

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise das propriedades mecânicas de materiais
metálicos através de ensaios mecânicos em
miniatura**

Vanessa Silva Loyola

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Junho de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise das propriedades mecânicas de materiais
metálicos através de ensaios mecânicos em
miniatura**

Vanessa Silva Loyola

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Junho de 2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

- L923 Loyola, Vanessa Silva
Análise das propriedades mecânicas de materiais metálicos
através de ensaios mecânicos em miniatura / Vanessa Silva
Loyola.—2017.
x, 50f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 48-50
Orientadora : Tatiane de Campos Chuvas
1. Engenharia mecânica. 2. Metais – Propriedades mecânicas.
3. Aço cromo-molibdênio – Propriedades mecânicas. 4. Metais –
Ensaio e provas. I. Chuvas, Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.
- CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha orientadora Tatiane de Campos Chuvas por todo o apoio, direcionamento, incentivo e paciência durante a realização deste trabalho. Gostaria também agradecer aos colaboradores do CEFET/RJ pela ajuda nas fases de preparação e experimental deste trabalho.

Um agradecimento especial para meu amigo Diego Navarro, pois sem sua ajuda com a usinagem do sistema na empresa Transcional a realização dos ensaios não seria possível. Agradeço também à Luiza Higino Doro, Mateus de Queiroz dos Reis e Bruno Salgado, não só pela amizade, mas também pelo apoio em momentos em que os prazos não conseguiriam ser cumpridos sem seu apoio.

Por último, à família e amigos que tornaram este trabalho possível e me acompanharam durante todos os anos de estudo e dedicação do curso de graduação além de contribuírem para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

As indústrias nuclear e de petróleo e gás vem impulsionando o desenvolvimento de ensaios mecânicos que possam ser utilizados na caracterização dos efeitos da degradação do tempo e uso de equipamentos em operação, pois estas informações são fundamentais para a programação de manutenção ou troca do equipamento. Neste contexto, o *Small Punched Test*, classificado como um ensaio em miniatura, foi desenvolvido para determinar propriedades mecânicas utilizando quantidade de material significativamente inferior aos ensaios convencionais, possibilitando a análise do estado de degradação de um equipamento sem inutilizá-lo devido à retirada de material. Entretanto, novos desafios foram surgindo. Atualmente, deseja-se compreender como os parâmetros de ensaios podem influenciar os resultados obtidos, além de determinar correlações matemáticas que quantifiquem os valores das propriedades mecânicas analisadas. Este trabalho consistiu na realização de ensaios mecânicos em miniatura do tipo *Small Punch Test* (SPT) para analisar e determinar propriedades mecânicas de tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento percentual de aços Cr-Mo. Para realizar os ensaios de SPT foi necessário projetar e fabricar um dispositivo que pudesse ser acoplado a máquinas de ensaio universal. Os valores obtidos nos testes foram correlacionados com dados de ensaios convencionais de tração. Em particular, estudou-se como a velocidade de ensaio influenciava nos valores gerados durante o teste. Os resultados mostraram que o teste descreve bem as propriedades mecânicas e que, a velocidade de ensaio impacta diretamente nos dados obtidos. Um dos principais fatores que contribuiu para uma boa aquisição de dados foi o dimensionamento correto do dispositivo de ensaio.

Palavras-chave: Ensaios mecânicos em miniatura, propriedades mecânicas, *Small Punched Test*.

ABSTRACT

The nuclear and oil and gas industries have been promoting the development of mechanical tests that can be used to characterize the effects of time degradation and the use of equipment in operation, since this information is crucial for maintenance or equipment replacement. In this context, the Small Punched Test, classified as a miniature test, was developed to determine mechanical properties using quantity of material significantly inferior to the conventional tests, allowing the analysis of the state of degradation of equipment without disabling it due to material removal. However, new challenges have been emerging. Nowadays, the understanding of how the test parameters can influence the results obtained, in addition to define mathematical correlations that quantify the values of the mechanical properties analyzed. This work consisted in the realization of miniature mechanical tests of the Small Punch Test (SPT) to analyze and determine mechanical properties of yield stress, tensile stress and elongation of Cr-Mo steels. In order to execute the SPT tests it was necessary to develop and manufacture a device that could be connected to universal testing machines. The values obtained in the tests were correlated with data from conventional tensile tests. In particular, it was studied how the test velocity influenced the values generated during the test. In particular, it was studied how the test velocity influenced the values generated during the test. The results showed that the test describes well the mechanical properties and that the test speed directly impacts the obtained data. One of the main factors that contributed to a good data acquisition was the correct sizing of the test device.

Keywords: Miniaturized mechanical tests, mechanical properties, Small Punched Test.

SUMÁRIO

Introdução.....	1
1.2 Motivação e Justificativa	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado.....	2
1.5 Organização do trabalho	3
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos.....	4
2.2 Ensaio Mecânico de Tração	5
2.3 Ensaio Mecânicos em Miniatura.....	8
2.3.1 <i>Small Punched Test</i> (SPT)	9
2.3.2 <i>Impression Creep Test</i> (ICT).....	16
2.3.3 <i>Small Ring Test</i> (SRT)	18
2.3.4 <i>Sub-size Uniaxial Test</i> (SSUT).....	19
Materiais e Métodos.....	21
3.1 Materiais.....	21
3.2 Projeto e fabricação do dispositivo.....	23
3.3 Preparação das amostras	25
3.4 Montagem do sistema	27
Resultados e Discussão	29
4.1 Tensão Limite de Resistência	36
4.2 Alongamento	40
4.3 Tensão Limite de Escoamento	42
4.4 Fratuira do Corpo de Prova	44
Conclusões.....	46
Sugestão para Trabalhos Futuros.....	47
Referências Bibliográficas	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comportamento tensão-deformação para um corpo de prova de latão. (CALLISTER, 2002)	6
Figura 2- Curva de tração de engenharia vs. curva verdadeira de tração. (CALLISTER, 2002)	7
Figura 3- Corpos de Prova de Ensaio de Tração Convencional. (SOUZA, 1982)	8
Figura 4- Corpos de prova de ensaio mecânicos em miniatura. ICT- Impression Creep Test; SSUT- Sub-size Uniaxial Test; SRT- Small Ring Test; SPT- Small Punched Test (HYDE et al., 2010).....	9
Figura 5- Esquema de Miniaturized Disk Bend Test (MANAHAN et al., 1981).	10
Figura 6- Representação esquemática do equipamento de SPT (CONTRERAS <i>et al.</i> , 2009).	11
Figura 7- Geometria padrão de amostras para ensaio de SPT (HYDE & SUN, 2011).	11
Figura 8- Curva obtida através do ensaio de SPT para um material dúctil em temperatura ambiente (GARCIA et al., 2014).....	12
Figura 9- Curva obtida através do ensaio de SPT (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015). ...	13
Figura 10- Diferentes formas de determinação de Py (GARCIA et al., 2009).	14
Figura 11- Corpo de prova retangular para ICT. (BRETT et al., 2014)	16
Figura 12- Geometrias de punção para ICT (HYDE et al., 2010).....	17
Figura 13- Curva típica de ICT para ensaios a diferentes tensões (HYDE & SUN, 2009).	17
Figura 14- Geometrias de corpo de prova para SRT (HYDE et al., 2014).....	18
Figura 15- Curva deformação x tempo para aço P91 a 650°C com CP circular (HYDE et al., 2011).	19
Figura 16- Comparação entre corpo de prova de Sub-size Uniaxial Test (SSUT), uma moeda e CP para SPT (RABENBERG, 2012)	20
Figura 17- Projeto do Sistema de SPT (a) Vista frontal do sistema e (b) Vista em corte do sistema de SPT.....	23
Figura 18- Componentes do sistema de <i>Small Punched Test</i>	24
Figura 19- Punção desenvolvido para os ensaios de SPT.	25
Figura 20- (a) Peças cilíndricas de aço P91 e P92 e (b) cortadora metalográfica Minitom.	25
Figura 21- Corpos de prova do ensaio de SPT.	26
Figura 22 – Máquina de Scoop Cutter para extração de amostras (CWA 15627 Part B).....	27
Figura 23- Sistema acoplado à máquina de tração.	27
Figura 24- Curva carga vs. deslocamento de aço A335 P92 obtida por SPT.....	30
Figura 25- Curvas carga vs. deslocamento do punção para aço P91 modificado para SPT com velocidade de 0,2 mm/min.	31
Figura 26- Curvas carga vs. deslocamento do punção para diferentes velocidades de ensaio (a) em aço P91 modificado e (b) em aço P92.....	32
Figura 27- Estojo com furo passante ajustado.....	33
Figura 28- Carga máxima de ensaio vs. taxa de deslocamento do punção para (a) aço P91 modificado e (b) aço P92 obtidos por SPT.....	35

Figura 29- Determinação das constantes experimentais para tensão limite de resistência a diferentes velocidades de ensaio para SPT através de (a) equação 4, e (b) equação 5.....	37
Figura 30- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para 2 métodos de determinação de $\sigma_{L.R.}$	39
Figura 31- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para 2 métodos de determinação de alongamento.	41
Figura 32- Diferentes técnicas para determinação de P_y no ensaio de SPT.....	42
Figura 33- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para diferentes métodos de determinação de tensão limite de escoamento.	43
Figura 34- Análise da fratura CP após ensaio de SPT: (a) região de fratura e (b) detalhamento da trinca.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço SAE 4340, dado pelo fabricante (em % de peso).....	21
Tabela 2- Composição química do aço ASTM A335 P91 Modificado (em % de peso).	22
Tabela 3- Composição química do aço ASTM A335 P92 (em % de peso).....	22
Tabela 4- Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P91 Modificado.....	22
Tabela 5- Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P92.	23
Tabela 6- Valores de P_m e d_m para aços P91 e P92 por ensaio de SPT a diferentes velocidades.	33
Tabela 7- Resultados de tensão limite de resistência por SPT para aço P91 e P92.....	38
Tabela 8- Sumário de resultados de alongamento por SPT para aços P91 e P92.....	40
Tabela 9- Sumário de resultados tensão limite de escoamento por SPT para aços P91 e P92.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SPT – *Small Punched Test*

CP – Corpo de Prova

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ICT – *Impression Creep Test*

SRT – *Small Ring Test*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Regulamentadora Brasileira

EGL – Comprimento Útil Equivalente

SSUT – *Sub-size Uniaxial Test*

CEN – *European Committee for Standardization*

CWA – *CEN Workshop Agreement*

CNC – Comando Numérico Computadorizado

Capítulo 1

Introdução

O conhecimento sobre as propriedades mecânicas dos materiais metálicos é essencial para a aplicação ou mesmo para o projeto de um determinado componente. Essas propriedades são quantificadas através da execução de ensaios mecânicos, que visam coletar informações sobre a resposta mecânica de materiais com diferentes composições químicas e, dessa forma, gerar bases de dados que servem como padrões de comportamento dos materiais e auxiliam na seleção de materiais para diversas aplicações na indústria.

Um dos ensaios mecânicos mais utilizados com este propósito é o ensaio de tração, através do qual pode-se obter características do material ensaiado como a tensão limite de escoamento e a tensão limite de resistência. Para a realização de ensaios como os de tração é necessário que haja uma disponibilidade de volume de material relativamente grande para o levantamento dos padrões de engenharia. Além disso, este tipo de ensaio é normalmente realizado até que ocorra a fratura do corpo de prova (CP), inutilizando-o. Por esse motivo são considerados ensaios destrutivos, característica que limita a aplicação deste tipo de ensaio para a determinação, por exemplo, de perda de resistência mecânica de equipamentos em operação. (CALLISTER, 2002)

Nesse contexto, ensaios em miniatura como o *Small Punched Test* (SPT), vêm sendo desenvolvidos para avaliar diferentes propriedades mecânicas de materiais metálicos utilizando um volume de material tão reduzido que podem ser classificados como ensaios não destrutivos. As técnicas de ensaio em miniatura permitem determinar diferentes propriedades mecânicas como tensão de ruptura, tensão limite de resistência, tenacidade à fratura e resistência à fluência a partir de pequenas amostras retiradas do material que se deseja testar. (GARCIA *et al.*, 2014)

1.2 Motivação e Justificativa

Diante da crescente necessidade de otimização de custos durante o projeto e desenvolvimento de equipamentos ou componentes mecânicos, o uso de métodos não destrutivos na caracterização dos materiais surge como uma necessidade. Outro aspecto

relevante para o engenheiro mecânico é conhecer a vida útil dos equipamentos em serviço. A necessidade de grande volume de material para realizar o ensaio de tração convencional implica na parada do equipamento durante a retirada de material ou até mesmo na sua inutilização devido ao grande volume de material retirado, o que torna esta abordagem inviável.

Situações como a descrita tornam a realização de ensaios em miniatura vantajosa, pois é possível realizar o teste retirando uma quantidade tão pequena de material do equipamento que não provoca sua inutilização. Pode-se assim, conhecer a influência da degradação do tempo de uso no material através da comparação dos resultados dos testes como SPT com resultados de testes convencionais de tração realizados em materiais de mesma composição química que não tenham sido expostos a este tipo de degradação. Esses ensaios também são aplicados na determinação das propriedades mecânicas das diferentes regiões de juntas soldas, que se tornam, em certos casos, regiões de fragilidade do componente fabricado.

O *Small Punched Test* permite que se tenha segurança na tomada de decisões sobre continuação de operação, substituição, ou manutenção do equipamento. A análise das propriedades mecânicas dos materiais metálicos através da aplicação do SPT melhora a confiabilidade do componente, além de ajudar a entender a vida útil do componente e definir intervalos de inspeção/reparo/manutenção com segurança.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar as propriedades mecânicas de aço Cr-Mo, a saber, o aço ASTM P91 modificado e o aço ASTM P92, através do *Small Punched Test*, e tentar correlacionar os dados com os obtidos por meio de ensaios convencionais de tração.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

Um dispositivo para realização dos ensaios em miniatura foi projetado e confeccionado. O dispositivo consiste em uma matriz inferior e um estojo para encaixe do corpo de prova, um punção por aonde é aplicada uma carga de compressão no corpo de prova e uma matriz superior que serve como guia do punção. Posteriormente, dois aços foram testados pela forma convencional de ensaio de tração e pelo método do SPT. Após, os

resultados comparados a fim de verificar a eficiência destas técnicas para a determinação dos valores de propriedades mecânicas. Complementarmente foi analisado como a velocidade de ensaio, determinada pela velocidade deslocamento do punção, influencia nos resultados obtidos.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está subdividido em 5 capítulos. O capítulo 1 consiste numa descrição geral do escopo do trabalho e objetivos, bem como introduzir o assunto. O capítulo 2 traz um apanhado geral de informações técnicas e procedimentos de realização de ensaios de tração convencional e de miniatura com base nas bibliografias existentes sobre os temas. O capítulo 3 descreve a parte de método experimental do trabalho apresentando os materiais utilizados, a metodologia de fabricação dos corpos de prova e do dispositivo necessário para a realização do ensaio. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios realizados e discussão a respeito dos mesmos. O capítulo 5 tem como objetivo concluir o trabalho com base em todas as etapas de realização do mesmo. Ao final, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema de *Small Punched Test* e as referências bibliográficas utilizadas na preparação do trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos

Os materiais metálicos são largamente utilizados na indústria metalmeccânica, perdurando por séculos como o principal componente para aplicação em estruturas e componentes submetidos a diferentes solicitações mecânicas. Isso ocorre devido às diversas composições químicas e microestruturas que esses materiais podem apresentar, o que os diferenciam de outros tipos de materiais como os cerâmicos ou poliméricos (CALLISTER, 2002).

