. Sendo assim, este trabalho visa originar uma metodologia que possa otimizar a escolha de alguns parâmetros dos ensaios de punctionamento futuros, principalmente os que serão realizados no equipamento de punctionamento instrumentado presente no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia, visto que essa técnica ainda é pouco conhecida no Brasil.

Para tanto, foi obtido um modelo em elementos finitos do fenômeno físico, o qual foi validado com os resultados experimentais realizados no equipamento do LTAD. Como objetivos específicos, foram estudados os efeitos da variação de parâmetros do modelo, como a espessura do corpo de prova e a carga de aperto da matriz superior. Além disso, foi investigada a influência do atrito nos resultados do ensaio de punctionamento.

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, incluindo a introdução que se situa no capítulo I.

Os capítulos II e III apresentam a revisão bibliográfica do trabalho. O segundo capítulo levanta o estado da arte a respeito dos ensaios de punctionamento esférico, mostrando os aspectos gerais do ensaio, o princípio de funcionamento, a análise da curva de resposta e as metodologias para os cálculos das propriedades mecânicas. Já o terceiro capítulo aborda o método dos elementos finitos, com destaque para a solução por integração explícita no tempo. Além disso, ele trata de algumas funcionalidades e aspectos técnicos do programa STAMPACK®, o software de simulação em elementos finitos usado neste trabalho.

O STAMPACK® é um software desenvolvido principalmente para simulação numérica de estampagem de chapas, que faz uso do método dos elementos finitos com integração explícito-dinâmica na base do seu algoritmo. Esse programa se mostrou adequado para as simulações deste trabalho, uma vez que as ferramentas do ensaio de punctionamento esférico apresentam grandes similaridades com as ferramentas que podem ser modeladas no STAMPACK® para simulação de processos de conformação que envolvem chapas metálicas.

A metodologia deste trabalho é descrita no capítulo IV, juntamente com os materiais e recursos laboratoriais utilizados. Foi mostrada a obtenção e a preparação do modelo em elementos finitos, como o desenho, a imposição das condições de contorno, o teste de convergência da malha e o uso da escala geométrica. Além disso, foi mostrado o planejamento das simulações.

Os resultados, mostrados no capítulo V, indicaram uma boa coerência entre as curvas de resposta obtidas pela simulação e pelos experimentos. Verificou-se uma diferença entre

ambas, que se tratava da complacência do equipamento. Após a correção desse efeito, foram analisadas as variações dos parâmetros propostas no trabalho.

A carga de aperto se mostrou um parâmetro de pouca influência no resultado dos testes, salvo os casos em que a carga era pequena a ponto de deixar o corpo de prova se movimentar na direção horizontal ou em que a carga era grande a ponto de esmagar o corpo de prova. Essa variável foi analisada de forma qualitativa.

Já a espessura dos corpos de prova influenciou tanto no formato da curva de resposta, como nos parâmetros usados nos cálculos das propriedades. Espessuras maiores levaram a curvas de resposta com menor transição entre os estágios do ensaio e maior percepção do efeito da indentação na deformação dos corpos de prova. Já espessuras menores levaram a curvas de resposta com menores valores de força e a deformação dominante nos corpos de prova devido à flexão elástica. Verificou-se ainda que, no cálculo do limite de escoamento, a espessura tem pouca influência, sendo obtida neste trabalho uma expressão que conseguia estimar bem os valores para diversos materiais.

Quanto ao atrito, observou-se que essa é uma variável que afeta apenas a parte final da curva de resposta, de forma que maiores valores de atrito levaram a maiores valores de carga máxima. Desse modo, o atrito se mostrou importante na análise do limite de resistência. Além disso, pela análise de deformações, verificou-se que o aumento no atrito muda o comportamento do corpo de prova quanto à ruptura, levando o mesmo a romper em regiões mais afastadas do ponto inferior do punção esférico.

O capítulo VI traz as conclusões finais e as sugestões para trabalhos futuros e o capítulo VII lista as referências bibliográficas usadas neste trabalho.

## CAPÍTULO II

### ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Este capítulo mostra inicialmente a relevância de ensaios mecânicos na determinação do comportamento mecânico dos materiais. Em seguida, dando ênfase especificamente no ensaio de punctionamento esférico, é mostrada uma revisão histórica a respeito deste ensaio e, posteriormente, é discorrido sobre seu princípio de funcionamento, a curva de resposta da qual são obtidas as propriedades mecânicas e o uso do método dos elementos finitos aliado a esta técnica de ensaio.

#### 2.1 Ensaios para avaliar propriedades mecânicas dos materiais

Muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a esforços ou carregamentos, como por exemplo, a liga de alumínio a partir da qual a asa de um avião é construída e o aço no eixo de um automóvel. Nestes casos, é necessário conhecer as características do material para projetar o componente a partir do qual ele é feito, tal que as tensões/deformações resultantes não sejam excessivas e não causem a falha mecânica do componente. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta, ou deformação, a um esforço aplicado, bem como os limites de resistência e mecanismos de falha deste material. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência ao escoamento e a ruptura, a dureza, a ductilidade e a rigidez.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório, cuidadosamente projetados, de acordo com normas específicas, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Fatores que devem ser considerados incluem a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, assim como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, de

compressão ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de um segundo ou se estender por um longo período. A temperatura de operação também pode ser um fator importante.

As propriedades mecânicas são o alvo da atenção de várias pessoas e grupos que possuem interesses diferentes, tais como: produtores e consumidores de materiais, instituições de pesquisa, agências governamentais, dentre outros. Consequentemente, é imprescindível que exista alguma consistência na maneira de conduzir os ensaios e na interpretação dos seus resultados. Essa consistência é obtida com o emprego de técnicas de ensaios padronizadas (normas técnicas). O estabelecimento e a publicação dessas normas padrões são frequentemente coordenados por sociedades profissionais, como a Sociedade Americana para Ensaios de Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*), que é a organização mais ativa nos Estados Unidos e tem grande aceitação mundial (CALLISTER JR., 2011). No Brasil, a entidade responsável pelas normas padrões é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Uma das funções dos engenheiros de estruturas é determinar as distribuições de tensões e deformações em componentes que estejam submetidos a cargas bem definidas, utilizando para tal, técnicas experimentais, analíticas ou numéricas. Os engenheiros de materiais e metalúrgicos, por sua vez, preocupam-se com a produção e a fabricação de materiais para atender as exigências de serviços previstas por essas análises de tensão/deformação, o que envolve necessariamente uma compreensão das relações entre a microestrutura dos materiais e as suas propriedades.

Os ensaios para determinar o comportamento mecânico dos materiais podem ser classificados quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente ou quanto à velocidade de aplicação da carga. (GARCIA, 2012)

Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça, os ensaios podem ser de dois tipos:

- Destrutivos: após executados provocam a inutilização parcial ou total da peça. Alguns exemplos são os ensaios de tração, fadiga, fluência, tenacidade à fratura;
- Não destrutivos: após executados não comprometem a integridade da peça. Alguns exemplos são os raios X, raios  $\gamma$ , ultrassom.

Quanto à velocidade de aplicação da carga, os ensaios podem ser:

- Estáticos: a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio, caracterizando um processo quase estático.

Nessa categoria têm-se os ensaios de tração, compressão, flexão, dureza e torção;

- Dinâmicos: a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente, como nos ensaios de fadiga e impacto;
- Carga constante: a carga é aplicada durante um longo período, como no caso do ensaio de fluência.

Inúmeras vezes, a constituição e as propriedades mecânicas do material usado na fabricação de um determinado equipamento não são conhecidas. Isso ocorre, por exemplo, com algumas estruturas de centrais elétricas ou da indústria petroquímica, especialmente as mais antigas, para as quais a documentação técnica não é precisa ou mesmo não existe. Desse modo, de forma a levantar as propriedades destes materiais e garantir a integridade das estruturas, incluindo análises de vida remanescente, é necessária a realização de ensaios não destrutivos.

Os "mini testes" conseguem fornecer informação relativa à resistência mecânica dos aços e outros materiais metálicos presentes nos equipamentos em operação, sujeitos a fenômenos de degradação ao longo do tempo e, com isso, determinar a vida útil residual dos mesmos com base nos resultados obtidos. Estes ensaios podem ser considerados não destrutivos, quando as amostras extraídas são retiradas de componentes com dimensões elevadas comparadas às da amostra, não tendo, assim, efeitos significativos na resistência dos mesmos e garantindo a continuidade dos equipamentos em serviço. (HURST; MATOCHA, 2012)

Alguns ensaios que se enquadram no conjunto dos "mini testes" são: o "mini Charpy" (LUCAS, 1983; KURISHITA et al., 1994), cujo corpo de prova é mostrado na Fig 2.1, o ensaio de microindentação instrumentada (BYUN et al., 1997), o ensaio de tração em corpos de prova miniaturizados (KUMAR; POOLEERY; MADHUSOODANAN, 2014), ilustrado na Fig. 2.2. Além desses ensaios baseados em ensaios convencionais, existem outros "mini testes" que vêm sendo desenvolvidos.

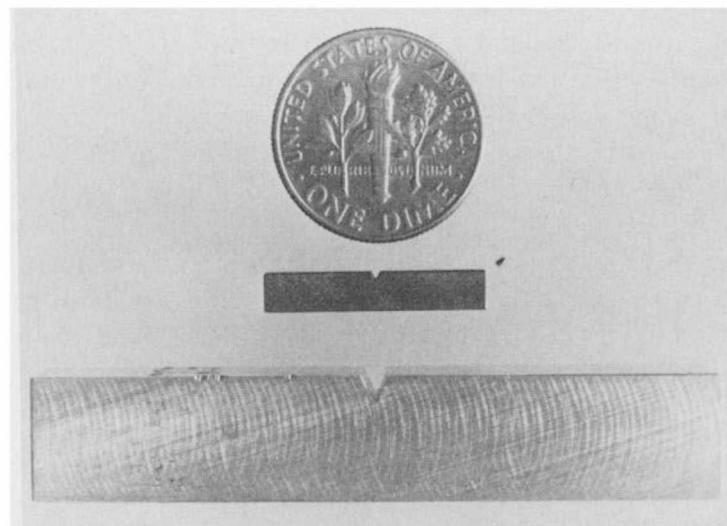


Figura 2.1 – Escala de um corpo de prova usado no ensaio mini Charpy. (LUCAS, 1983)



Figura 2.2 – Corpos de prova de ensaios de tração convencional, de tamanho reduzido e em miniatura. (KUMAR; POOLEERY; MADHUSOODANAN, 2014)

O ensaio de punctionamento por cisalhamento, conhecido como *Shear Punch Test* (LUCAS et al., 1984; GUDURU et al., 2005), consiste em punctionar uma pequena amostra que é fixada entre duas matrizes com um punção cilíndrico até sua ruptura por cisalhamento. São medidos o deslocamento do punção e a força, gerando uma curva similar à curva do ensaio de tração. A partir dela podem ser estimados os valores da tensão cisalhante de escoamento, tensão cisalhante máxima e do coeficiente de encruamento do material testado. A Figura 2.3 mostra um exemplo de dispositivo e o esquema de funcionamento do *Shear Punch Test*.

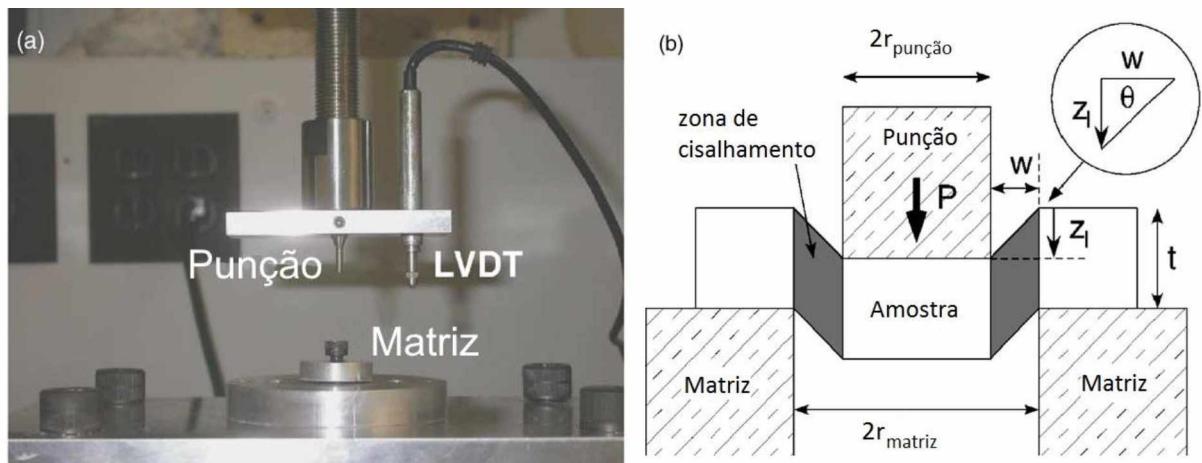


Figura 2.3 – (a) Dispositivo do Shear Punch Test. (b) Esquema do Shear Punch Test. (GUDURU et al., 2005)

O ensaio de fluênciia por impressão, ou *Impression Creep Test* (HYDE; SUN; BECKER, 1996) consiste na aplicação de uma carga constante através de um punção de ponta plana sobre um corpo de prova de superfície também plana a temperaturas elevadas. O esquema de funcionamento é mostrado na Fig. 2.4, bem como um corpo de prova após o ensaio. As propriedades de fluênciia são obtidas relacionando a profundidade de penetração com o tempo de ensaio a carga constante e condições de temperaturas elevadas.

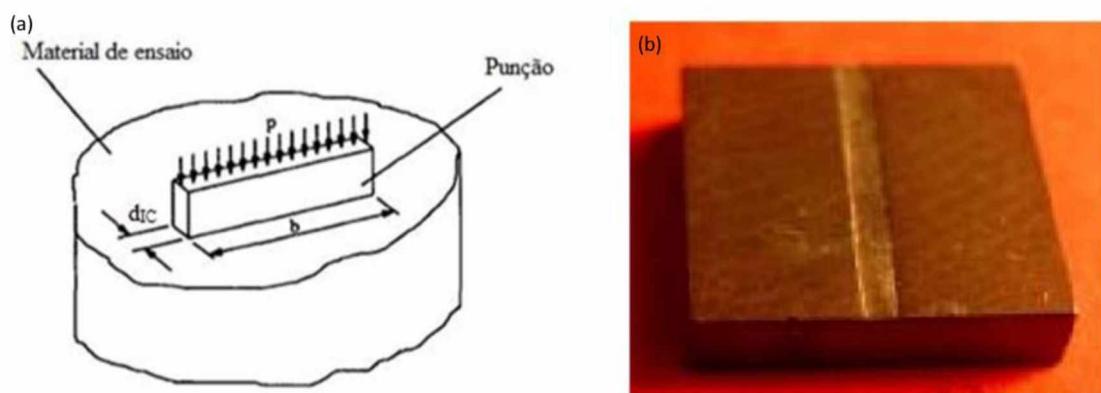


Figura 2.4 – (a) Esquema do Impression Creep Test. (HYDE; SUN; BECKER, 1996) (b) Corpo de prova após o Impression Creep Test (SUN; HYDE; BRETT, 2008)

Classificado também como "mini teste", tem-se o ensaio de punctionamento esférico, conhecido como *Small Punch Test* (SPT), que foi o objeto de estudo no desenvolvimento deste trabalho.

## 2.2 Ensaio de Punctionamento Esférico (Small Punch Test)

A indústria nuclear e a petrolífera foram duas das precursoras no desenvolvimento dos "mini testes" para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, em especial da técnica de SPT. Um dos primeiros estudos que descrevem esta técnica foi publicado em 1981 nos EUA com o artigo elaborado por Manahan e seus coautores, e que em 1986 foi registrada como patente. Manahan et al. (1981) sugeriram esta técnica com o intuito de ser uma alternativa aos métodos convencionais de caracterização mecânica, o que reduziria significativamente o volume de material necessário para a caracterização. O seu objetivo centrava-se na obtenção das propriedades mecânicas dos materiais presentes em componentes de equipamentos de centrais termonucleares, a fim de avaliar o seu estado de degradação quando estes operavam sob condições de radiação.

A Figura 2.5a ilustra o esquema do ensaio utilizado por Manahan et al. (1981), no qual foram utilizadas amostras em forma de discos de 3,00 mm de diâmetro e 0,25 mm de espessura. O esquema consistia em um dispositivo para suporte da amostra e um punção que comprime uniaxialmente a amostra. A partir desse ensaio foi gerada uma curva da carga aplicada pelo deslocamento do punção, conforme apresentado na Fig. 2.5b.

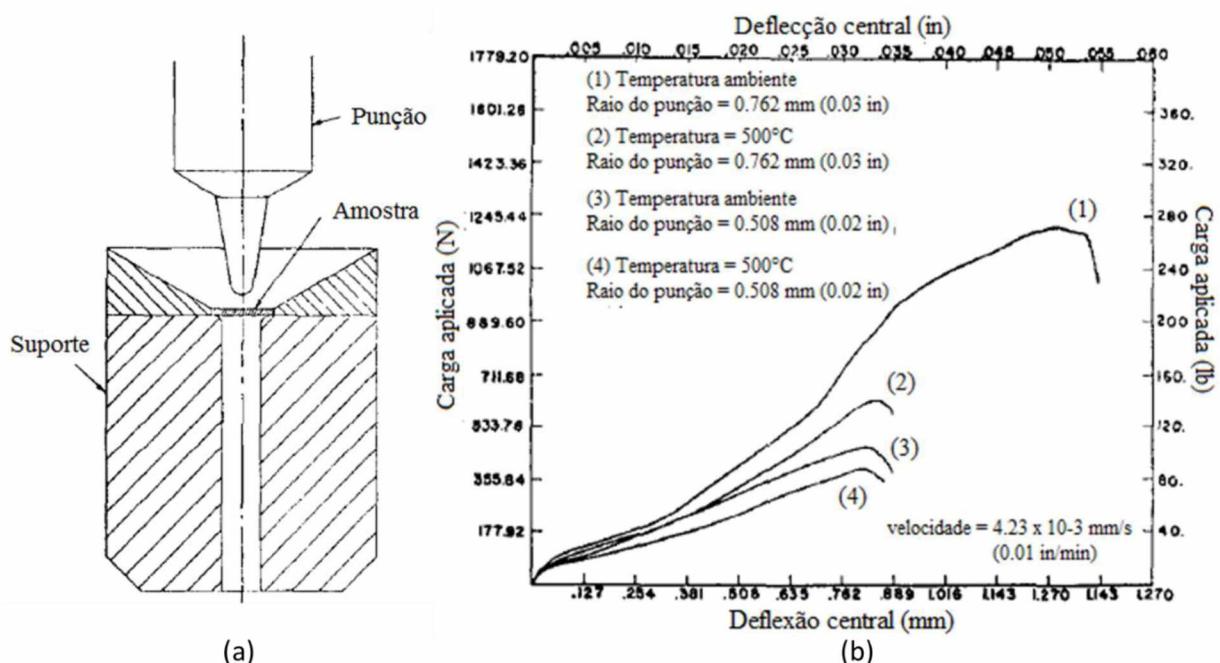


Figura 2.5 – (a) Esquema para o ensaio; (b) curva de força por deslocamento obtida no ensaio com diferentes temperaturas e diâmetros do punção. (MANAHAN et al., 1981)

As principais informações obtidas nesse trabalho foram a grande influência do diâmetro do punção empregado no ensaio e a taxa de deslocamento do mesmo para obtenção de resultados mais precisos, além da influência da temperatura de ensaio no perfil da curva obtida.

Após o registro de patente de Manahan e seus coautores (1986), vários pesquisadores usaram esta técnica de ensaio a fim de estimar diversas propriedades mecânicas, como o limite de ruptura e o limite de escoamento (LUCAS et al., 1986; CHEON; KIM, 1996), o módulo de elasticidade (RODRÍGUEZ et al., 2009), a temperatura de transição dúctil-frágil (BULLOCH, 1998), tenacidade à fratura (WANG et al., 2008; RODRÍGUEZ et al., 2012) e propriedades de fluência (LING et al., 2007; DOBES; MILICKA, 2008).

Além disso, após os primeiros trabalhos da década de 1980, que eram basicamente ligados à indústria nuclear com objetivos de avaliar a degradação dos componentes de reatores nucleares devido aos danos causados pela irradiação (MANAHAN et al., 1981; KAMEDA; MAO, 1992), a técnica encontrou desenvolvimento em diversas outras áreas, tais como: nas usinas de vapor (HA; FLEURY, 1998) de modo a estudar a degradação devido à fluência dos componentes que trabalhavam com combustíveis fósseis convencionais; em juntas soldadas (HYDE; SUN, 2001; CHUVAS, 2015) em que as zonas termicamente afetadas (ZTAs) são muito estreitas e a determinação das propriedades nessas regiões do material utilizando testes convencionais se torna impraticável; em materiais para aplicação em componentes de turbinas aeronáuticas (HURST et al., 2016) para avaliar propriedades de tração e de fluência.

O uso da técnica do SPT foi acelerado pelo desenvolvimento das tecnologias de extração de amostras do material de maneiras não destrutivas e que não exigem preparação posterior das mesmas. A Rolls-Royce plc® desenvolveu uma máquina que extrai amostras no formato de conchas (Fig. 2.6), que tem como base de funcionamento a rotação de dois eixos, conforme mostrado na Fig. 2.7.

Neste dispositivo, um eixo é responsável pela rotação da concha de corte, enquanto o outro é responsável pela rotação de avanço ou penetração da concha no material a ser extraído. O corte é feito com fluido refrigerante na concha, para que o material não sofra alterações provocadas pela temperatura desenvolvida pelo corte. As amostras retiradas possuem aproximadamente 25 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. Além disso, de cada amostra podem ser obtidos vários corpos de prova, conforme mostrado na Fig. 2.8.

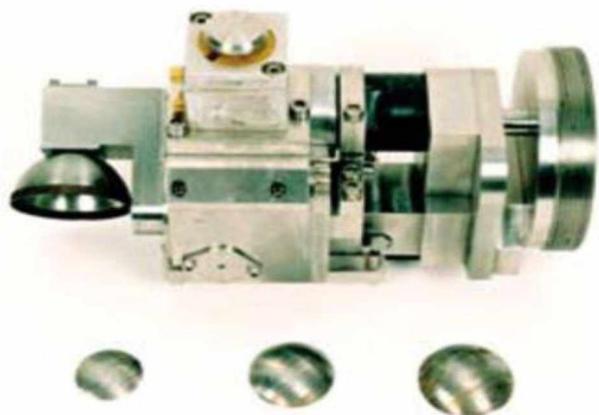


Figura 2.6 – Máquina de extração de amostras do tipo concha SSam™-2 desenvolvida pela Rolls-Royce® e amostras obtidas. (ROLLS-ROYCE POWER ENGINEERING PLC, 2010)

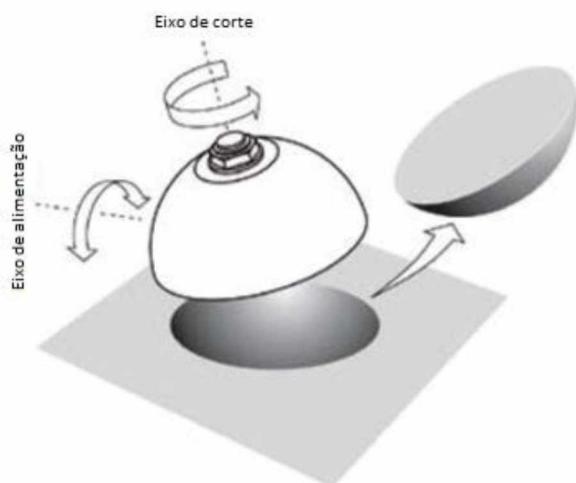


Figura 2.7 – Princípio de funcionamento da máquina de extração de amostras. (ROLLS-ROYCE POWER ENGINEERING PLC, 2010)



Figura 2.8 – Corpos de prova obtidos de uma amostra extraída pela SSam™-2 (MATOCHA; PURMENSKÝ, 2009)

Outra técnica de extração de amostras para os ensaios de SPT foi desenvolvida por OKAMOTO et al. (2009) e consiste em um processo de remoção por descarga elétrica entre um eletrodo e o material a ser removido, conforme apresentado na Fig. 2.9.

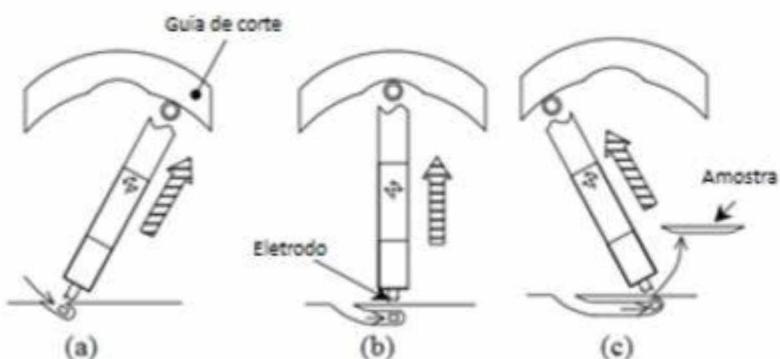


Figura 2.9 – Princípio de funcionamento do equipamento de remoção por descarga elétrica. (a) primeira fase da operação. (b) segunda fase da operação. (c) operação executada. (OKAMOTO et al., 2009)

Este processo remove amostras de dimensões 40x23x2,3 mm em aproximadamente três a quatro horas, dependendo do tipo de aço, causando pouco, ou quase nenhum efeito térmico devido à descarga elétrica.

Portanto, o SPT vem se mostrando uma boa alternativa aos ensaios convencionais de avaliações de propriedades mecânicas, principalmente tendo em vista o fato de que os corpos de prova utilizados neste tipo de ensaio possuem dimensões muito inferiores aos dos corpos de prova convencionais, podendo, para muitos casos, ser considerado um ensaio não destrutivo.

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento

O uso industrial do SPT foi inicialmente bastante limitado na Europa devido à falta de normas regulamentando o ensaio. A Comissão Europeia de Normalização (CEN) elaborou, em 2004, um Workshop com objetivo de apresentar algumas diretrizes para a realização do SPT em materiais metálicos. Em 2007, foi publicado o documento CWA 15627 (2007), contendo tais diretrizes, o qual foi dividido em duas partes. A primeira parte consistia nas diretrizes para o SPT voltado para retirada de propriedades de fluência, enquanto a segunda trazia diretrizes para o SPT que analisava propriedades de tração e fratura dos materiais.

Este documento apresenta diretrizes quanto à preparação das amostras do ensaio, ao dispositivo a ser utilizado, ao princípio de funcionamento e condições do ensaio e às

características geométricas dos corpos de prova. Além disso, ele apresenta diretrizes sobre a análise dos resultados obtidos para extrair propriedades dos materiais, como: limite de escoamento, limite de resistência, tenacidade à fratura, temperatura de transição dúctil-frágil.

A Figura 2.10 mostra um esquema de dispositivo do ensaio SPT, onde o corpo de prova (4) é colocado em um orifício situado na matriz inferior (2), sendo pressionado em seguida pela matriz superior (1) e por fim carregado na zona central por ação de um punção esférico (3), que irá deformá-lo até a ruptura.

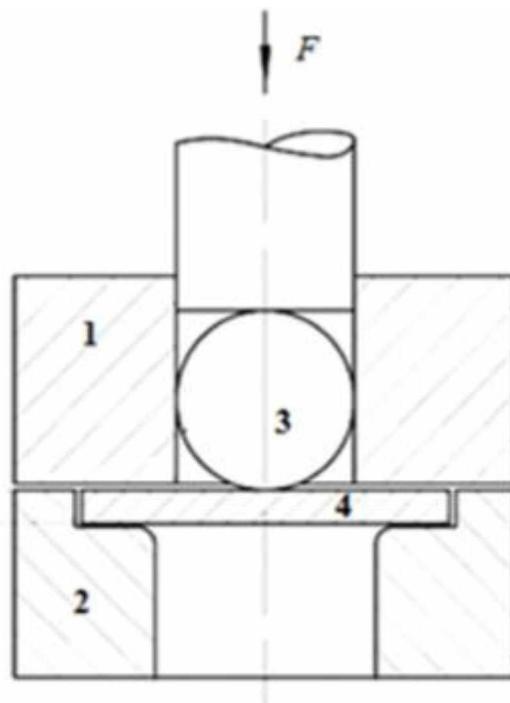


Figura 2.10 – Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT. (WANG et al., 2008)

De acordo com o documento CWA 15627 (2007), existem basicamente dois tipos de ensaios SPT: *Small Punch Bulge Test* (SPBT) e *Small Punch Drawing Test* (SPDT). No SPBT, o corpo de prova é preso firmemente entre as matrizes, impondo que a deformação ocorra apenas na região de contato com o punção, sendo este tipo o mais utilizado. Já no SPDT, o corpo de prova é apenas apoiado entre as matrizes de forma a impedir o deslocamento vertical.

A geometria dos corpos de prova do ensaio pode ser quadrangular, conforme mostrada na Fig. 2.11a ou circular (Fig. 2.11b), sendo esta mais comumente utilizada.



Figura 2.11 – Corpos de Prova de ensaios SPT (a) de geometria quadrangular. (JU; JANG; KWON, 2003) (b) de geometria circular. (HU; LING, 2009)

Qualquer uma destas duas geometrias pode ser utilizada nos ensaios SPT sem influenciar nos resultados. A maior diferença na escolha da geometria é apenas a área de contato com as matrizes, uma vez que o corpo de prova quadrangular possui uma maior área de contato com as matrizes, o que facilita seu engaste no ensaio SPBT.

