

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

**Caracterização das propriedades mecânicas de  
diferentes materiais metálicos através de ensaios  
*Small Punched***

Natalia Cordeiro Noce

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2018**

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

**Caracterização das propriedades mecânicas de  
diferentes materiais metálicos através de ensaios  
*Small Punched***

Natalia Cordeiro Noce

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  
Novembro de 2018**

## CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

N756 Noce, Natalia Cordeiro  
Caracterização das propriedades mecânicas de diferentes materiais metálicos através de ensaios Small Punched / Natalia Cordeiro Noce.—2018.

xi, 61f. : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 58-61

Orientador : Tatiane de Campos Chuvas

1. Engenharia mecânica. 2. Metais - Propriedades mecânicas.  
3. Análise estrutural. I. Chuvas, Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha mãe Roseli Cordeiro Noce, pois sem todo o seu apoio e compreensão eu jamais teria chegado tão longe, principalmente quando resolvi trocar de curso de formação.

Ao meu pai Salvatore Noce, mesmo não estando presente há tantos anos, por me ensinar a ser forte, correr atrás dos meus sonhos e junto com a minha mãe ter me ensinado o importante valor da educação.

Ao meu namorado Rodolfo Nucci Porsani por ser o melhor apoio emocional que alguém poderia ter.

A melhor orientadora que eu poderia pedir Tatiane de Campos Chuvas por ter me apoiado, guiado e incentivado durante a realização desse trabalho. Obrigada por responder todas as mensagens, e-mails e sempre me atender quando aparecia meio desesperada em sua sala.

Ao professor Luís Felipe Guimarães de Souza sem o qual não seria possível a realização dos ensaios necessários para esse trabalho.

Ao professor Matheus Campolina Mendes pela sua paciência e ajuda principalmente na reta final da realização desse trabalho.

Ao professor Jorge Carlos Ferreira Jorge e ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx) pela ajuda com a análise química do material estudado.

Ao técnico do Laboratório de Materiais Hiron Akira pelas longas horas que ficou comigo enquanto preparava todas as amostras necessárias para a realização desse trabalho.

E por fim toda a minha família e amigos por sempre permanecerem ao meu lado.

## RESUMO

Devido a uma crescente necessidade da indústria nuclear em avaliar efeitos de degradação das propriedades mecânicas de equipamentos ainda em operação foram desenvolvidos ensaios em miniatura, como o *Small Punched Test* (SPT). Para a realização desses ensaios são necessários corpos de prova de tamanho muito inferior aos de ensaios de tração convencionais (diâmetro de 8 mm e 0,5 mm de espessura) classificando-o como um ensaio não destrutivo já que a quantidade de material a ser retirado é muito pequena não comprometendo, na maioria dos casos, a integridade do maquinário analisado. O *Small Punched* é um ensaio que quantifica bem as propriedades mecânicas dos materiais, entretanto é preciso compreender bem como os parâmetros de ensaio influenciam os resultados, de modo a determinar propriedades mecânicas como tensão limite de resistência, tensão limite de escoamento e alongamento percentual. O presente trabalho tem como objetivo a determinação das propriedades mecânicas através de ensaios *Small Punched* e a comparação dos resultados encontrados com os de ensaios de tração convencionais para diferentes materiais metálicos. Foram estudadas diferentes velocidades de ensaios com o intuito de verificar a influência desse parâmetro nas propriedades obtidas com os ensaios de *Small Punched*. Os resultados obtidos por meio do ensaio miniatura mostram-se qualitativamente viáveis para a descrição das propriedades mecânicas dos materiais utilizados no presente trabalho e a velocidade de ensaio tem influência direta nos valores obtidos, com padrão semelhante aos ensaios convencionais de tração. Contudo, o pequeno volume de material se tornou um limitador para materiais que podem sofrer algum tipo de transformação de fase induzida por deformação plástica.

Palavras-chave: *Small Punched Test*, Ensaios de Tração, Propriedades Mecânicas

## ABSTRACT

Due to a growing need for the nuclear industry to evaluate effects of degradation of the mechanical properties of equipment still in operation, miniature tests such as the Small Punched Test (SPT) were developed. In order to carry out these tests, test specimens of much smaller size than those of conventional tensile tests (diameter 8 mm and 0.5 mm thick) are classified as a non-destructive test since the amount of material to be removed is very small and does not compromise, in most cases, the integrity of the machinery analyzed. Small Punched is an test that quantifies well the mechanical properties of the materials, however, it is necessary to understand how the test parameters influence the results, in order to determine mechanical properties such as tensile strength, yield stress and percent elongation. The present work aims to determine the mechanical properties through Small Punched tests and to compare the results found with those of conventional tensile tests for different metallic materials. Different velocities of tests were studied in order to verify the influence of this parameter on the properties obtained with the Small Punched Test. The results obtained by means of the miniature test are qualitatively feasible for the description of the mechanical properties of the materials used in the present work and test speed has a direct influence on the obtained values, with similar pattern to the conventional traction tests. However, small volume of material has become a limiter for materials that may undergo some kind of plastic transformation induced phase transformation.