O tipo de estrutura cristalina, a uma determinada temperatura, em um metal sólido é responsável pelas características intrínsecas, conhecidas como propriedades do metal, como condutividade térmica elétrica e ductilidade. O estudo das propriedades mecânicas visa analisar o tipo e intensidade de resposta do material diante da aplicação de uma carga, que estão associadas à habilidade de cada material em resistir ou transmitir esforços mecânicos sem se romper ou se deformar incontrolavelmente (CALLISTER, 2002).

Conforme descrito em VAN VLACK (1970) a propriedade mecânica considerada mais importante é a resistência mecânica. Através de sua análise é possível determinar se o material será capaz de resistir à ação de determinados tipos de esforços, como a tração e a compressão (resistência à tração e resistência à compressão), por exemplo. Há também a elasticidade, que corresponde à capacidade que o material tem de se deformar quando submetido a um esforço e de retornar à forma original quando o esforço termina, caracterizando uma deformação elástica. Tal comportamento pode ser observado no diagrama tensão vs. deformação do material, gerado a partir de ensaio de tração, no qual pode-se verificar uma região de comportamento elástico que obedece a Lei de Hooke, onde a constante de proporcionalidade E é conhecida como módulo de elasticidade, ou módulo de Young, conforme apresenta a equação 1.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Equação 1

Onde: σ = Tensão

E = Módulo de Young

ε = Deformação

Após o fim da deformação elástica do metal, tem início a chamada zona plástica, na qual não existe uma linearidade entre tensão e deformação do material. A transição entre zona elástica e plástica é verificada pelo aumento não-linear da deformação com a variação da tensão correspondente. Este fenômeno é conhecido como escoamento (SOUZA, 1982). Esse ponto no gráfico é definido como ponto de escoamento ou limite de proporcionalidade. Geralmente em projetos mecânicos é desejável que o material se deforme apenas em regime elástico, por isso a importância de se conhecer esta propriedade.

A deformação que permanece no corpo após o esforço ser removido é chamada de deformação plástica. Ductilidade é apresentada como a medida da deformação plástica. Outra propriedade importante é a tenacidade, definida em CALLISTER (2002) como capacidade do material absorver energia até sua fratura. Tais características podem ser avaliadas através de métodos de ensaios como o de tração convencional.

2.2 Ensaio Mecânico de Tração

As propriedades mecânicas podem ser verificadas através de experimentos normatizados realizados em laboratórios. O ensaio de tração convencional é o mais utilizado principalmente devido à facilidade de execução e repetitividade de resultados, sendo classificado como ensaio destrutivo, pois resulta na inutilização parcial ou total da peça ou componente (CALLISTER, 2002).

De acordo com a norma E8 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) o ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial nas extremidades de um corpo de prova com dimensões padronizadas. A carga crescente deforma o CP normalmente até a fratura. A deformação medida no CP é registrada por meio de um registrador gráfico ou computador e mostrada através de uma curva de comportamento tensão-deformação do material, que relaciona a carga aplicada no corpo de prova com a área da seção transversal inicial do CP, como mostra a equação 2.

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

Equação 2

Onde: σ = Tensão

F = Carga aplicada

A = Área da seção transversal

A curva tensão vs. deformação é utilizada como base para a determinação de diferentes propriedades mecânicas dos materiais, como o limite elástico ou de proporcionalidade, definido como a maior tensão que o material pode suportar sem que haja deformação permanente. Segundo SOUZA (1982), é chamada de zona elástica, onde a deformação é proporcional ao alongamento e corresponde ao início da curva até o ponto P da Figura 1.

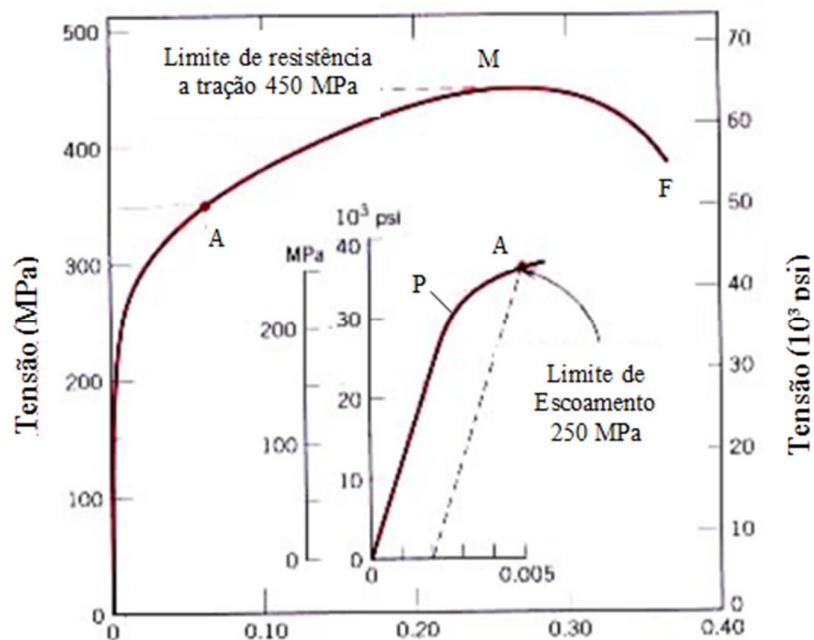


Figura 1- Comportamento tensão-deformação para um corpo de prova de latão.

(CALLISTER, 2002)

Em alguns casos, a tensão referente ao ponto P da figura 1 não pode ser determinado com precisão. Por isso, de acordo com CALLISTER, 2002, foi estabelecida uma convenção traçando uma linha paralela ao regime elástico do material apresentado na curva (Figura 1) considerando uma pré-deformação específica, geralmente de 0,002. A interseção dessa linha com a curva tensão vs. deformação (ponto A da figura 1) é chamada de tensão limite de escoamento ou resistência ao escoamento.

Após o escoamento, a curva entra no chamado regime plástico, caracterizado pela região onde a deformação deixa de apresentar uma relação linear com a tensão e há deformação plástica. Nessa região, a tensão necessária para continuar o processo de deformação plástica em materiais metálicos aumenta até alcançar um valor máximo, apresentado na Figura 1, valor conhecido como tensão limite de resistência, que corresponde à tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura sob tração numa típica curva tensão-deformação de engenharia.

De acordo com SOUZA (1982), a deformação medida é uniforme pelo menos até ser atingida a carga máxima do ensaio e, por isso, é possível medir satisfatoriamente a resistência do material e a variação dessa deformação em função da tensão aplicada. A partir desse ponto, a tensão diminui até a fratura do material (ponto F - Figura 1), sendo a tensão que corresponde à fratura chamada de tensão limite de ruptura. A partir do ponto máximo do diagrama, para determinados materiais, um “pescoço” começa a se formar em um ponto determinado do CP, onde a deformação fica concentrada. Esse fenômeno é conhecido por estricção ou empescoamento, região onde ocorre a fratura.

As correlações entre tensão e deformação mostradas na Figura 1 são baseadas na seção transversal inicial do CP. Há também um método que considera os valores instantâneos da seção reta sobre a qual a deformação está ocorrendo (CALLISTER, 2002). Tal método é conhecido como curva verdadeira de tensão vs. deformação. (Figura 2).

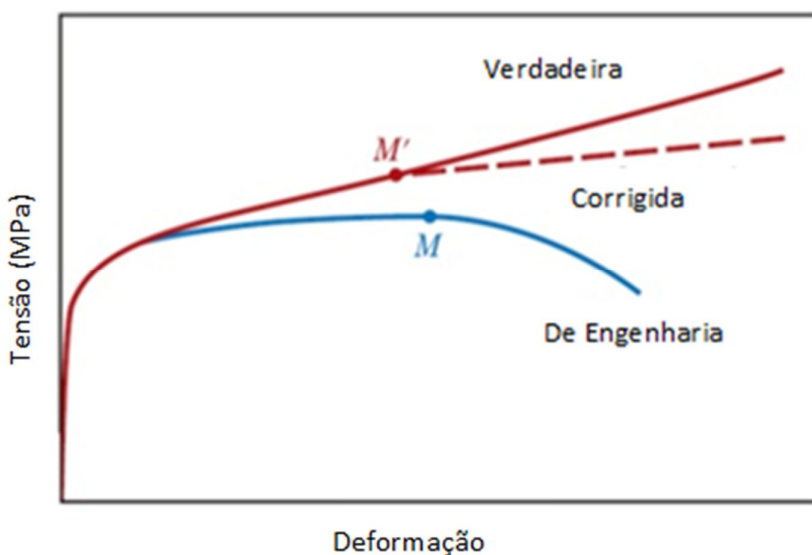


Figura 2- Curva de tração de engenharia vs. curva verdadeira de tração. (CALLISTER, 2002)

A velocidade de ensaio é definida pela norma ASTM E8 em termos de taxa de deformação ou taxa de tensão do corpo de prova. O método que avalia a taxa de deformação mais usual é especificado em termos de mm/ min ou [in./ min], que foi o escolhido para a realização dos experimentos deste trabalho.

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6892 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define dimensões e geometrias padrões para os corpos de prova para ensaio de tração convencional. O comprimento útil do CP consiste na região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material e a cabeça é destinada a fixação na máquina de ensaio de tração e pode-se encontrar CP com seção circular ou retangular, mostrados na Figura 3.

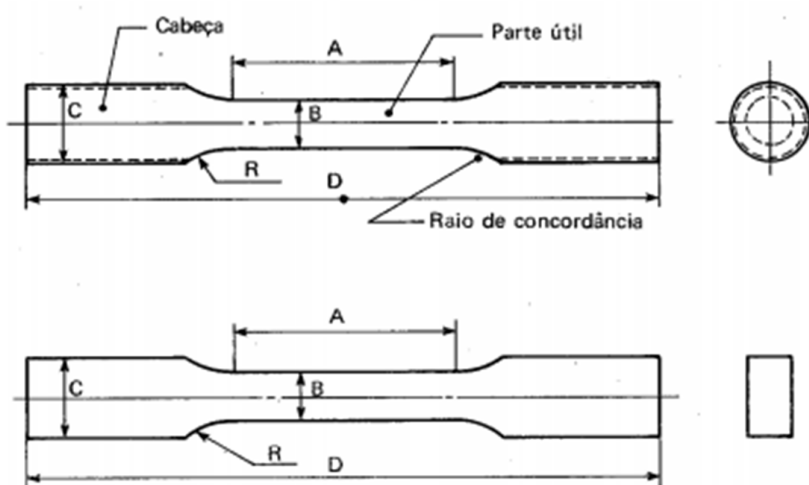


Figura 3- Corpos de Prova de Ensaio de Tração Convencional. (SOUZA, 1982)

As dimensões de A, B, C, D e R são padronizadas tanto pela norma brasileira quanto pelas normas ASTM E8 e ASTM A370. Essas normas apresentam opções de ensaio de tração com corpo de prova com dimensões reduzidas, que são proporcionais ao CP do ensaio convencional, porém com suas dimensões reduzidas a metade das utilizadas como padrão convencional. Tal variação é realizada aplicando-se os mesmos princípios e técnicas utilizados em ensaios de tração convencional e tem o objetivo de viabilizar a avaliação de equipamentos em serviço.

2.3 Ensaios Mecânicos em Miniatura

Os ensaios mecânicos em miniatura estão sendo desenvolvidos como uma alternativa para conhecimento do comportamento mecânico de metais utilizando corpos de prova com diferentes geometrias e que têm em comum o volume de material utilizado consideravelmente menor que os ensaios mecânicos convencionais e por isso, segundo HYDE *et al.* (2010), são classificados como ensaios não destrutivos. Estes ensaios também representam redução de custos na realização do ensaio devido ao pequeno volume de material utilizado (MANAHAN *et al.*, 1981). São apresentadas na Figura 4 as geometrias utilizadas em diferentes tipos de ensaios em miniatura.

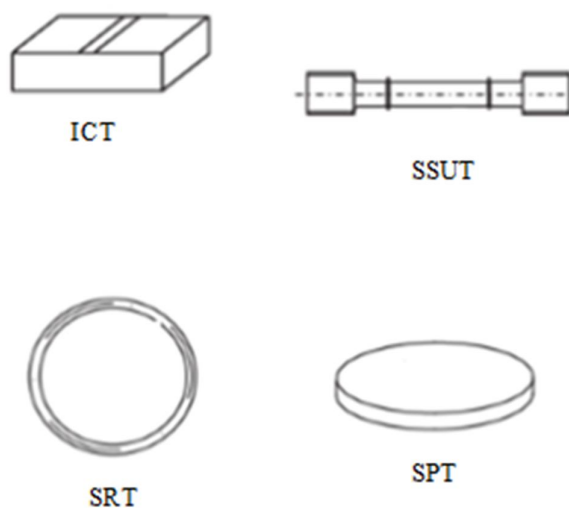


Figura 4- Corpos de prova de ensaio mecânicos em miniatura. ICT- *Impression Creep Test*; SSUT- *Sub-size Uniaxial Test*; SRT- *Small Ring Test*; SPT- *Small Punched Test* (HYDE *et al.*, 2010).

2.3.1 *Small Punched Test (SPT)*

A primeira apresentação técnica do *Small Punched Test* foi elaborada por MANAHAN *et al.* (1981), que utilizaram o método para obter as propriedades mecânicas dos materiais de componentes da indústria nuclear e avaliar a influência de diferentes condições de radiação na degradação dos equipamentos. Durante o desenvolvimento da técnica, os autores se referiam ao ensaio como *Miniaturized Disk Bend Test* devido à forma de discos de 3,0 mm de diâmetro com 0,25 mm de espessura. O ensaio consistia na adaptação de uma máquina de tração convencional para encaixe de um dispositivo com um punção para

compressão uniaxial do corpo de prova em formato de disco (Figura 5). A partir desse ensaio foi possível obter uma curva referente ao deslocamento do punção vs. carga aplicada no CP.

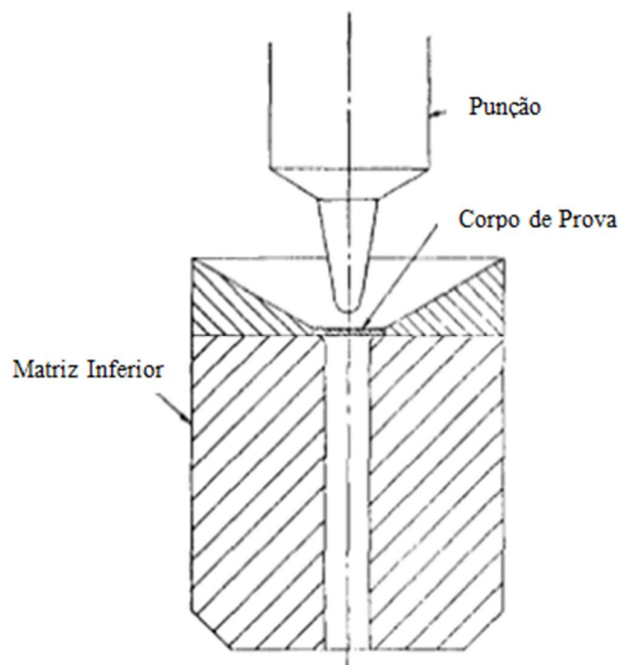


Figura 5- Esquema de Miniaturized Disk Bend Test (MANAHAN *et al.*, 1981).