Quanto às dimensões, o CWA 15627 (2007) recomenda para os corpos de prova circulares diâmetro de aproximadamente 8,0 mm e espessura de aproximadamente 0,5 mm. A justificativa para essa espessura de 0,5 mm é que o número de grãos ao longo da espessura é adequado para obter propriedades volumétricas. Já para os corpos de prova quadrangulares, normalmente é usada uma geometria de 10,0 mm de lado e 0,5 mm de espessura. (JU; JANG; KWON, 2003; CONTRERAS et al., 2008; GARCÍA et al., 2015)

O objetivo do ensaio é produzir uma curva de carga por deslocamento do punção e/ou carga por deflexão do corpo de prova que contenha informações das deformações elásticas e plásticas e das propriedades de resistência mecânica do material.

### 2.2.2 Curva Força x Deslocamento e Cálculo das Propriedades

O SPT permite a determinação de diversas propriedades mecânicas que, na sua maioria, estão relacionadas à curva de carga x deslocamento do punção, como a mostrada na Fig. 2.12.

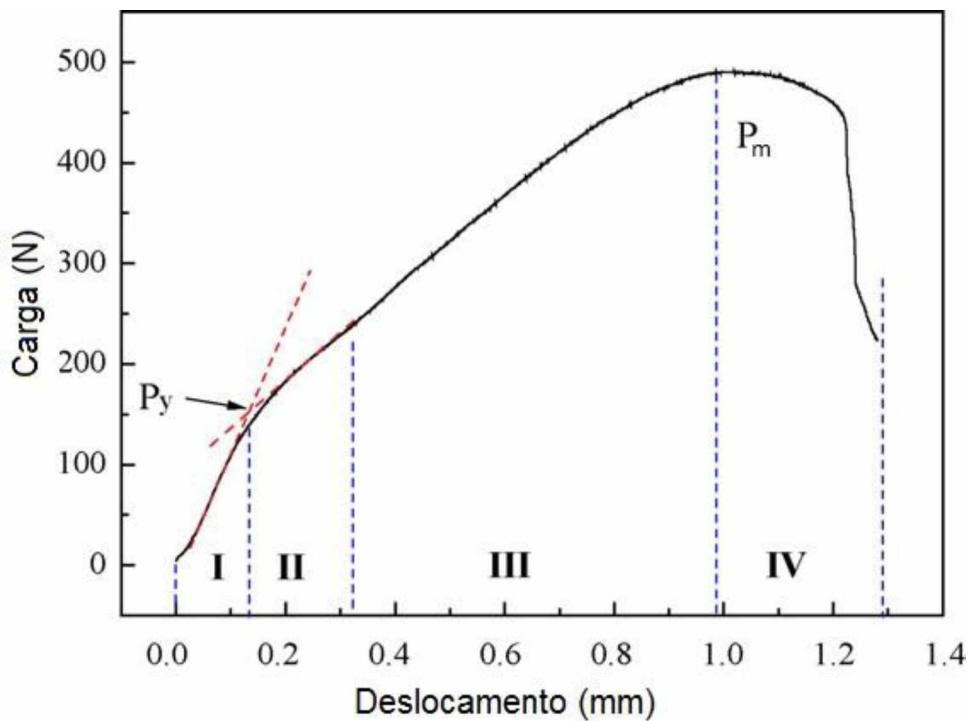


Figura 2.12 – Curva carga x deslocamento típica dos ensaios SPT. (WANG et al., 2008)

Baik et al. (1986) identificaram na curva carga x deslocamento quatro estágios de deformação como indicado na Fig. 2.12. Segundo os autores, o primeiro estágio (I) corresponde à flexão elástica, durante a qual todo o corpo de prova sofre deformação elástica. No segundo estágio (II) inicia-se a deformação plástica, onde o volume de plasticidade que surge no centro do corpo de prova, na região de contato com o punção, aumenta progressivamente na direção da espessura e na direção radial. A partir de um determinado ponto, começa a ocorrer um comportamento de membrana, que predomina na maior parte do ensaio (III), na qual a deformação não está associada às tensões provocadas pela flexão do corpo de prova, mas sim devido a uma alta tensão na área de contato entre a esfera e o corpo de prova.

O regime de estiramento da membrana inicia quando é atingido um determinado estágio do ensaio em que ocorre um deslizamento de camadas simultaneamente com a deformação plástica localizada em algumas regiões. Neste regime, o fluxo de deformação radial torna-se dominante na região que não está presa pelas matrizes e, consequentemente, ocorre uma rápida redução na espessura.

Por fim, ao aproximar-se da carga máxima, a inclinação da curva começa a diminuir à medida que o mecanismo de falha começa a se desenvolver, dando origem ao quarto estágio (IV), onde ocorrerá a propagação da trinca principal que leva à ruptura da amostra.

Várias equações foram desenvolvidas para permitir a obtenção das propriedades de tração (limite de escoamento e limite de resistência) com base na curva carga x deslocamento. Ela é relacionada com as propriedades mecânicas através de correlações matemáticas, que dependem das propriedades do material, da geometria do corpo de prova e do punção utilizado no ensaio.

Rodríguez et al. (2009) destacaram alguns pontos da curva que são mais importantes para a estimativa das propriedades:

- $P_y$  = carga onde se tem o início da deformação plástica, podendo ser obtido por diferentes técnicas ainda em estudo. Pode ser visto na Fig. 2.12.
- $P_m$  = carga máxima obtida durante todo o ensaio considerada para o cálculo do limite de resistência.
- $d_m$  = deslocamento no ponto de carga máxima, utilizado para o cálculo do alongamento. Ainda é discutido como esse ponto é escolhido, devido à dificuldade em se determinar com precisão quando o corpo de prova se rompe durante o ensaio.

Mao e Takahashi (1987) estudaram relações entre os dados do ensaio SPT e o limite de escoamento ( $\sigma_y$ ), limite de resistência ( $\sigma_{ut}$ ) e tenacidade à fratura ( $J_{IC}$ ) para quatro materiais isotrópicos com comportamento dúctil. Eles relacionaram a mudança de inclinação da curva entre o primeiro e segundo estágio da curva como sendo a carga ( $P_y$ ) correspondente ao início da deformação plástica.

Através de um processo empírico, Mao e Takahashi (1987) chegaram a uma relação linear entre o limite de escoamento dos materiais e a carga sobre a espessura do corpo de prova ao quadrado ( $t^2$ ), resultando na Eq. (2.1), para  $P_y$  expresso em N e  $t$  em mm.

$$\sigma_y = 0,360 \left( \frac{P_y}{t^2} \right) \quad (2.1)$$

Mao e Takahashi (1987) também relacionaram a carga máxima do ensaio ( $P_m$  [N]) com o limite de resistência, obtendo, empiricamente, a Eq. (2.2).

$$\sigma_{ut} = 0,130 \left( \frac{P_m}{t^2} \right) - 320 \quad (2.2)$$

Fleury e Ha (1998) chegaram a resultados que mostravam a correlação linear entre os valores obtidos com base na curva do SPT e os obtidos em ensaios uniaxiais convencionais

para diferentes temperaturas em aços Cr-Mo, notando a diferença entre a inclinação das retas que são usadas no desenvolvimento das equações empíricas de correlação entre carga e tensão para os diferentes materiais.

Devido ao debate gerado pela existência de diversas correlações para cálculos das propriedades mecânicas, García et al. (2014) apresentaram uma análise de cinco métodos desenvolvidos para a obtenção do valor de  $P_y$  com base em pesquisas anteriores como as de Mao e Takahashi (1987) e Rodríguez et al. (2009). O objetivo desse estudo foi tentar desenvolver uma maneira de obter o valor de  $P_y$  que resultasse em uma equação para o cálculo do limite de escoamento sendo o menos dependente do material e que obtivesse uma boa aproximação com os valores adquiridos através dos ensaios convencionais de tração, tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas.

Na Figura 2.13 é possível observar o processo de obtenção de  $P_y$  utilizado em cada um dos métodos.

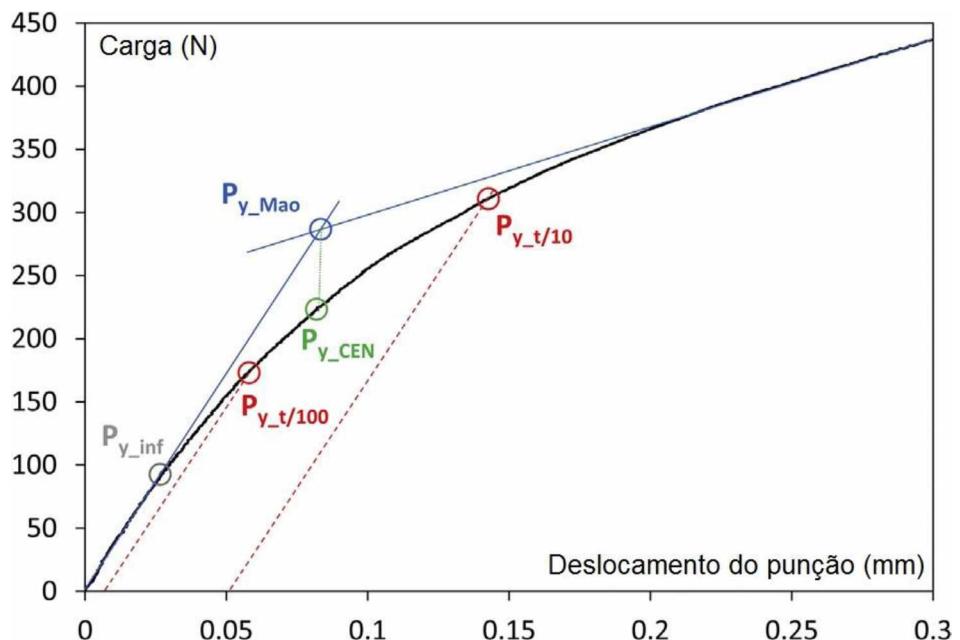


Figura 2.13 – Diferentes propostas para determinar  $P_y$ . (GARCÍA et al., 2014)

O ponto  $P_{y\_Mao}$  é calculado de acordo com o método proposto por Mao e Takahashi (1987), no qual eles definiram  $P_y$  como o ponto de interseção de duas tangentes, sendo uma do regime elástico (região I) e uma do regime plástico (região II). O ponto  $P_{y\_CEN}$  utiliza o proposto no documento CWA 15627 (2007), no qual é definido como a projeção vertical do ponto de interseção das duas tangentes descritas por Mao e Takahashi (1987). Os pontos  $P_{y\_t/100}$  e  $P_{y\_t/10}$  referem-se aos trabalhos de Rodríguez et al. (2009) e Contreras et al.

(2008), respectivamente, onde o ponto  $P_y$  é obtido através do ponto de interseção entre a curva do SPT e uma reta paralela à inclinação inicial do gráfico (fase elástica) com um deslocamento de  $t/10$  ou  $t/100$ , onde  $t$  é a espessura do corpo de prova ensaiado. O último ponto,  $P_{y\_inf}$ , vem de uma proposta recente de Lacalle et al. (2009), que definiu  $P_y$  como a carga correspondente ao primeiro ponto de inflexão localizado na região I.

Para o ponto  $P_m$ , todos os autores citados o descrevem como o ponto de valor máximo de carga obtida durante o ensaio. Já para o ponto  $d_m$ , devido à dificuldade de determinar o ponto exato de ruptura do corpo de prova do SPT, a melhor definição é a que ele corresponde ao valor de deslocamento onde a carga é máxima, tendo em vista que após esse ponto, o corpo de prova falha rapidamente. (GARCÍA et al., 2014)

A partir das equações empíricas de Mao e Takahashi (1987) para o cálculo do limite de escoamento e do limite de resistência (Eq. (2.1) e Eq. (2.2)), Contreras et al. (2008) relacionaram a carga da curva do SPT com as tensões de forma mais geral, conforme mostrado nas Eq. (2.3) e Eq. (2.4):

$$\sigma_y = \alpha_1 \cdot \left( \frac{P_y}{t^2} \right) + \alpha_2 \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ut} = \beta_1 \cdot \left( \frac{P_m}{t^2} \right) + \beta_2 \quad (2.4)$$

Onde,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são constantes dependentes principalmente do tipo de material, das dimensões do corpo de prova e dos parâmetros de ensaio e  $t$  é a espessura do corpo de prova utilizado, sendo considerada padrão  $t = 0,5 \text{ mm}$ .

Segundo García et al. (2014), outros autores observaram que a carga máxima  $P_m$  depende de  $t$  e não de  $t^2$  (LACALLE et al., 2008), sendo o limite de resistência calculado de acordo com a Eq. (2.5). Além disso, uma pesquisa recente propôs uma nova relação que leva em conta o deslocamento do punção quando a carga é máxima,  $d_m$ , de acordo com a Eq. (2.6). (HURST; MATOCHA, 2012)

$$\sigma_{ut} = \beta'_1 \cdot \left( \frac{P_m}{t} \right) + \beta'_2 \quad (2.5)$$

$$\sigma_{ut} = \beta''_1 \cdot \left( \frac{P_m}{t \cdot d_m} \right) + \beta''_2 \quad (2.6)$$

Para o alongamento, são encontradas duas relações diferentes na literatura. Fleury e Ha (1998) descreveram uma relação linear de acordo com a Eq. (2.7), onde  $\gamma$  é uma constante empírica que teve valor igual a 7 no seu trabalho. Rodríguez et al. (2009) propuseram uma versão normalizada dessa expressão dividindo  $d_m$  pela espessura do corpo de prova (Eq. (2.8)), onde em seu trabalho obtiveram uma constante  $\gamma' = 14$ . Isto se mostrou coerente com o trabalho de Fleury e Ha que haviam utilizado um valor de espessura de 0,5 mm.

$$A(\%) = \gamma \cdot d_m \quad (2.7)$$

$$A(\%) = \gamma' \cdot \frac{d_m}{t} \quad (2.8)$$

Segundo Rodríguez et al. (2009), o módulo de elasticidade ( $E$ ) do material pode ser relacionado com a informação do primeiro estágio da deformação curva carga x deslocamento, podendo ser obtido de acordo com a Eq. (2.9):

$$E \approx \frac{\left(\frac{P}{d}\right)_{ini}}{t} \quad (2.9)$$

Onde  $(P/d)_{ini}$  é a inclinação da curva carga x deslocamento no primeiro estágio de deformação e  $t$  é a espessura inicial do corpo de prova.

Além dessas propriedades, o ensaio SPT permite ainda calcular propriedades de tenacidade à fratura, bem como propriedades de fluência.

### 2.3 Método dos elementos finitos associado ao SPT

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta que pode auxiliar bastante a técnica dos ensaios de punctionamento. O MEF vem sendo utilizado com alguma frequência por vários pesquisadores a fim de determinar parâmetros importantes para o ensaio.

Manahan et al. (1981) utilizaram o MEF com objetivo de estudar o atrito presente nos contatos. Os autores escolheram o software Abaqus para o cálculo, uma vez que este permitia efetuar análises não lineares. Foi utilizada uma malha de elementos finitos com dois

elementos contínuos axissimétricos bidimensionais, dando destaque para a região próxima ao contato com a matriz inferior, como mostrado na Fig. 2.14.

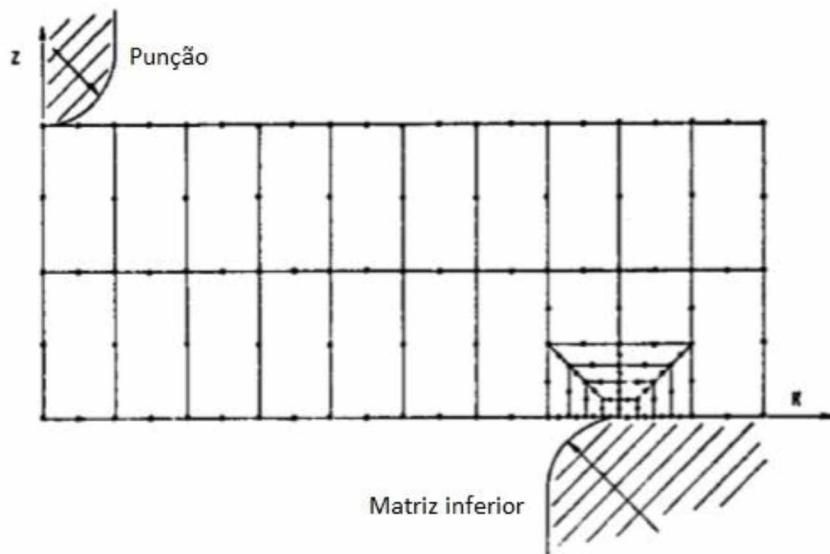


Figura 2.14 – Esquema de malha utilizada para análise em MEF. (MANAHAN et al., 1981)

Os autores concluíram que apesar de os resultados obtidos serem corretos, uma vez que se verificou que o coeficiente de atrito tendia a zero, mais trabalho deveria ser feito para tornar o modelo de elementos finitos mais sensível.

Segundo Fleury e Ha (1998), os autores Mao, Shoji e Takahashi (1987) foram os primeiros a propor uma modelagem da curva carga x deflexão para tentar reproduzir a curva carga x deslocamento utilizando elementos finitos. Eles consideraram um comportamento plástico perfeitamente rígido e utilizaram expressões analíticas descritivas desse comportamento desenvolvido por Onat e Haythornthwaite (1956), conseguindo descrever a curva carga x deslocamento do punção para a condição de temperatura ambiente. Esse modelo, no entanto, não conseguiu fornecer uma descrição precisa do comportamento do ensaio na região plástica, onde o comportamento ocorre sob um regime de membrana, conforme observado na Fig. 2.15.

Campitelli et al. (2004) avaliaram a relação entre tensão e deformação real por meio de ensaios de tração e de SPT em aços austeníticos e martensíticos à temperatura ambiente. Além disso, eles também desenvolveram um modelo em elementos finitos para calcular a curva de força por deslocamento obtida no SPT utilizando o software Abaqus. A Figura 2.16 mostra o modelo em elementos finitos utilizado.

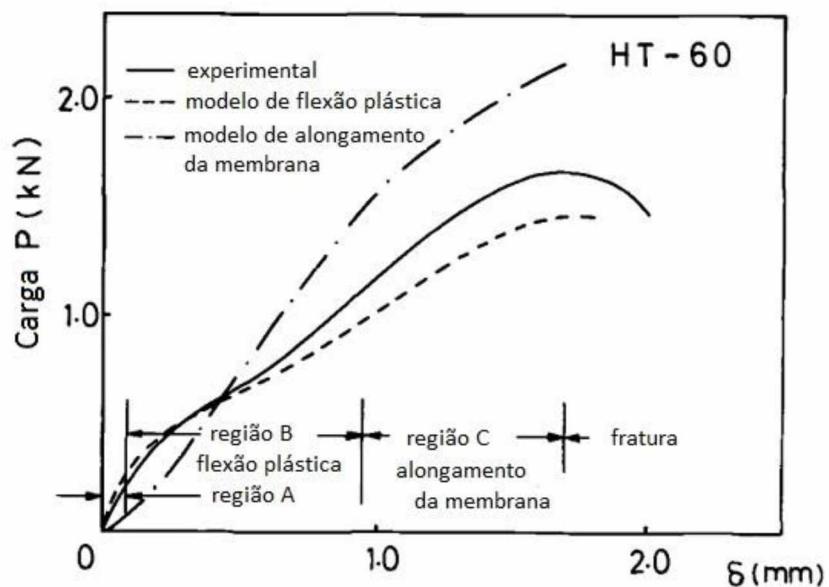


Figura 2.15 – Curva carga x deslocamento comparando comportamento plástico perfeitamente rígido com o experimental. (MAO; SHOJI; TAKAHASHI, 1987)

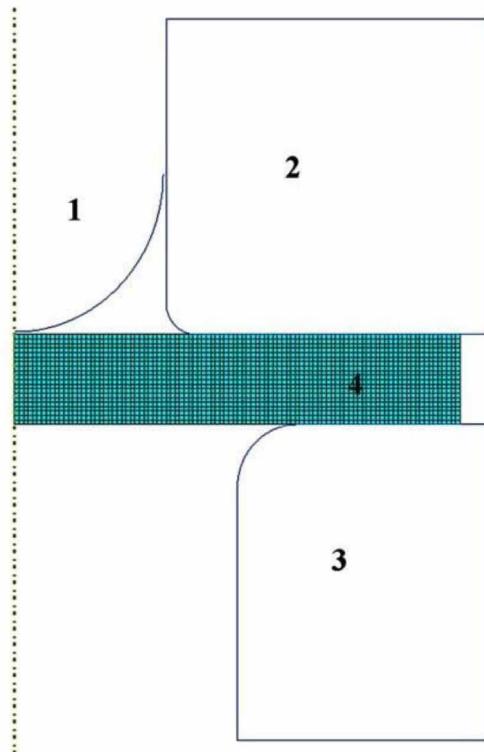


Figura 2.16 – Modelo axissimétrico obtido no Abaqus para o SPT. (CAMPITELLI et al., 2004)

De modo a validar o modelo, Campitelli et al. (2004) realizaram experimentos variando a espessura dos corpos de prova e simularam os ensaios com espessuras diferentes. Os resultados podem ser observados na Fig 2.17.

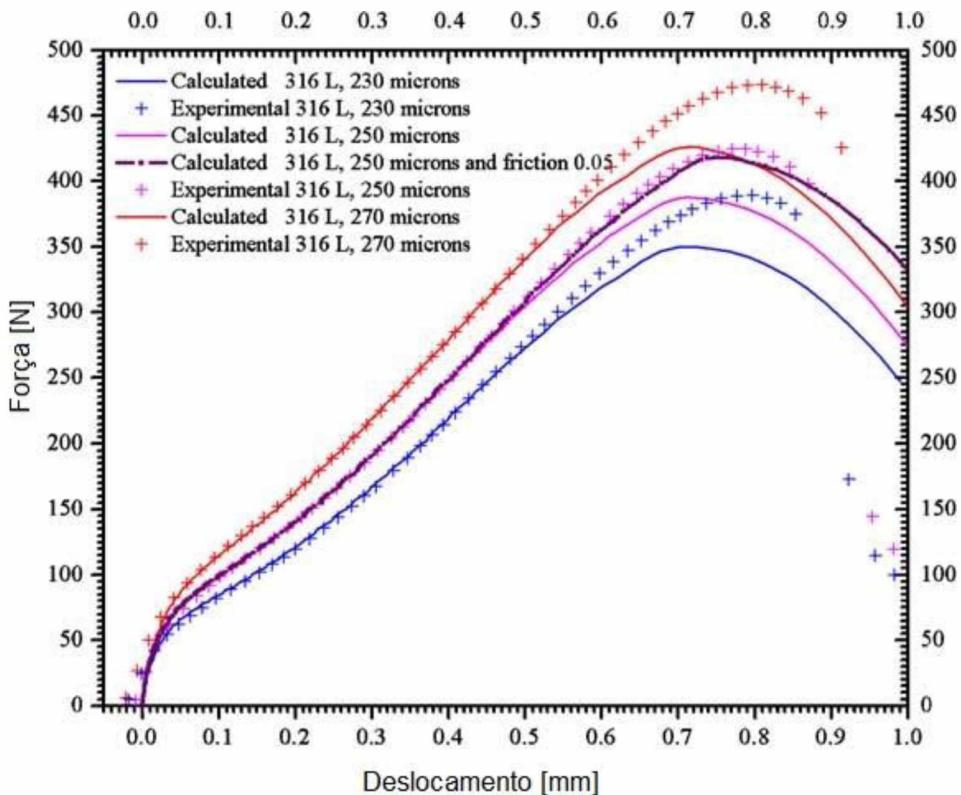


Figura 2.17 – Curvas Força x Deslocamento experimentais e calculadas para amostras de diferentes espessuras do aço 316L. (CAMPITELLI et al., 2004)

Hu e Ling (2009) realizaram estudos em elementos finitos usando o software Abaqus 6.5-1 de código explícito. O estudo foi realizado com base nas equações constitutivas do dano plástico que são amplamente utilizadas para descrever os efeitos micromecânicos dos danos em materiais dúcteis. Na análise efetuada, foi utilizado o modelo 3D como representado na Fig. 2.18, onde é possível observar que o corpo de prova é engastado na região correspondente ao contato com as matrizes e o punção encontra-se livre na direção vertical.

A Figura 2.19 mostra a evolução do dano à medida que o punção se desloca. Os danos ocorrem na parte inferior do corpo de prova e crescem através do mesmo até a ruptura, o que também foi verificado na fase experimental. A falha inicia-se na superfície inferior entre 0,78 e 0,85 mm afastado do centro, o que foi coerente com o experimento. Assim, concluiu-se que este modelo numérico utilizado estava bem definido, podendo ser utilizado com êxito.

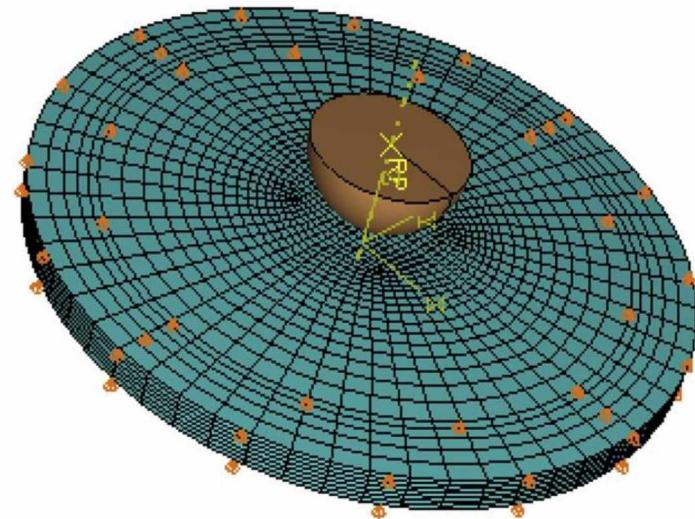


Figura 2.18 – Modelo em elementos finitos 3D para a simulação do SPT (HU; LING, 2009)

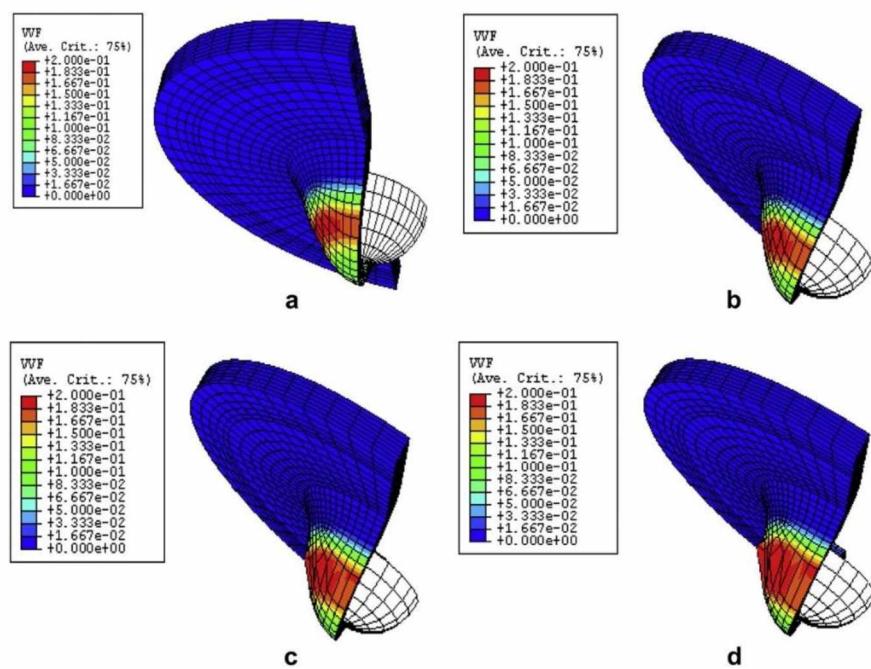


Figura 2.19 – Deslocamento do punção até a falha (HU; LING, 2009)

# CAPÍTULO III

## MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este capítulo apresenta uma introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF), um dos métodos mais utilizados na solução numérica de problemas complexos de engenharia e que foi usado nas simulações dos ensaios deste trabalho. No texto foi dada ênfase à solução por integração explícita, que está presente no programa STAMPACK®. Este programa comercial, desenvolvido no Centro Internacional de Métodos Numéricos (Espanha), foi utilizado em todas as simulações deste trabalho, e, por isso, são mostradas também, a seguir, algumas características do mesmo.

### 3.1 Introdução

Muitos problemas de engenharia podem ser descritos matematicamente na forma de equações diferenciais, porém, dependendo de sua complexidade, a obtenção da solução exata pode ser impraticável ou mesmo impossível. Desse modo, soluções aproximadas que utilizam métodos numéricos se tornam boas alternativas, sendo o MEF um dos métodos mais utilizados para este propósito.

Um componente mecânico real é uma estrutura contínua. O MEF divide (discretiza) a estrutura em pequenas, porém finitas e bem definidas subestruturas (elementos). Por meio de funções polinomiais, juntamente com operações matriciais, o comportamento contínuo de cada elemento é desenvolvido em termos das propriedades geométricas e do material do elemento. As cargas podem ser aplicadas dentro do elemento (gravidade, dinâmica, térmica etc.), sobre a superfície do elemento ou nos nós do elemento. (BUDYNAS, 2011).

O conjunto de elementos utilizados na discretização é denominado malha. Um exemplo é apresentado na Figura 3.1, que mostra uma estrutura de chapa fina com

espessura constante discretizada com elementos triangulares simplex de três nós e em estado plano de tensão.