Keywords: Small Punched Test, Traction Tests, Mechanical Properties

# SUMÁRIO

Introdução.....	1
Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos.....	3
2.2 Ensaio Mecânico de Tração Convencional .....	4
2.3 Small Punched Test .....	8
2.4 Aço AISI 304.....	17
2.5 Aço ASTM A335 P92 .....	19
Materiais e Métodos .....	20
3.1 Dispositivo.....	20
3.2 Materiais Testados .....	21
3.3 Preparação de Amostras .....	22
3.4 Montagem do Sistema .....	23
3.5 Preparo de Amostras para Análise Microestrutural.....	24
Resultados e Discussão.....	25
4.1 Tensão Limite de Resistência .....	30
4.2 Alongamento .....	37
4.3 Tensão Limite de Escoamento.....	43
4.4 Análise Microestrutural .....	53
Conclusões.....	56
Sugestões para Trabalhos Futuros .....	57
Referências Bibliográficas.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva tensão vs. deformação para um corpo de prova de latão (CALLISTER & RETHWISCH, 2014). .....	5
Figura 2.2 - Curva de tração de engenharia vs. curva verdadeira de tração (CALLISTER & RETHWISCH, 2014). .....	7
Figura 2.3 - Corpos de prova de ensaio de tração convencional (SOUZA, 1982). .....	7
Figura 2.4 – (a) Esquema do <i>Miniaturized Disc Bend Test</i> ; (b) curva obtida através do ensaio MDBT com diferentes temperaturas e diâmetros de punção (MANAHAN <i>et al.</i> , 1981). .....	9
Figura 2.5 - Geometria padrão das amostras para os testes <i>Small Punched</i> (HYDE <i>et al.</i> , 2012). .....	10
Figura 2.6 - Esquema do funcionamento do <i>Scoop Cutter Sampling</i> (CWA 15627 Part B, 2006). .....	10
Figura 2.7 - Representação esquemática do equipamento SPT (RODRÍGUEZ <i>et al.</i> , 2009). ..	11
Figura 2.8 - Curva obtida através do ensaio SPT para um material dúctil em temperatura ambiente (GARCÍA <i>et al.</i> , 2014). .....	12
Figura 2.9 - Curva obtida através do ensaio SPT (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015). .....	12
Figura 2.10 - Diferentes formas de determinação de $P_y$ (GARCÍA <i>et al.</i> , 2014). .....	13
Figura 2.11 - Tipos de fratura que ocorrem durante o ensaio STP (a) materiais dúcteis, (b) materiais frágeis (GARCÍA <i>et al.</i> , 2016). .....	16
Figura 2.12 –Microestrutura do aço AISI 304 (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015). .....	18
Figura 2.13 - Maclas de deformação resultando em estrutura martensítica de um aço AISI 304 deformado a frio, (a) região perto da superfície do tarugo e (b) região central do tarugo (BRAMFITT & BENSCOTER, 2002). .....	18
Figura 3.1 - Dispositivo desenvolvido por LOYOLA, 2017 .....	20
Figura 3.2 - Amostras confeccionadas durante a realização do trabalho. ....	22
Figura 3.3 - Sistema montado para a realização dos ensaios SPT.....	23
Figura 4.1 - Curva carga vs. deslocamento para o aço AISI 304 obtida por SPT. ....	25
Figura 4.2 - Curvas carga vs. deslocamento do punção para aço ASTM A335 P92 para SPT com velocidade de 0,4 mm/min. ....	26
Figura 4.3 - Curvas carga vs. deslocamento do punção para as diferentes velocidades de ensaio (a) aço AISI 304 e (b) aço ASTM A335 P92. ....	27