Esta técnica tem sido utilizada desde então por autores como CONTRERAS *et al.* (2009) para estimar diversas propriedades mecânicas como influência da temperatura na transição dúctil-frágil em ligas metálicas, tensão limite de resistência, módulo de elasticidade, propriedades de fluência e até mesmo para caracterizar a zona termicamente afetada (ZTA) de juntas soldadas, entre outras.

Com o objetivo de criar um padrão na indústria, uma metodologia de teste foi desenvolvida pela Comissão Europeia de Normalização (CEN) através do documento CWA 15627:2006 que representa um código de práticas para a realização do SPT, apresentando recomendações de características geométricas dos corpos de prova, parâmetros de ensaio e análise dos dados obtidos no mesmo. Este código de práticas descreve o SPT como um ensaio em que se aplica uma força de modo uniaxial por um punção em um pequeno corpo de prova em formato de disco a fim de analisar seu comportamento à carga aplicada.

A Figura 6 apresenta um esquema do dispositivo de SPT utilizado por CONTRERAS *et al.* (2009), onde o corpo de prova é encaixado na matriz inferior. O punção infere uma carga na face superior e região central do CP. A carga é transmitida ao punção pela matriz superior.

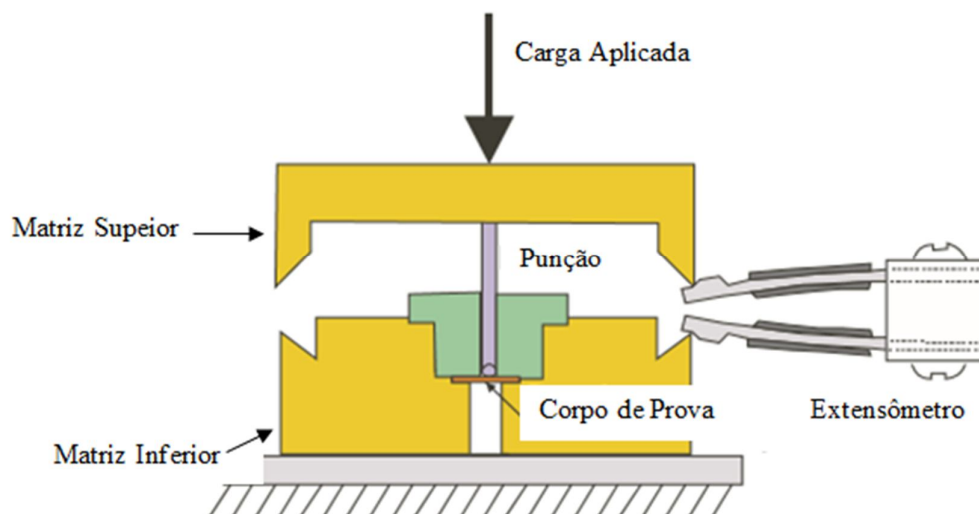


Figura 6- Representação esquemática do equipamento de SPT (CONTRERAS *et al.*, 2009).

Extensômetro, *strain gauging* ou outros métodos de determinação do deslocamento do punção de forma contínua são utilizados na medição da deflexão do disco em conformidade com o código de boas práticas da CEN. Como alternativa, o deslocamento do punção pode ser registrado continuamente durante a realização do ensaio.

Atualmente, os corpos de prova (Figura 7) possuem as dimensões de diâmetro (D) de 8,0 mm e espessura (t_0) de 0,5 mm, o que atende os requisitos geométricos da CWA 15627:2006. A norma apresenta também a possibilidade de utilizar a amostra com formato retangular, e uma variação na espessura da mesma com valores entre 0,2 e 0,6 mm.



Figura 7- Geometria padrão de amostras para ensaio de SPT (HYDE & SUN, 2011).

BAIK *et al.* (1986) identificaram na curva carga-deslocamento quatro fases de deformação mostradas na figura 8. Segundo os autores, a primeira região (I) corresponde à flexão elástica durante a qual toda a amostra sofre deformação elástica. Na segunda região (II) ocorre a deformação plástica, onde o volume de plasticidade que surge no centro do CP, na zona de contato com o punção, aumenta progressivamente na direção da espessura e na

direção radial. A terceira região (III) corresponde ao alongamento de membrana, que ocorre devido ao deslizamento das camadas do corpo de prova e permanece na maior parte do ensaio, e está associado a uma tensão de membrana. WANG *et al.* (2008) relataram que ao aproximar-se da carga máxima, a inclinação da curva começa a diminuir à medida que o mecanismo de falha (em escala microscópica) começa a se desenvolver (estiramento e fissuras internas), dando origem à quarta região (IV), que corresponde ao fenômeno de estiramento e ruptura da amostra. A Figura 8 mostra a representação típica da carga vs. deslocamento do punção de uma liga metálica dúctil com as diferentes regiões delimitadas.

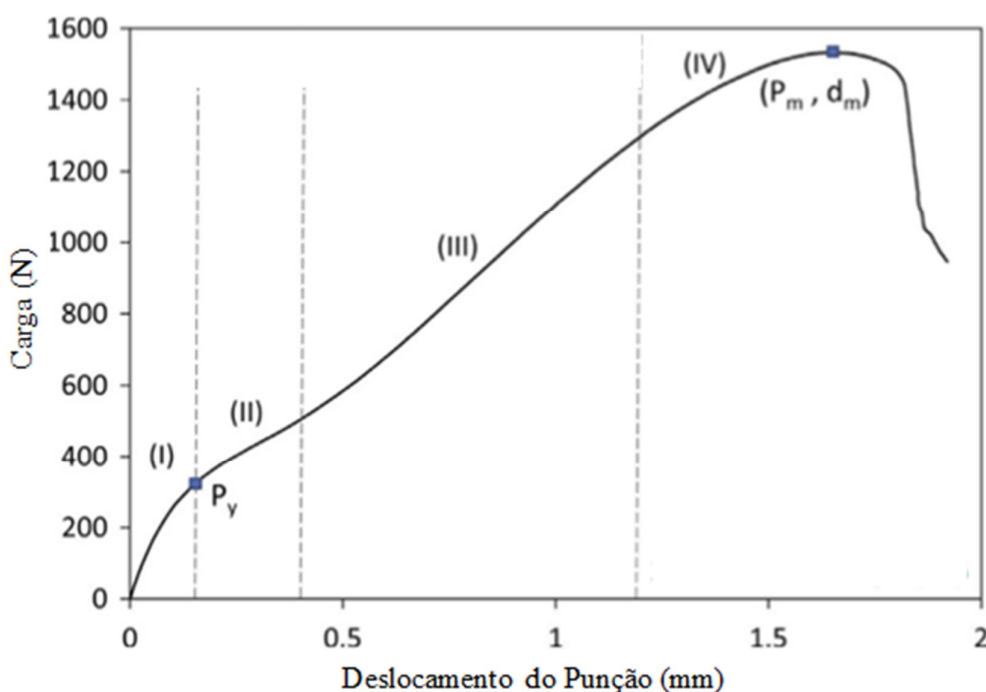


Figura 8- Curva obtida através do ensaio de SPT para um material dúctil em temperatura ambiente (GARCIA *et al.*, 2014)

Alguns autores de pesquisas mais atuais como PRAKASH & ARUNKUMAR (2015) subdividem as fases de forma diferente do que é normalmente encontrado em estudos sobre o assunto. Isso se dá na tentativa de dividir a fase de membrana (Região III) da Figura 8 em duas partes, região de membrana e região de instabilidade plástica, respectivamente região III e IV da Figura 9. Esta divisão faz com que o ponto de carga máxima do ensaio e a ruptura do corpo de prova fiquem localizados na região V.

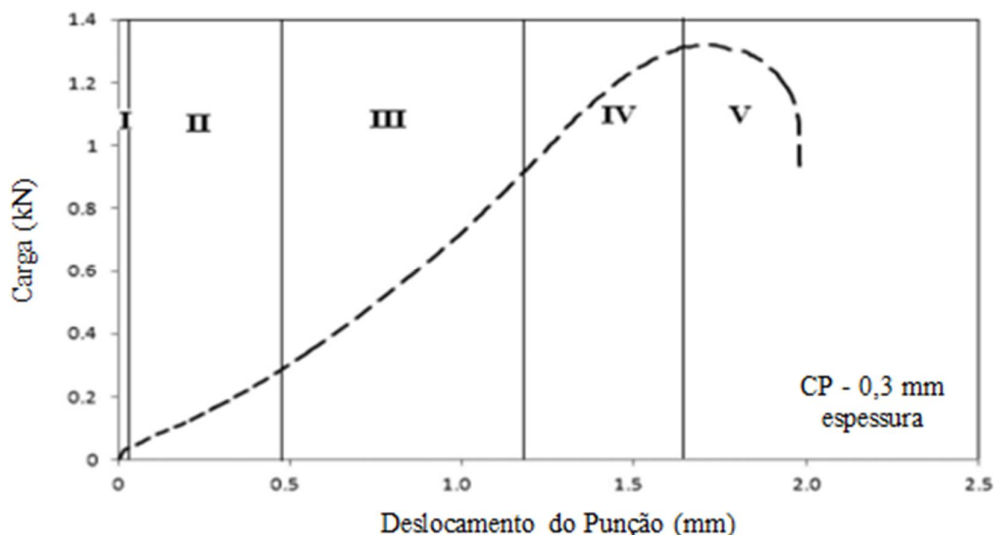


Figura 9- Curva obtida através do ensaio de SPT (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015).

Através do uso de correlações analíticas e empíricas estabelecidas entre o SPT e resultados de teste de tração convencional, algumas propriedades mecânicas podem ser extraídas. Com relação à determinação da carga/tensão limite de escoamento, MAO *et al.* (1987) relacionaram a mudança do declive da curva entre a região I e II do gráfico pelo cruzamento entre duas tangentes e chamando a carga associada a este ponto de (P_y), que corresponde à carga de início da deformação plástica e é usada na correlação com a tensão limite de escoamento ($\sigma_{L.E.}$). O código de práticas do CEN descreve o ponto (P_y) como a projeção vertical da interseção entre as tangentes proposto anteriormente por MAO *et al.* (1987). GARCIA *et al.* (2009) descreveram a carga (P_y) como o ponto de interseção entre a curva do SPT e uma linha reta paralela a curva inicial do gráfico com um deslocamento de ($t/10$), metodologia semelhante à aplicada em ensaios de tração convencionais, e CONTRERAS *et al.* (2008) com deslocamento de $t/100$, sendo t a espessura do CP. LACALLE *et al.* (2009) definem o ponto P_{y_inf} como o primeiro ponto de inflexão da região I do gráfico apresentado na Figura 10.

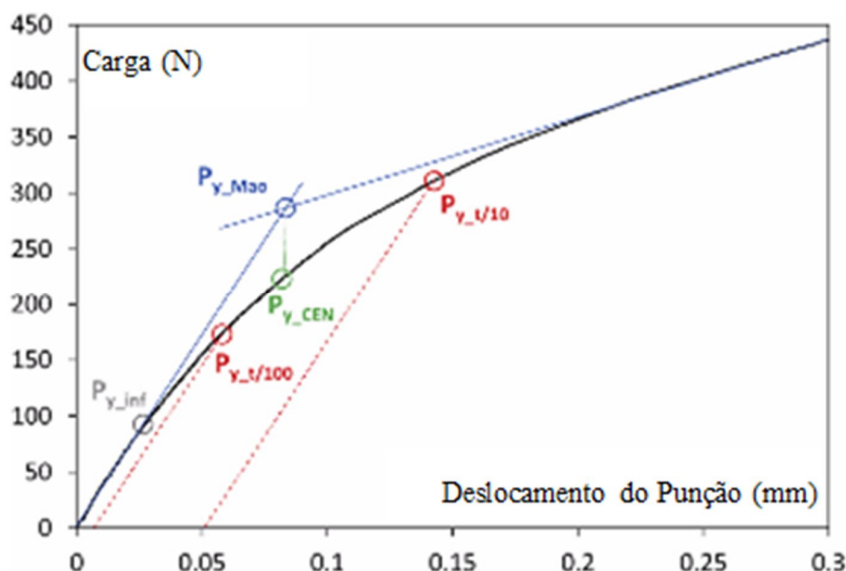


Figura 10- Diferentes formas de determinação de P_y (GARCIA *et al.*, 2009).

Os diferentes métodos para determinação da carga (P_y) implicam em diferentes correlações para a tensão limite de escoamento ($\sigma_{L.E.}$). Contudo, a equação utilizada nas diferentes propostas é a mesma (Equação 3) e depende da espessura inicial da amostra, onde as constantes de ensaio chamadas de α_1 e α_2 utilizadas nesta equação são determinadas experimentalmente e variam de acordo com o método utilizado e material a ser ensaiado. (GARCIA *et al.* 2009)

$$\sigma_{L.E.} = \alpha_1 * \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2 \quad \text{Equação 3}$$

Onde: α_1, α_2 , são constantes do ensaio

t = espessura inicial do CP

$\sigma_{L.E.}$ = tensão limite de escoamento

P_y = carga associada a tensão limite de escoamento

A carga máxima de ensaio (P_m) está relacionada com a tensão limite de resistência ($\sigma_{L.R.}$). Em GARCIA *et al.* (2014) são apresentadas as correlações desenvolvidas experimentalmente na determinação desta propriedade para uma série de materiais. Em geral, a equação utilizada para determinação da tensão limite de resistência é a Equação 4. Uma segunda forma de cálculo desta propriedade leva em consideração o deslocamento do punção

no ponto de carga máxima do ensaio (Equação 5). Para a tensão limite de resistência são utilizadas constantes de ensaio denominadas β que dependem da equação escolhida.

$$\sigma_{L.R.} = \beta_1 * \frac{P_m}{t^2} + \beta_2 \quad \text{Equação 4}$$

$$\sigma_{L.R.} = \beta_1' * \frac{P_m}{(t.d_m)} + \beta_2' \quad \text{Equação 5}$$

Onde: $\beta_1, \beta_2, \beta_1', \beta_2'$ são constantes do ensaio

t = espessura inicial do CP

$\sigma_{L.R.}$ = tensão limite de resistência

P_m = carga máxima do ensaio

d_m = deslocamento do punção no ponto de carga máxima

Existem duas correlações principais para determinar o alongamento (A) na literatura. FLEURY & HA (1998) propuseram uma equação em que o alongamento percentual do corpo de prova durante o ensaio depende do deslocamento do punção no ponto de carga máxima, enquanto que RODRIGUEZ *et al.* (2009) defendem que esta propriedade está relacionada não só com o deslocamento do punção no momento de carga máxima, como também com a espessura do CP utilizado. Ambas utilizam constantes de ensaio γ . As relações são apresentadas nas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$A = \gamma * d_m \quad \text{Equação 6}$$

$$A = \gamma' * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: γ e γ' são constantes do ensaio

t = espessura inicial do CP

A = alongamento (%)

d_m = deslocamento do punção no ponto de carga máxima

A norma CWA 15627 *Part B* define parâmetros de ensaio para SPT incluindo taxa de deslocamento do punção durante o ensaio. A Equação 8 apresenta uma estimativa para a taxa

de deslocamento do punção para a geometria recomendada pelo CEN. Em geral, recomenda-se uma taxa de deslocamento do punção (velocidade de punção) na faixa entre 0,2 - 2 mm/min, sendo a mais usual a de 0,2 mm/min.

$$v = \frac{\varepsilon_{max}}{1000} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: v = Taxa de deslocamento do punção (mm/min)

ε_{max} = Deformação máxima (s^{-1})

2.3.2 Impression Creep Test (ICT)

A técnica de ICT foi desenvolvida com o objetivo de apresentar uma alternativa aos ensaios de fluência convencionais e foi publicada pela primeira vez por CHU *et al.* (1977). As dimensões standard para estes corpos de prova foram estudadas por diversos autores. De acordo com HYDE & SUN (2001), duas geometrias podem ser utilizadas como corpos de prova para este ensaio (seção transversal circular e retangular), pois ambas possuem a capacidade de gerar dados de fluência. Recomendam-se as seguintes dimensões para a realização do ensaio: w ou $\phi=10$ mm e $h=2.5$ mm para um punção com $d=1$ mm. Quando a amostra de material que se deseja analisar é insuficiente para a obtenção de CP com estas dimensões, podem ser utilizados corpos de prova com w ou $\phi=8$ mm e $h=2$ mm para um punção com $d=0.8$ mm, como mostra a Figura 11.