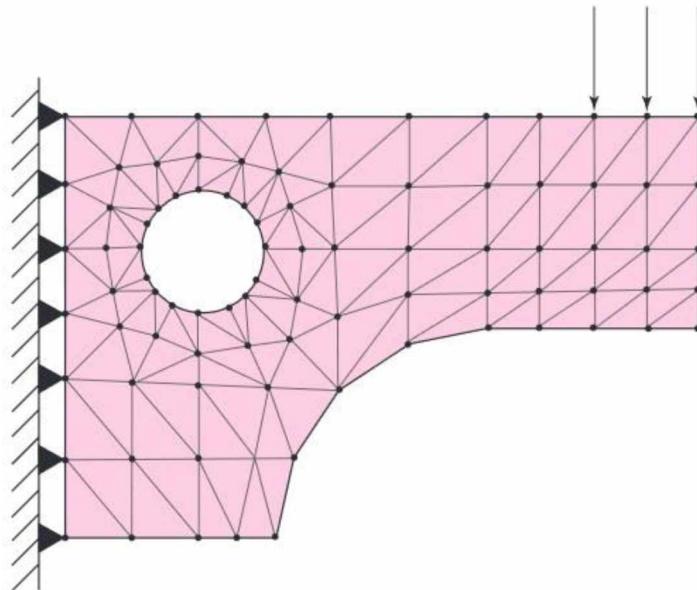


Figura 3.1 – Ilustração da malha de um modelo de elementos finitos. (BUDYNAS, 2011)

Os nós do elemento são suas entidades governantes fundamentais, pois são neles que o elemento se interliga com outros elementos e onde as propriedades elásticas do elemento eventualmente são estabelecidas, as condições de contorno são atribuídas e as forças (de contato ou do corpo) são finalmente aplicadas. Os graus de liberdade dos nós são os movimentos de rotação e de translação independentes que podem ocorrer. Cada nó pode ter, no máximo, três graus de liberdade translacionais e três rotacionais. A Figura 3.2 mostra exemplos de elementos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais com seus nós e graus de liberdade em um dos nós.

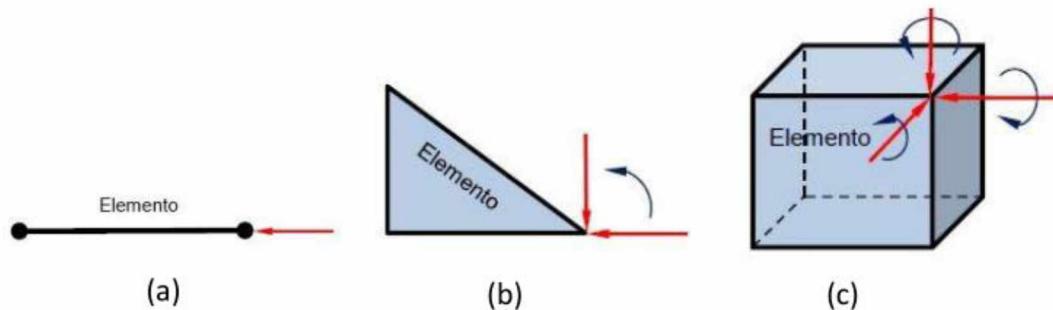


Figura 3.2 – Exemplos de elementos a) unidimensional. b) bidimensional. c) tridimensional. (AZEVEDO, 2014)

Assim que cada elemento no interior de uma estrutura tiver sido definido localmente na forma matricial, os elementos são montados (amarrados) globalmente por seus nós comuns em uma matriz de sistema global. As cargas aplicadas e as condições de contorno são então especificadas e, por meio de operações matriciais, os valores de todos os graus de liberdade de deslocamento desconhecidos são determinados. Conhecendo-se os deslocamentos, podem-se calcular as deformações e tensões utilizando as equações da mecânica do contínuo e as leis constitutivas dos materiais.

O fluxograma apresentado na Figura 3.3 mostra as etapas de uma solução de um problema físico qualquer utilizando o MEF.

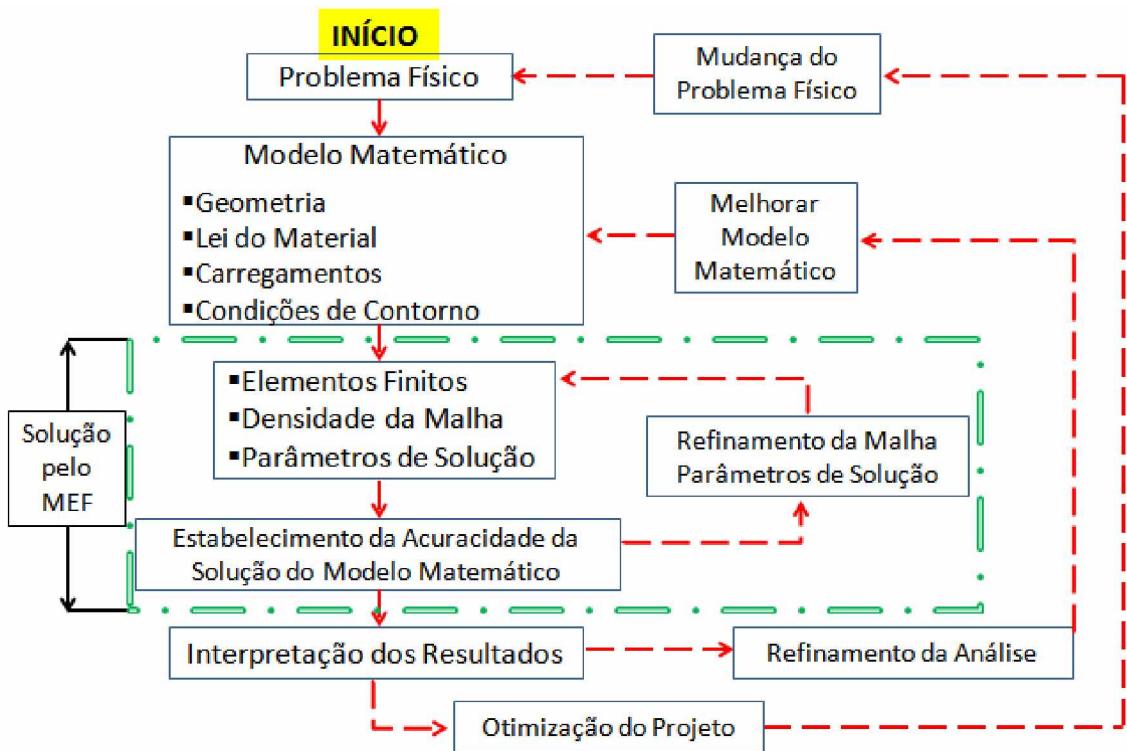


Figura 3.3 – Fluxograma do processo de análise por MEF (BATHE, 1996)

A análise pelo MEF se divide em três partes distintas, sendo elas: o pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira etapa deve-se definir a geometria, o tipo de análise, a malha, propriedades dos materiais e condições de contorno. No processamento ou análise, deve-se definir o tipo de análise desejada (utilizando equações lineares ou não lineares, entre outras configurações) para obter os deslocamentos nodais. Na etapa de pós-processamento são apresentados os resultados, tais como, tensões, fluxo de calor, convergência, fatores de segurança, etc. A Figura 3.4 ilustra a sequência básica de etapas para aplicação computacional do MEF baseada no trabalho de

Alves (2007). Esta sequência é seguida pela maioria dos softwares comerciais de MEF para a solução de um problema.

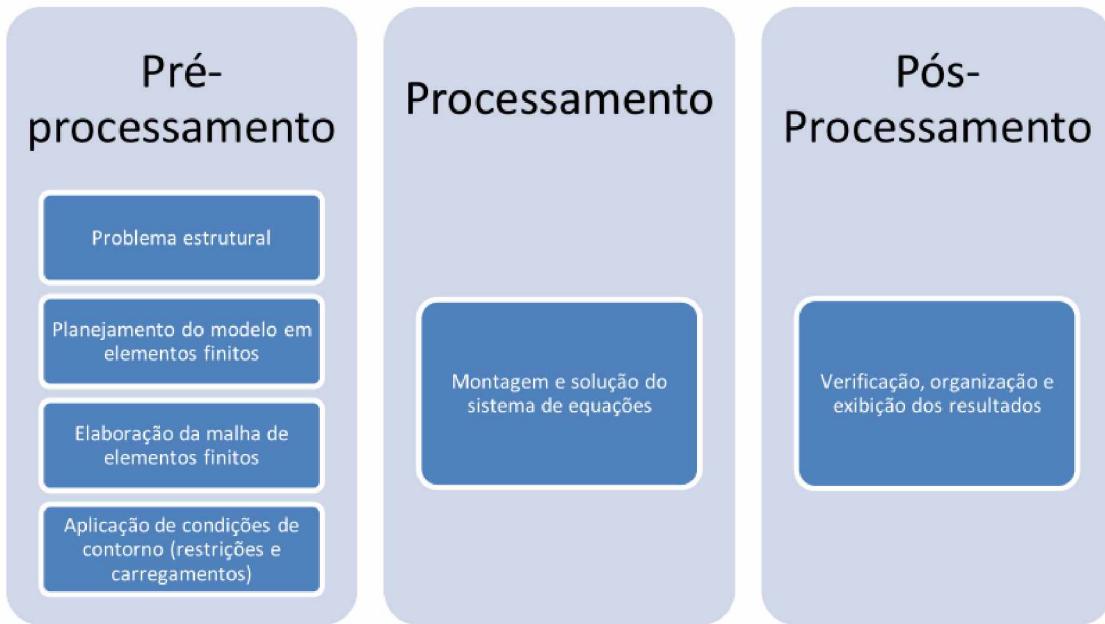


Figura 3.4 – Sequência básica para aplicação computacional do MEF. (ALVES, 2007)

Quanto à solução dos problemas numéricos, o MEF apresenta dois métodos de integração no tempo, explícito e implícito. Os métodos explícitos são condicionalmente estáveis, isto é, necessitam de um passo de tempo menor que um passo de tempo crítico para que o esquema evolua, corretamente no tempo, sem divergir. Além disso, necessitam que se resolva um Sistema de Equações Algébrico (SEA) trivial, em cada passo de tempo, pois só utilizam a solução do passo de tempo anterior para progredir e calcular a solução corrente (DE SOUZA, 2002). Esta característica do método explícito permite a análise do desenvolvimento (histórico) da solução, muito importante na análise de deformações plásticas. (ZIENKIEWICZ, 1991).

Já os métodos implícitos exigem uma computação adicional e podem ser mais difíceis de serem implementados. Apesar de se conseguir realizar uma análise mais rápida, em menos passos de tempo, que um método explícito, a obtenção da solução no passo de tempo corrente, depende da solução no passo de tempo anterior e no atual. As vantagens são verificadas em problemas dinâmicos com pequenas não linearidades, pois permitem usar um passo de tempo maior, resultando em uma melhor estabilidade numérica e precisão. Eles geralmente são incondicionalmente estáveis, podendo-se utilizar passos de tempo maiores, tendo em vista que o custo computacional também aumenta. (YANG et al., 1995)

### 3.2 Solução por integração explícita no tempo

Considerando um problema não linear, a discretização temporal e espacial da estrutura a ser estudada pode ser representada pela equação do movimento (Eq. (3.1)), tendo como base a expansão de Taylor.

$$M \cdot \ddot{u} + p(u, \dot{u}) = f(u, t) \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1),  $M$  é a matriz de massa da estrutura,  $u$ ,  $\dot{u}$  e  $\ddot{u}$  são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração,  $p(u, \dot{u})$  são as forças internas e  $f(u, t)$  são as forças externas. (DUARTE, 2007)

Como foi dito anteriormente, os métodos explícitos são condicionalmente estáveis, de modo que a convergência do problema ocorre quando o passo de tempo for menor que um valor crítico  $\Delta t_{crit}$ . Esse valor crítico pode ser estimado levando em conta as propriedades elásticas do material e o tamanho do menor elemento da malha, de acordo com a Eq. (3.2):

$$\Delta t_{crit} = \frac{L}{c} \quad (3.2)$$

Onde  $L$  é o comprimento característico do menor elemento e  $c$  é a velocidade do som se propagando no material, cujo valor é dado pela Eq. (3.3):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3)$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $\rho$  a densidade do material.

A integração é feita baseada no algoritmo das diferenças finitas, de modo que o passo de tempo seguinte é determinado pela iteração anterior somada a um fator relativo ao novo instante de tempo, conforme mostrado na Eq. (3.4):

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t_{n+1} \quad (3.4)$$

Desse modo, a Eq. (3.1) determina a configuração em um instante  $t_{n+1}$  a partir da configuração conhecida no instante  $t_n$ , de maneira que a aceleração, a velocidade e o

deslocamento de um ponto nodal podem ser obtidos pelas Eq. (3.5), Eq. (3.6) e Eq. (3.7), respectivamente.

$$\ddot{u}_n = M^{-1} \cdot (p(u, \dot{u})_n - f(u, t)_n - C \cdot \dot{u}_n) \quad (3.5)$$

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \ddot{u}_n \quad (3.6)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t_{n+1} \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Onde o termo  $C \cdot \dot{u}$  representa a componente de amortecimento.

De acordo com Aparicio Sánchez (2001), o algoritmo dinâmico explícito apresenta como vantagens:

- Algoritmo robusto e mais simples de programar;
- Requer menos memória que o algoritmo estático implícito;
- Pode ser paralelizado;
- Tem bom desempenho para instabilidade da rigidez, prevendo bem o surgimento de rugas (flambagem localizadas).

E como desvantagens:

- O algoritmo é condicionalmente convergente;
- Para melhorar a convergência, muitas vezes são necessários passos de tempo extremamente pequenos.

### 3.3 O programa STAMPACK®

O STAMPACK® é um programa de simulação em elementos finitos que utiliza o método explícito para cálculo das equações diferenciais. A integração no tempo envolve uma discretização automática, de modo que a cada passo de tempo o programa calcula um novo passo de tempo  $\Delta t$ , garantindo que esse valor fique sempre abaixo do valor crítico  $\Delta t_{crit}$  para produzir uma solução numericamente estável, de acordo com a Eq. (3.8):

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} \quad (3.8)$$

O software foi desenvolvido essencialmente para simulação numérica de estampagem de chapas, com aplicações industriais em processos como embutimento, conformação de chapas espessas, hidroconformação, etc. (STAMPACK, 2003). Porém, ele pode ser aplicado em outros tipos de problemas onde a integração explícita é mais recomendada, como é o caso do ensaio de punctionamento esférico (SPT) onde ocorre deformação plástica no corpo de prova, em um processo similar à estampagem de uma chapa. O programa permite a análise de modelos bidimensional ou tridimensional

As ferramentas do SPT apresentam grandes similaridades com as ferramentas do processo de embutimento de chapas metálicas. Estas ferramentas já estão modeladas e caracterizadas no STAMPACK® para simulação deste processo, como mostrado no esquema da Figura 3.5.

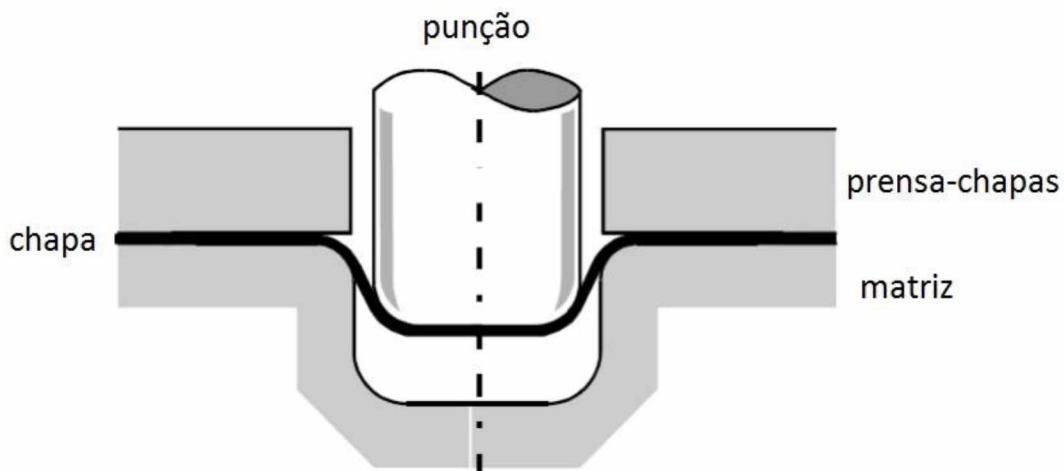


Figura 3.5 – Esquema das ferramentas usadas em uma conformação de chapas. (STAMPACK, 2014)

De modo a se obter resultados precisos através da simulação, o programa leva em conta diversos fatores como dados de entrada, tais como a geometria das ferramentas e do corpo de prova, as propriedades dos materiais utilizados, a interação (contato) entre o corpo de prova e as ferramentas, as condições de contorno e as cargas aplicadas.

A primeira etapa da simulação consiste na criação das geometrias do corpo de prova e das ferramentas, sendo que o programa conta com uma interface CAD para o desenho de geometrias simples ou permite a importação de geometrias mais complexas de outros softwares. Uma vez que a geometria foi criada ou importada, a próxima etapa consiste na geração da malha.

A qualidade dos resultados de simulação do programa está relacionada diretamente ao tipo de elemento finito usado na discretização do modelo bem como à quantidade/tamanho dos elementos que compõem a malha.

Quanto à classificação da malha de elementos finitos no STAMPACK®, estas podem ser divididas em malha estruturada ou malha não estruturada. Esta classificação está relacionada com a disposição relativa dos diferentes elementos. Na malha estruturada, os elementos são dispostos em famílias de linhas e cada nó é conectado a um número constante de elementos. Esse tipo de malha simplifica a programação e a matriz do SEA apresenta uma estrutura regular. Porém, ela é aplicada apenas em domínios com geometrias de complexidade baixa ou média. Já a malha não estruturada varia as dimensões dos elementos para acompanhar melhor a geometria, sendo, portanto, mais irregular e possuindo uma formulação mais complexa. Por outro lado, ela apresenta poucas restrições quanto ao método de discretização e pode ser utilizada para geometrias mais complexas.

No momento da discretização da malha, deve-se atentar para a razão de aspecto, uma vez que as combinações de tamanhos de elementos utilizados podem ser infinitas. Esta relação mede a razão entre a altura e a largura do elemento ( $RA = H/L$ ). É recomendado evitar uma razão de aspecto elevada, pois elementos com geometria pontiaguda ou muito estreitos influenciam diretamente nos resultados finais do modelo, bem como em problemas de contato. O manual do STAMPACK (2003) recomenda um valor de razão de aspecto entre 0,5 e 1. Além disso, deve-se ter em mente que, o tamanho do menor elemento afeta diretamente o tempo final de cálculo, conforme mostrado na Eq. (3.2).

Na formulação do STAMPACK, as ferramentas são consideradas perfeitamente rígidas, sendo assim, a geometria destas ferramentas (matriz e punção), podem ser aproximadas por linhas de contorno em modelos 2D, ou superfícies nos modelos 3D. O prensa-chapas pode ser modelado como não deformável ou como deformável. Algoritmos específicos reproduzem os pares de contato entre as ferramentas e a peça a ser deformada.

A matriz é totalmente fixa, uma vez que o movimento de todos os nós é inteiramente restrito e o movimento do punção é governado de acordo com uma curva de velocidade fornecida. Uma vez que é utilizado o método explícito, que resolve um problema de equilíbrio dinâmico na ausência de gravidade, não é necessária a aplicação de restrições de movimento de corpo rígido.

Devido à simetria do problema, neste trabalho foi usado o modelo bidimensional axissimétrico. Neste tipo de problema, as ferramentas (matriz, punção e prensa-chapas) são representadas por linhas e discretizadas usando elementos unidimensionais (barras). O corpo de prova (chapa) é representado por uma superfície plana e é discretizado utilizando

elementos quadrilaterais 2D. Os elementos usados são elementos clássicos, cujas funções de forma podem ser obtidas na literatura básica de MEF (OÑATE, 1995; ZIENKIEWICZ, 2004).

### 3.3.1 Comportamento mecânico dos materiais

Simulações numéricas envolvem uma avaliação quantitativa do problema e o módulo de cálculo fornece resultados pelo estabelecimento de uma relação entre a cinemática e a dinâmica do problema. Essa relação é estabelecida pelas leis físicas conhecidas que governam o comportamento dos materiais.

O STAMPACK® conta com uma biblioteca de materiais pré-definidos, mas também permite o usuário criar e adicionar à biblioteca materiais com propriedades definidas pelo mesmo. Para tanto, as principais características para a inclusão de um novo material à biblioteca são o comportamento elástico, o comportamento plástico e a anisotropia do material (quando existir).

O comportamento elástico é caracterizado por dois parâmetros: o módulo de elasticidade  $E$  e o coeficiente de Poisson  $\nu$ . O programa considera a zona elástica linear e usa o mesmo valor para o limite de proporcionalidade  $\sigma_p$ , o limite elástico  $\sigma_e$  e o limite de escoamento convencional  $\sigma_y$ . Esse valor é a tensão correspondente a uma deformação de 0,2%. Isso leva a um pequeno e desprezível desvio entre a curva numérica e a curva real. O coeficiente de Poisson pode assumir valores entre 0 e 0,5, sendo 0 para materiais altamente compressíveis e 0,5 para materiais incompressíveis.

O comportamento plástico pode ser descrito por várias leis constitutivas, sendo que o STAMPACK® disponibiliza na sua formulação três leis constitutivas: Hollomon (Eq. (3.9)), Ludwik-Nadai (Eq. (3.10)) ou Voce (Eq. (3.11)). As curvas de encruamento são definidas como curvas de tensão-deformação verdadeiras e são funções da deformação plástica e não da deformação total. O limite de escoamento definido é o primeiro ponto desta curva.

$$\sigma_y = K \cdot (\varepsilon_{ps})^n \quad (3.9)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + K \cdot (\varepsilon_{ps})^n \quad (3.10)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y0} - (\sigma_{y0} - K) \cdot e^{-n \cdot \varepsilon_{ps}} \quad (3.11)$$

Onde  $\sigma_{y0}$  é a tensão de escoamento inicial do material,  $K$  é o coeficiente de resistência,  $n$  é o expoente de encruamento e  $\varepsilon_{ps}$  é a deformação plástica equivalente.

A lei constitutiva mais comumente usada para aço carbono é a de Ludwik-Nadai, também conhecida como Lei de Swift. Os parâmetros necessários para descrever o comportamento plástico são o expoente de encruamento  $n$  e o coeficiente de resistência  $K$ .

O escoamento ocorre quando a tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) se iguala ao limite de escoamento atual, segundo o critério adotado. Como critério de escoamento, levando em conta a anisotropia do material, o programa permite utilizar os critérios de Hill 48, Hill 48 avançado e Hill 90. Porém, para o modelo bidimensional é utilizada o critério de Hill 48, conforme descrita na Eq. (3.12).

$$\sigma_{eq} = \left[ \sigma_{11}^2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{22}^2 - 2 \frac{r_0}{1+r_0} \sigma_{11} \sigma_{12} + \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Onde  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{12}$  e  $\sigma_{22}$  são as componentes de tensão do tensor tensão considerando o estado plano de tensão e os parâmetros  $r_0$ ,  $r_{45}$  e  $r_{90}$  são conhecidos como coeficientes de Lankford e determinam a anisotropia plástica do material.

Uma das aplicações desse critério envolve componentes em chapa e, portanto, peças em que uma das dimensões é muito inferior quando comparada as outras duas. No caso da chapa, esta dimensão é a espessura.

Neste trabalho, os materiais foram considerados isotrópicos, de modo que  $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$ .

# CAPÍTULO IV

## METODOLOGIA

Neste capítulo será descrita a metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente foi apresentado o procedimento experimental e detalhes do equipamento utilizado. Em seguida, mostrou-se a obtenção do modelo em elementos finitos através do programa STAMPACK® e foi feita a preparação do modelo, como o teste de malha e outros ajustes no programa. São apresentadas ainda as propriedades dos materiais utilizados e a descrição das simulações que foram realizadas.

### 4.1 Procedimento experimental

Os testes experimentais foram realizados em um equipamento de puncionamento instrumentado do LTAD, mostrado na Fig. 4.1. O princípio de funcionamento é a deformação da amostra mediante a uma esfera de metal duro (WC-Co), que é empurrada por uma haste metálica. Essa, por sua vez, está acoplada a uma célula de carga que mede a força aplicada. O deslocamento é medido através de um LVDT e os dados obtidos são armazenados através de um programa de controle.

O equipamento conta ainda com uma matriz superior de aperto e uma matriz inferior de aço 4340 revenido a 280°C, uma base de suporte e outros componentes de fixação e de acoplamento, mostrados na Fig. 4.2. A Figura 4.3 mostra em detalhe a região de ensaio, indicando os principais componentes.

O ensaio inicia-se com a aproximação rápida do punção em relação ao corpo de prova, até que o LVDT toque a superfície de referência. Em seguida, a velocidade é reduzida e o movimento continua até que a haste toque a esfera. O programa de controle começa a gravar os dados do ensaio quando a célula de carga mede uma força de 30 N. Esta célula de carga foi dimensionada para uma força máxima de ensaio de 2 kN, enquanto

o LVDT permite o deslocamento de no máximo 2 mm. Como critério de parada, o ensaio termina quando a força medida cai em 100 N. Os dados são convertidos na curva de resposta de força x deslocamento.

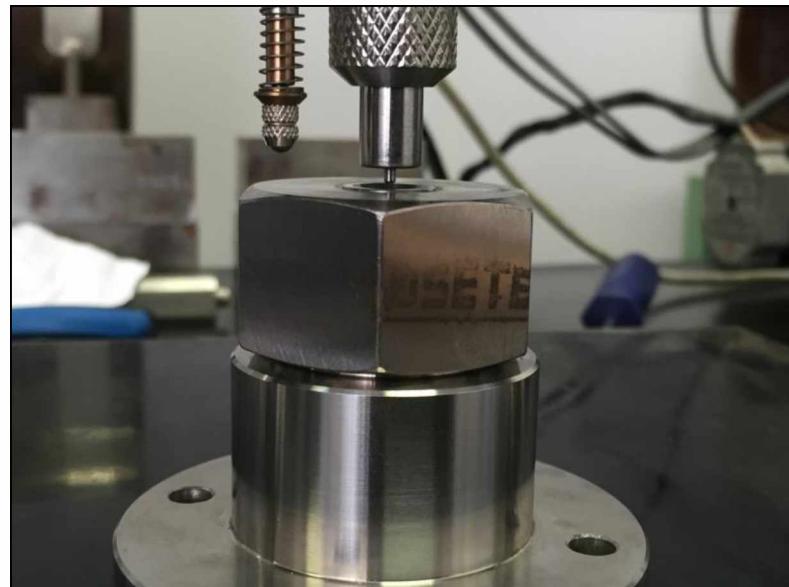


Figura 4.1 – Equipamento utilizado nos testes experimentais.



Figura 4.2 – Componentes do dispositivo de punctionamento.

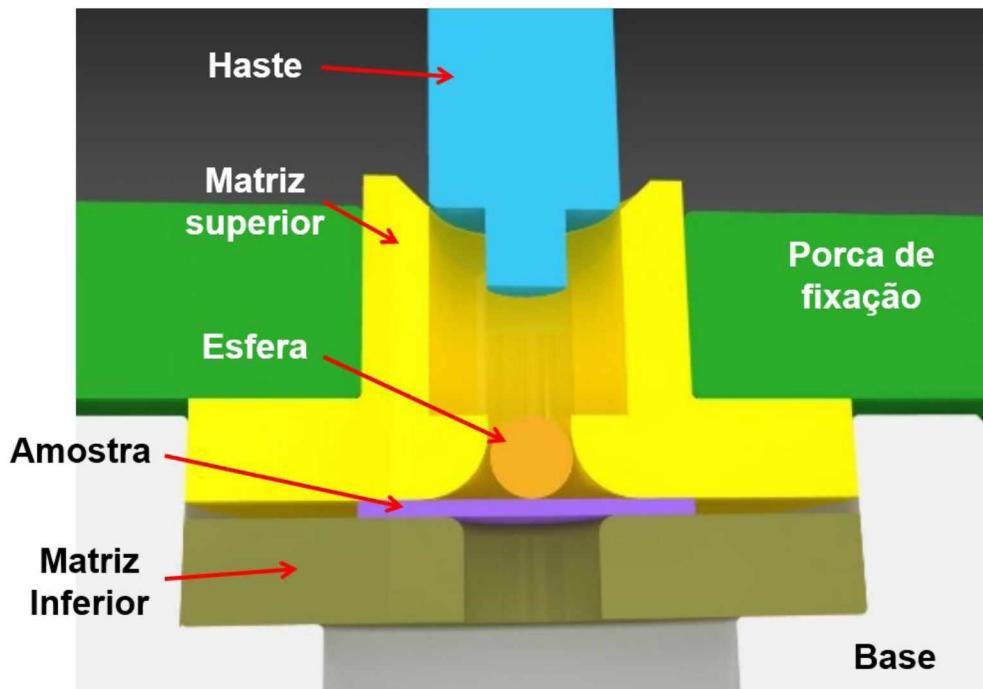


Figura 4.3 – Modelo da região de ensaio.

A Figura 4.4 mostra a interface do programa de supervisão do ensaio, mostrando parâmetros de entrada do ensaio e o gráfico de força por deslocamento.

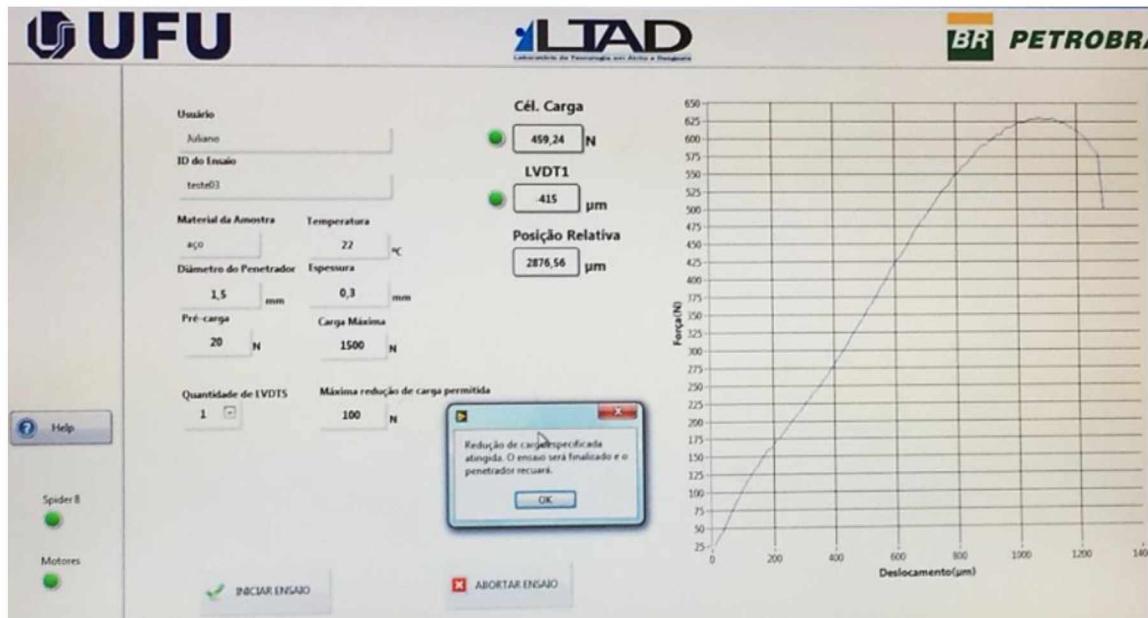


Figura 4.4 – Imagem da tela do programa de aquisição e controle do teste.