Figura 4.4 - Carga máxima de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção (a) aço AISI 304 e (b) aço ASTM A335 P92 obtidos por SPT.....	29
Figura 4.5 - Determinação das constantes experimentais para tensão limite de resistência através da (a) Equação 2.3, e (b) Equação 2.4.....	31
Figura 4.6 - Resultados de tensão limite de resistência obtidos para os novos CPs ensaiados.	35
Figura 4.7 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para a tensão limite de resistência (a) referente à Equação 2.4 e (b) referente à Equação 2.5. ....	36
Figura 4.8 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para a tensão limite de resistência. ....	37
Figura 4.9 - Resultados de alongamento percentual obtidos para os novos CPs ensaiados. ....	41
Figura 4.10 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para o alongamento percentual (a) referente à Equação 2.6 e (b) referente à Equação 2.7. ....	42
Figura 4.11 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para o alongamento percentual. ....	43
Figura 4.12 - Diferentes técnicas para determinação de $P_y$ no ensaio SPT. ....	44
Figura 4.13 - Resultados de tensão limite de escoamento obtidos para os novos CPs ensaiados. ....	50
Figura 4.14 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para a tensão limite de escoamento (a) referente à Técnica de MAO & TAKAHASHI (1987), (b) referente ao Código de Práticas CEN e (c) referente à Técnica de CONTRERAS <i>et al.</i> (2008).....	51
Figura 4.15 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para a tensão limite de escoamento. ....	52
Figura 4.16 - Microestrutura do aço 304 como recebido. ....	53
Figura 4.17 - Microscopia do aço AISI 304 nas áreas próximas ao empescoamento para (a) 0,2 mm/min, (b) 0,4 mm/min e (c) 0,6 mm/min. Aumento: 1000x. ....	54

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Composição química do aço ASTM A335 P92 (em % de peso). .....	21
Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI 304 (em % de peso).....	21
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P92.....	22
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 304.....	22
Tabela 4.1 - Valores de $P_m$ , $d_m$ e $P_y$ , para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 obtidos em ensaio SPT a diferentes velocidades.....	28
Tabela 4.2 - Resultados da tensão limite de resistência por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 usando o método gráfico para obtenção das constantes experimentais.....	33
Tabela 4.3 - Resultados da tensão limite de resistência por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 usando o método numérico para obtenção das constantes experimentais...	35
Tabela 4.4 - Resultados dos alongamentos percentuais para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método gráfico de obtenção das constantes de experimentais .....	38
Tabela 4.5 - Resultados dos alongamentos percentuais para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método numérico de obtenção das constantes de experimentais.....	41
Tabela 4.6 - Resultados da tensão limite de escoamento por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método gráfico de obtenção das constantes de experimentais. ....	46
Tabela 4.7 - Resultados da tensão limite de escoamento por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método numérico de obtenção das constantes de experimentais.....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AISI – *American Iron and Steel Institute*  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
CEN – *European Committee for Standardization*  
CNC – Comando Numérico Computadorizado  
CP – Corpo de Prova  
CWA – *CEN Workshop Agreement*  
GL – Comprimento Útil Equivalente  
HRC – Sistema de Medição de Dureza Rockwell  
ICT – *Impression Creep Test*  
LABUS – Laboratório de Pesquisa em Usinagem  
LAMAT – Laboratório de Materiais  
MET – Microscopia Eletrônica de Transmissão  
NBR – Norma Regulamentadora Brasileira  
SPT – *Small Punched Test*  
SRT – *Small Ring Test*  
SSUT – *Sub-size Uniaxial Test*  
ZTA – Zona Termicamente Afetada

# Capítulo 1

## Introdução

Métodos para a avaliação da vida útil de equipamentos são geralmente conservadores, principalmente por razões de segurança e também por causa das incertezas decorrentes da falta de dados sobre as propriedades mecânicas de componentes específicos, já que ocorre modificação dessas propriedades devido aos processos de fabricação e tecnologias aplicadas para produzir essas peças. A determinação das propriedades mecânicas, com precisão, do material em operação é um elemento-chave para o aprimoramento da confiabilidade desses elementos, para a otimização dos procedimentos operacionais, para a fixação dos intervalos de inspeção, e para a definição de uma rotina para estratégias de manutenção e reparo, visando estender a vida útil do maquinário em questão (FLEURY & HA, 1998).