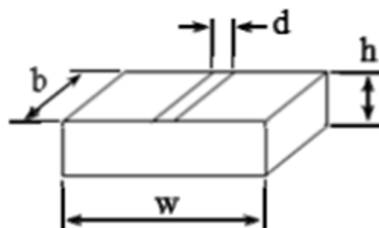


Figura 11- Corpo de prova retangular para ICT. (BRETT *et al.*, 2014)

Seguindo o pressuposto geral dos ensaios em miniatura, o ICT possibilita a caracterização dos materiais metálicos com relação à fluência a partir de amostras de materiais muito pequenas. O ensaio consiste na aplicação de uma carga constante através de

um punção de ponta plana em uma amostra de superfície plana a temperatura elevada. A geometria dos punções (Figura 12) também pode variar.

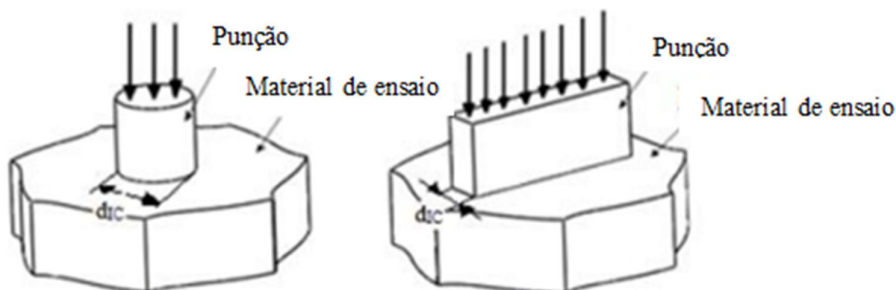


Figura 12- Geometrias de punção para ICT (HYDE *et al.*, 2010).

A curva de fluência é determinada através da medição da impressão da profundidade de penetração do punção no CP em condições de temperatura elevada com carga constante. Obtém-se uma curva deslocamento (profundidade de penetração) vs. tempo de ensaio a carregamento constante como resultado típico do ensaio (Figura 13). Após a obtenção da curva é necessário realizar uma correlação com o ensaio convencional para obter as taxas mínimas de fluência.

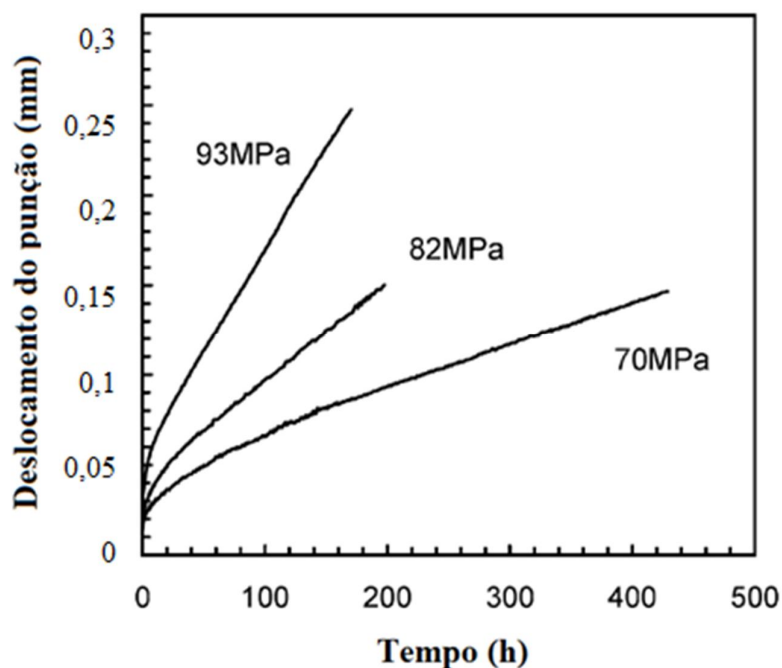


Figura 13- Curva típica de ICT para ensaios a diferentes tensões (HYDE & SUN, 2009).

2.3.3 Small Ring Test (SRT)

A técnica de SRT consiste numa variação do *Impression Creep Test*, com o mesmo propósito de medir a resistência à fluência dos materiais. É o mais recente método de ensaios em miniatura sendo patenteada por HYDE *et al.* (2011), que o descreve como um ensaio com potencial de quantificar várias propriedades mecânicas dos materiais, apesar de atualmente ter seu desenvolvimento focado na determinação da propriedade de resistência à fluência. A geometria padrão dos corpos de prova para o SRT é apresentada na Figura 14.



Figura 14- Geometrias de corpo de prova para SRT (HYDE *et al.*, 2014)

As dimensões recomendadas para os corpos de prova são raio $R_{ST}=6\text{mm}$, espessura radial $b_{0ST}=2\text{mm}$ e espessura axial $d_{ST}=1\text{mm}$ para CP circular e raio $R_{ST}=5\text{-}10\text{mm}$, espessura no sentido radial $b_{0ST}=2\text{mm}$ e espessura no sentido axial $d_{ST}=1\text{mm}$ para CP elíptico. O ensaio consiste em aplicar uma carga de tração ou compressão em pontos diametralmente opostos e paralelos ao eixo do CP que tem formato de anel circular ou elíptico, como mostra a Figura 14. De acordo com HYDE & SUN (2010), a geometria elíptica é mais flexível e, por isso, possibilita a correlação de pequenas tensões com deformações relativamente grandes. Esta característica é especialmente desejável para a realização de ensaios de fluência. Como resultado do ensaio é possível obter uma curva deslocamento vs. tempo de duração de ensaio à temperatura constante sob diferentes valores de carregamento aplicado na área da seção transversal do CP, como apresenta a Figura 15.

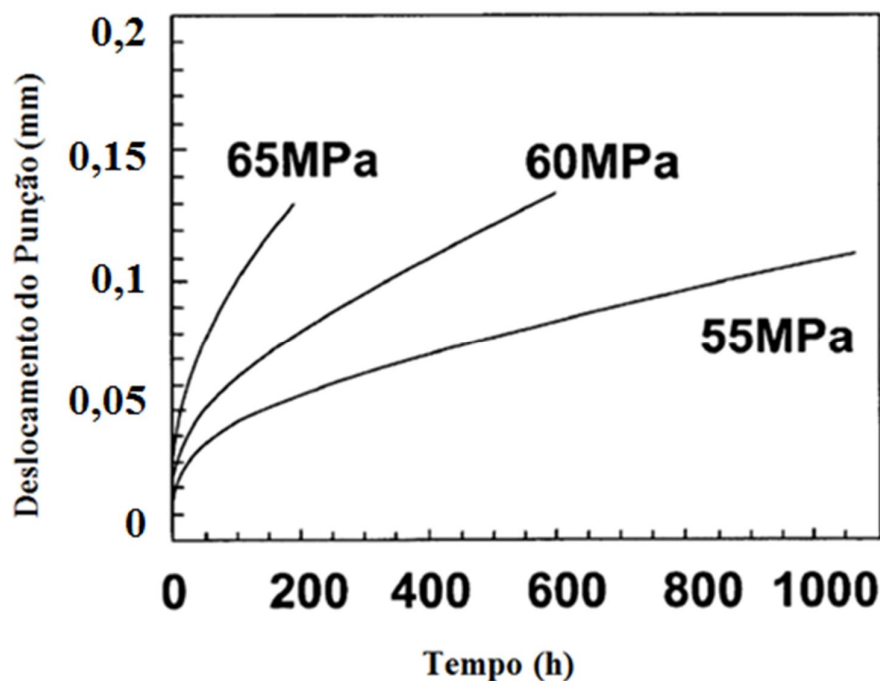


Figura 15- Curva deformação x tempo para aço P91 a 650°C com CP circular (HYDE *et al.*, 2011).

2.3.4 *Sub-size Uniaxial Test (SSUT)*

Apesar de existirem CP de ensaio de tração normalizados para ensaios convencionais e reduzidos, desenvolveu-se uma forma de ensaio com um corpo de prova semelhante aos dos ensaios convencionais de tração, porém com dimensões menores que as dimensões indicadas pelas normas ASTM E8 e A-370 para CP reduzido. O intuito da confecção desses CPs era minimizar a degradação imposta ao equipamento com extração da amostra de material.

O princípio de funcionamento é semelhante ao de ensaio de tração convencional. PANAYOTU *et al.* (1986) utilizaram este tipo de ensaio para estudar os materiais que estavam sujeitos a condições de irradiação e correlacionou os resultados com os obtidos através do método convencional de forma satisfatória. Enquanto que o comprimento útil para corpos de prova reduzido indicado na ASTM E8 é de 32 mm, o comprimento útil equivalente (EGL) do corpo de prova do SSUT é de 5-12 mm. A Figura 16 mostra a comparação de tamanho entre um corpo de prova de SSUT, um de SPT e uma moeda.

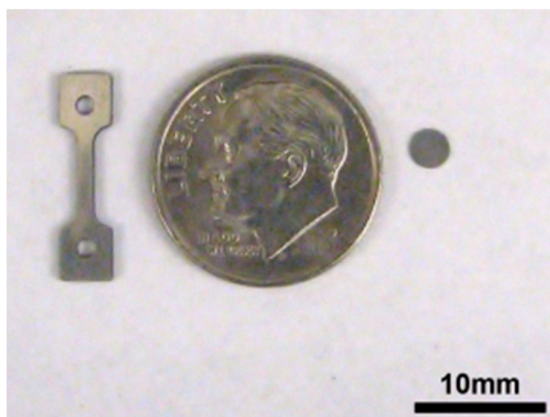


Figura 16- Comparação entre corpo de prova de Sub-size Uniaxial Test (SSUT), uma moeda e CP para SPT (RABENBERG, 2012)

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Para realizar o procedimento experimental de *Small Punched Test* foram necessárias algumas etapas de preparação como: projeto e usinagem do sistema de adaptação, confecção das amostras e posteriormente, a realização do ensaio, coleta de dados e análise dos resultados. Este capítulo descreve os materiais utilizados, equipamentos e métodos que foram utilizados neste projeto.

3.1 Materiais

O material utilizado para as matrizes (superior e inferior) do dispositivo, bem como para o punção foi o aço SAE 4340, que atende ao requisito de dureza (superior a 55 HRc) da norma *CEN Workshop Agreement (CWA) 15627 Part B* para garantir que não haja deformação plástica no punção. Foi utilizado um tarugo de duas polegadas de diâmetro de aço SAE 4340 como material base para o dispositivo, cuja composição química está apresentada na Tabela 1, com tratamento térmico de recozimento e dureza de 28 HRc, conforme informado pelo fabricante. A dureza do material utilizado é inferior aos requisitos da norma, e o dispositivo foi projetado inicialmente como um teste por este motivo e posteriormente seria outro dispositivo com dureza mais elevada seria desenvolvido. Porém, ao realizar os ensaios, foi observado que os componentes do dispositivo e o punção não sofreram deformação plástica aparente e assim foi possível realizar todos os ensaios com o dispositivo inicial.

Tabela 1- Composição química do aço SAE 4340, dado pelo fabricante (em % de peso).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	(em balanço)
0,39	0,72	0,25	0,75	1,72	0,24	
Co	Al	Cu	P	V	S	
0,01	0,050	0,04	0,010	0,01	0,025	

Foram realizados ensaios com dois materiais distintos a fim de obter maior número de dados para comprovar a eficácia do SPT. Os corpos de prova foram produzidos a partir de tubos de aço ASTM P91 modificado com diâmetro externo de 152 mm e espessura de parede de 18 mm, fabricado sem costura e na condição normalizado a 1070 °C e revenido a 770 °C, sendo ambos os tratamentos seguidos de resfriamento ao ar, e aço ASTM P92, com diâmetro externo de 323 mm e 60 mm de espessura de parede. As composições químicas dos materiais estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2- Composição química do aço ASTM A335 P91 Modificado (em % de peso).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
0,108	0,33	0,53	0,013	0,002	0,190	8,560	0,300
Nb	As	Sn	Ti	V	N	Al	Mo
0,067	0,006	0,150	0,003	0,221	0,053	0,012	0,870

Tabela 3- Composição química do aço ASTM A335 P92 (em % de peso).

C	V	Mn	Ti	Nb	W	Cr	Ni	Mo
0,11	0,23	0,17	0,18	0,10	1,62	9,62	0,10	0,50

As Tabelas 4 e 5 mostram as propriedades mecânicas dos materiais obtidas de formas distintas: através das informações contidas na norma A335, pelos dados fornecidos pelo fabricante e por resultados experimentais de ensaios de tração convencional, a temperatura ambiente.

Tabela 4- Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P91 Modificado.

	$\sigma_{L.E.}$(MPa)	$\sigma_{L.R.}$(MPa)	Alongamento (%)
Norma ASTM A335 P91	> 415	> 585	> 19
Fabricante	638	724	20
Ensaio de Tração Convencional	580 ± 14	734 ± 3	24,5± 2,7

Tabela 5- Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P92.

	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	Alongamento (%)
Norma ASTM A335 P92	> 440	>620	20
Fabricante	516	688	25
Ensaio de Tração Convencional	485	675	26,9

3.2 Projeto e fabricação do dispositivo

Para realização dos ensaios de *Small Puched* foi preciso desenvolver um aparato que garantisse a integridade do sistema, que encaixasse na máquina de tração do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ e que fixasse a amostra de forma que a mesma não se movimentasse durante o ensaio. O projeto do dispositivo foi realizado no software *SolidWorks* e o resultado é apresentado na Figura 17.

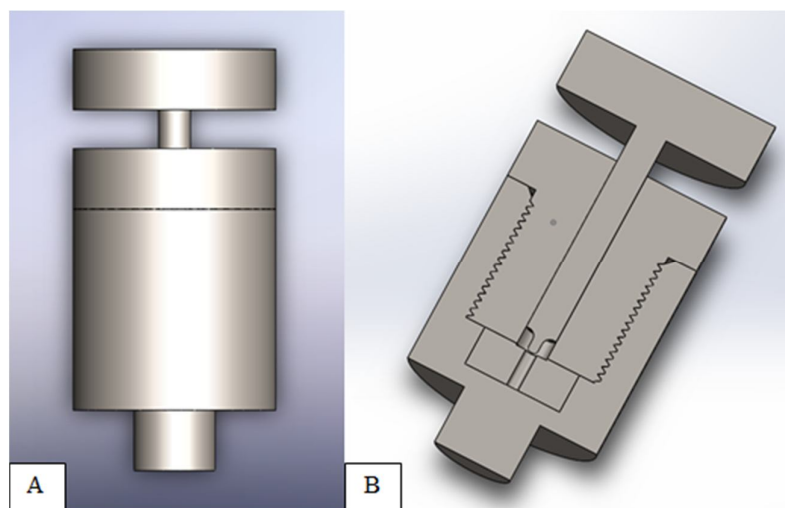


Figura 17- Projeto do Sistema de SPT (a) Vista frontal do sistema e (b) Vista em corte do sistema de SPT.