Os corpos de prova foram retirados através de uma máquina de eletroerosão a fio. Esse procedimento foi utilizado tanto para a obtenção do diâmetro quanto para a obtenção

das espessuras selecionadas. As dimensões do CP definidas preliminarmente são mostradas na Fig. 4.5.

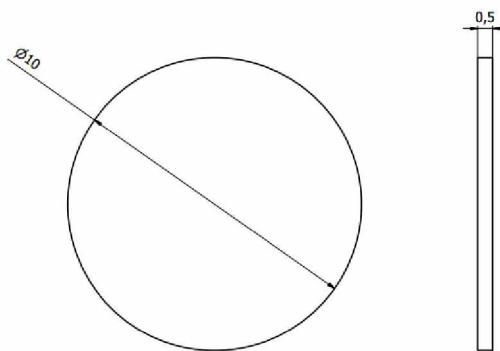


Figura 4.5 – Dimensões do corpo de prova (em milímetros).

Após cortadas, as amostras foram lixadas usando uma lixa de 1200 mesh até que os riscos oriundos do corte desaparecessem. Esse processo foi realizado com o auxílio de um suporte mostrado na Fig. 4.6. Esse dispositivo tem como finalidade facilitar o processo de lixamento, tendo em vista as dimensões do corpo de prova. Esse dispositivo permitiu a obtenção de amostras lixadas com uma espessura homogênea (plano único). A Figura 4.7 mostra o corpo de prova antes e depois do ensaio de punctionamento.



Figura 4.6 – Suporte utilizado no processo de lixamento dos CP's.

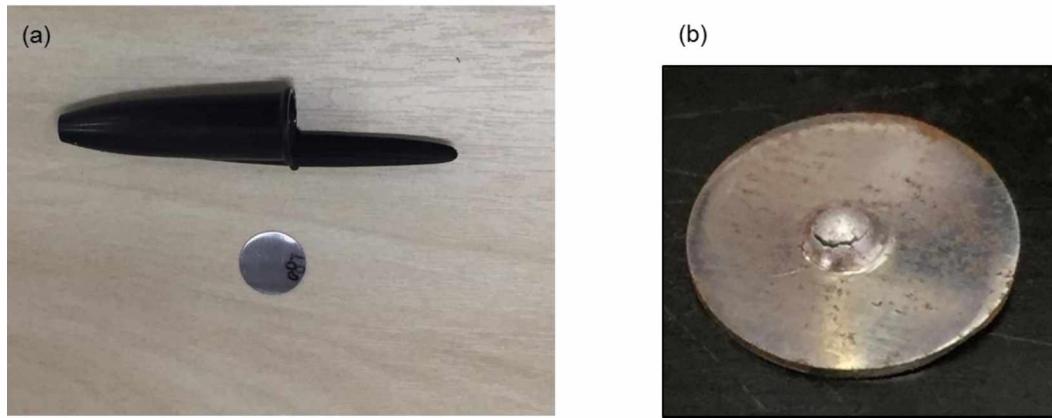


Figura 4.7 – Corpo de prova (a) antes do ensaio. (b) depois do ensaio.

#### 4.2 Obtenção do modelo em elementos finitos

O modelo em elementos finitos foi criado no programa STAMPACK®, que conta com uma interface que permite a criação de geometrias. O modelo foi feito de maneira que melhor representasse o equipamento de ensaio usado nos testes experimentais, mostrado na Fig. 4.1 e esquematizado na Fig. 4.3. As dimensões importantes levadas em conta para os ensaios são as seguintes:

- Diâmetro do punção  $d_p = 1,5 \text{ mm}$ ;
- Diâmetro do furo da matriz inferior  $d_f = 2,4 \text{ mm}$ ;
- Raio de curvatura da matriz inferior  $r_m = 0,3 \text{ mm}$ .

Como mencionado no capítulo anterior, foi utilizado um modelo bidimensional axissimétrico devido à simetria em relação a um eixo. Além disso, o punção e as matrizes foram considerados como não deformáveis, tendo suas geometrias aproximadas por linhas. O modelo conta ainda com o corpo de prova que possui formato de disco circular e espessura uniforme, sendo aproximado por uma superfície retangular quando desenhado no plano de simetria. Para o corpo de prova, as dimensões que devem ser levadas em conta são o diâmetro e a espessura do mesmo.

O modelo obtido no STAMPACK pode ser visto na Figura 4.8. O punção, representado por (1) e as matrizes superior e inferior, representadas por (2) e (4) respectivamente, são as ferramentas consideradas não deformáveis. O corpo de prova é representado por (3).

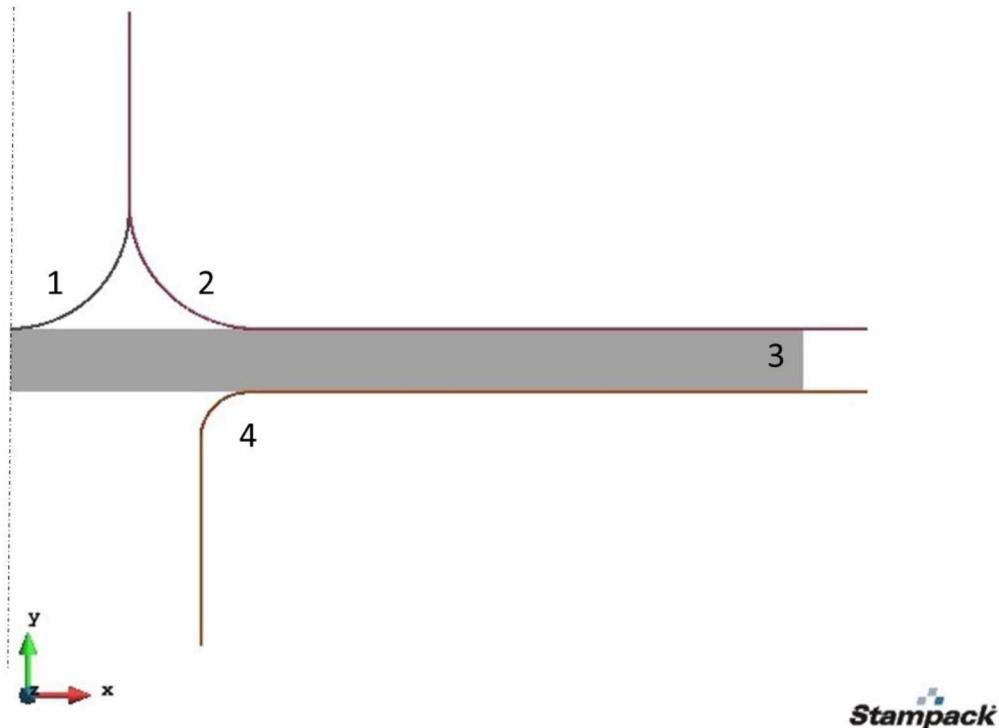


Figura 4.8 – Modelo axissimétrico do equipamento de ensaio obtido no STAMPACK.

#### 4.3 Preparação do modelo em elementos finitos

Uma vez obtidas as geometrias do equipamento e do corpo de prova, foi definido o tipo de problema e impostas as condições de contorno. Como o STAMPACK® é um programa essencialmente de simulações de conformações de chapas, foram selecionadas em sua interface as características de problema de um embutimento, devido às semelhanças com o SPT. Desse modo, as condições de contorno foram atribuídas a cada ferramenta.

O tipo de problema axissimétrico assume simetria ao longo do eixo  $X = 0$ . Assim, tanto o punção quanto o corpo de prova têm seu movimento restrinido na direção horizontal nos pontos de contato com esse eixo. Além disso, todos os nós do punção têm movimento na horizontal restrito, já que seu movimento se dá somente na direção vertical. A matriz inferior tem os movimentos de todos os nós restrinidos, sendo totalmente fixa.

À matriz superior (prensa-chapas) é atribuída uma carga de aperto que será responsável pela fixação do corpo de prova. O valor dessa carga de aperto é um dos objetos de estudo deste trabalho e será discutido posteriormente.

O movimento do punção foi definido tendo como base os primeiros testes experimentais feitos no equipamento mostrado na Fig. 4.1. Assim, foi imposto um

deslocamento de 1,4 mm na direção vertical no sentido do corpo de prova a uma velocidade de 0,01 mm/s.

Com as condições de contorno bem definidas, foi gerada a malha do modelo. Para o corpo de prova foi utilizada malha estruturada com elementos quadrilaterais, enquanto para as ferramentas foi utilizada malha não estruturada. Tendo em vista que o modelo é bidimensional e o deslocamento do punção é imposto na direção vertical, ou no sentido da espessura do corpo de prova, o refinamento da malha foi feito pelo número de elementos na espessura do corpo de prova.

Todas as simulações foram realizadas em um computador *desktop* com processador Intel Core i5, CPU 650, 3,20 GHz, 2 núcleos, 4 processadores lógicos e 8 Gb de memória RAM. Os processos de cálculos das simulações foram todos executados com prioridade Alta.

#### 4.3.1 Teste de convergência da malha

No geral, quanto mais refinada a malha, mais confiáveis tendem a serem os resultados. Porém, ao atingir o chamado ponto de convergência de malha, o refino começa a aumentar o esforço computacional sem que haja melhoria significativa na qualidade dos resultados, podendo inclusive ocasionar a divergência da solução do problema. Para obter esse ponto de convergência foi variado o número de elementos ao longo da espessura do corpo de prova, bem como o tamanho dos elementos das ferramentas proporcionalmente, de modo que os elementos do punção não penetrem os elementos do corpo de prova, causando a instabilidade da solução e a perda do contato.

Foram realizadas seis simulações com o intuito de se obter o ponto de convergência da malha. Para perceber a mudança no resultado, foram comparados o valor máximo da tensão equivalente de Von Mises, a deformação plástica efetiva e a curva de resposta das simulações. Os testes foram feitos inicialmente com uma malha mais grosseira, com 5 elementos ao longo da espessura, e a malha foi sendo refinada até atingir 40 elementos ao longo da espessura, conforme descrito na Tabela 4.1. Para estes testes, foram usados modelos de corpo de prova de 10 mm de diâmetro e 0,400 mm de espessura. Foram usadas as propriedades de um aço ABNT 1010 ( $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_y = 308 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{ut} = 398 \text{ MPa}$ ,  $K = 646 \text{ MPa}$  e  $n = 0,07$ ).

Os resultados das simulações, quanto à tensão equivalente são observados no gráfico da Fig. 4.9. Nota-se que a partir da malha refinada com 20 elementos, o valor da tensão tende a estabilizar. Além disso, foi realizada a análise dos valores da deformação plástica efetiva no momento em que a carga máxima era atingida, para cada simulação. A Figura 4.10 mostra esse comportamento para os Testes 1, 3, 4 e 5.

Tabela 4.1 – Número de elementos ao longo da espessura e total de cada simulação

Simulação	Número de elementos na espessura	Número de elementos total
Teste 1	5	237
Teste 2	8	532
Teste 3	12	1097
Teste 4	20	2828
Teste 5	30	6103
Teste 6	40	10658

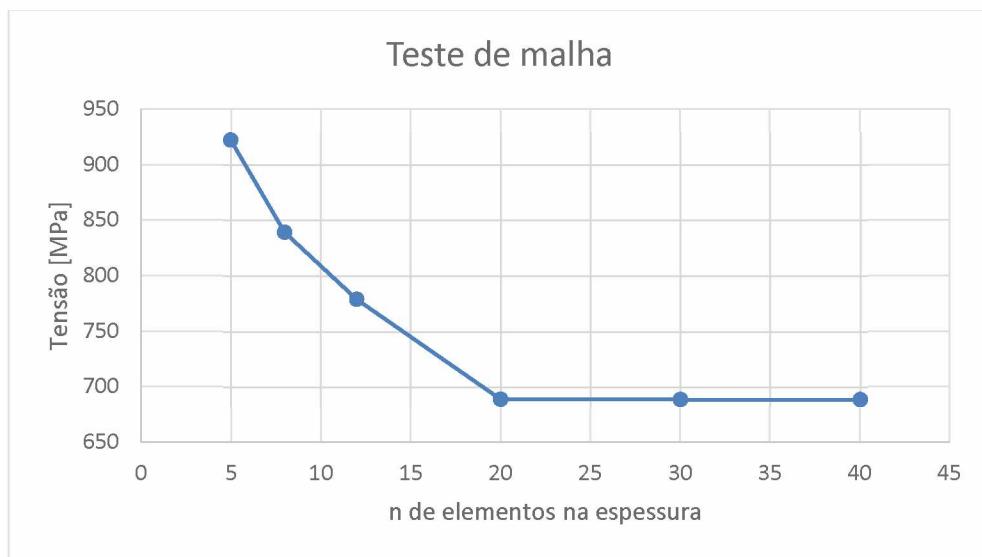


Figura 4.9 – Gráfico de convergência da malha.

Observa-se que o valor da deformação plástica efetiva sofreu pouca alteração entre os Testes 4 e 5, tendo como valor máximo 0,865 e 0,873 respectivamente. As regiões onde esse valor é máximo caracterizam a região onde ocorre a ruptura do corpo de prova no ensaio real. Nos testes 1 e 3, o valor máximo foi de 9,405 e 2,898 respectivamente, estes valores não são reais e indicam que a malha não está adequada. Além dos valores bem diferentes dos obtidos com modelos mais refinados, a região onde ocorre a máxima deformação, também foi diferente. Logo, percebe-se que quando a malha é muito grosseira, o ensaio fica descaracterizado.

Porém, além da análise dos valores da tensão e da deformação, foi analisada também a curva de resposta para cada simulação. A Figura 4.11 mostra a curva de resposta obtida na simulação com refinamento de 20 elementos na espessura, enquanto a Fig. 4.12 mostra a curva de resposta obtida na simulação com refinamento de 30 elementos na espessura.

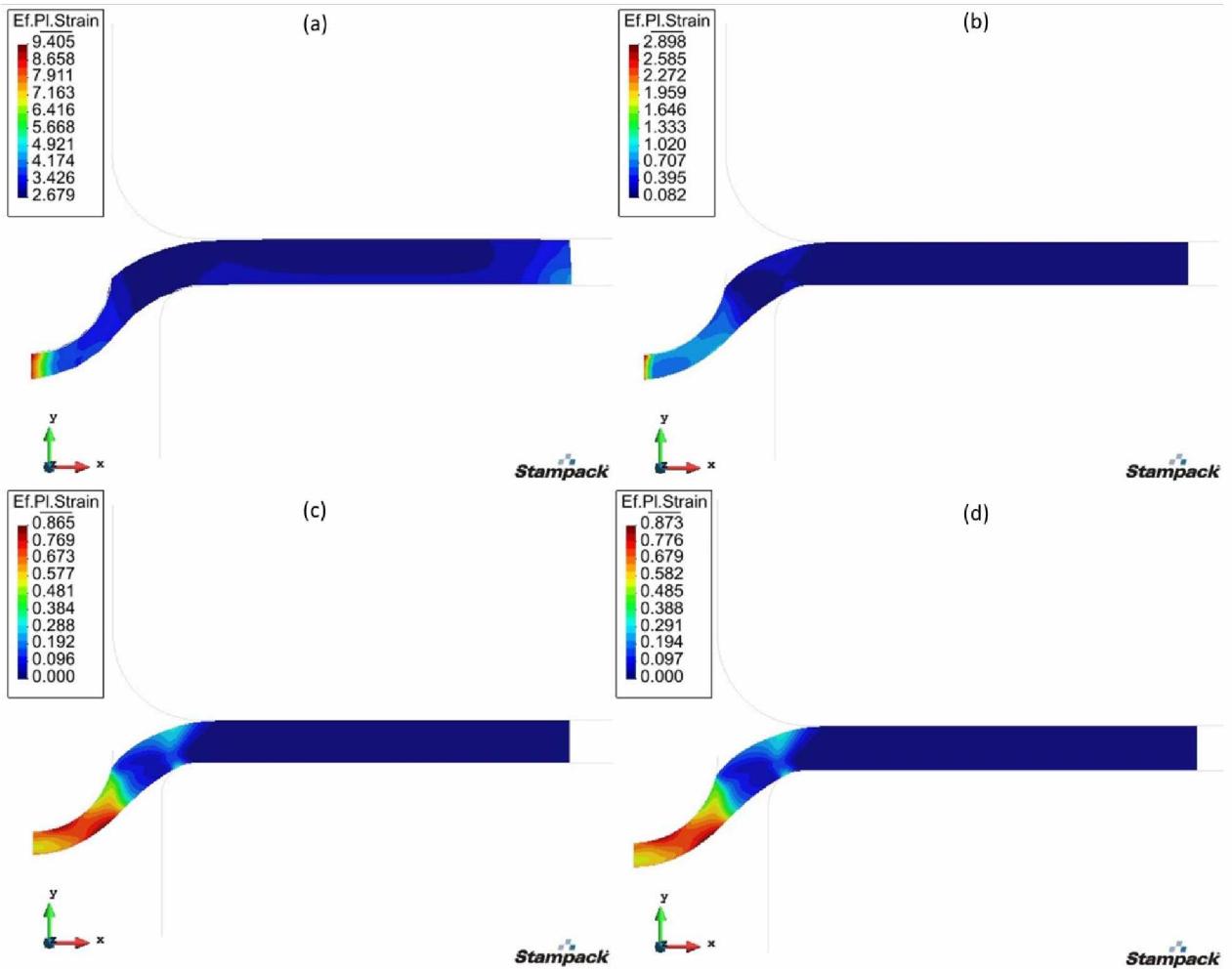


Figura 4.10 – Deformação plástica efetiva considerando (a) 5 elementos; (b) 12 elementos; (c) 20 elementos; (d) 30 elementos na espessura

Pode-se observar que a curva da Fig. 4.12 é mais suave que a curva da Fig. 4.11. Embora os valores de tensão e a deformação plástica efetiva não tenham apresentado mudança significativa para os dois casos, a curva de resposta da simulação com refinamento de 30 elementos na espessura se mostrou mais condizente com o que ocorre nos ensaios reais. Além disso, uma curva mais suave se mostra melhor para a obtenção dos parâmetros relevantes para o cálculo das propriedades mecânicas dos materiais. Desse modo, optou-se por utilizar uma malha com refinamento de 30 elementos na espessura. Para uma malha com refinamento maior, os resultados não mostram alterações significantes e o esforço computacional aumenta consideravelmente. A malha do modelo a ser usado em todas as simulações é mostrada na Fig. 4.13.

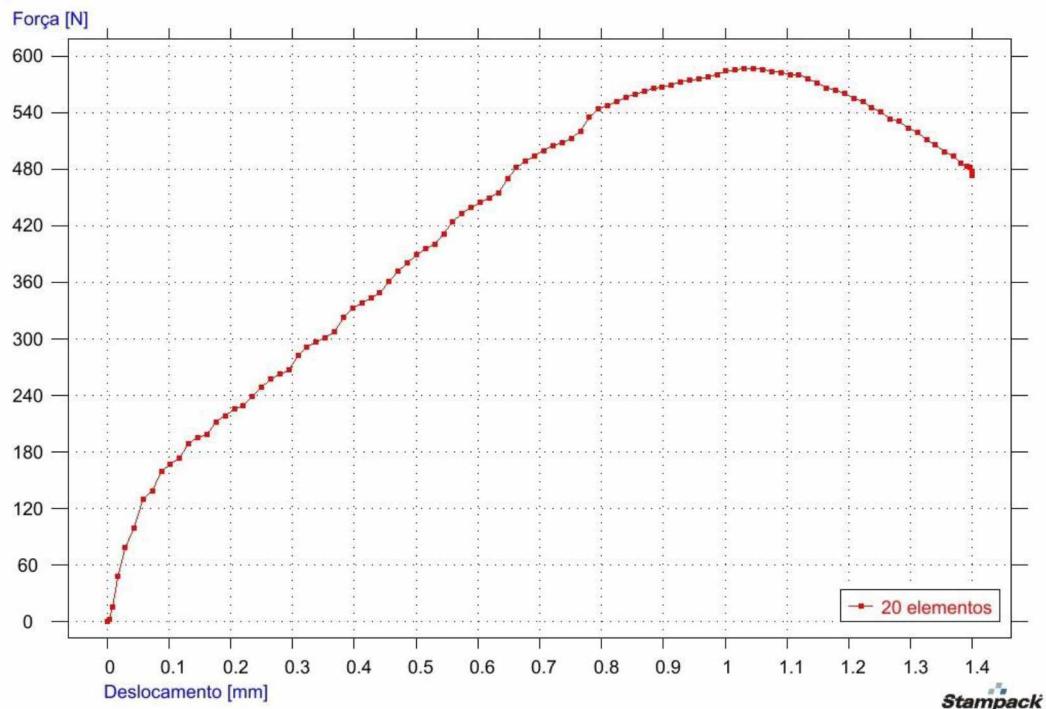


Figura 4.11 – Curva de resposta da simulação considerando 20 elementos na espessura.

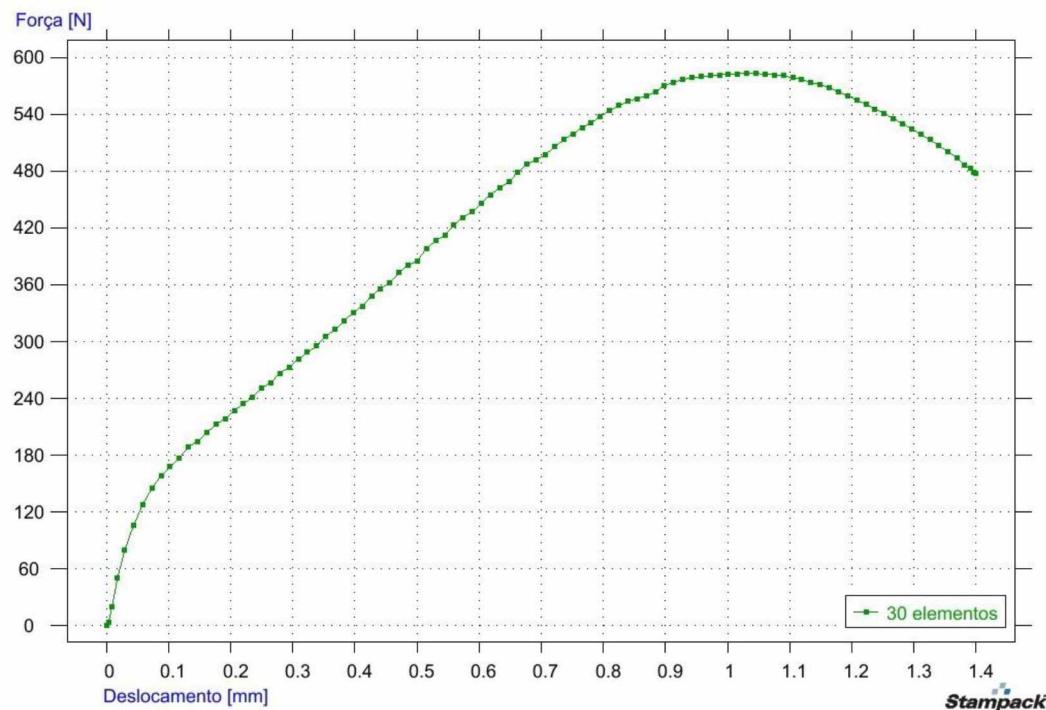


Figura 4.12 – Curva de resposta da simulação considerando 30 elementos na espessura.

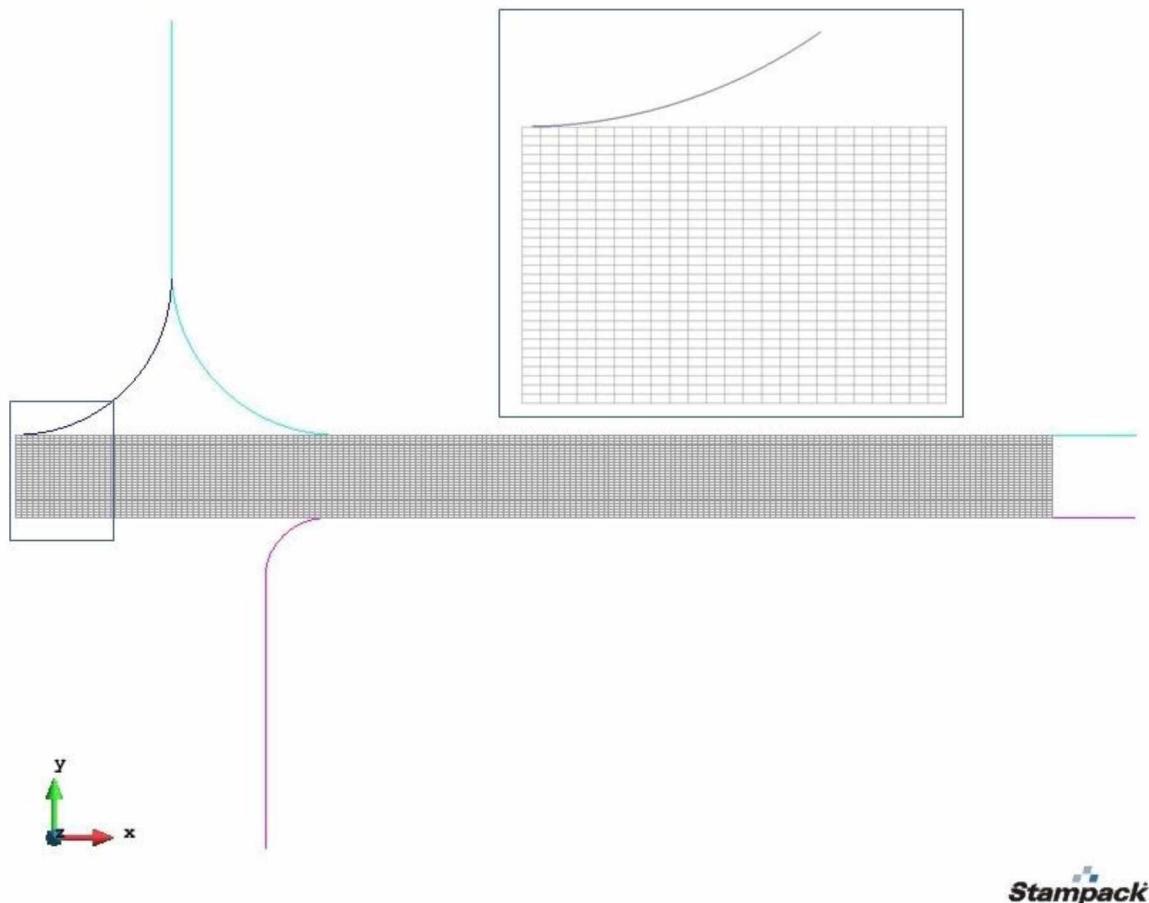


Figura 4.13 – Malha de elementos finitos utilizada com detalhe ampliado.

#### 4.3.2 Escala geométrica

Os ajustes de construção do modelo bem como o ajuste da malha foram feitos com o modelo em tamanho real. Porém, devido às pequenas dimensões dos componentes, alguns elementos da malha estariam em uma escala micrométrica, o que eleva bastante o esforço computacional.

O MEF permite que se façam simplificações e que se aplique ao modelo um fator de escala, reduzindo exponencialmente o esforço computacional necessário sem que com isso existam perdas na qualidade dos resultados obtidos. Este fator de escala se torna interessante, uma vez que o cálculo do passo de tempo, que garante a convergência da solução explícita, é baseado no tamanho do menor elemento da malha. (FELICE NETO, 2012)

Silva (2016) estudou o uso da escala geométrica nas simulações de processos de estampagem, e observou uma redução significativa no tempo total de processamento sem prejuízo na qualidade dos resultados. Ele observou ainda que modelos em escala podem ser usados também na simulação de problemas elasto-plásticos e em processos quase-estáticos com elevado grau de não linearidade.

No modelo deste trabalho foi utilizado um fator de escala  $10^2$ , uma vez que a espessura do corpo de prova e o raio do punção são da ordem de micrometros. A Figura 4.14 mostra a comparação do resultado da simulação em escala real com a simulação em escala  $10^2$ . As duas curvas se encontram na mesma escala (real). Para que isso ocorra, os parâmetros do modelo ampliado são divididos da seguinte maneira: o deslocamento é dividido pelo fator de escala ( $10^2$ ), uma vez que esse fator foi aplicado diretamente na geometria; a força é dividida pelo fator de escala ao quadrado ( $10^4$ ), já que os resultados de tensões dependem da propriedade do material e da deformação (adimensional) e tem unidade de força por área (dimensão de comprimento ao quadrado).

O uso da escala geométrica possibilitou um melhor refinamento, uma vez que houve um ganho de tempo sem prejuízo da qualidade dos resultados. As simulações cujas curvas de resposta são apresentadas na Fig. 4.14 foram feitas usando uma malha com 20 elementos na espessura. Enquanto a simulação do modelo em escala real demorou 170 minutos, a do modelo em escala ampliada demorou 32 minutos. Ao refinar para 30 elementos na espessura, utilizando escala, a simulação demorou 71 minutos, mostrando um ganho em tempo e em qualidade quando comparado ao modelo em escala real.