O sistema foi usinado no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do CEFET/RJ e na empresa Transcional, especializada em usinagem de precisão. Foram utilizados os equipamentos serra de fita de marca e modelo Diplomat DPT - 180 /300a, torno universal Nardini Mascote 350, fresadora-ferramenteira Diplomat FVF 2000 e furadeira de coluna Schulz FSC 32P Pratika. Ao final das operações obteve-se uma matriz inferior com

um ressalto para encaixe no equipamento para ensaio e uma matriz superior que se acopla à inferior através de uma rosca usinada nas peças. Foi desenvolvido também um estojo para acomodação do CP, para o caso de realizar o ensaio com amostras de outro diâmetro ou geometria, não tenha a necessidade de se usinar uma matriz inferior nova, sendo trocado somente o estojo. Os componentes do aparato são apresentados na Figura 18.

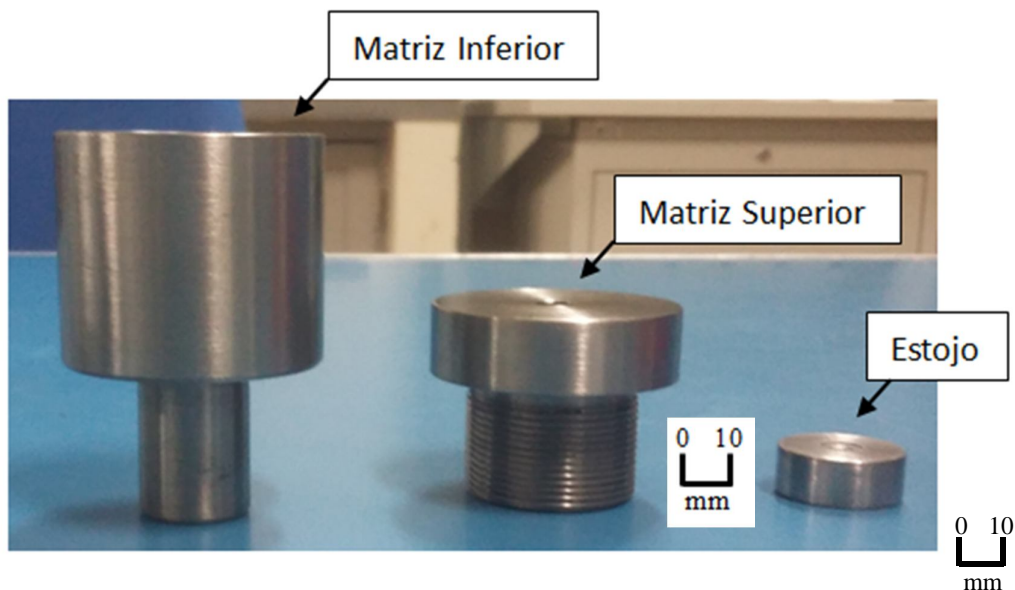


Figura 18- Componentes do sistema de *Small Punched Test*.

Com relação ao punção, a parte que entra em contato com a amostra deve possuir raio de 1,25 mm caso o diâmetro escolhido do CP seja de 8,0 mm, segundo especificações da norma CWA 15627 *Part B*. Para que não haja uma impressão cônica sobre a amostra este diâmetro deve ser conservado por pelo menos 4,0 mm no comprimento do punção. Em razão desta particularidade, o torno de Comando Numérico Computadorizado (CNC) Romi Centur 30D do Laboratório de Automação em Usinagem do CEFET/RJ foi utilizado para esta operação, por permitir maior precisão na obtenção da geometria final. A Figura 19 mostra o punção após a usinagem.



Figura 19- Punção desenvolvido para os ensaios de SPT.

3.3 Preparação das amostras

Para a confecção dos corpos de prova do ensaio de *Small Punched* peças cilíndricas de aço P91 e P92 foram usinadas com diâmetro de 8,0 mm necessário para este experimento (Figura 20a). Para obter a espessura (t) igual a 0,5 mm foi realizada operação de corte em uma máquina de corte de precisão a baixa velocidade e carga controlada modelo Minitom da marca Struers (Figura 20b) localizada no Laboratório de Materiais (LAMAT).

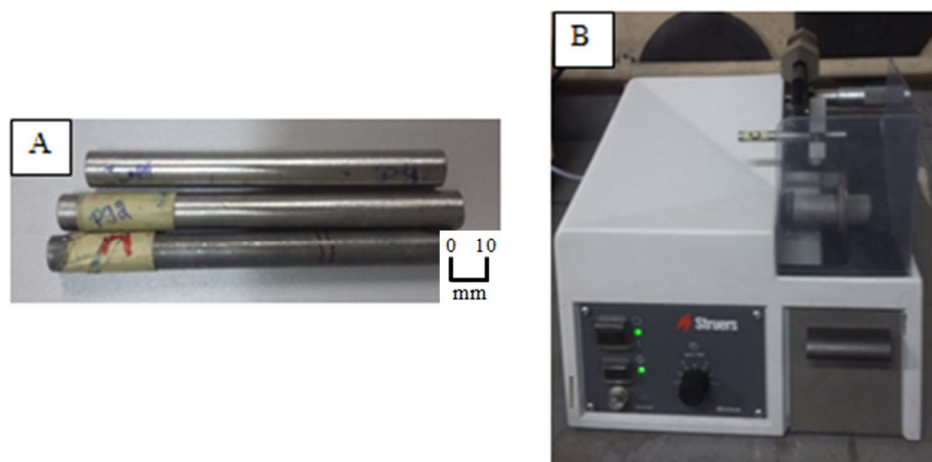


Figura 20- (a) Peças cilíndricas de aço P91 e P92 e (b) cortadora metalográfica Minitom.

Após o corte foram obtidos CPs com espessura em torno de 0,7 mm. Para alcançar tolerância recomendada de $\pm 1\%$ da espessura final de ensaio foram realizadas operações de lixamento manual devido à dificuldade de utilizar lixadeiras automáticas para um corpo de prova com a geometria utilizada. Tal operação foi realizada inicialmente com lixas de granulometria 320 e finalizada com lixas 1200. A medição dos corpos de prova foi realizada com um micrômetro externo 0-25mm 0,01mm Mitutoyo de exatidão $\pm 0,002$ mm. A norma CWA 15627 *Part B* apresenta número mínimo de CPs para realização dos ensaios de acordo com as propriedades mecânicas que se deseja caracterizar, por isso, para este trabalho são necessárias no mínimo 2 amostras de cada material e mesmas condições de ensaio para caracterização das propriedades mecânicas. Ao todo foram confeccionados 13 CPs, 6 de aço P91 modificado e 7 de aço P92, sendo alguns mostrados na Figura 21.



Figura 21- Corpos de prova do ensaio de SPT.

A norma CWA 15627 *Part B* apresenta um método de extração de amostras por meio de um equipamento denominado *Scoop Cutter Sampling* em que a amostra é retirada já com as dimensões necessárias para o ensaio de SPT (Figura 22), o que facilita a preparação do CP, agiliza a realização do ensaio e reduz a quantidade de material retirada do equipamento. O procedimento não foi utilizado neste trabalho por se tratar de estudo acadêmico em que a retirada mínima de material para confecção dos corpos de prova não era imprescindível.

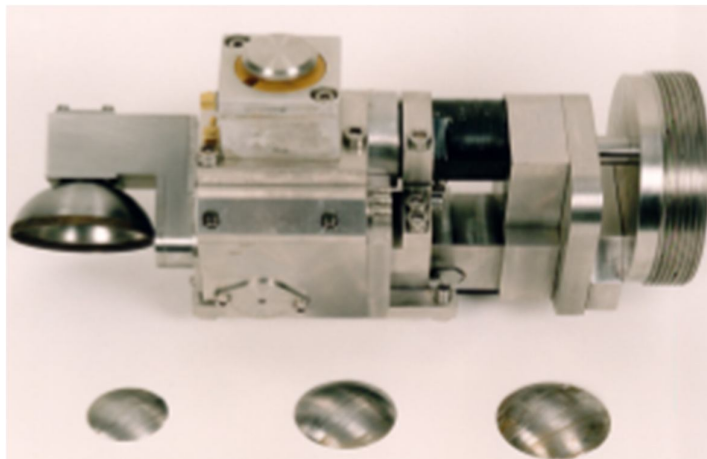


Figura 22 – Máquina de *Scoop Cutter* para extração de amostras (CWA 15627 Part B).

3.4 Montagem do sistema

A montagem do aparato foi realizada em uma máquina de ensaio de servo-hidráulica modelo 8801 da Instron com célula de carga de 5 kN no LAMAT/CEFET/RJ. A Figura 23 mostra a matriz inferior do aparato fixada no atuador do equipamento. A carga foi aplicada com o acionamento do atuador inferior comprimindo a matriz de SPT contra a placa fixa. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente e sem qualquer tipo de lubrificação.

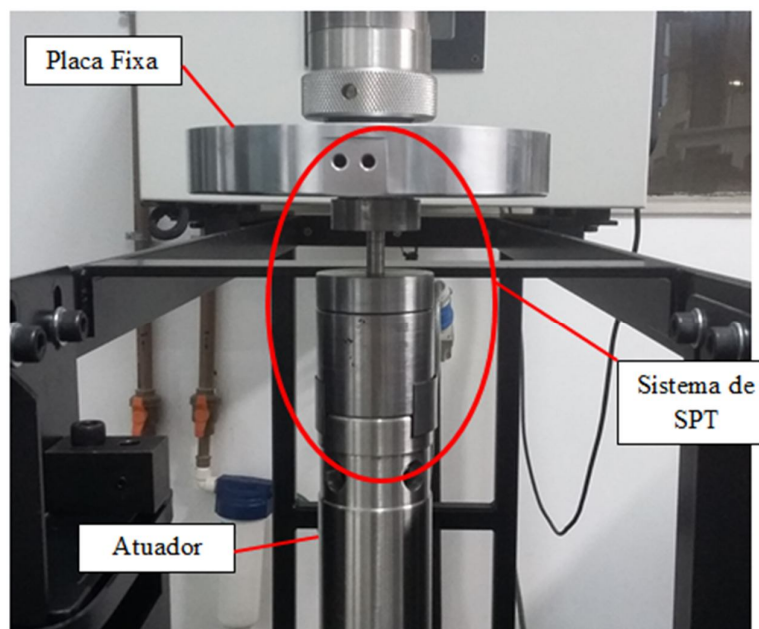


Figura 23- Sistema acoplado à máquina de tração.

A coleta de dados foi realizada através do *software* Bluehill, possibilitando a coleta e armazenamento das informações de força aplicada, em Newtons, e deslocamento do punção,

em milímetros. Assim, não foi necessário utilizar extensômetro para registro de dados, apesar de existir a possibilidade de se utilizar este dispositivo. O *setup* da máquina foi configurado no modo de compressão do *software*. Foram realizados 13 ensaios de aço P91 e aço P92 com 2 velocidades de ensaio diferentes; 0,2 mm/min e 0,6 mm/min, com intuito de analisar a influência da velocidade de ensaio nos resultados obtidos.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nos ensaios de SPT são apresentados neste capítulo assim como a tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento calculados por diferentes métodos previamente apresentados no item 2.3.1. deste trabalho.

Foram avaliadas as propriedades mecânicas de dois materiais, o aço P91 e o aço P92. Para isso, primeiramente, foram levantadas curvas carga vs. deslocamento do punção. Avaliando a Figura 24 é possível observar que os resultados são compatíveis com os encontrados por autores pesquisadores deste tipo de ensaio (GARCIA *et al.*, 2014) para materiais considerados dúcteis: deformação elástica do CP (região I), deformação plástica (região II), alongamento de membrana, que está associada à tensão de membrana, e é determinado pelo intervalo onde não há mais o comportamento de deformação e encruamento característico da região plástica (região III). Isso ocorre por causa do deslizamento de camadas com a deformação localizada em algumas regiões do CP. Pesquisas sobre a influência de lubrificação no ensaio de SPT sugerem que, com a redução do atrito entre o corpo de prova e o dispositivo de ensaio, a inclinação da curva na região de membrana é menor do que em ensaios sem lubrificação. (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2016). Por fim, na região IV encontra-se o estiramento e ruptura do corpo de prova, na qual está localizado também o ponto de carga máxima do ensaio.

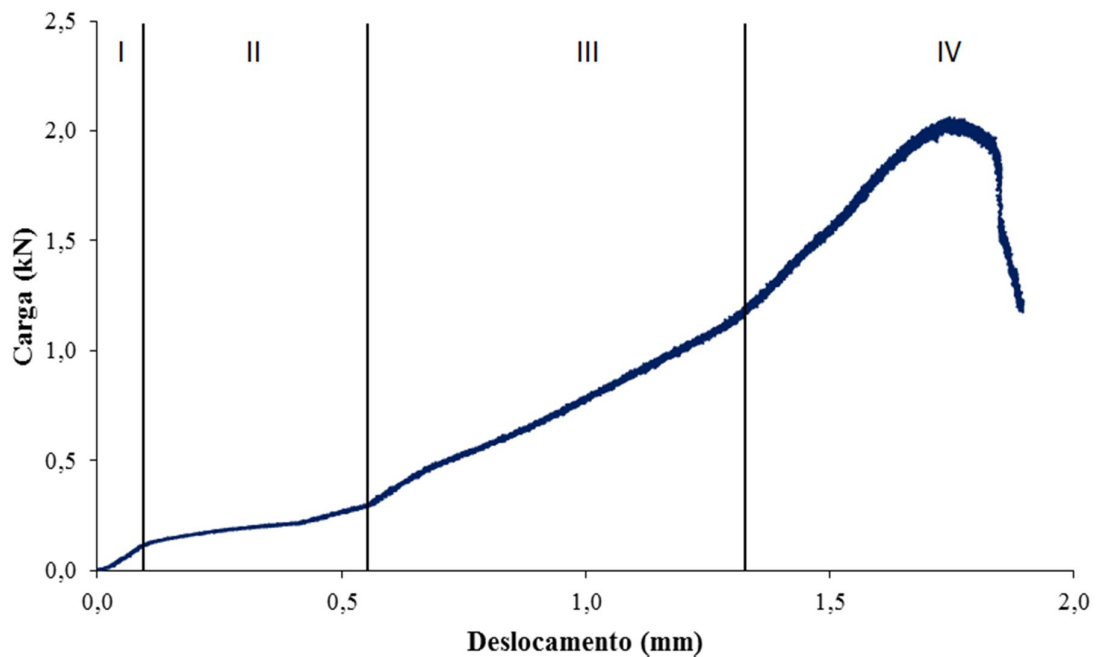


Figura 24- Curva carga vs. deslocamento de aço A335 P92 obtida por SPT.

As curvas apresentaram boa repetitividade no geral, com geometria similar para ensaios realizados na mesma velocidade de deslocamento do punção. A Figura 25 mostra a comparação entre os resultados de 3 ensaios de SPT para aço P91 com a mesma velocidade (0,2 mm/min). É possível observar pouca variação no traçado da curva, principalmente nos pontos importantes como ruptura e carga máxima.

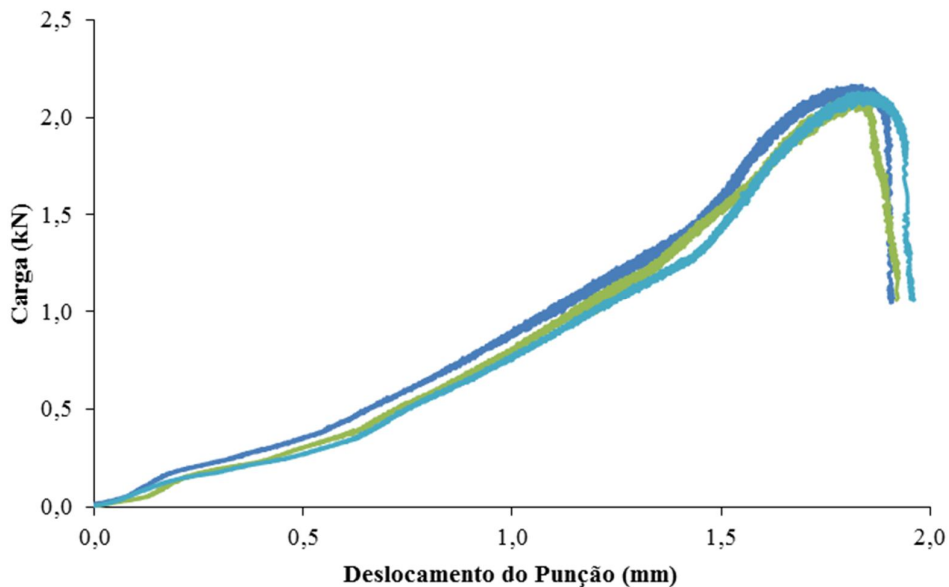
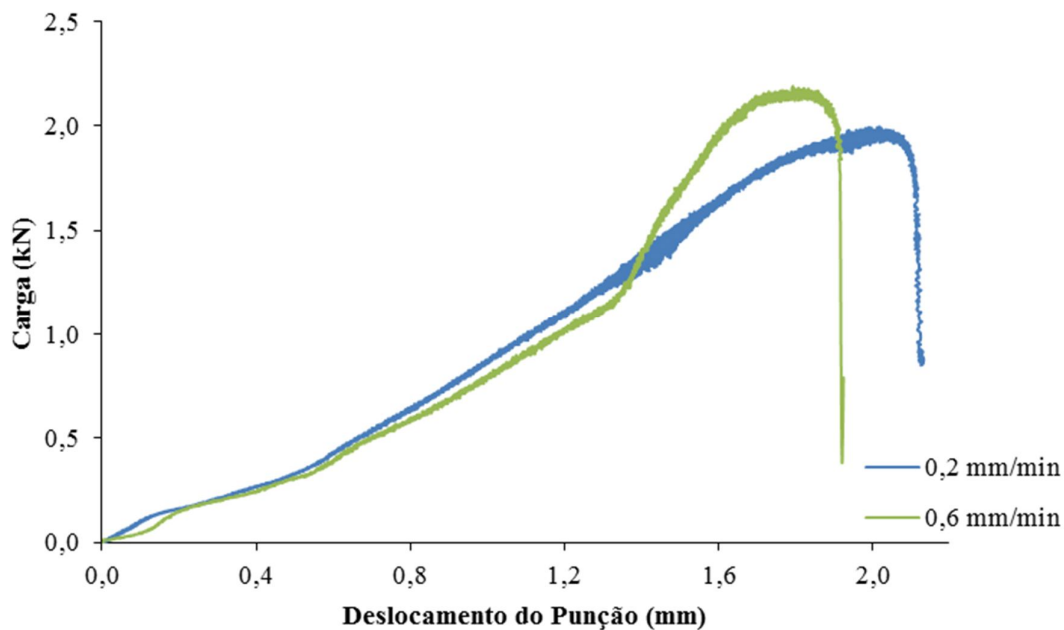
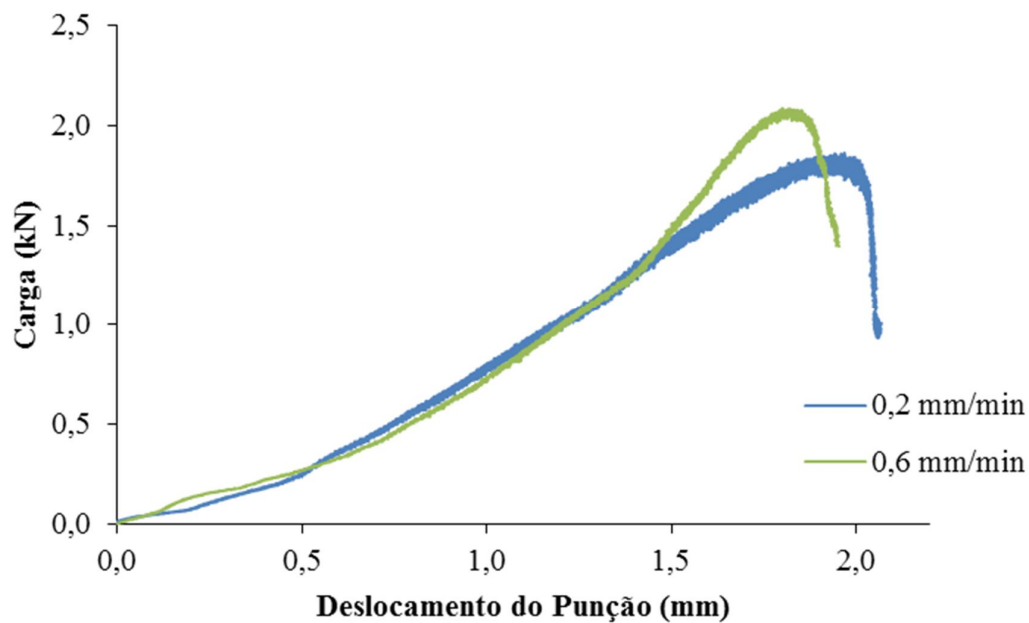


Figura 25- Curvas carga vs. deslocamento do punção para aço P91 modificado para SPT com velocidade de 0,2 mm/min.

Um dos objetivos deste trabalho era avaliar a influência da velocidade de ensaio nos resultados obtidos. A Figura 26 traz a comparação dos resultados de ensaios de SPT a 2 velocidades diferentes para (a) aço P91 e (b) aço P92. Foi observado que a carga máxima de ensaio é diretamente proporcional a velocidade utilizada, sendo este comportamento observado também em ensaios de tração convencionais. O fato das cargas máximas de ensaio do aço P91 obtidas por SPT serem maiores do que as de aço P92 também é compatível com os resultados obtidos através de ensaio de tensão convencional (Tabelas 4 e 5).



(a)



(b)

Figura 26- Curvas carga vs. deslocamento do punção para diferentes velocidades de ensaio (a) em aço P91 modificado e (b) em aço P92.

Inicialmente foram realizados 9 ensaios. Após análise dos resultados foi verificado que o atrito entre o estojo do sistema desenvolvido e o corpo de prova provocou uma interferência no início do ensaio, fazendo com que a curva carga vs. deslocamento fosse deslocada para a

direita. Foi realizado um alargamento de 1 mm de ajuste no furo passante do estojo (Figura 27) para reduzir o atrito do sistema e mais 4 ensaios foram realizados nesta condição. A Tabela 6 apresenta os valores de carga máxima (P_m) e deslocamento máximo do punção (d_m) para os materiais estudados a diferentes velocidades nas 2 condições descritas. Os ensaios iniciais que apresentaram atrito no sistema como grupo 1 e os ensaios realizados com o sistema ajustado como grupo 2.

Tabela 6- Valores de P_m e d_m para aços P91 e P92 por ensaio de SPT a diferentes velocidades.

	Material	V (mm/min)	P_m (N)	d_m (mm)
Grupo 1	P91	0,2	2164	1,81
		0,2	2128	1,83
		0,6	2190	1,79
	P92	0,2	2067	1,87
		0,2	2053	1,78
		0,6	2171	1,89
		0,6	2087	1,80
Grupo 2	P91	0,2	1996	2,02
		0,6	2023	2,00
	P92	0,2	1864	1,97
		0,6	1945	2,03

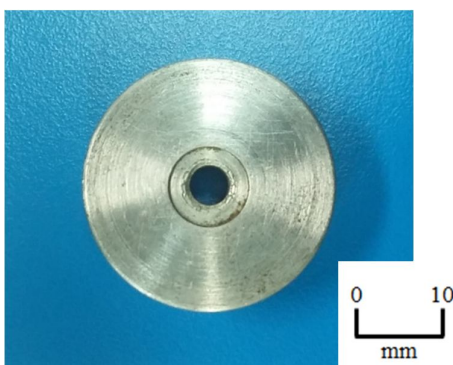
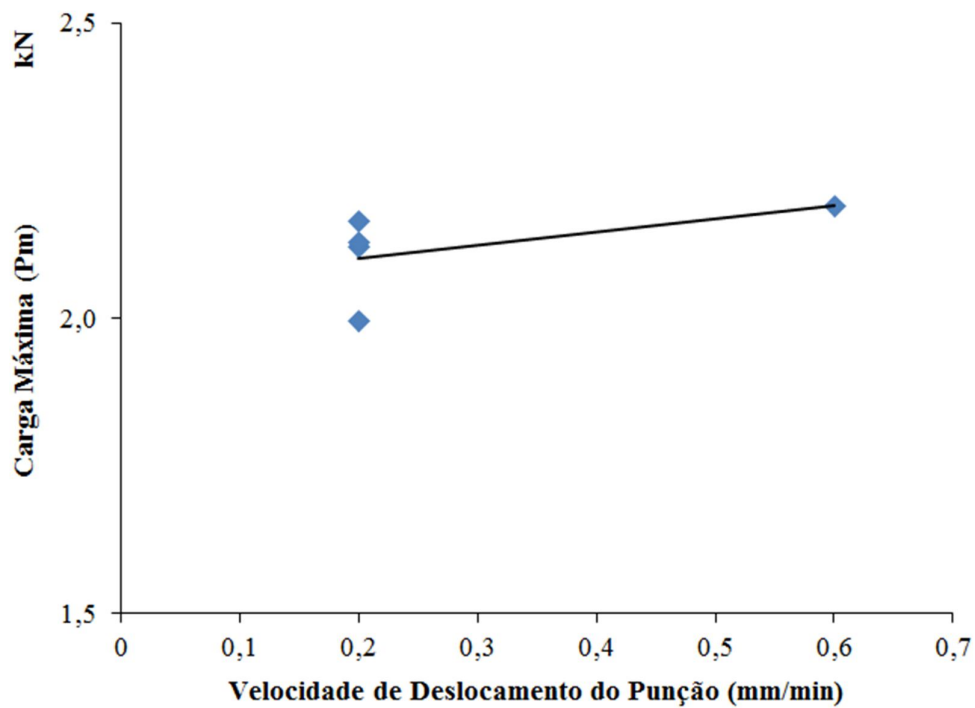


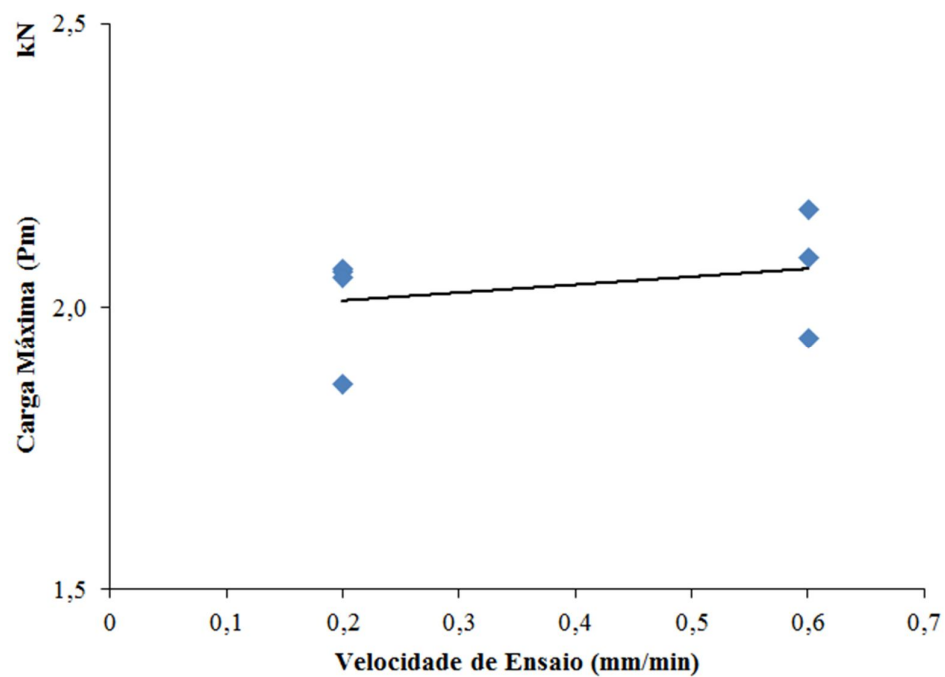
Figura 27- Estojo com furo passante ajustado.

Para a determinação do deslocamento máximo seria necessário utilizar o valor correspondente ao ponto de fratura do CP. Contudo, foi utilizado neste trabalho o valor de d_m obtido com base no ponto em que ocorre a carga máxima de ensaio, devido à dificuldade de se localizar precisamente o deslocamento em que ocorre a fratura. MORENO *et al.* (2016) fazem uma análise sobre a localização de d_m e a forma que esse fator influencia os resultados do ensaio, apresentando o conceito que o ponto de fratura do CP seria a localização mais adequada para esta variável. Este parâmetro deve ser analisado de forma mais profunda para tentar encontrar uma relação entre velocidade de ensaio e deslocamento máximo do punção.

Uma correlação entre carga máxima de ensaio para o aço P91 foi desenvolvida com base nos resultados apresentados (Figura 28a), e para aço P92 (Figura 28b). Seriam necessários mais ensaios de SPT com estes materiais para entender melhor a forma que a velocidade de deslocamento do punção influencia o parâmetro de carga máxima. Apesar disso, é possível observar que a carga máxima de ensaio é maior quando uma taxa de deslocamento mais elevada é utilizada.