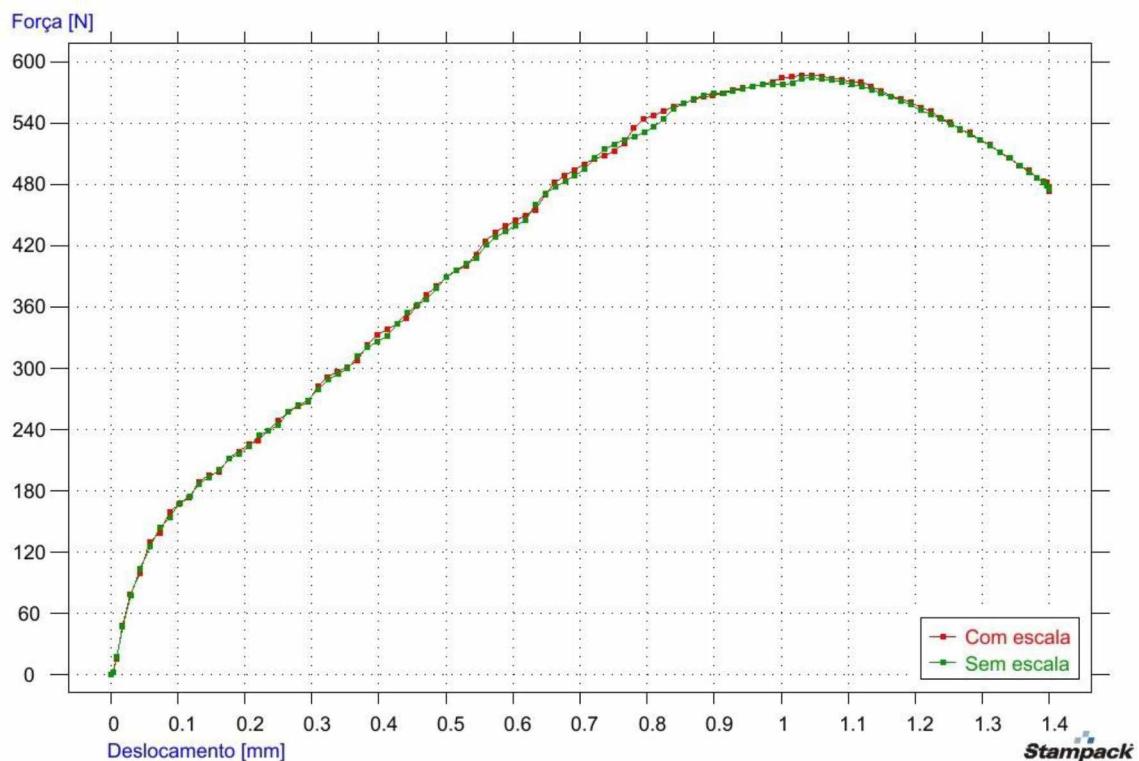


Figura 4.14 – Comparação das curvas de resposta das simulações com e sem escala geométrica.

#### 4.4 Planejamento das simulações e materiais utilizados

As primeiras simulações foram realizadas com o objetivo de validar o modelo com os experimentos realizados no equipamento mostrado na Fig. 4.1. Para essa validação foram ensaiados corpos de prova de aço 1010 com 10 mm de diâmetro e 0,400 mm de espessura. As propriedades do aço 1010 são mostradas na Tabela 4.2. Porém, as curvas de resposta dos resultados experimentais apresentaram comportamento não condizente com o esperado, de acordo com a literatura. Em uma inspeção mais detalhada dos dispositivos do equipamento de testes, constatou-se que a matriz inferior estava com o raio de curvatura inadequado. Resultados desse comportamento são apresentados no Capítulo V.

Posteriormente, com o ajuste da matriz inferior, foram feitos mais ensaios experimentais utilizando materiais caracterizados no trabalho de Nicolosi (2015), cujas características são mostradas na Tabela 4.2. Foram realizadas simulações para todos os materiais ensaiados para a validação do modelo e para a obtenção do coeficiente de correção da complacência da máquina.

A complacência foi estimada de acordo com o método proposto por Campitelli et al. (2004), de modo que a curva experimental foi corrigida utilizando uma equação linear. Essa correção é mostrada na seção 5.1.

Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais utilizados nos ensaios e nas simulações (NICOLOSI, 2015)

Material	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Limite de escoamento $\sigma_y$ [MPa]	Limite de resistência a tração $\sigma_{ut}$ [MPa]	Coeficiente de encruamento n	Coeficiente de Resistência K [MPa]
Aço 1010	210	308	398	0,070	646
Material D	210	586	699	0,075	1042
Material E	210	736	823	0,053	1197
Material F	210	779	874	0,056	1274
Material G	210	896	954	0,034	1361
Aço L80	202	514	621	0,075	813
Aço P110	205	857	929	0,056	1154

Os materiais denominados "D" a "G" (Tab. 4.2) são aços que têm aplicação estrutural e na fabricação de tubos para a indústria de óleo e gás, usados em dutos, revestimentos de

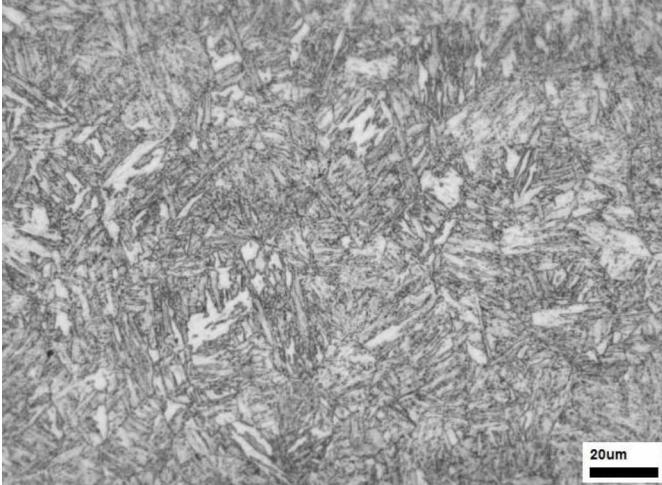
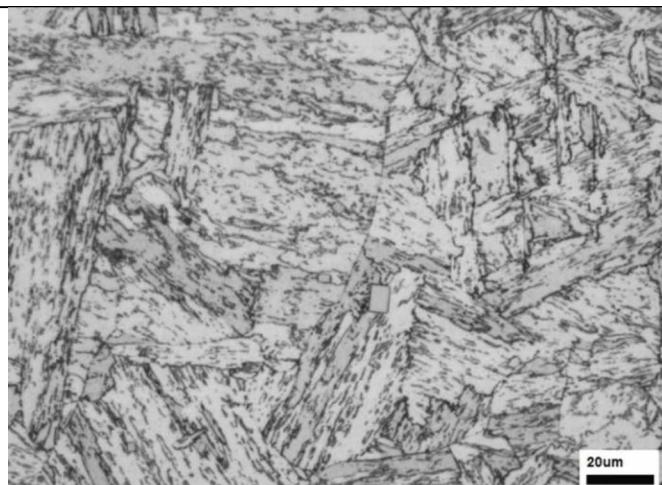
poços e colunas de produção. Eles possuem propriedades mecânicas, microestruturas e composições químicas distintas (NICOLOSI, 2015).

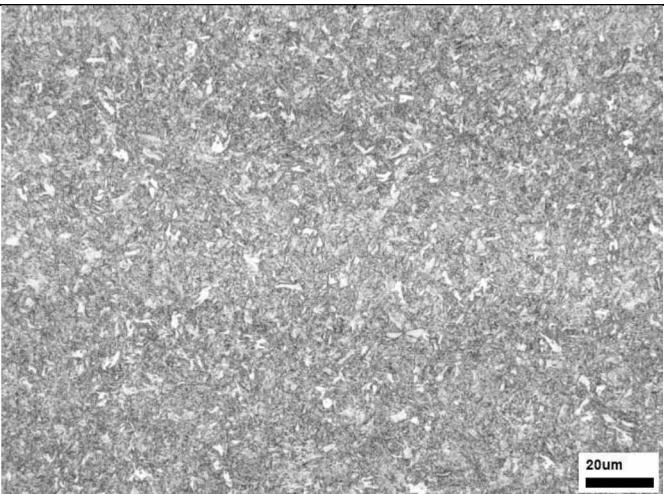
As composições químicas desses materiais são mostradas na Tab. 4.3 e as microestruturas na Tab. 4.4.

Tabela 4.3 – Composições químicas dos aços "D" a "G" (% em peso) (NICOLOSI, 2015)

Aço	C	S	P	Mn	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	V	Ti	Nb	W
D	0,268	0,010	0,013	1,088	0,240	-	0,346	0,007	0,030	0,026	0,004	0,030	0,006	0,017
E	0,004	-	0,021	0,477	0,324	0,060	11,900	6,670	2,056	0,005	0,047	0,157	0,024	0,155
F	0,335	0,017	0,015	0,445	0,329	0,014	0,943	0,020	0,865	0,027	0,053	0,017	0,033	0,023
G	0,375	0,011	0,016	0,376	0,375	0,044	0,999	0,017	1,300	0,024	0,068	0,004	0,085	0,029

Tabela 4.4 – Microestruturas dos aços "D" a "G" (NICOLOSI, 2015)

Aço	Fotomicrografia	Microestrutura
D	 <p>Ataque químico: Nital 6% - 10 segundos.</p>	Matriz predominantemente martensítica com a presença de grãos de ferrita dispersos.
E	 <p>Ataque químico: Vilela – 60 segundos.</p>	Matriz predominantemente martensítica com a presença de plaquetas de austenita retida distribuídas entre as ripas de martensita

F		Matriz predominantemente martensítica com a presença de grãos de ferrita dispersos. Ataque químico: Nital 6% - 5 segundos.
G		Matriz predominantemente martensítica com a presença de grãos de ferrita dispersos. Ataque químico: Nital 6% - 3 segundos.

Os aços L80 e P110 também apresentam amplo uso na fabricação de tubos para a indústria de óleo e gás. As composições químicas dos aços L80 e P110 são apresentadas nas Tab. 4.5 e Tab. 4.6 respectivamente, enquanto as fotomicrografias dos dois são mostradas nas Fig. 4.15 e Fig. 4.16.

Tabela 4.5 – Composição química do aço L80 (% em peso) (NICOLOSI, 2015)

C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Al	V	Ti	Nb	Co
0,266	0,015	0,010	1,077	0,231	0,307	0,055	0,022	0,003	0,022	0,001	0,006

Tabela 4.6 – Composição química do aço P110 (% em peso) (NICOLOSI, 2015)

C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Al	V	Ti	Co
0,248	0,007	0,010	1,053	0,225	0,326	0,052	0,023	0,003	0,027	0,003

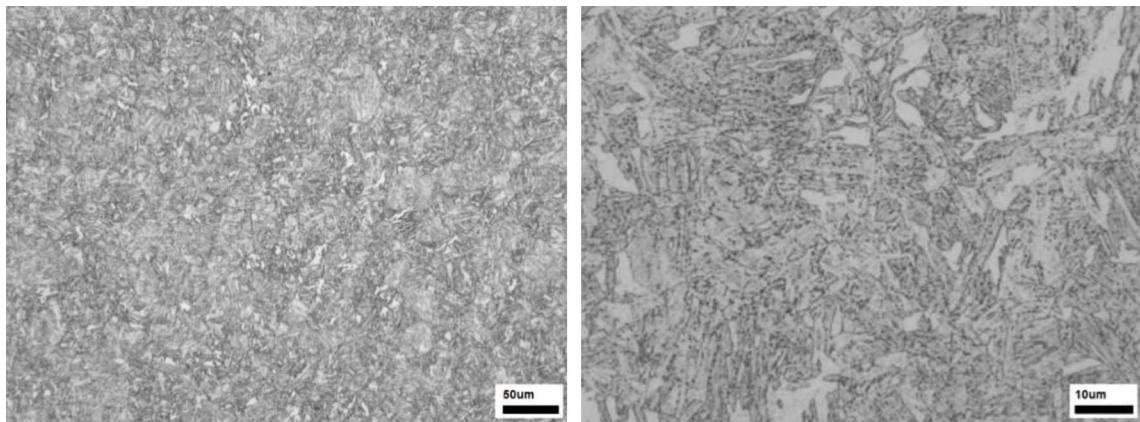


Figura 4.15 – Fotomicrografias do aço L80 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos). (NICOLOSI, 2015).

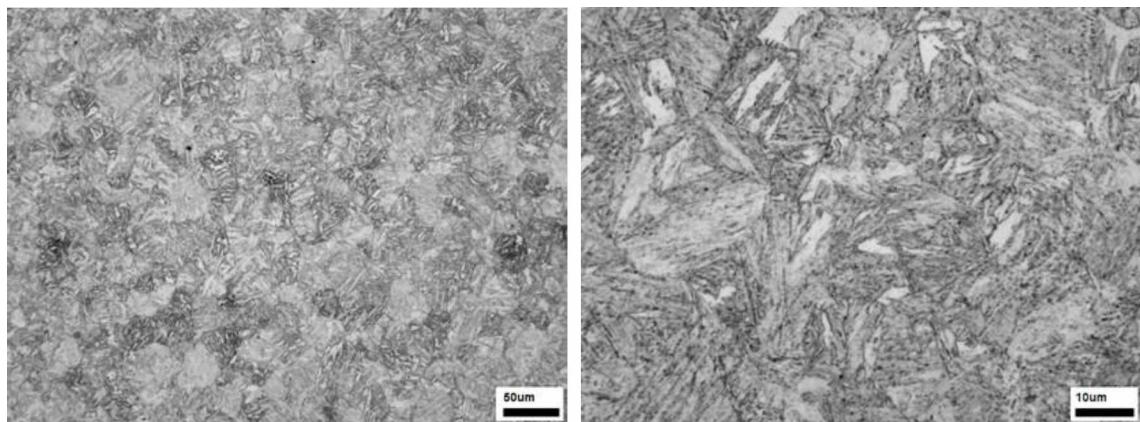


Figura 4.16 – Fotomicrografias do aço P110 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos). (NICOLOSI, 2015).

Com o modelo validado, foi possível realizar a variação dos parâmetros cujas influências foram estudadas neste trabalho. Uma das vantagens do MEF é a possibilidade de se controlar os parâmetros de entrada das simulações, tornando possível a variação de apenas um parâmetro, para analisar sua influência. A variação dos parâmetros ocorreu de acordo com os planejamentos mostrados nas Tab. 4.7, Tab. 4.8 e Tab. 4.9, sendo os parâmetros avaliados neste trabalho a carga de aperto, a espessura do corpo de prova e o atrito.

A carga de aperto foi testada inicialmente, pois esse valor não foi obtido experimentalmente. Ao encontrar o melhor valor de carga de aperto, o mesmo foi usado ao longo das simulações seguintes.

A variação da espessura foi feita para os materiais L80 e P110. Os valores intermediários, 0,370 mm e 0,375 mm, respectivamente, foram considerados uma vez que esses foram os valores medidos no experimento e usados na validação.

Tabela 4.7 – Variação da carga de aperto

Simulação	Material	Espessura [mm]	Atrito	Carga de Aperto [kN]
1	Aço 1010	0,400	0,1	1
2	Aço 1010	0,400	0,1	2
3	Aço 1010	0,400	0,1	3
4	Aço 1010	0,400	0,1	5

Tabela 4.8 – Variação da espessura

Simulação	Material	Espessura [mm]	Atrito	Carga de aperto [kN]
1	L80	0,250	0,1	2
2	L80	0,350	0,1	2
3	L80	0,370	0,1	2
4	L80	0,450	0,1	2
5	L80	0,500	0,1	2
6	P110	0,250	0,1	2
7	P110	0,350	0,1	2
8	P110	0,375	0,1	2
9	P110	0,450	0,1	2
10	P110	0,500	0,1	2

A variação do atrito foi feita para os materiais L80 e P110. Foram usadas as espessuras dos testes experimentais e o coeficiente de atrito foi variado de 0,1 a 0,7.

Tabela 4.9 – Variação do atrito

Simulação	Material	Espessura [mm]	Atrito	Carga de aperto [kN]
1	L80	0,370	0,1	2
2	L80	0,370	0,3	2
3	L80	0,370	0,5	2
4	L80	0,370	0,7	2
5	P110	0,375	0,1	2
6	P110	0,375	0,3	2
7	P110	0,375	0,5	2
8	P110	0,375	0,7	2

Ao final do trabalho, foram obtidas as expressões que melhor calculavam as propriedades limite de escoamento e limite de resistência. O limite de escoamento foi expresso de acordo com a Eq. (2.3), sendo  $P_y$  obtido pelo método de Rodríguez et al. (2009). Já o limite de resistência foi expresso inicialmente de acordo com a Eq. (2.4). Em seguida, foram testados os métodos propostos por Lacalle et al. (2008) e por Hurst e Matocha (2012), descritos nas Eq. (2.5) e Eq. (2.6) respectivamente.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostra os resultados obtidos nas simulações juntamente com as discussões dos mesmos. Inicialmente é mostrada a validação do modelo obtido pelo método experimental. Em seguida, foram feitas algumas variações de parâmetros para estudar seus efeitos nos resultados do SPT, mostrando a viabilidade do uso do MEF no estudo deste problema. Os parâmetros variados foram os seguintes: carga de aperto, espessura do corpo de prova e coeficiente de atrito.

### 5.1 Validação do modelo em MEF e avaliação da complacência

As primeiras simulações realizadas foram feitas com o objetivo de validar o modelo ao comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais. Foram ensaiados três corpos de prova de aço 1010 com 10 mm de diâmetro e 0,400 mm de espessura no equipamento mostrado na Fig. 4.1. As curvas de resposta obtidas são mostradas na Fig. 5.1. A curva de resposta da simulação também está mostrada na Fig. 5.1.

É possível notar um desvio entre a curva da simulação e as curvas experimentais. Isso ocorre devido ao efeito de complacência do equipamento que será descrito posteriormente. O problema observado foi o comportamento das curvas experimentais na transição entre a fase elástica e o início da plástica, conforme destacado na Fig. 5.2. Nota-se que há uma região onde está ocorrendo deslocamento praticamente sem o aumento de força, antes da força voltar a crescer. Esse efeito não é observado na curva da simulação e nem esperado de acordo com a literatura.

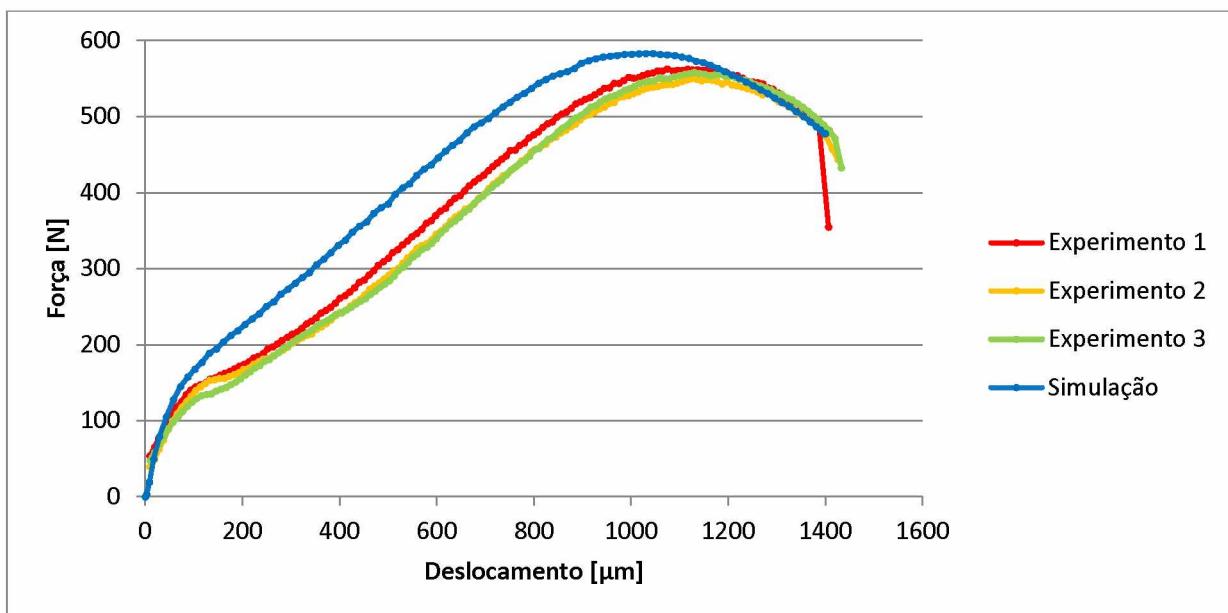


Figura 5.1 – Comparaçāo das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço 1010.

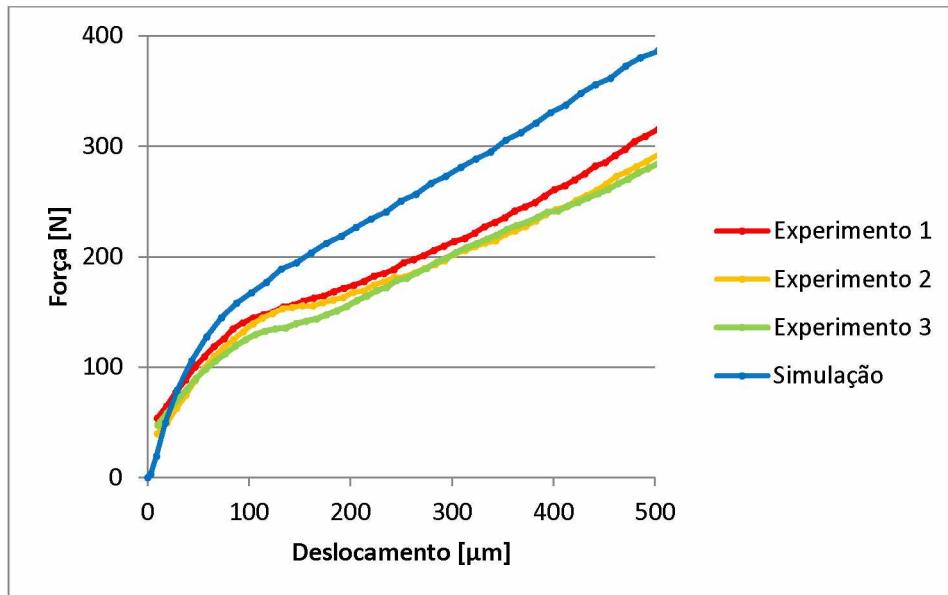


Figura 5.2 – Destaque das curvas na transição entre a fase elástica e plástica.

Ao investigar a possível causa do problema, foi notado que a matriz inferior não possuía um raio de curvatura bem definido. Esse perfil, medido em um interferômetro, pode ser visto na Fig. 5.3. Observa-se que, próximo ao raio de curvatura, a superfície superior apresenta um declive, conforme destacado na figura. Esse declive, possivelmente, poderia estar causando uma perda de contato entre o corpo de prova e a matriz nessa região, o que explicaria o comportamento das curvas de resposta obtidas nos experimentos.

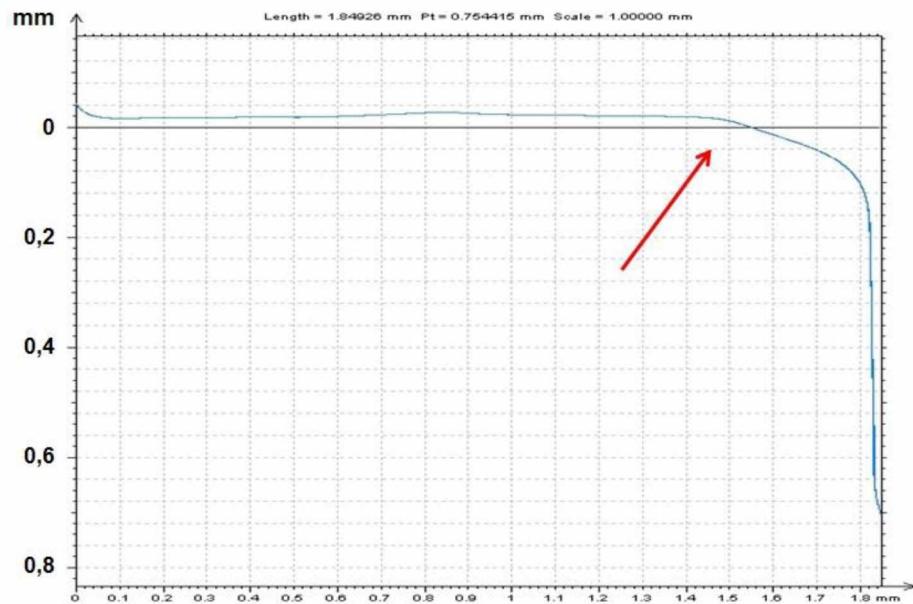


Figura 5.3 – Perfil da matriz inferior medido em um interferômetro.

Embora ainda não fosse possível validar o modelo, nesta etapa do trabalho foi realizado o teste de convergência da malha, descrito na seção 4.3.1 e a análise da variação da carga de aperto, mostrada na seção 5.2.

Após o ajuste da matriz, foram realizados ensaios com os materiais mostrados na Tab. 4.2. Para a validação do modelo, foram realizadas simulações com os aços L80 e P110. Para o aço L80, foram usados corpos de prova de 0,370 mm enquanto para o aço P110 foram usados corpos de prova de 0,375 mm. A comparação entre as curvas de resposta experimentais e da simulação é mostrada nas Fig. 5.4 e Fig. 5.5.

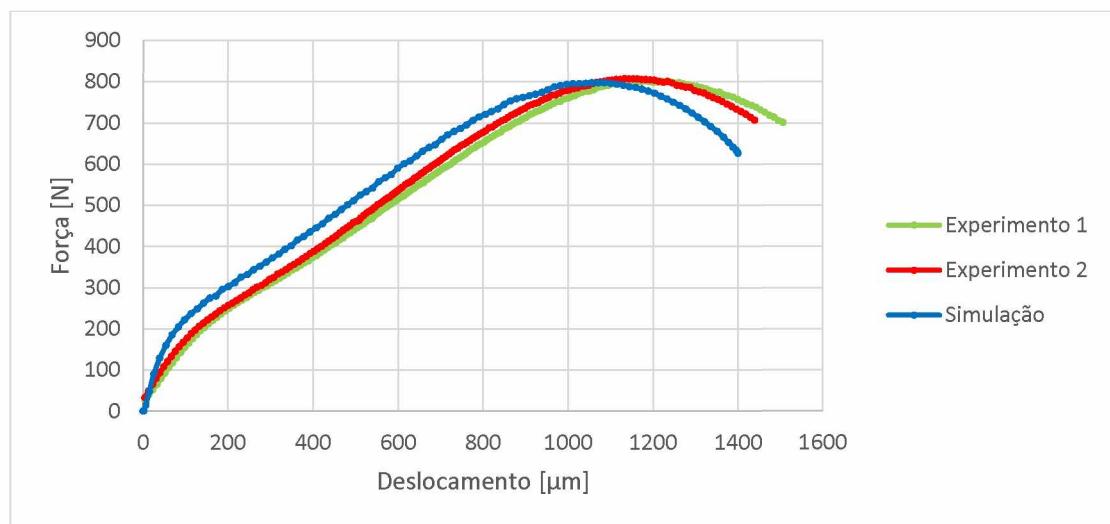


Figura 5.4 – Comparaçāo das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço L80.

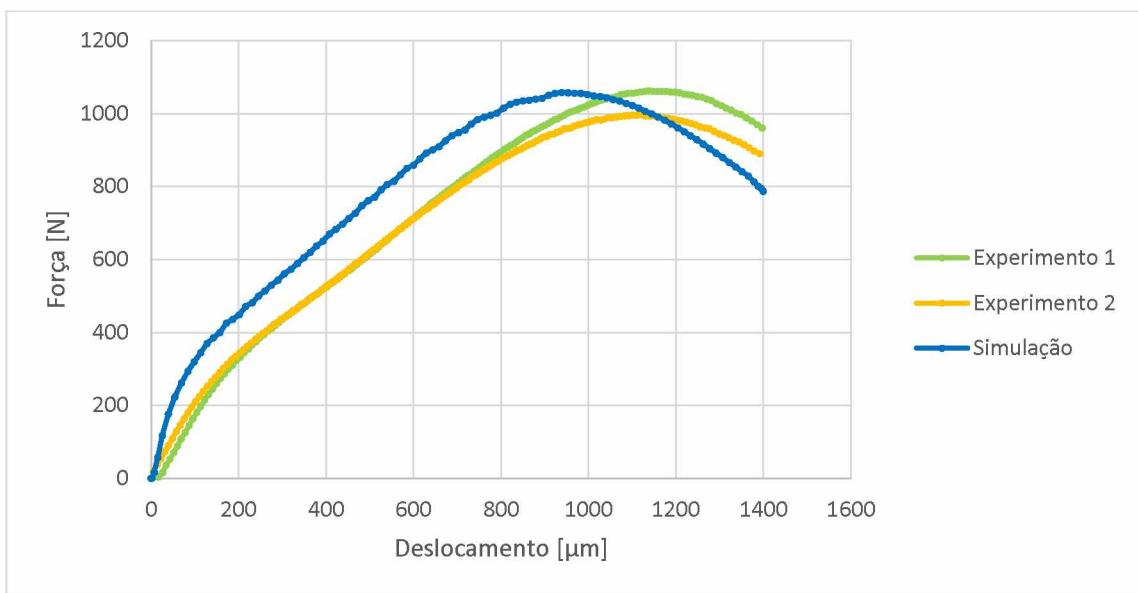


Figura 5.5 – Comparação das curvas de resposta obtidas no experimento e na simulação para o aço P110.