(a)

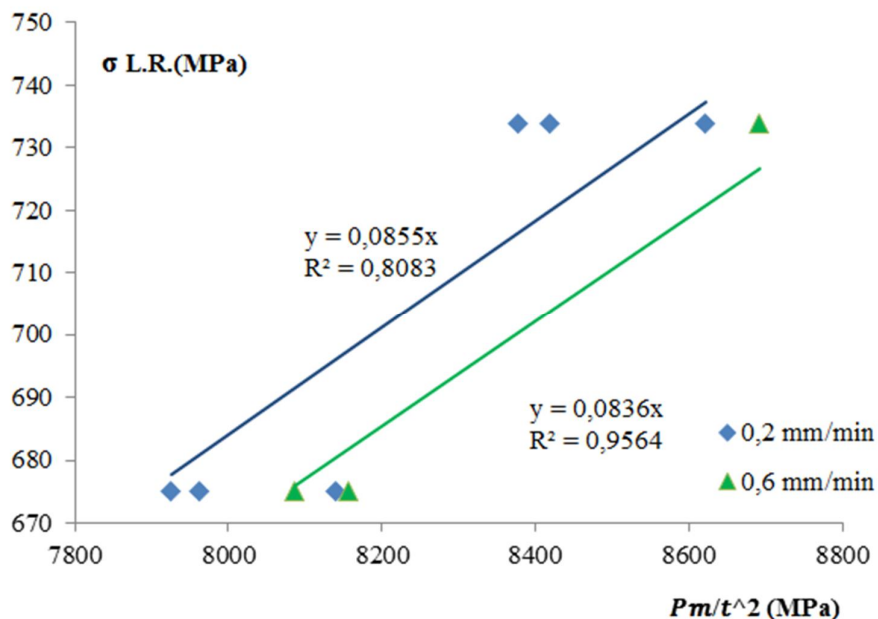


(b)

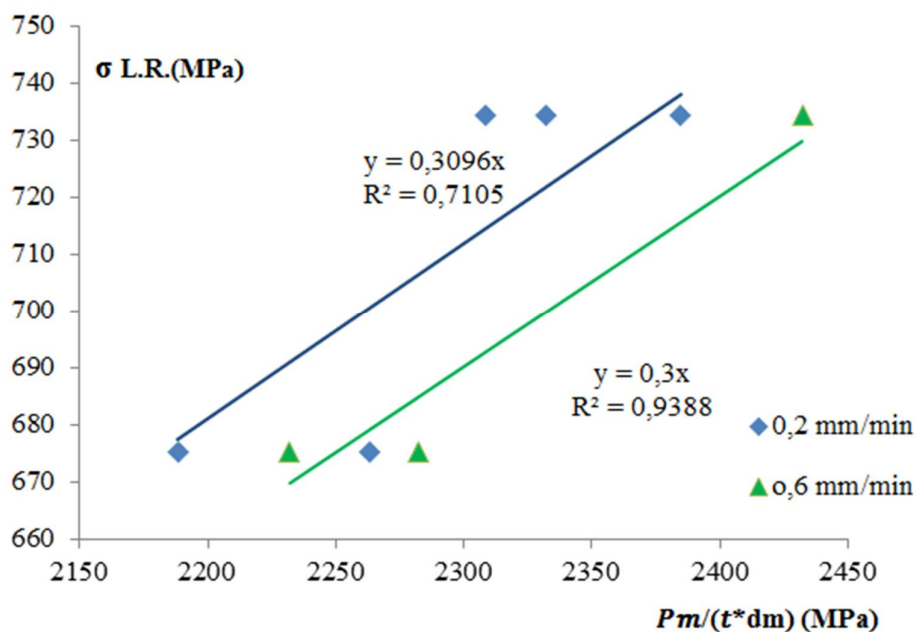
Figura 28- Carga máxima de ensaio vs. taxa de deslocamento do punção para (a) aço P91 modificado e (b) aço P92 obtidos por SPT.

4.1 Tensão Limite de Resistência

Para determinar a tensão limite de resistência foram utilizadas a Equação 4, que relaciona a carga máxima de ensaio (P_m) com a espessura do CP através de constantes experimentais β_1 e β_2 , e a Equação 5, que utiliza os valores do deslocamento do punção no ponto de carga máxima juntamente com as constantes β_1' e β_2' . Os valores de constantes propostos pelos autores, em particular por GARCIA *et al.* (2014), se mostraram inadequadas para os materiais estudados neste trabalho, porque quando aplicadas foram encontrados resultados muito distantes das tensões limite de resistência. Por isso, foram propostas novas constantes para as diferentes velocidades de ensaio executadas, para que os valores de tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento se aproximem dos resultados do ensaio de tração convencional. A Figura 29 mostra como foram encontradas as novas constantes a fim de aplicar as equações de tensão limite de resistência para os materiais estudados a diferentes velocidades de ensaio utilizando (a) Equação 4 e (b) Equação 5. As constantes β_2 e β_2' foram definidas como zero, simplificação realizada por GARCIA *et al.*, 2014. Este método é apresentado somente para o grupo 1 de resultados, condição inicial do furo passante do estojo, devido a insuficiência de dados para desenvolver uma relação adequada para o grupo 2.



(a)



(b)

Figura 29- Determinação das constantes experimentais para tensão limite de resistência a diferentes velocidades de ensaio para SPT através de (a) equação 4, e (b) equação 5.

Após o desenvolvimento das constantes de ensaio β_1 , β_2 , foi possível calcular a tensão limite de resistência para os ensaios realizados com base nas correlações apresentadas no item 2.3.1 deste trabalho. As Equações 9 e 10 foram desenvolvidas com base na Equação 4,

relacionando a velocidade de deslocamento do punção 0,2 e 0,6 mm/min, respectivamente. Enquanto que as Equações 11 e 12 tiveram como base a Equação 5, relacionando também a velocidade de deslocamento do punção.

$$\sigma_{L.R.} = 0,0855 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 9}$$

para $v = 0,2$ mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,0836 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 10}$$

para $v = 0,6$ mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,304 * \frac{P_m}{(t.d_m)} \quad \text{Equação 11}$$

para $v = 0,2$ mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,3 * \frac{P_m}{(t.d_m)} \quad \text{Equação 12}$$

para $v = 0,6$ mm/min.

A Tabela 7 apresenta os valores de tensão limite de resistência calculados tendo como base as constantes elaboradas e as Equações 9, 10, 11 e 12. Ao comparar os resultados desta Tabela com a tensão limite de resistência obtida por meio de ensaio de tração convencional, pode-se verificar a proximidade entre os dois métodos. Lembrando que a mesmas constantes foram aplicadas aos dois materiais. A Figura 30 mostra a relação entre as constantes desenvolvidas e a velocidade de deslocamento do punção.

Tabela 7- Resultados de tensão limite de resistência por SPT para aço P91 e P92.

Material	$\sigma_{L.R.}$ Convencional (MPa)	V (mm/min)	Pm/t ²	Pm/dm*t
			$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)
P91	734±3	0,2	720 ±11	714 ±12
		0,6	727	730
P92	675	0,2	681 ±10	693 ±21
		0,6	679 ±4	677 ±11

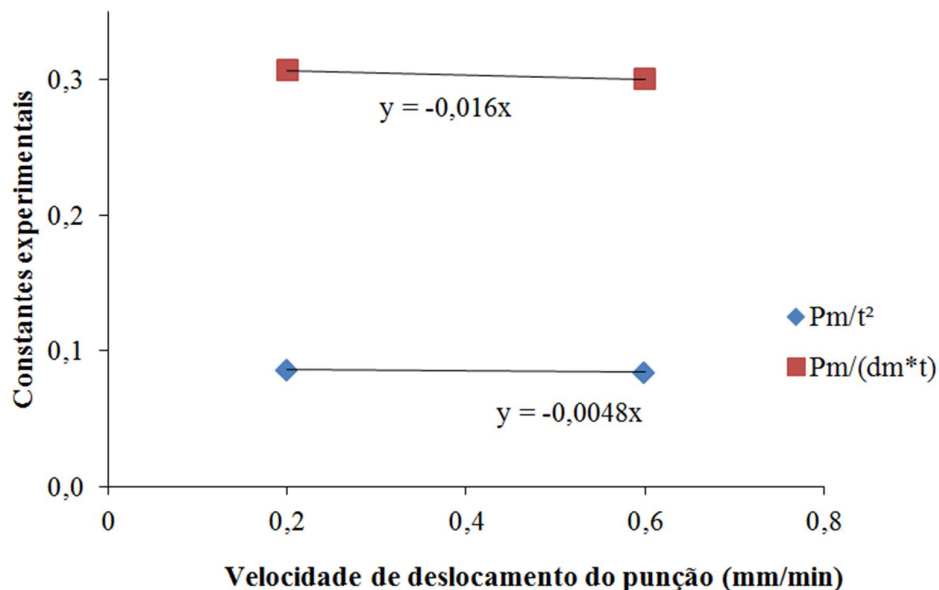


Figura 30- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para 2 métodos de determinação de $\sigma_{L.R.}$

Através da inclinação negativa das curvas presentes na Figura 30, pode-se constatar que conforme aumenta a velocidade de deslocamento do punção no ensaio de SPT, as constantes encontradas são menores, o que indica que a tensão aumenta com o incremento na velocidade, o que condiz com o comportamento padrão de materiais metálicos submetidos a velocidades de carregamento diferentes. É possível também observar que a inclinação das curvas é suave, o que indica que apesar da velocidade influenciar nos valores de tensão limite de resistência, pode ser considerada uma influência branda.

A pequena variação dos valores de tensão limite de resistência por SPT comparados aos de ensaio convencional, como pode ser visto na Tabela 7, indica que somente uma constante produz uma boa aproximação para a determinação desta propriedade mecânica por Small Punched. Analisando as 2 equações utilizadas, a primeira que relaciona o parâmetro de carga máxima de ensaio somente com a espessura do CP e a segunda que utiliza também o parâmetro d_m , pode-se observar que a variação dos resultados na primeira equação é menor do que na segunda, indicando que a primeira apresenta valores mais confiáveis para a determinação da tensão limite de resistência. Este resultado está em acordo com o obtido por GARCIA *et al.* (2014). Tal observação corrobora o conceito de que d_m como o ponto de carga máxima de ensaio e não o de fratura pode influenciar negativamente no resultado dos ensaios.

4.2 Alongamento

O mesmo procedimento foi aplicado para determinar o alongamento máximo dos materiais. As Equações 6 e 7 foram utilizadas como base de cálculo, com constantes de ensaio γ e γ' . Foram utilizadas a equação 6, que relaciona a constante γ com o deslocamento no ponto de carga máxima, e a equação 7 que utiliza a constante γ' , o deslocamento no ponto de carga máxima e a espessura do CP. Dessa forma, foram desenvolvidas novas constantes de forma análoga a que foi apresentada para o cálculo da tensão limite de resistência.

Os valores de alongamento para os aços P91 modificado e P92 para as diferentes velocidades de ensaio são mostradas na Tabela 8, os valores foram calculados de acordo com as constantes γ e γ' desenvolvidas para este trabalho. A Figura 31 apresenta a relação entre as constantes desenvolvidas para o alongamento e a velocidade de deslocamento do punção.

Tabela 8- Sumário de resultados de alongamento por SPT para aços P91 e P92.

Material	A Convencional (%)	V (mm/min)	γ * dm	γ' * (dm/t)
			A (%)	A (%)
P91	24,5 ±2,7	0,2	27,7 ±0,1	25,7 ±0,1
		0,6	26,8	26,8
P92	26,9	0,2	25,3±0,9	24,9 ±1,1
		0,6	27,5 ±0,9	27,1 ±0,6

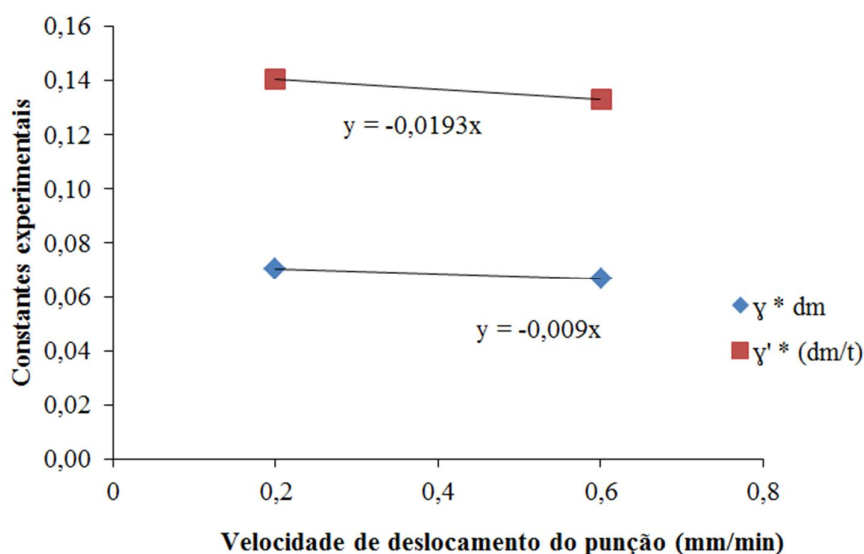


Figura 31- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para 2 métodos de determinação de alongamento.

A comparação das constantes desenvolvidas com a velocidade de deslocamento do punção para o alongamento dos materiais estudados (Figura 31) é similar à comparação realizada para constantes de tensão limite de resistência. A inclinação negativa indica que quanto maior a velocidade menor será a constante a ser empregada. A inclinação destas curvas é mais pronunciada, o que indica que a velocidade do ensaio de SPT possui maior influência no alongamento do que na tensão limite de resistência. A pequena variação dos valores de alongamento por SPT comparados aos de ensaio convencional (Tabela 8) indica que somente uma constante produz uma boa aproximação para a determinação desta propriedade mecânica por *Small Punched*, da mesma forma que para os resultados de tensão limite de resistência.

A análise dos resultados de alongamento em GARCIA *et al.* (2014) indica que as duas equações são insuficientes para a determinação do parâmetro analisado, por causa da forte dependência de d_m nas duas equações. Porém, em comparação com os resultados obtidos neste trabalho, as duas equações apresentaram bons resultados e pequena variação com relação ao alongamento. Isto pode ter ocorrido devido aos diferentes materiais estudados por GARCIA *et al.* (2014), o que sugere que as equações apresentadas devem ser avaliadas quanto aos bons resultados de acordo com o material estudado.

4.3 Tensão Limite de Escoamento

Existem algumas propostas para a determinação de P_y , as mais usuais foram apresentadas no capítulo 2. Para estudar esta propriedade, foram utilizadas as técnicas apresentadas por MAO *et al.* (1987), pelo código de práticas do CEN e por GARCIA *et al.* (2009). A Figura 32 apresenta a transição de deformação elástica para plástica de uma curva carga vs. deslocamento do punção em um ensaio de SPT para aço P92. A partir dela, é possível observar como foi encontrado P_y de acordo com as técnicas apresentadas.

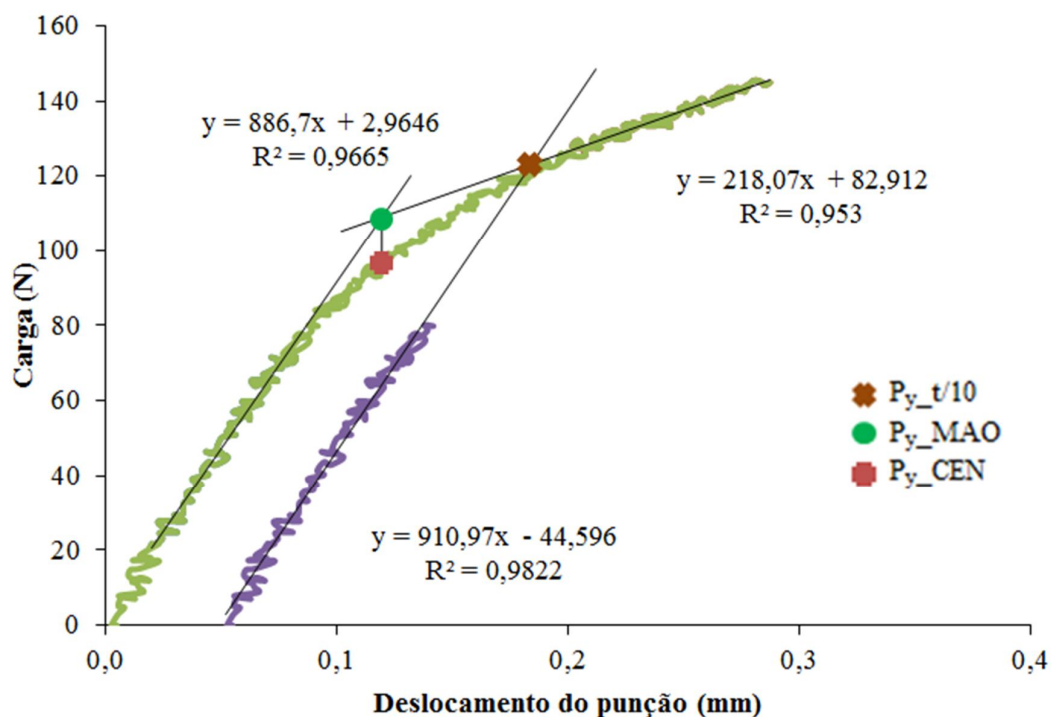


Figura 32- Diferentes técnicas para determinação de P_y no ensaio de SPT.

Para determinar a tensão limite de escoamento foi utilizada a Equação 3, que relaciona a carga P_y com a espessura do CP e constantes experimentais α_1 e α_2 . Para simplificar a equação, a constante α_2 foi definida como zero. Aplicando o mesmo método utilizado para a determinação das propriedades já citadas neste trabalho, foram desenvolvidas novas constantes, que quando relacionadas à equação de tensão limite de escoamento pelos 3 métodos de determinação de P_y descritos na Figura 32.

Os resultados de tensão limite de escoamento para os aços P91 modificado e P92 para as diferentes velocidades, utilizando constantes desenvolvidas neste trabalho, são mostradas na Tabela 9. A Figura 33 apresenta a correlação destas constantes com a velocidade de deslocamento do punção.

Tabela 9- Sumário de resultados tensão limite de escoamento por SPT para aços P91 e P92.

Material	$\sigma_{L.E.}$ Convencional (MPa)	V (mm/min)	MAO	CEN	t/10
			$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)
P91	580±14	0,2	587 ±84	577 ±90	600 ±61
		0,6	485	485	495
P92	485	0,2	524 ±64	533 ±60	501 ±64
		0,6	440 ±65	442 ±71	426 ±83

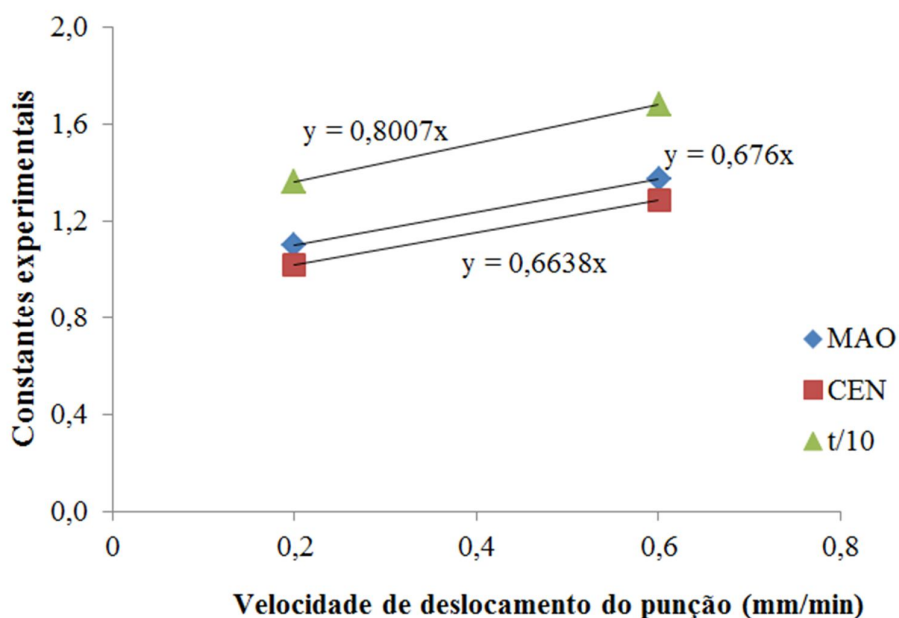


Figura 33- Constantes de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção para diferentes métodos de determinação de tensão limite de escoamento.

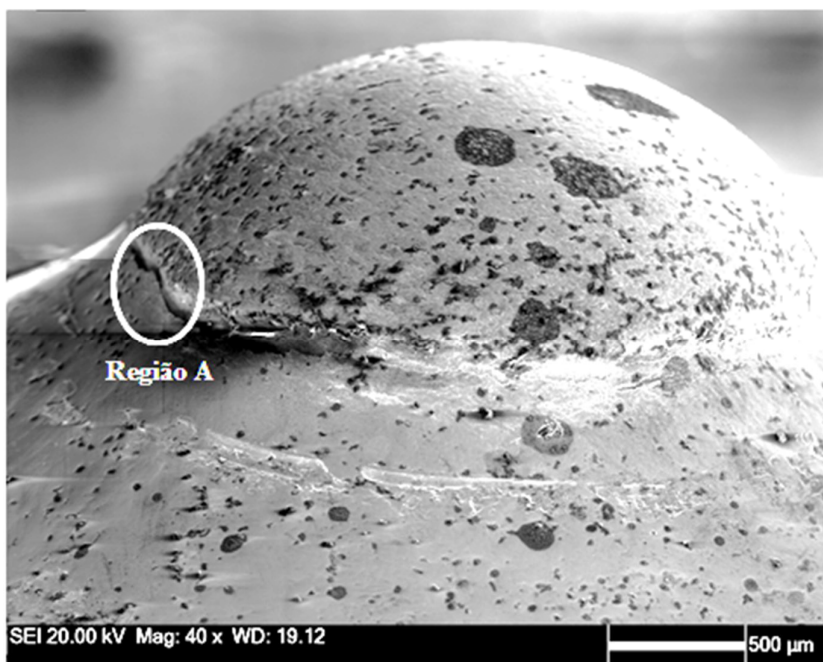
Ao contrário do que foi observado nas tabelas e correlações das constantes com as velocidades de ensaio para alongamento e tensão limite de resistência, no caso da tensão limite de escoamento é observado um decrescimento da tensão a medida que a velocidade cresce, e isso constatado pelos 3 métodos analisados. A inclinação da curva da Figura 33 é

grande, portanto, a velocidade de deslocamento do punção possui uma significativa influência na tensão limite de escoamento determinada por SPT.

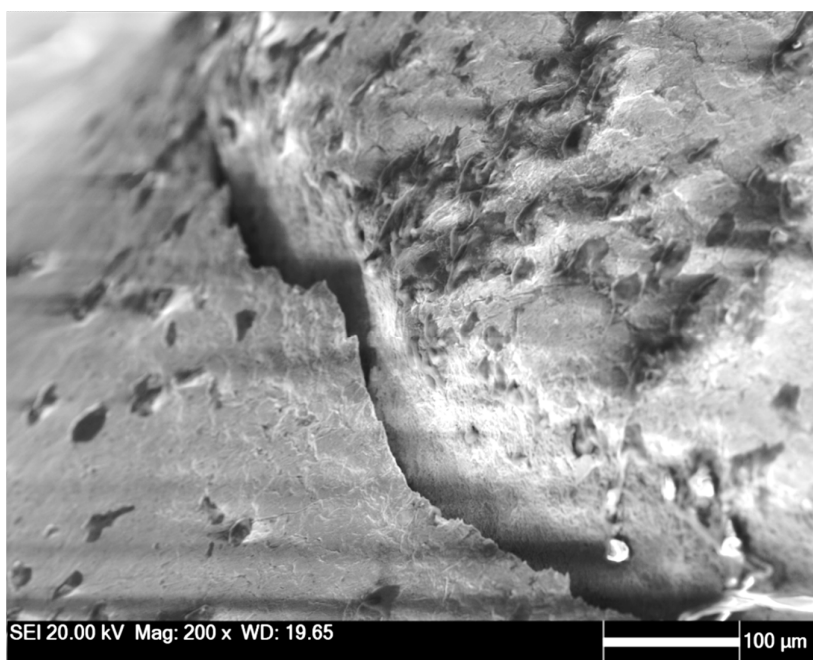
A grande variação dos valores de desvio padrão e média da Tabela 9 indicam que somente uma constante para os dois materiais resultou em uma aproximação ruim, e que uma constante específica para cada material seria uma escolha mais adequada. Os resultados indicam que quanto maior é a velocidade de ensaio, menor é o valor de tensão limite de escoamento encontrado, e mais rapidamente o material de ensaio deforma de forma plástica. A ampla variação é observada nos resultados obtidos pelos três métodos apresentados, o que dificulta a análise de qual método seria mais eficiente para a determinação desta propriedade.

4.4 Fratura do Corpo de Prova

Complementarmente foi analisada a fratura de um dos CPs. A fratura de todos os CPs se deu na região de contato com o punção e é apresentada na Figura 34, obtida através Microscopia Eletrônica de Varredura. A localização da fratura é coerente com o apresentado por autores de SPT para a temperatura ambiente (CONTRERAS *et al.*, 2008). O uso de lubrificação durante o ensaio é um fator que pode ser relevante no posicionamento e tipo da fratura do CP, devido a redução de atrito ente o corpo de prova e o dispositivo de ensaio (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2016).



(a)



(b)

Figura 34- Análise da fratura CP após ensaio de SPT: (a) região de fratura e (b) detalhamento da trinca.

Capítulo 5

Conclusões

A determinação de propriedades mecânicas por meio de *Small Punched Test* é considerada uma tecnologia recente e ainda deve ser profundamente estudada a fim de consolidar o conhecimento da técnica. Por meio da análise dos resultados obtidos neste trabalho e com base no conhecimento atual sobre o ensaio, foi possível concluir que:

1. Os resultados do ensaio de *Small Punched*, curvas carga aplicada vs. deslocamento do punção, mostraram-se similares aos resultados de ensaios convencionais de tração de forma qualitativa, além de apresentarem boa repetitividade.
2. Foi verificado que a velocidade de ensaio possui influência direta nos resultados do ensaio em todas as propriedades avaliadas. Conforme a velocidade aumenta, as propriedades de alongamento e tensão limite de resistência também crescem, porém, o comportamento oposto é verificado para os valores de tensão limite de escoamento.
3. É possível determinar propriedades mecânicas a partir de ensaios de SPT, contanto que se desenvolva um sistema de ensaio que obedeça às recomendações de ensaio, pois o mesmo possui grande influência nos resultados do ensaio.
4. É preciso utilizar constantes de ensaio que sejam compatíveis com as classes do material de estudo para que seus resultados sejam coerentes com os encontrados por meio de ensaios convencionais de tração.

Sugestão para Trabalhos Futuros

1. Realizar mais ensaios sob mesma condição apresentadas neste trabalho.
2. Aprimorar a geometria do sistema de *Small Punched* para minimizar a interferência nos resultados do ensaio.
3. Realizar ensaios de SPT com CPs de diferentes geometrias e espessuras recomendadas.
4. Desenvolver um dispositivo que possibilite a utilização de lixadeiras na preparação de amostras.
5. Realizar os ensaios de SPT com diferentes materiais para tentar encontrar correlações específicas para estes materiais.
6. Fazer ensaios a diferentes temperaturas para avaliar a sua influência nos resultados obtidos.
7. Analisar a fratura dos CPs para ensaios de *Small Punched Test* e tentar correlacioná-las as obtidas por meio de ensaio de tração convencional.
8. Fazer ensaios com diferentes formas de lubrificação para analisar como o alongamento de membrana e a fratura do corpo de prova são afetados.

Referências Bibliográficas

- CALLISTER, W.D.; *Ciência dos Materiais e Engenharia*, 7 ed. New York, John Wiley & Sons Inc., 2002.
- SOUZA, S. A.; *Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos*, 5 ed. São Paulo, Blücher, 1982.
- VAN VLACK, L.H.; *Princípios de Ciência dos Materiais*, 1 ed. São Paulo, Blücher, 1970.
- HYDE, T. H., SUN, W.; BRETT, S. J.; “Application of Impression Creep Test Data for the Assessment of Service Exposed Power Plant Components,” *In: Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques*, v. 1, pp. 138-145, Ostrava, Aug. 2010.
- MANAHAN, M. P.; ARGON, A. S.; HARLING, O. K.; "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Post- irradiation Mechanical Properties", *Journal of Nuclear Materials*, v. 104, pp. 1545-1550, Dec. 1981.
- CONTRERAS, M. A.; RODRIGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C.; “Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test”, *Welding Journal*, v. 88, pp. 188-192, Sep. 2009.
- CEN. Workshop Agreement Small Punch Test Method for Metallic Materials. CWA 15627:2006.
- BAIK, J. M.; KAMEDA, J.; BUCK, O.; “Development of small punch test for ductile-brittle transition temperature measurement of temper embrittled Ni–Cr steels”, *In: Corwin WR, Lucas GE, editors. The use of small-scale specimens for testing irradiated material, ASTM STP 888*, pp. 92– 109, Philadelphia, Sep. 1983.
- 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*, v. 238, n. 12, pp. 3186-3193, Dec. 2008.
- GARCIA, T.E.; RODRIGUEZ, C.; BELZUNCE, F.J.; SUAREZ, C.; “Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punched test”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 582, pp. 708-717, Jun. 2014.
- PRAKASH, V.; ARUNKUMAR, S.; “Influence of Friction on the Response of Small Punch Test”, *The Indian Institute of Metals – IIM*, v. 69, pp. 617-622 Dec. 2015.
- MAO, X.; SHOJI, T.; TAKAHASHI, H.; "Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization Method and Rigid Plastic Analysis", *Journal of Testing and Evaluation*, v.15, n. 1, pp. 30-33, Jan. 1987.

CONTRERAS, M. A.; RODRIGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C.; “Use of small punch test to determine the ductile-to brittle transition temperature of structural steels”, *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, v.31, pp. 727-737, Jun. 2008.

LACALLE, R.; GARCIA, J.; ÁLVARES, A. A.; “Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos, *In: Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 2, pp. 501-506, Santander, Mar. 2009.

FLEURY, S.; HA, J.S.; “Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plants”. *Int. J. Pres.* vol. 75, pp. 699-706, Mar. 1998.

HYDE, T. H.; HYDE, C. J.; SUN, W.; “Theoretical basis and practical aspects of small specimen creep testing”, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 48, n. 2, pp. 112-125, Feb. 2013.

CHU, S. N. G.; LI, J.C.; “Impression creep; a new creep test”, *Journal of Materials Science*, v. 12, n. 11, pp. 2200-2208, Nov. 1977.

HYDE, T. H.; SUN, W.; “Multi-step Load Impression Creep Tests for a 1/2Cr 1/2Mo 1/4V Steel at 565°C”, *An International Journal for Experimental Mechanics*, v. 37, n. 3, pp. 2-6, Aug. 2001.

BRETT, S.J.; KUHN, B.; RANTALA, J. H.; Hyde, C. J.; “Impression Creep Testing for Material Characterization in Development and Application”, *Proceedings of the 10th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering*, At Liège, Belgium, pp. 209 – 216, Sep. 2014.

RABENBERG, E.; *Small Specimen Test Techniques for Evaluating Radiation-induced Changes in Mechanical Properties*, M.Sc. Dissertation, Boise State University, Idaho, USA, 2012.

MORENO,M.F.; BETTOLINO, G.; YAWNY, A.; “The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test”, *Materials and Design*, v. 95, pp. 623-631, Jan. 2016.

HYDE, T. H.; HYDE, C. J.; SUN, W.; “A Basis for Selecting the Most Appropriate Small Specimen Creep Test Type”, *Pressure Vessel Technol*, v. 136, n. 2, Jan. 2014.

PANAYOTOU, N. F.; ARTKIN, S. D.; PUIGHuigh, R. J.; “Design and Use of Nonstandard Tensile Specimens for Irradiated Materials Testing”, *In: Corwin WR, Lucas GE, editors. The*

use of small-scale specimens for testing irradiated material, ASTM STP 888, pp. 201-219, Philadelphia, Jan. 1986.