Observa-se que os gráficos experimentais não apresentam mais o efeito observado na Figura 5.2 devido à imperfeição da matriz. Porém, a curva de resposta da simulação continua à esquerda das curvas experimentais. Observa-se ainda que as cargas máximas das curvas experimentais e da simulação são semelhantes, o que levou a perceber que poderia se tratar do efeito de complacência do equipamento.

As ferramentas utilizadas nas simulações foram consideradas perfeitamente rígidas, ou não deformáveis. Na prática isso não ocorre, de modo que as deformações nas ferramentas, mesmo que pequenas afetam na medição da deflexão do corpo de prova, uma vez que o deslocamento medido pelo LVDT é a soma do deslocamento do punção e da deformação do equipamento. De forma a evitar esse efeito, o melhor seria medir diretamente a deflexão do corpo de prova, que para o caso do SPT se torna difícil devido às pequenas dimensões.

Alguns estudos recentes (BRUCHHAUSEN et al., 2016; MORENO; BERTOLINO; YAWN, 2016) utilizaram hastes ligadas ao lado inferior do corpo de prova que transferiam a deflexão da amostra ao LVDT. Moreno, Bertolino e Yawn (2016) compararam os resultados àqueles medidos diretamente pelo deslocamento do punção e perceberam que não ocorria a complacência, uma vez que a força aplicada na haste era muito pequena.

Outros estudos (CAMPITELLI et al., 2004; RASCHE; KUNA, 2015) propuseram métodos lineares e parabólicos de correção para a complacência. Neste trabalho foi utilizado o método linear sugerido por Campitelli et al. (2004), no qual a curva de resposta experimental é corrigida levando em conta que o deslocamento medido ( $d_{med}$ ) é a soma da

deflexão do corpo de prova ( $d_{cp}$ ) e do deslocamento elástico do equipamento ( $d_e$ ). Assim, a correção pode ser dada de acordo com a Eq. (5.1):

$$d_{cp} = d_{med} - d_e = d_{med} - P \cdot C_e \quad (5.1)$$

Onde  $P$  é a força em  $N$  e  $C_e$  é a complacência do equipamento em  $\mu m/N$ .

Para encontrar o valor de  $C_e$ , foram escolhidos alguns valores de força de maneira aleatória, e anotados os valores dos deslocamentos correspondentes do experimento e da simulação. Esses valores de força foram escolhidos de forma a caracterizar a curva até o ponto de carga máxima. Com esses valores, foi obtida uma curva com a diferença entre os deslocamentos do experimento e da simulação nas ordenadas e os valores dos deslocamentos da simulação nas abscissas, conforme mostrado na Fig. 5.6, que ilustra a curva obtida quando feito o procedimento para o aço P110. O valor da complacência é o coeficiente angular da reta obtida.

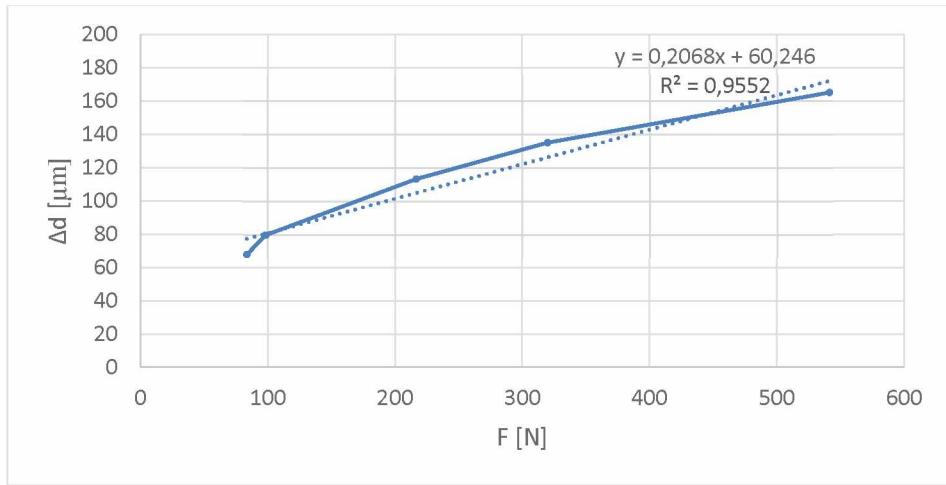


Figura 5.6 – Gráfico de obtenção da complacência para o aço P110.

Esse procedimento foi realizado também para o aço L80 e para os materiais D a G de modo a obter um valor médio para a complacência e utilizá-lo na correção do efeito para todas as curvas. O valor médio obtido foi de  $C_e = 0,22 \mu m/N$ . Desse modo, os deslocamentos das curvas experimentais foram corrigidos de acordo com a Eq. (5.1). As curvas corrigidas são mostradas na Fig. 5.7 e Fig. 5.8 para os aços L80 e P110 respectivamente, e na Fig. 5.8 para os materiais D a G.

Observa-se que a parte inicial da curva apresenta desvios pequenos, mostrando que a caracterização dos materiais na simulação e a correção da complacência foram muito eficientes. Já a parte próxima à carga máxima apresenta desvios maiores, uma vez que se

trata de uma região de alta instabilidade, além de sofrer influência do atrito, que é um parâmetro difícil de ser controlado no experimento.

Porém, pode-se afirmar que as curvas de resposta da simulação apresentaram boa concordância com as curvas experimentais para os diversos materiais, mostrando que o modelo em elementos finitos utilizado neste trabalho está apto a representar o problema proposto.

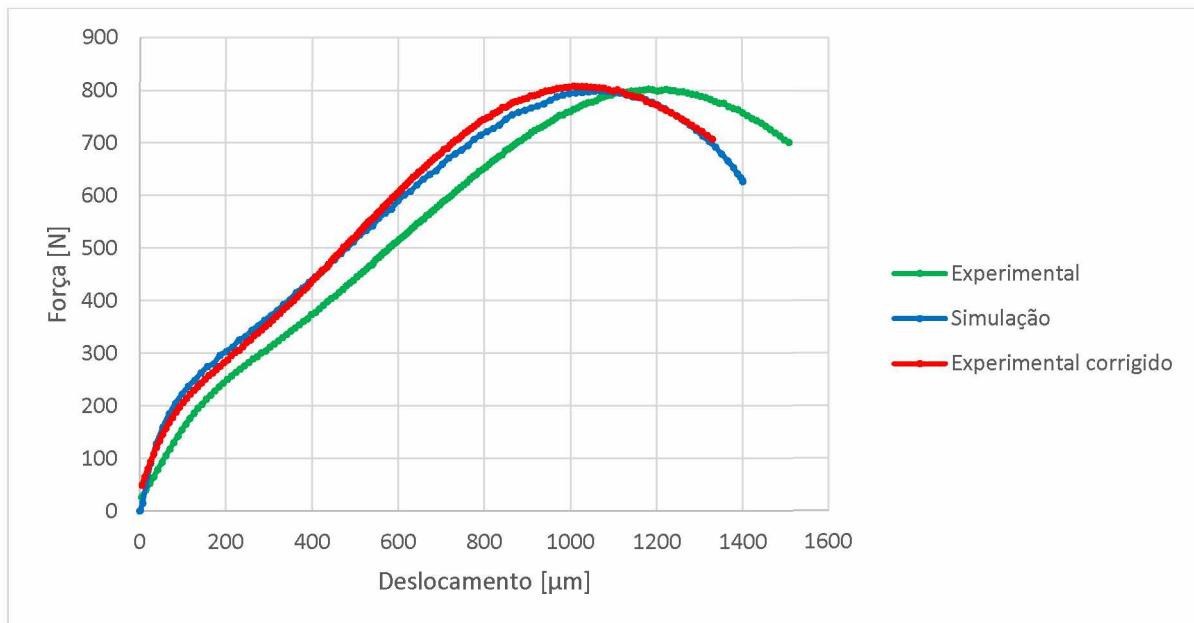


Figura 5.7 – Efeito da correção da complacência para o aço L80.

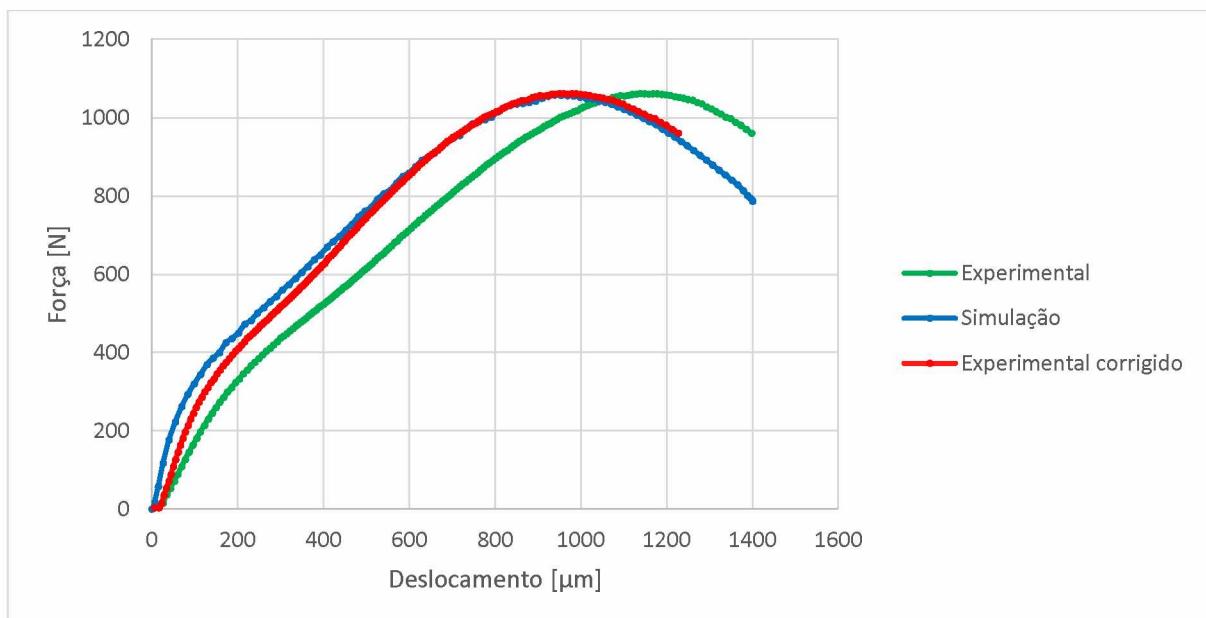


Figura 5.8 – Efeito da correção da complacência para o aço P110.

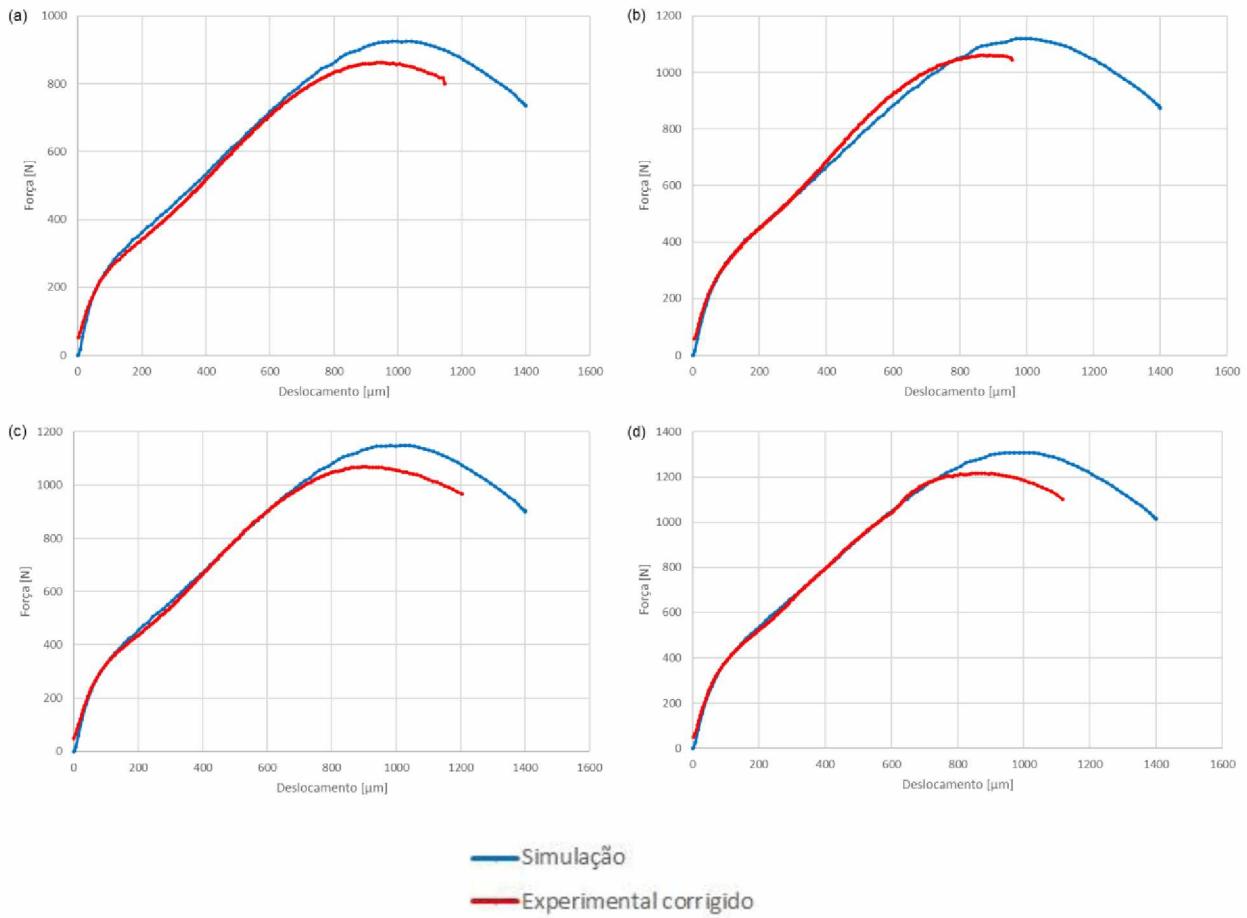


Figura 5.9 – Gráficos comparativos das curvas obtidas na simulação e no experimento, já corrigida a complacência para os materiais (a) D. (b) E. (c) F. (d) G.

## 5.2 Variação da carga de aperto

Um dos parâmetros de entrada necessários do STAMPACK® é a força do prensa-chapas, equivalente no SPT à carga de aperto da matriz superior. Essa variável não era conhecida no experimento, que utilizava um aperto de modo a não deixar o corpo de prova livre para movimentar horizontalmente.

Como padrão, o programa entra com o valor de 1 tonelada-força (10 kN), valor este que estava levando a simulação à divergência. Desse modo, variou-se esse parâmetro para avaliar sua influência na curva de resposta da simulação numa faixa de valores que não levava a simulação a divergir. As curvas de resposta obtidas são mostradas na Fig. 5.10.

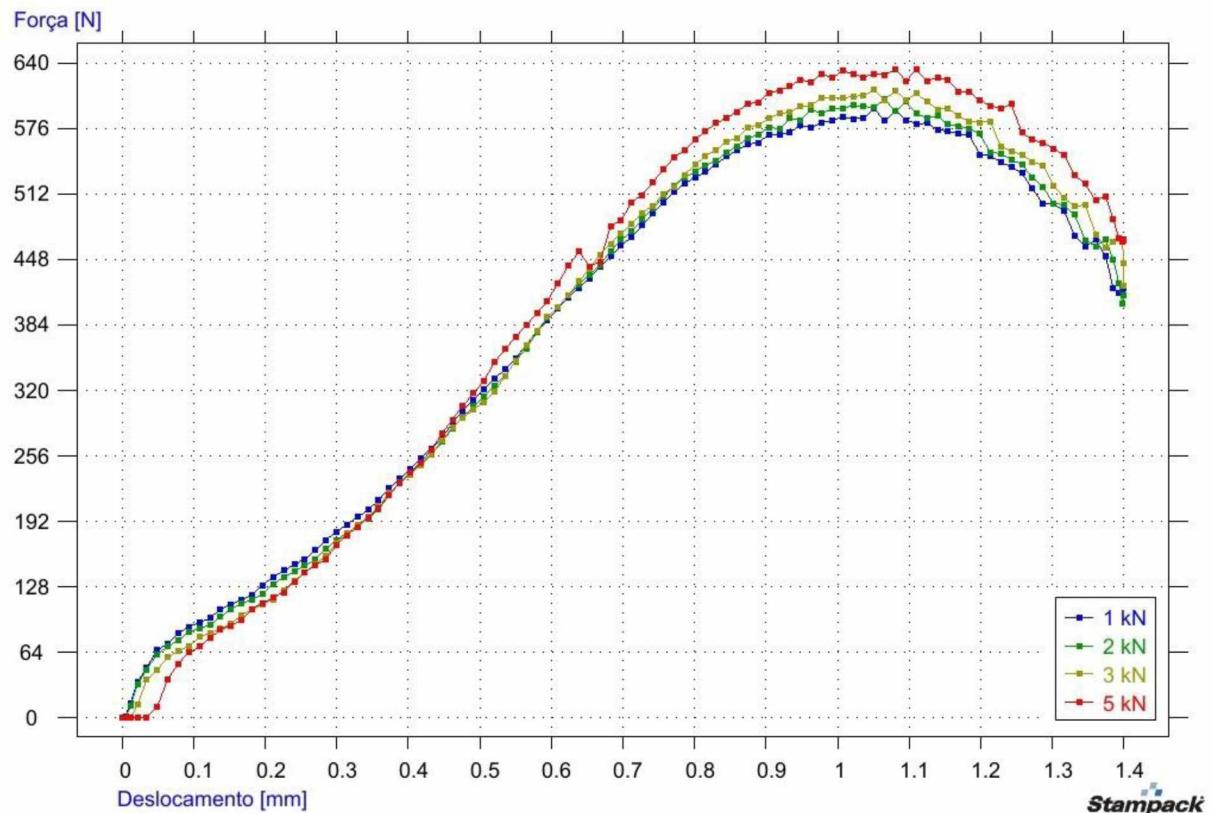


Figura 5.10 – Comparaçāo dos resultados obtidos nas simulações variando a carga de aperto.

É possível notar que para a carga de 5 kN, o gráfico se distanciou mais dos outros. Isso ocorreu, pois, para essa carga tem-se o início do esmagamento do corpo de prova devido à alta compressão, como pode ser visto na Fig. 5.11a. Para as outras cargas, quase não se notou alteração no gráfico, porém a carga de 1 kN permitiu que o corpo de prova deslizasse na direção horizontal (Fig. 5.11b), podendo ter o resultado comprometido quando analisado outros fatores, como o atrito. A partir desses resultados, foi adotada uma carga de aperto de 2 kN, para os materiais ensaiados neste trabalho.

A avaliação da carga de aperto foi feita de forma qualitativa, uma vez que o seu valor não afeta a curva de resposta a não ser no caso em que começa a existir o esmagamento ou deslizamentos. Em todos os casos, foi observado se o corpo de prova se movia horizontalmente, o que não ocorreu. Esse valor também não chegou a causar esmagamento em nenhuma simulação posterior.

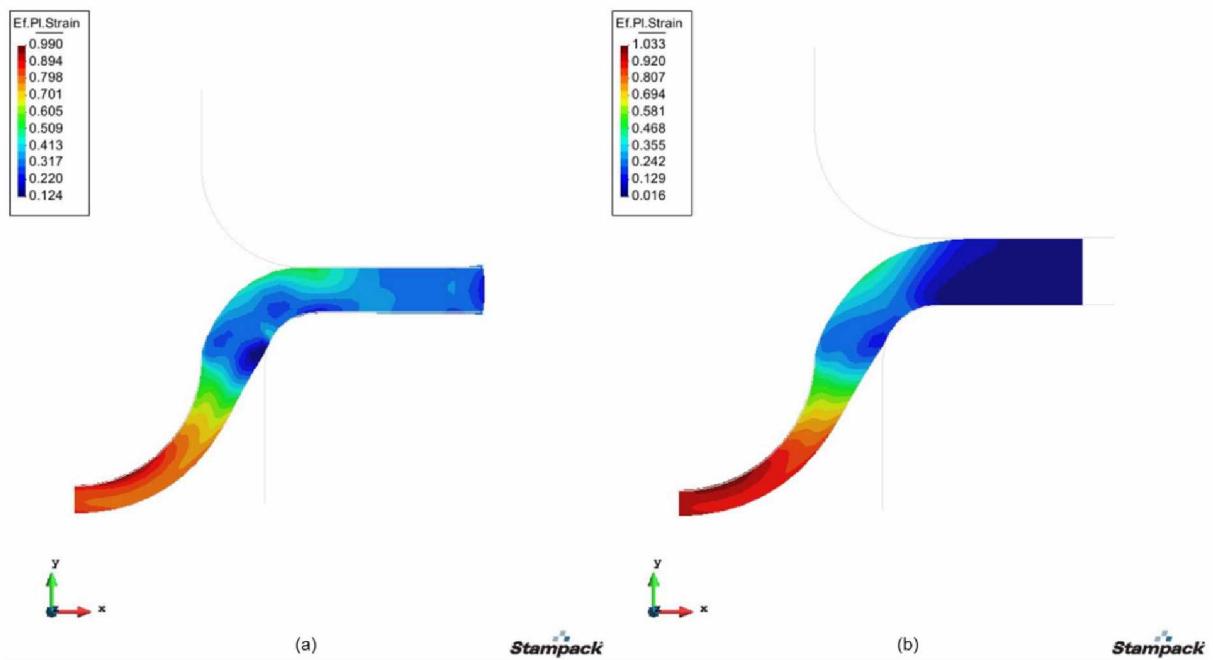


Figura 5.11 – Deformações obtidas nas simulações considerando a carga de aperto de (a) 5 kN. (b) 1 kN.

### 5.3 Variação da espessura dos corpos de prova

Para analisar o efeito da espessura dos corpos de prova, foram feitas simulações com os aços L80 e P110, utilizando as espessuras: 0,250 mm, 0,350 mm, 0,450 mm, 0,500 mm e as espessuras utilizadas na validação experimental de cada um dos materiais. Todos os outros parâmetros da simulação foram mantidos constantes e apenas a espessura do corpo de prova foi variada. As curvas de resposta das simulações são mostradas na Fig. 5.12 para o aço L80 e na Fig. 5.13 para o aço P110.

É possível observar que com espessuras maiores, a curva passa a apresentar cargas maiores. Isso é esperado, uma vez que a espessura aumenta a rigidez do corpo de prova, necessitando uma força maior para que o punção tenha o mesmo deslocamento. Esse comportamento também reflete comportamentos diferentes para as curvas, de modo que nas curvas de 0,450 mm e 0,500 mm, a transição entre os estágios I e II e entre II e III, mostrados na Fig. 2.8, é mais difícil de ser percebida que nas curvas de espessuras menores.

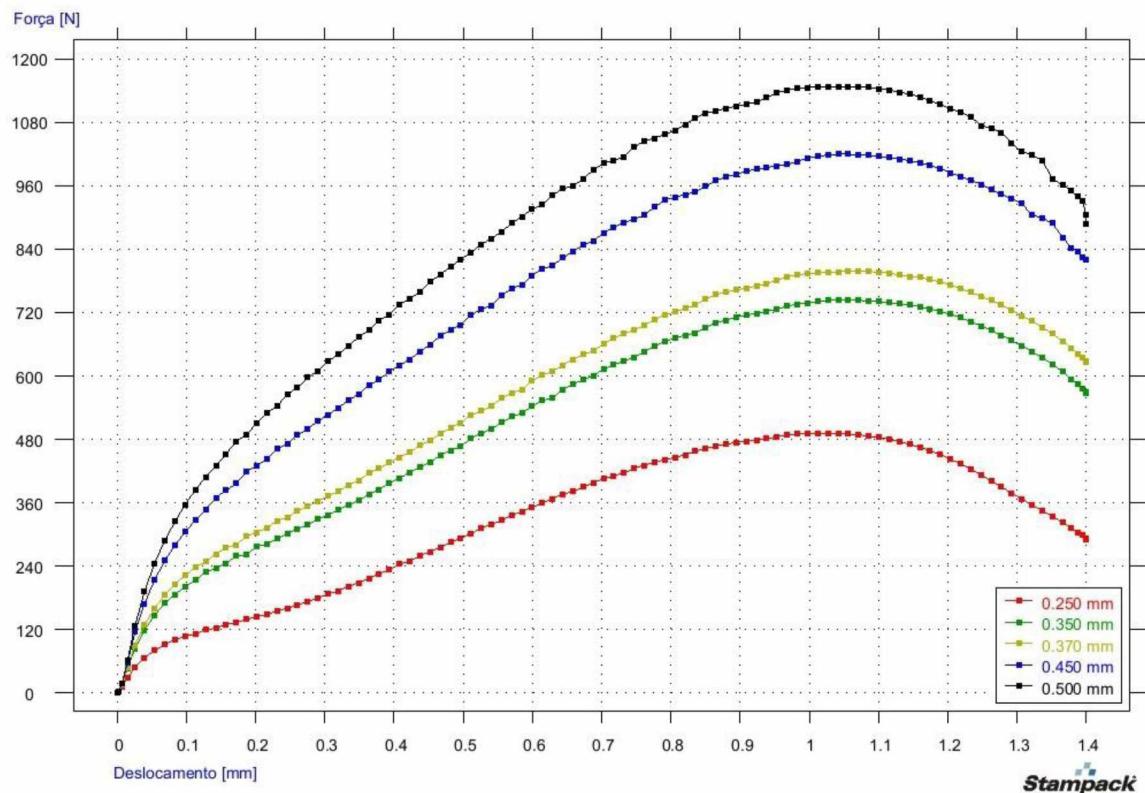


Figura 5.12 – Curvas de resposta das simulações com espessuras variadas para o aço L80.

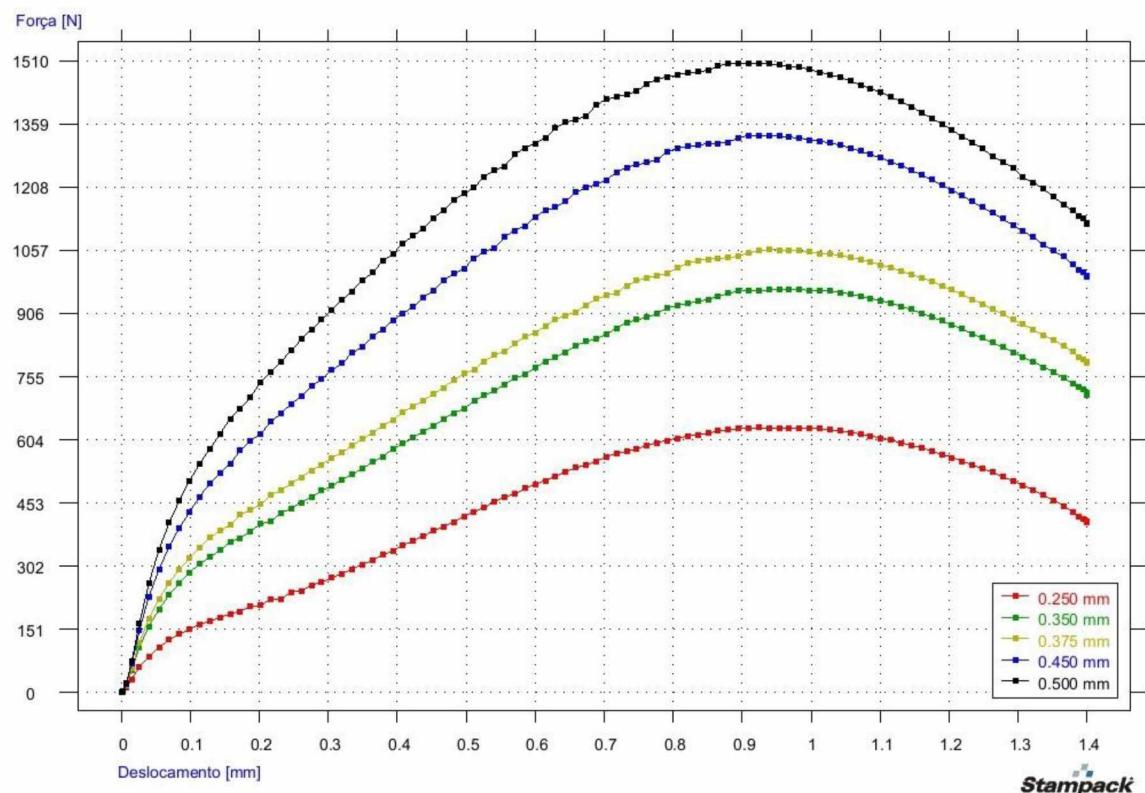


Figura 5.13 – Curvas de resposta das simulações com espessuras variadas para o aço P110.

Outro efeito importante observado ao variar a espessura é a alteração nos valores de  $P_y$  e  $P_m$ , mas não no deslocamento onde a carga é máxima ( $d_m$ ). Para perceber essa influência no cálculo das propriedades do material, calculou-se as relações  $(P_y/t^2)$  e  $(P_m/t^2)$  usadas para calcular o limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) e o limite de resistência à tração ( $\sigma_{ut}$ ) respectivamente conforme as Eq. (2.3) e Eq. (2.4).

Dentre os métodos para se encontrar  $P_y$ , foi utilizado o  $P_{y\_t/10}$ , proposto por Rodríguez et al. (2009). Nesse método,  $P_y$  é obtido através do ponto de interseção entre a curva de resposta e uma reta paralela à inclinação inicial do gráfico com um deslocamento de  $t/10$ . A Figura 5.14 mostra em destaque a região inicial da curva de resposta do aço L80 com espessura 0,250 mm. Neste caso, foi obtido  $P_y = 104 N$ . Os valores de  $P_y$  para as outras espessuras são mostrados na Tab. 5.1, bem como os valores de  $P_m$  para os aços L80 e P110.

As relações  $(P_y/t^2)$  e  $(P_m/t^2)$  foram analisadas em função da espessura, conforme mostrado na Fig. 5.15. Nota-se que apesar de  $P_y$  aumentar com a espessura, a relação  $(P_y/t^2)$  se mantém constante. Desse modo, o cálculo do limite de escoamento pode ser feito independente da espessura utilizada no ensaio. Já a relação  $(P_m/t^2)$  mostra uma queda com o aumento da espessura, mostrando uma forte dependência com a espessura do corpo de prova. Por isso, foram analisadas também as relações  $(P_m/t)$  e  $(P_m/(t \cdot d_m))$ , descritas nas Eq. (2.5) e Eq. (2.6), para encontrar a melhor expressão para o cálculo do limite de resistência.

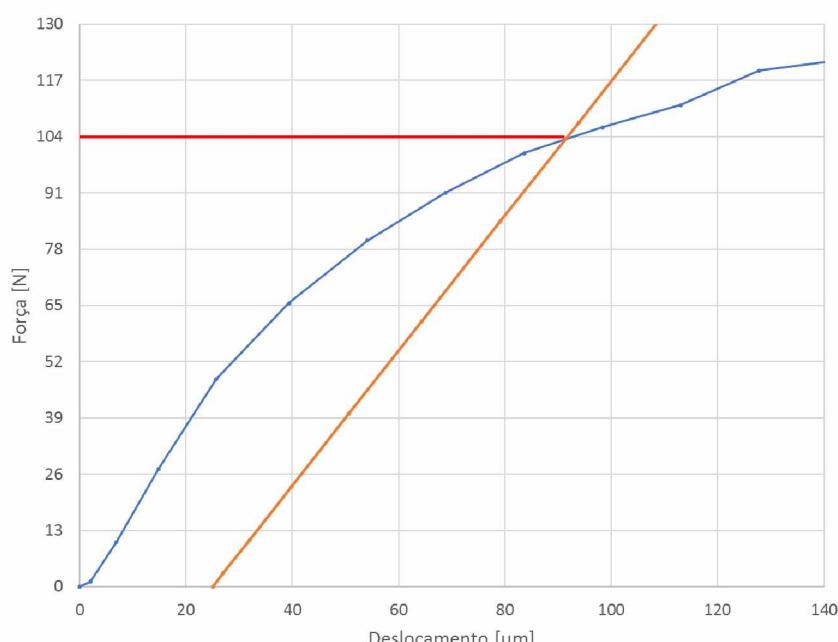


Figura 5.14 – Obtenção de  $P_y$  na curva de resposta do aço L80 com espessura 0,250 mm.

Tabela 5.1 – Valores de  $P_y$  e  $P_m$  obtidos para cada espessura para os aços L80 e P110.

L80			P110		
$t$ [mm]	$P_y$ [N]	$P_m$ [N]	$t$ [mm]	$P_y$ [N]	$P_m$ [N]
0,250	104	491	0,250	150	632
0,350	214	743	0,350	306	962
0,370	238	798	0,375	373	1058
0,450	349	1019	0,450	498	1332
0,500	455	1147	0,500	640	1504

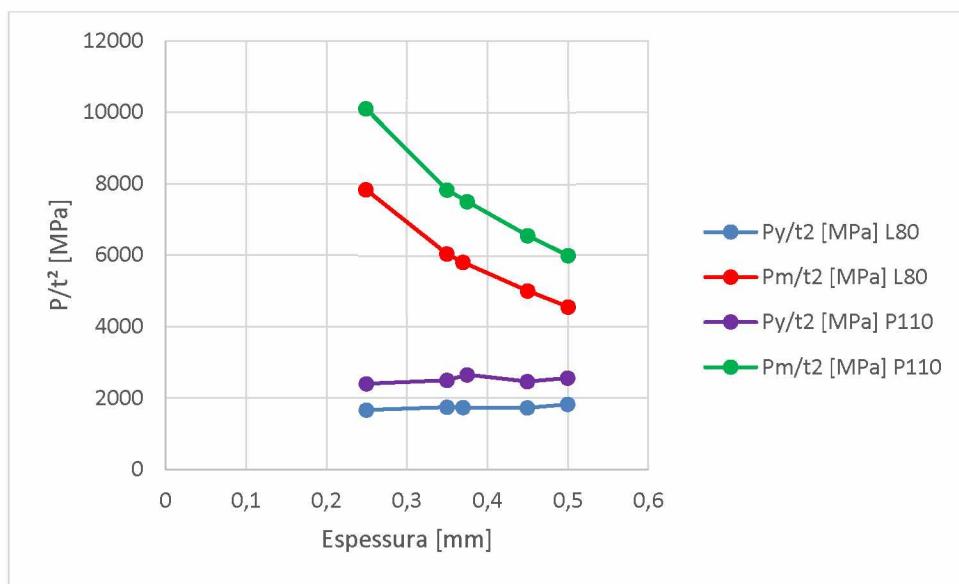


Figura 5.15 – Gráficos de influência da espessura nos cálculos das propriedades mecânicas.

As simulações possibilitam ainda análises de deformação, que permitem estudar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio, além de prever onde provavelmente ocorrerá a ruptura. Com o aumento da espessura, foi observado um aumento de  $P_y$  e uma mudança no comportamento das curvas de resposta. Foi observado ainda que a carga máxima  $P_m$  aumentou, mas o deslocamento do punção equivalente a essa carga não se alterou.

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram a deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de espessura 0,250 mm e 0,500 mm, respectivamente, no deslocamento do punção equivalente à carga  $P_y$ . Para as duas espessuras, o deslocamento do punção resulta em uma deformação plástica devido a uma indentação na região em contato com a ponta da esfera e uma flexão elástica na região inferior do corpo de prova.

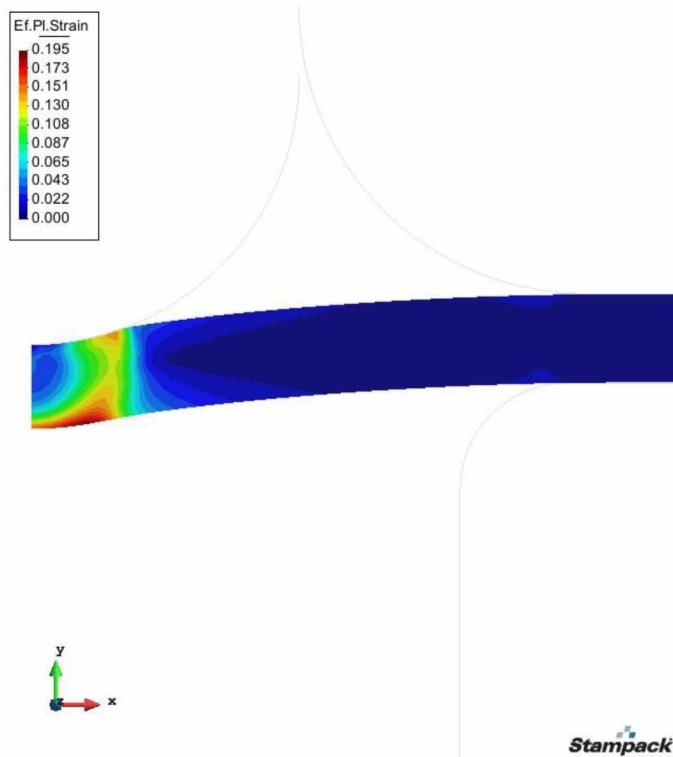


Figura 5.16 – Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,250 mm de espessura para um deslocamento do punção de 0,09 mm, correspondente à carga  $P_y$ .

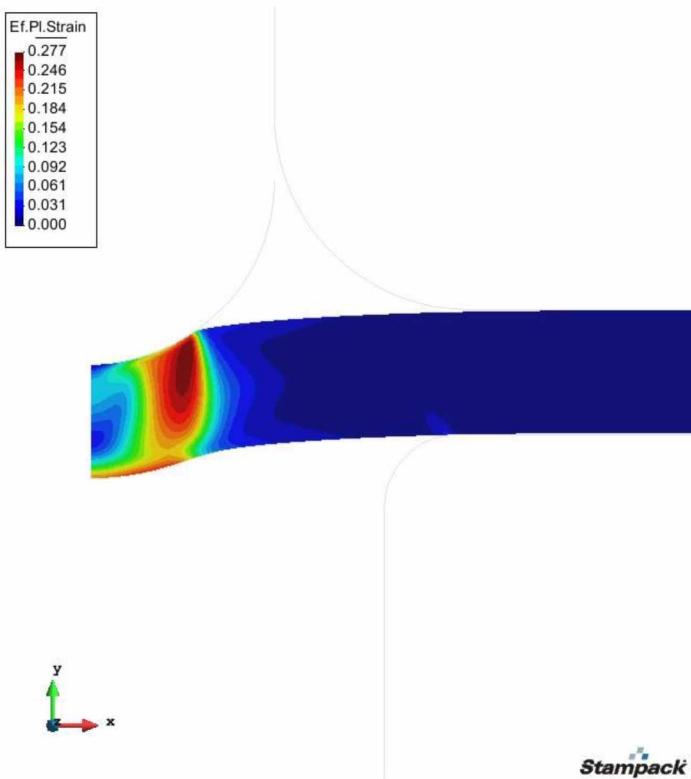


Figura 5.17 – Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,500 mm de espessura para um deslocamento do punção de 0,16 mm, correspondente à carga  $P_y$ .

No corpo de prova mais espesso é observado que a deformação causada pelo deslocamento do punção é praticamente toda devido à indentação, com uma pequena flexão elástica. Já para o corpo de prova menos espesso, a deformação devido à flexão elástica é dominante. Essa mudança de comportamento com a espessura justifica a mudança no comportamento das curvas de resposta para os corpos de prova mais espessos, uma vez que a maior presença da indentação dificulta a percepção da transição dos estágios das curvas.

As deformações plásticas efetivas no deslocamento do punção equivalente à carga máxima são mostradas nas Fig. 5.18 e 5.19 para as espessuras de 0,250 mm e 0,500 mm, respectivamente. Foram mostrados os modelos 2D e com rotação de 180° para melhor visualização.

Após a carga máxima, ocorre a propagação de trinca que leva à ruptura do corpo de prova. Desse modo, as regiões de maior deformação nas Fig. 5.18 e 5.19 correspondem à região em que o corpo de prova possivelmente irá romper. É possível observar que, devido à predominância da flexão no corpo de prova menos espesso, sua ruptura iniciará na região inferior do mesmo e como a espessura é pequena, é possível visualizar no modelo em rotação a região de possível falha. Já para o corpo de prova mais espesso, nota-se que próximo à ruptura, a maior deformação passa a se concentrar na região inferior do corpo de prova, porém devido aos efeitos combinados de indentação e flexão, existem duas prováveis regiões de falha conforme visto na Fig. 5.19.

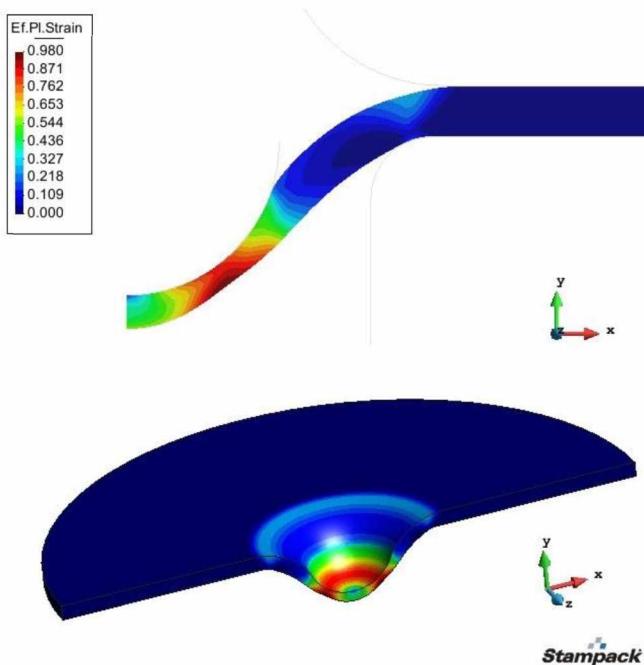


Figura 5.18 – Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,250 mm de espessura para um deslocamento do punção de 1,06 mm.

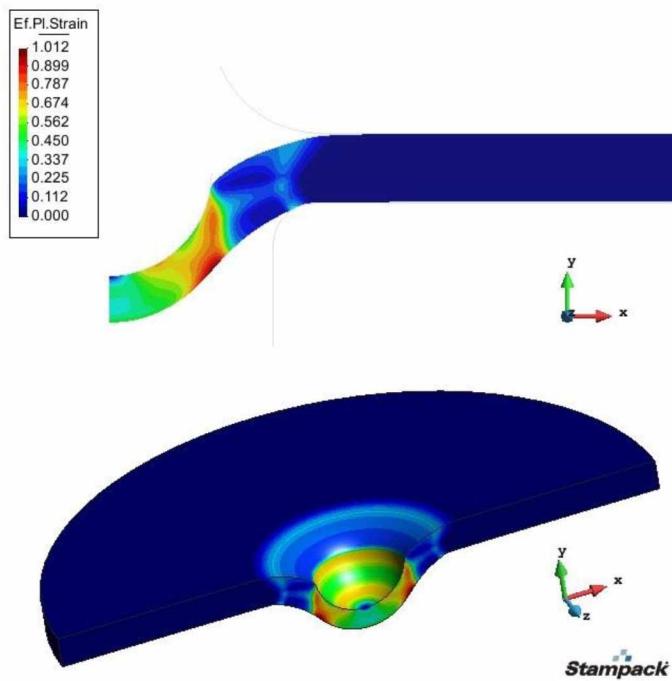


Figura 5.19 – Deformação plástica efetiva do corpo de prova de aço L80 de 0,500 mm de espessura para um deslocamento do punção de 1,06 mm.

#### 5.4 Variação do coeficiente de atrito

Outro parâmetro analisado neste trabalho foi o coeficiente de atrito, verificando seu efeito nos ensaios. Nas simulações anteriores o coeficiente de atrito utilizado no contato entre o punção e o corpo de prova foi  $\mu = 0,1$ . Esse valor não foi medido no experimento, mas ele é encontrado na literatura para contatos entre dois metais lubrificados ou entre superfícies muito lisas. Para verificar o efeito da variação desse coeficiente, foram simulados outros valores de coeficiente de atrito, chegando até o valor de  $\mu = 0,7$ , encontrado na literatura para o contato a seco entre dois metais, sem tratamentos superficiais.

Essa variação foi feita para os aços L80 e P110 e as curvas de resposta para os dois materiais são mostradas nas Fig. 5.20 e Fig. 5.21 respectivamente. A partir das duas figuras, observa-se que os estágios iniciais da curva não são afetados pela variação do atrito, não apresentando variações entre as curvas. A partir de determinado valor de deslocamento, as curvas começam a apresentar desvios, sendo que o maior atrito leva a um valor maior da carga máxima.

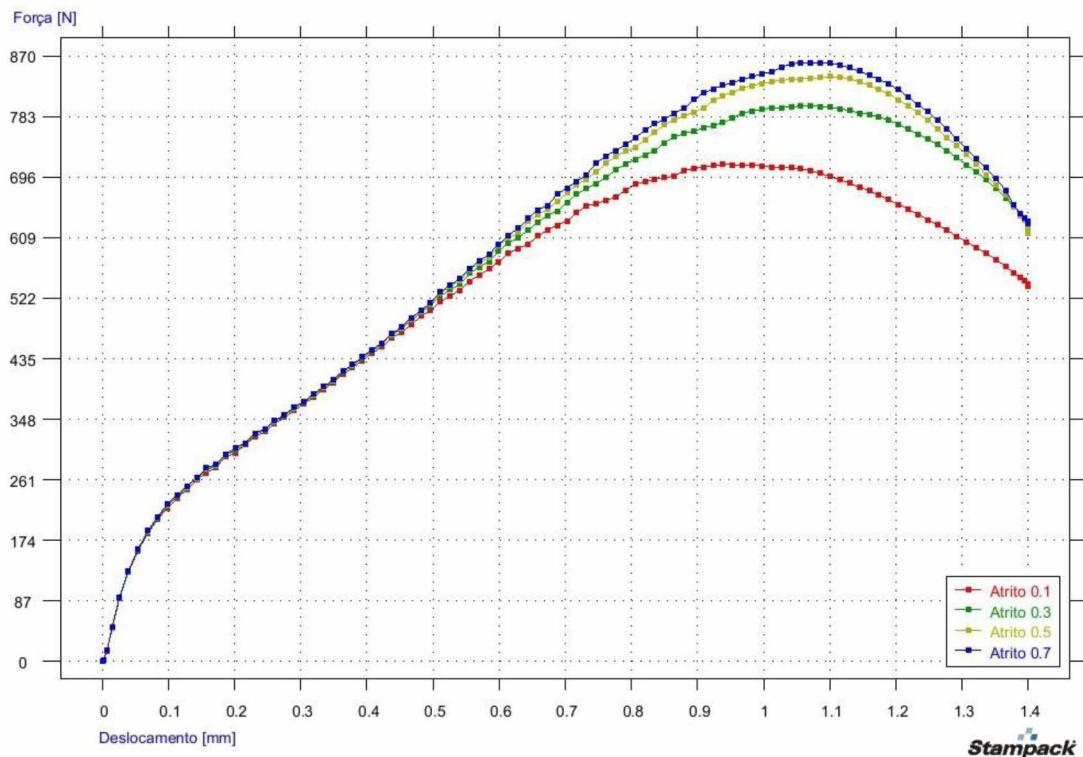


Figura 5.20 – Curvas de resposta das simulações de L80 variando o atrito.

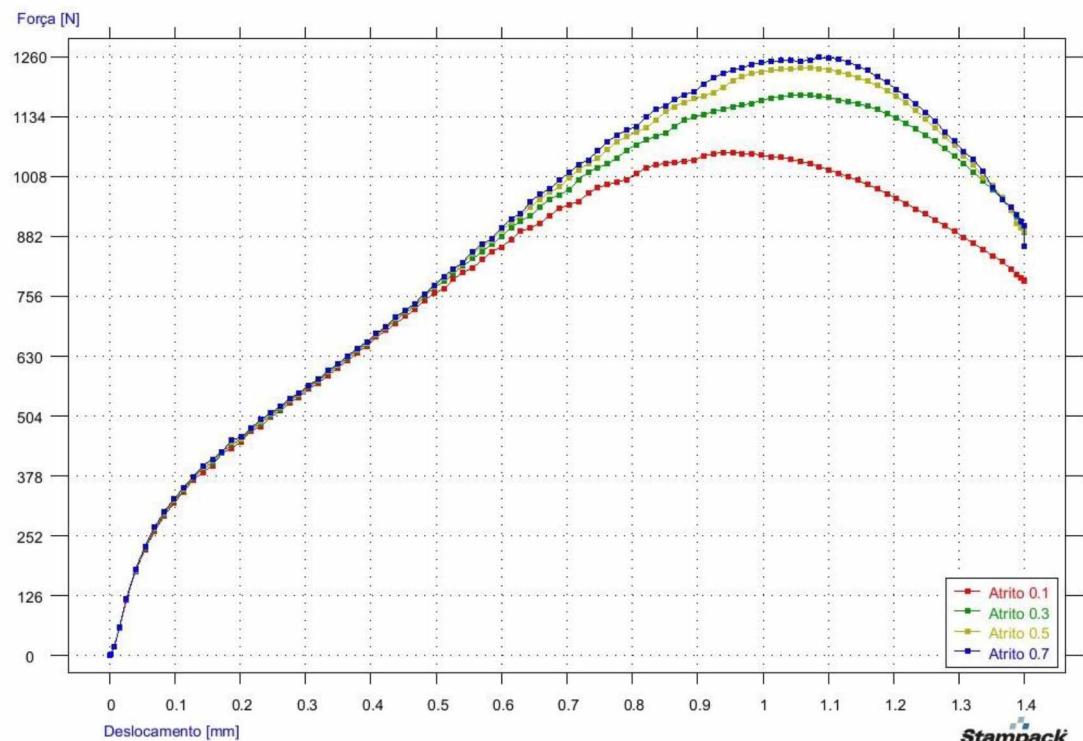


Figura 5.21 – Curvas de resposta das simulações de P110 variando o atrito.

Para ambos os materiais, o efeito do atrito é percebido após um deslocamento do punção de aproximadamente 0,4 mm. Essa região da curva corresponde ao estágio onde o regime de membrana predomina, havendo deslizamento de camadas simultaneamente com a deformação plástica localizada em algumas regiões do corpo de prova. O aumento do atrito tende a dificultar esse deslizamento, de modo que para continuar seu deslocamento, o punção passa a exercer uma maior força.

Esse aumento das forças máximas nas curvas de resposta é bastante percebido entre a curva com atrito de 0,1 e a curva com atrito de 0,3. Já entre atritos maiores, o aumento é percebido, mas de maneira mais discreta, como ocorre entre as curvas com atrito 0,5 e 0,7.

Ao analisar as deformações dos corpos de prova nas regiões de carga máxima observa-se uma mudança na região de maior deformação. O aumento do atrito leva a um afinamento na espessura do corpo de prova em regiões mais afastadas do ponto inferior da esfera.

Isso ocorre, pois com um atrito menor, a região do corpo de prova em contato com o punção deforma facilmente, uma vez que a resistência ao movimento do punção é baixa. Desse modo, a falha se situa próxima ao ponto inferior do punção. Já com atritos maiores, a região do corpo de prova em contato com o punção adere a ele, permitindo menores deformações na região e maiores em áreas mais afastadas.

A Fig. 5.22 mostra esse efeito, ao comparar as deformações obtidas nas simulações com os variados atritos para o aço L80.

É possível observar que com atrito de 0,1 a distribuição da deformação próxima ao ponto inferior do punção é mais constante do que as observadas com os atritos maiores. Ao aumentar o atrito, nota-se que surge uma região sem deformação logo abaixo do punção. Além disso, o aumento do atrito leva a região de falha a ficar mais distante da parte inferior da esfera, porém, essa diferença começa a diminuir entre o atrito de 0,5 e 0,7, o que pode justificar as curvas de resposta serem mais próximas que as outras.

Esse efeito também foi observado recentemente no trabalho de Prakash e Arunkumar (2016), onde eles realizaram experimentos lubrificados e a seco. Eles observaram os corpos de prova através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e mediram a distância da falha até o ponto inferior do corpo de prova, obtendo 0,68 mm a seco e 0,49 mm lubrificado.

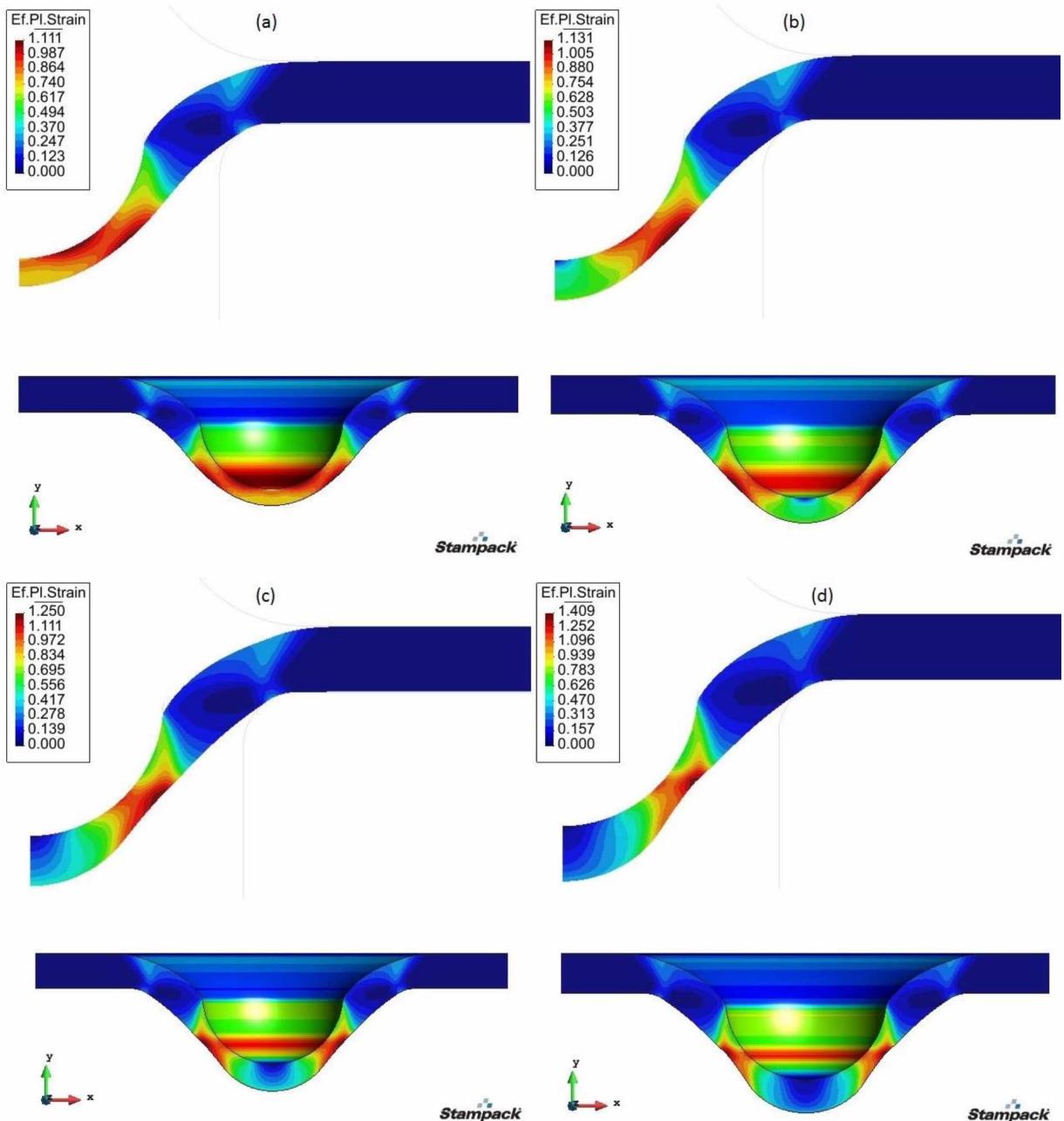


Figura 5.22 – Deformações plásticas efetivas obtidas nas simulações do aço L80 com coeficiente de atrito (a) 0,1. (b) 0,3. (c) 0,5. (d) 0,7.

## 5.5 Expressões para o cálculo das propriedades

Neste item serão feitas algumas estimativas das expressões para o cálculo dos limites de escoamento e de resistência à tração baseados no exposto no item 2.2.2. Estas estimativas são preliminares, pois o número de ensaios analisado foi pequeno. O propósito

é testar uma metodologia que facilite a determinação destas expressões para o equipamento em desenvolvimento no LTAD.

### 5.5.1 Expressão para o limite de escoamento

Conforme visto na seção 5.3, a relação  $(P_y/t^2)$  se mostrou praticamente constante independente da espessura para os aços L80 e P110. Desse modo, para estimar os valores das constantes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  da Eq. (2.3), calculou-se a relação  $(P_y/t^2)$  para os materiais D e E, e em seguida foi plotado o gráfico dos limites de escoamento conhecidos pela relação  $(P_y/t^2)$  calculada para cada material (Fig. 5.23). Por regressão foram obtidos os valores das constantes e para validação, foram estimados os limites de escoamento dos materiais F e G com a expressão obtida.

Para o material D foi obtido  $P_y = 267 N$  e para o material E,  $P_y = 351 N$ . Para os aços L80 e P110 foram usados os valores médios de  $(P_y/t^2)$ . A partir do gráfico da Fig. 5.23, foi feita uma regressão linear passando pela origem ( $\alpha_2 = 0$ ) e foi obtida a expressão mostrada na Eq. (5.2).

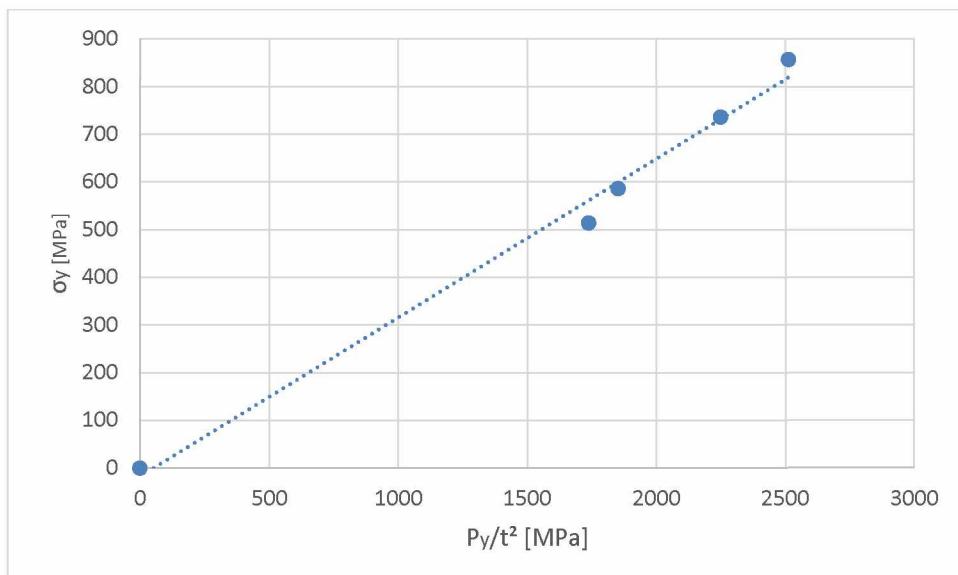


Figura 5.23 – Relação entre o limite de escoamento e  $(P_y/t^2)$  para os diferentes materiais.

$$\sigma_y = 0,3328 \frac{P_y}{t^2} \quad (R^2 = 0,9904) \quad (5.2)$$

O valor de  $\alpha_1 = 0,3328$  obtido através do método de  $P_{y\_t/10}$  ficou próximo aos encontrados na literatura (RODRÍGUEZ et al., 2009; GARCÍA et al., 2014) e o valor de

$R^2 = 0,9904$  mostrou que a expressão é pouco dependente do material, podendo ser usada para estimar o limite de escoamento de diversas ligas.

Para o material F foi obtido  $P_y = 359 N$  e para o material G,  $P_y = 426 N$ . Os valores de  $\sigma_y$  para os dois materiais usando a Eq. (5.2) foram  $\sigma_{yF} = 806 MPa$  e  $\sigma_{yG} = 886 MPa$ , respectivamente.

Quando comparados aos valores fornecidos pelo fabricante,  $\sigma_{yF} = 779 MPa$  e  $\sigma_{yG} = 896 MPa$ , são percebidos erros de 3,47% e 1,11% respectivamente. Desse modo, pode-se afirmar que a expressão da Eq. (5.2) é uma boa estimativa para os resultados deste trabalho. Vale ressaltar que, usando a mesma metodologia, outros pontos poderiam ser incluídos na determinação definitiva do parâmetro  $\alpha_1$  para o cálculo do limite de escoamento utilizando outros testes do equipamento em questão.

### 5.5.2 Expressão para o limite de resistência

Conforme visto na seção 5.3, verificou-se que a relação  $(P_m/t^2)$  apresentou forte dependência com a espessura. Portanto, para encontrar a expressão de cálculo de  $\sigma_{ut}$  foram utilizados os valores de  $P_m$  correspondentes às espessuras dos ensaios experimentais. Do mesmo modo usado para a expressão do limite de escoamento, utilizou-se os valores de  $(P_m/t^2)$  dos materiais D e E, e em seguida, estimou-se o limite de resistência para os materiais F e G.

Para o material D foi obtido  $P_m = 863 N$  e para o material E,  $P_m = 1061 N$ . A partir do gráfico da Fig. 5.24, foi feita uma regressão linear e foi obtida a expressão mostrada na Eq. (5.3).

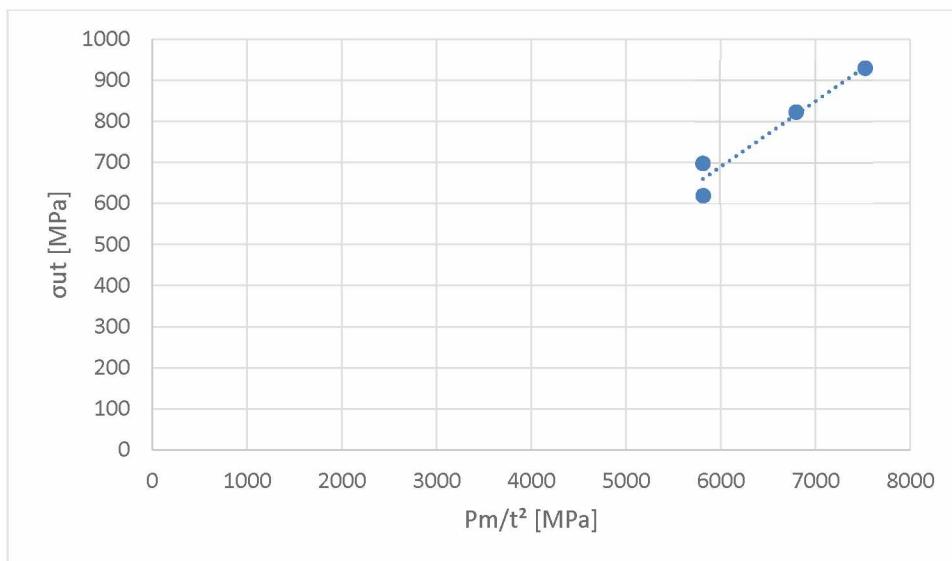


Figura 5.24 – Relação entre o limite de resistência e  $(P_m/t^2)$  para os diferentes materiais.

$$\sigma_{ut} = 0,1595 \frac{P_m}{t^2} - 267,82 \quad (R^2 = 0,9429) \quad (5.3)$$

Através da expressão da Eq. (5.3), encontrou-se valores de  $\sigma_{utF} = 969 \text{ MPa}$  e  $\sigma_{utG} = 1036 \text{ MPa}$ . Os valores fornecidos pelo fabricante são  $\sigma_{utF} = 874 \text{ MPa}$  e  $\sigma_{utG} = 954 \text{ MPa}$ , percebendo-se erros de 10,89% e 8,65% respectivamente. Devido a esses valores um pouco mais elevados e a forte dependência com relação à espessura, foram calculadas expressões que relacionam  $\sigma_{ut}$  com  $(P_m/t)$  e  $(P_m/(t \cdot d_m))$ . As regressões para os dois casos são mostradas nas Fig. 5.25 e Fig. 5.26, e as expressões obtidas são mostradas nas Eq. (5.4) e Eq. (5.5).

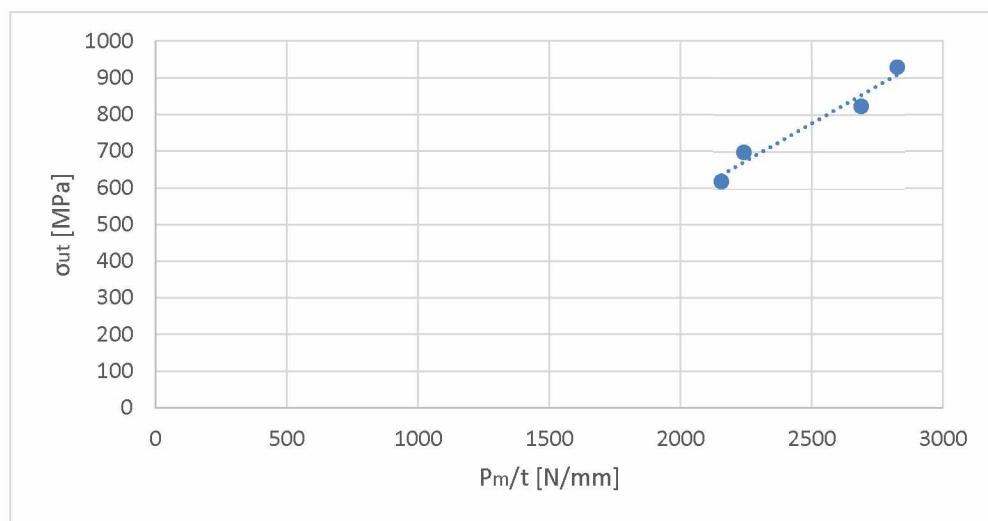


Figura 5.25 – Relação entre o limite de resistência e  $(P_m/t)$  para os diferentes materiais.

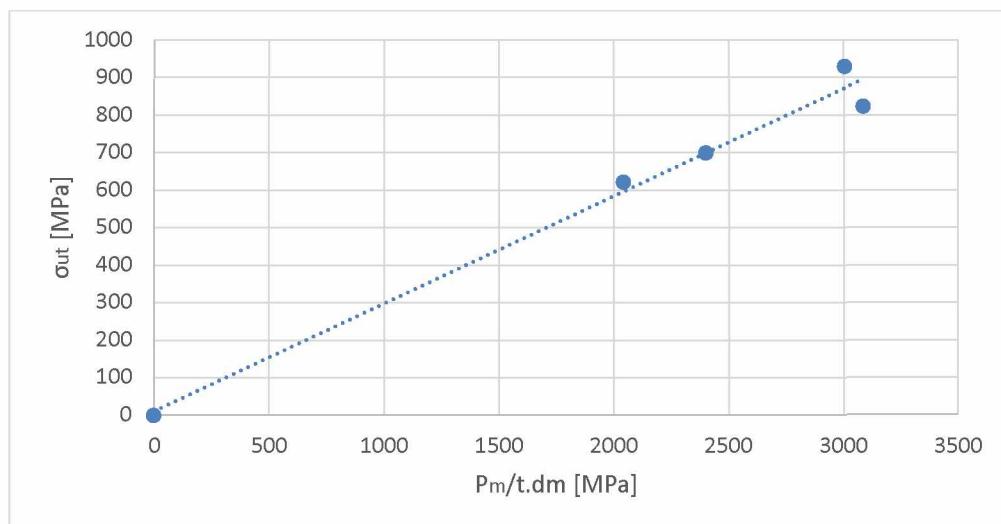


Figura 5.26 – Relação entre o limite de resistência e  $(P_m/(t \cdot dm))$  para os diferentes materiais.

$$\sigma_{ut} = 0,4065 \frac{P_m}{t} - 238,85 \quad (R^2 = 0,9581) \quad (5.4)$$

$$\sigma_{ut} = 0,2868 \frac{P_m}{t \cdot dm} \quad (R^2 = 0,9826) \quad (5.5)$$

Os valores calculados pelas expressões das Eq. (5.4) e Eq. (5.5), assim como os encontrados anteriormente a partir da Eq. (5.3) são mostrados na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de  $\sigma_{ut}$  calculados pelos três métodos para os materiais F e G.

Limite de Resistência	Material F	Erro (%)	Material G	Erro (%)
$\sigma_{utI}$ [MPa] (Eq. (5.3))	969	10,89	1036	8,65
$\sigma_{utII}$ [MPa] (Eq. (5.4))	975	11,55	1090	14,34
$\sigma_{utIII}$ [MPa] (Eq. (5.5))	834	4,60	951	0,34
Valor experimental [MPa]	874		954	

Percebe-se que os limites de resistência calculados para os materiais F e G apresentaram menor erro quando usada a expressão da Eq. (5.5). Apesar dessa expressão ter apresentado resultados melhores que as outras duas, ainda vale ressaltar que o cálculo de  $\sigma_{ut}$  depende muito do atrito envolvido no processo, como mostrado nas Fig. 5.20 e Fig. 5.21, uma vez que o atrito afeta a parte da curva de onde se localiza o valor de  $P_m$ . Desse modo, para maior confiabilidade da expressão, deve-se ter um bom controle do atrito.

Além disso, esse método utiliza o valor do deslocamento  $d_m$ , que tem influência da complacência do equipamento. A expressão da Eq. (5.5) foi obtida após a correção da complacência. Caso fosse obtida diretamente pelos dados experimentais, sem a correção, a regressão seria como mostrada na Fig. 5.27 e a expressão dada pela Eq. (5.6).

$$\sigma_{ut} = 0,3187 \frac{P_m}{t \cdot dm} \quad (R^2 = 0,9630) \quad (5.6)$$

Além de apresentar uma correlação mais baixa do que a da Eq. (5.5), ao calcular os novos  $\sigma_{ut}$  para os materiais F e G, foram obtidos  $\sigma_{utF} = 767 \text{ MPa}$  e  $\sigma_{utG} = 832 \text{ MPa}$ , apresentando erros de 12,20% e 12,71%, respectivamente.

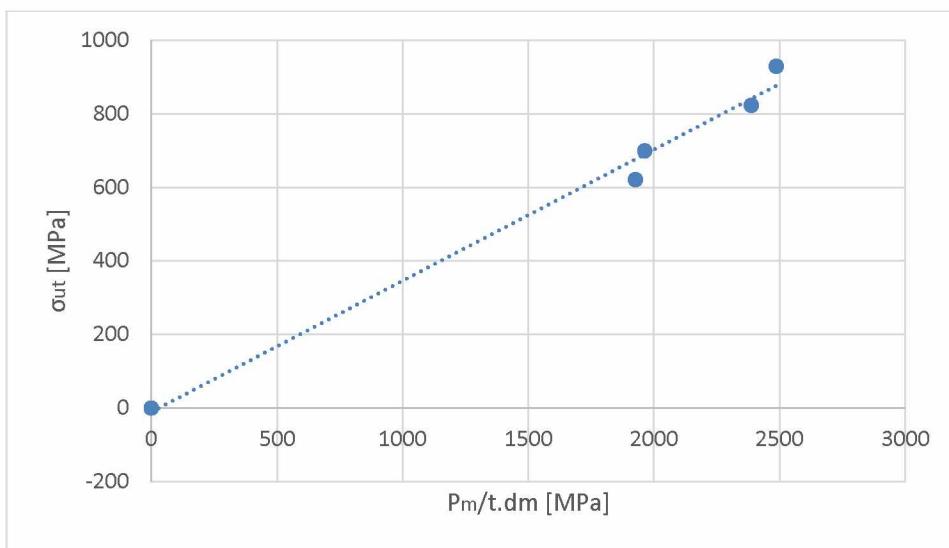


Figura 5.27 – Relação entre o limite de resistência e  $(P_m/(t \cdot dm))$  para os diferentes materiais, não considerando a correção da complacência.

Portanto, foi verificado que a correção da complacência é importante no cálculo do limite de resistência, caso seja usado o método de Hurst e Matocha (2012), que leva em conta o deslocamento do punção quando a carga é máxima.

Outra forma de aumentar a confiabilidade da expressão do cálculo do limite de resistência é fazer ensaios com um número maior de materiais diferentes. Neste trabalho, a estimativa das expressões foi realizada com apenas quatro pontos para obter a expressão e poder verificar-a, calculando os valores para os dois materiais restantes, o que não é suficiente para obter a expressão definitiva. Ao adicionar os dados dos materiais F e G para obter a expressão do limite de resistência, foi obtida a curva de regressão mostrada na Fig. 5.28 e a expressão dada na Eq. (5.7).

$$\sigma_{ut} = 0,2779 \frac{P_m}{t \cdot dm} \quad (R^2 = 0,9828) \quad (5.7)$$

Percebe-se que o valor de  $\beta$  teve pequena variação, indicando uma tendência da expressão de depender pouco dos materiais e mais das condições do sistema, como a geometria do equipamento, a complacência e o atrito.

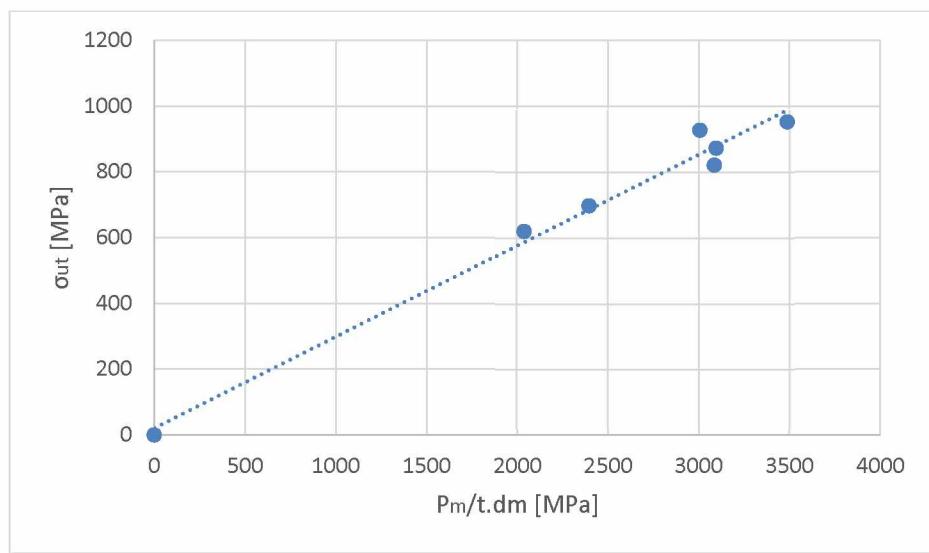


Figura 5.28 – Relação entre o limite de resistência e  $(P_m/(t.dm))$  utilizando mais materiais.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se ampliar o conhecimento sobre os ensaios de punctionamento esférico, bem como propor uma metodologia para otimizar a escolha de alguns parâmetros relativos aos mesmos. Várias simulações foram realizadas, inicialmente para validar o modelo numérico com base nos resultados experimentais, e em seguida utilizando este modelo validado para verificar a sensibilidade do ensaio à variação de parâmetros importantes à técnica.

Com base nos resultados obtidos, foi visto que o modelo representou bem o fenômeno físico estudado, tendo em vista a boa concordância apresentada entre as curvas de resposta obtidas nas simulações e experimentalmente para diversos materiais.

Através da comparação entre os resultados experimentais e os obtidos nas simulações, foi possível observar a existência da complacência do equipamento. Ela foi corrigida para não interferir nos resultados, pois ao contrário das simulações, onde as ferramentas são todas rígidas, no experimento existe uma parcela de deformação do equipamento que influencia diretamente no que está sendo medido. Através de uma correção linear feita para os diversos materiais testados no trabalho, obteve-se um valor médio de  $C_e = 0,22 \mu m/N$ .

Dentre os parâmetros estudados neste trabalho, observou-se que a carga de aperto apresenta pouca influência nos resultados dos ensaios. Porém, ela deve ser levada em conta de modo que não esmague o corpo de prova, como ocorreu com a carga de 5 kN, nem o deixe livre o suficiente para deslocar horizontalmente, como ocorreu com a carga de 1 kN. Experimentalmente, essa variável deve ser considerada qualitativamente.

No estudo da espessura dos corpos de prova, observou-se que existe uma influência desse parâmetro no cálculo do limite de resistência à tração, bem como no formato da curva de resposta do ensaio. Espessuras maiores levaram a curvas de resposta com cargas maiores ao longo de todo o ensaio. Além disso, notou-se que as transições entre os

estágios da curva de resposta diminuíram com o aumento da espessura, uma vez que é notada maior presença da indentação e menos regime de membrana. Já espessuras menores apresentaram maior presença da flexão elástica e melhor transições entre os estágios.

O atrito influenciou basicamente a parte final da curva de resposta, ou seja, próximo à região de ruptura do corpo de prova. Observou-se que a partir de determinado deslocamento do punção, as cargas aumentavam com o aumento do atrito. Além disso, foi observada a mudança na região de provável falha do corpo de prova, sendo que os maiores atritos levaram a um distanciamento da falha em relação ao ponto inferior do punção. Sendo assim, o estudo desse parâmetro se mostra importante na análise do limite de resistência do material, além de poder afetar propriedades relacionadas à fratura.

Por fim, foram obtidas as expressões preliminares para o cálculo do limite de escoamento e de resistência à tração. A primeira expressão se mostrou pouco dependente do material utilizado e da espessura do corpo de prova e conseguiu estimar bem tal propriedade para os materiais utilizados neste trabalho com erros menores que 5%. Já a determinação da expressão para determinar limite de resistência à tração, foi abordada através de três métodos, sendo que o que mostrou melhor resultado foi o que dividia a carga máxima  $P_m$  pela espessura  $t$  e pelo deslocamento do punção na carga máxima  $d_m$ . Vale ressaltar que para aumentar a confiabilidade dessas expressões, mais ensaios com materiais diferentes devem ser realizados. Assim, as estimativas das expressões para o cálculo das propriedades com base nos dados deste trabalho se mostraram satisfatórias.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Realização de mais ensaios experimentais com materiais diferentes de modo a obter expressões mais confiáveis para o cálculo do limite de escoamento e do limite de resistência à tração para o equipamento do LTAD.
- Realização de ensaios utilizando lubrificação para verificar e minimizar a influência do atrito no cálculo das propriedades.
- Verificar, usando MEF, a influência de parâmetros geométricos do equipamento na curva de resposta, tais como diâmetro do punção e raio de curvatura da matriz inferior.
- A partir do estudo do atrito, verificar sua influência na obtenção de propriedades relacionadas à fratura.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 2007. Erica – 5<sup>a</sup> ed.

APARICIO SÁNCHEZ, C. A. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. 2001. 126f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

AZEVEDO, D. F. O. **Análise Estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes, 2014. 78p.

BAIK, J. M.; KAMEDA, J.; BUCK, O. The Use of Small-Scale Specimens for Testing Irradiated Material. In: ASTM STP 888, 1986, Philadelphia. **Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittled Ni-Cr Steels**. p. 92-111.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1996. 1052 p.

BRUCHHAUSEN, M.; HOLMSTRÖM, S.; SIMONOVSKI, I.; AUSTIN, T.; LAPETITE, J.-M.; RIPPLINGER, S.; DE HAAN, F. Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 86, p. 2-10, 2016.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084p.

BULLOCH, J. H. Toughness losses in low alloy steels at high temperatures: an appraisal of certain factors concerning the small punch test. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 75, no. 11, p. 791-804, 1998.

BYUN, T. S.; HONG, J. H.; HAGGAG, F. M. FARRELL, K.; LEE, E. H. Measurement of Through-the-Thickness Variations of Mechanical Properties in SA508 Gr.3 Pressure Vessel Steels Using Ball Indentation Test Technique. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 74, p. 231-238, 1997.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 706p.

CAMPITELLI, E. N.; SPAETIG, P.; BONADE, R.; HOFFELNER, W.; VICTORIA, M. Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling. **Journal of Nuclear Materials**, vol. 335, num. 3, p. 366-378, 2004.

CEN Workshop Agreement. **Small-Punch Test Method for Metallic Materials**. CWA 15627:2007, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

CHEON, J. S.; KIM, I. S. Initial deformation during small punch testing. **Journal of Testing and Evaluation**, vol. 24, p. 255-262, 1996.

CHUVAS, T. C. **Influência do tratamento térmico no comportamento mecânico e nas tensões residuais de juntas soldadas de aços Cr-Mo**, 2015. 145 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

CONTRERAS, M. A.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, vol. 31, no. 9, p. 727-737, 2008.

DE SOUZA, D. A. F. **Algoritmo Adaptativo Implícito/Explícito por Arestas para Solução de Problemas de Transporte Tridimensionais**, 2002. 109 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DOBES, F.; MILICKA, K. Comparison of conventional and small punch creep tests of mechanically alloyed AL-C-O alloys. **Materials Characterization**, vol. 59, p. 961-964, 2008.

DUARTE, E. N. **Estudo Analítico-Numérico de Freios de Estampagem em Chapas Metálicas**. 2007. 144f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FELICE NETO, F. R. **Simulação de Microindentação de Material Multicamada pelo Método dos Elementos Finitos**. 2012. 64f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FLEURY, E.; HA, J. S. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength; **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 75, p. 699-706, 1998.

GARCIA, A. **Ensaios dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365p.

GARCÍA, T. E.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; PEÑUELAS, I.; ARROYO, B. Development of a methodology to study the hydrogen embrittlement of steels by means of the small punch test. **Materials Science and Engineering**, vol. 626, p. 342-351, 2015.

GARCÍA, T. E.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; SUÁREZ, C. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 582, p. 708-717, 2014.

GUDURU, R. K.; DARLING, K. A.; KISHORE, R.; SCATTERGOOD, R. O.; KOCH, C. C.; MURTY, K. L. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing. **Materials Science and Engineering**, vol. 395, p. 307-314, 2005.

HA, J. S.; FLEURY, E. Small punch tests on steels for steam power plant. **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 12, p. 818-835, 1998.

HU, R.; LING, X. Three-dimensional numerical simulation on plastic damage in small punch specimen of Zirconium. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 86, no. 12, p. 813-817, 2009.

HURST, R. C.; LANCASTER, R. J.; JEFFS, S. P.; BACHE, M. R. The contribution of small punch testing towards the development of materials for aero-engine applications. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 86, p. 69-77, 2016.

HURST, R. C.; MATOCHA, K. Where are we Now with the European Code of Practice for Small Punch Testing? In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE SSTM, 2, 2012, Ostrava, Czech Rep. **Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testing Techniques**. p. 4-18.

HYDE, T. H.; SUN, W.; BECKER, A. A. Analysis of the impression creep test method using a rectangular indenter for determining the creep properties in welds. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 38, num. 10, p. 1089-1102, 1996.

HYDE, T. H.; SUN, W. Multi-step load impression creep tests for a 1/2Cr1/2Mo1/4V steel at 565°C. **Strain**, vol. 37, p. 99-103, 2001.

JU, J.-B.; JANG, J.; KWON, D. Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 80, no. 4, p. 221-228, 2003.

KAMEDA, J.; MAO, X. Small-punch and TEM-disc testing techniques and their application to characterization of radiation damage. **Journal of Materials Science**, vol. 27, no. 4, p. 983-989, 1992.

KUMAR, K.; MADHUSOODANAN, R.; RUPANI, B. B. **Miniature Specimen Technique as an NDT Tool for Estimation of Service Life of Operating Pressure Equipment**. International Conference & Exhibition on Pressure Vessel and Piping, 2006.

KUMAR, K.; POOLEERY, A.; MADHUSOODANAN, K. **Use of Miniature Tensile Specimen and Video Extensometer for Measurement of Mechanical Properties**. Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, 2014. Relatório.

KURISHITA, H.; KAYANO, H.; NARUI, M.; YAMAZAKI, M. Current Status of Small Specimen Technology in Charpy Impact Testing. **Journal of Nuclear Materials**, 212-215, p. 1682-1687, 1994.

LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J. A.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, vol. 31, no. 10, p. 841-849, 2008.

LACALLE, R.; GARCÍA, J.; ÁLVAREZ, J. A; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. **Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos.** In: Anales de Mecánica de la Fractura, vol. 2, 2009, Santander, Spain. p. 501-506.

LING, X.; ZHENG, Y.; YOU, Y.; CHEN, Y. Creep damage in small punch creep specimens of Type 304 stainless steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 84, p. 304-309, 2007.

LUCAS, G. E. The Development of Small Specimen Mechanical Test Techniques. **Journal of Nuclear Materials**, 117, p. 327-339, 1983.

LUCAS, G. E.; SHECKHERD, J. W.; ODETTE, G. R.; PANCHANDEESWARAN, S. Shear Punch Tests for Mechanical Property Measurements in TEM Disc-Sized Specimens. **Journal of Nuclear Materials**, vols. 122-123, p.429, 1984.

LUCAS, G. E.; OKADA, A.; KIRITANI, M. Parametric analysis of the disc bend test. **Journal of Nuclear Materials**, vols. 141-143, p. 523-535, 1986.

MANAHAN, O. K.; ARGON, M. P.; HARLING, A. S. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. **Journal of Nuclear Materials**, vol. 104, p. 1545-1550, 1981.

MANAHAN, O. K.; ARGON, M. P.; HARLING, A. S. **Determining Mechanical Behavior of Solid Materials using Miniature Specimens.** United States Patent No. 4,567,774, 1986.

MAO, X.; SHOJI, T.; TAKAHASHI, H. Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis, **Journal of Testing and Evaluation**, vol. 15, p. 30-37, 1987.

MAO, X.; TAKAHASHI, H. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk ( $\varnothing$  3 mm) small punch tests. **Journal of Nuclear Materials**, vol. 150, p. 42-52, 1987.

MATOCHA, K.; PURMENSKÝ, J. The Evaluation of Materials Properties of in-Service components by Small Punch Test. **Journal of KONES Powertrain and transport**, vol. 16, no. 4, p. 315, 2009.

MORENO, M. F.; BERTOLINO, G.; YAWN, A. The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test. **Materials and Design**, vol. 95, p. 623-631, 2016.

NICOLOSI, E. R. **Avaliação de métodos analíticos para determinação de propriedades mecânicas de aços via ensaio de macroindentação instrumentada**. 2015. 308f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

OKAMOTO, K.; KITAGAWA, H.; KUSUMOTO, J.; KANAYA, A.; KOBAYASHI, T. Development of electric discharge equipment for small specimen sampling. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 86, no. 9, p. 633-636, 2009.

ONAT, E. T.; HAYTHORNTHWAITE, R. M. The Load-Carrying Capacity of Circular Plates at Large Deflection, **Journal of Applied Mechanics**, vol. 23, p. 49, 1956.

OÑATE, E. **Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos: Análisis estático lineal**. 2<sup>a</sup> ed. Barcelona: SPRINGER – CIMNE, 1995.

PURDY, D. Small Punch Testing Validates Steam Turbine for Continued Service. **Power Engineering**, v. 119, n. 3, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.power-eng.com/articles/print/volume-119/issue-3/departments/what-works/small-punch-testing-validates-steam-turbine-for-continued-service.html>> Acesso em: 4 abr. 2017

RASCHE, S.; KUNA, M. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 125, p. 23-34, 2015.

PRAKASH, R. V.; ARUNKUMAR, S. **Influence of Friction on the Response of Small Punch Test**. The Indian Institute of Metals, 2016. Technical Paper.

RODRÍGUEZ, C.; CÁRDENAS, E.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C. Fracture Characterization of Steels by Means of the Small Punch Test. **Experimental Mechanics**, vol. 53, no. 3, p. 385-392, 2012.

RODRÍGUEZ, C.; GARCÍA, J.; CÁRDENAS, E.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test. **Welding Journal**, vol. 88, p. 188-192, 2009.

ROLLS-ROYCE POWER ENGINEERING PLC. **Scoop sampling – extraction of material samples for examination and analysis**, Rolls-Royce, Derby, <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/scoop-sampling-tcm92-5 0918.pdf> (2010).

SILVA, P. S. da. **Análise do Uso de Escalas nas Simulações de Processos de Estampagem**. 2016. 99f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

STAMPACK. **Basic Concepts Theory Manual**. Quantech ATZ, version 5.5, Barcelona, Spain, 2003. 156p.

STAMPACK SIMULATION GUIDE. **Basic Concepts**. Quantech ATZ, version 7.0.1, Barcelona, Spain. 2014. 200p.

SUN, W.; HYDE, T. H.; BRETT, S. J. Application of impression creep data in life assessment of power plant materials at high temperatures. **Journal of Materials Design and Applications**, vol. 222, p. 175-182, 2008.

WANG, Z.-X.; SHI, H.-J.; LU, J.; SHI, P.; MA, X.-F. Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses. **Nuclear Engineering and Design**, vol. 238, no. 12, p. 3186-3193, 2008.

XU, Y.; NING, G.; ZHANG, C.; YU, Q.; XU, Y. Application of the Miniature Specimen Technique to Material Irradiation Tests and Surveillance for Reactor Components. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 77, p. 715-721, 2000.

YANG, D.; JUNG, D.; SONG, I.; YOO, D.; LEE, J. Comparative investigation into implicit, explicit, and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 50, p. 39-53, 1995.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method**. 4. ed. London: McGraw-Hill, 1991.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **El método de los elementos finitos: Mecánica de sólidos**. 5. ed., CIMNE, Barcelona, 2004.