O ensaio mecânico mais utilizado a fim de caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais é o ensaio de tração, porque através desse ensaio é possível obter diversas propriedades mecânicas como a tensão limite de escoamento, a tensão limite de resistência e, características como a ductilidade do material. Na fabricação dos corpos de prova (CP) para ensaios de tração convencionais se faz necessário um volume relativamente grande de material e ademais os ensaios normalmente só são finalizados quando ocorre a ruptura do CP, inutilizando-o. Conseqüentemente os ensaios de tração convencionais são considerados destrutivos, limitando seu uso, por exemplo, em casos de avaliação da perda de resistência mecânica em equipamentos ainda em serviço (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Por esta razão, ao querer avaliar um componente infligindo o menor dano possível, se torna conveniente o uso de testes em miniatura como o *Small Punched Test* (SPT), que vem sendo desenvolvido de modo a utilizar um volume de material bastante reduzido e que pode ser extraído dos componentes durante a sua vida útil normal, sendo considerado um ensaio não destrutivo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2009). Os ensaios em miniatura permitem a avaliação de uma variedade de propriedades mecânicas, tais quais tensão limite de resistência, resistência a fluência e tensão de ruptura.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal analisar as propriedades mecânicas dos aços ASTM P92 e o AISI 304, através de ensaios *Small Punched* e correlacionar os dados

obtidos com os de ensaios convencionais de tração. Para isso foi utilizado um dispositivo para ensaios em miniatura, anteriormente projetado e confeccionado, para a realização desse trabalho. O dispositivo consiste em uma matriz superior que guia o punção, um punção que aplica uma carga compressiva sobre o corpo de prova, uma matriz inferior e um estojo para colocação do corpo de prova. De forma complementar foram estudados os melhores parâmetros de ensaio como, por exemplo, a velocidade de deslocamento do punção.

Os resultados mostraram que o *Small Punched Test* descreve qualitativamente bem o comportamento mecânico dos materiais estudados, sendo possível a formulação de equações que correlacionam os resultados obtidos com os de tensão limite de resistência, tensão limite de escoamento e alongamento percentual com os de ensaios de tração convencional. Contudo, a classe do material utilizado é de grande importância na determinação quantitativa das propriedades mecânicas.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos

É de responsabilidade do engenheiro entender como é feita a medição das várias propriedades mecânicas e o que essas propriedades descrevem a respeito do material, que de modo geral são necessárias para a realização de projetos de estruturas/componentes que utilizam materiais escolhidos previamente, impedindo que ocorram deformações e/ou falhas inaceitáveis (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Entre as propriedades mecânicas levadas em consideração na realização de um projeto pode-se destacar: resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, fluência, dureza e tenacidade. Segundo VAN VLACK (1970) a propriedade mecânica mais importante é a tensão limite de resistência, uma vez que analisando se torna possível a determinação da capacidade do material em resistir a alguns esforços específicos, como por exemplo, a tração e a compressão (resistência à tração e resistência à compressão, respectivamente). Mas nem sempre é desejável que o material resista a todas as deformações, é quando se necessita considerar a propriedade mecânica resiliência, que é a capacidade do material de se deformar quando submetido a um esforço e voltar a sua forma original quando o encerra, o que caracteriza uma deformação elástica. A deformação elástica pode ser observada no gráfico tensão vs. deformação obtido pelos ensaios de tração e compressão do material, onde pode-se perceber uma região de comportamento linear correspondente ao comportamento elástico que segue a Lei de Hooke (Equação 2.1), onde a constante de proporcionalidade  $E$  é conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Equação 2.1

Onde:  $\sigma$  = Tensão

$E$  = Módulo de Young

$\varepsilon$  = Deformação

A linearidade termina no ponto denominado limite elástico (maior tensão que o material pode suportar sem deixar qualquer deformação permanente) e a partir dele tem-se início a região de deformação plástica, que é o resultado de um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material, denominado deformação plástica. A medida dessa deformação até o momento de ruptura do material é a propriedade mecânica chamada ductilidade. A transição entre as regiões elástica e plástica pode muitas vezes ser percebida através do fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante sua maior parte (SOUZA, 1982). O ponto onde se inicia o fenômeno de escoamento é conhecido como limite de escoamento e se torna importante para projetos mecânicos, pois em geral é necessário que o material trabalhe no regime elástico.

Outra propriedade mecânica importante é a tenacidade, definida em VAN VLACK (1970) como a medida da energia necessária para a ruptura do material. Todas as propriedades mecânicas citadas anteriormente, com exceção da dureza, podem ser caracterizadas através do ensaio de tração convencional.

## **2.2 Ensaio Mecânico de Tração Convencional**

A verificação das propriedades mecânicas dos materiais é feita através da realização de experimentos cuidadosamente planejados em ambiente laboratorial, de modo a reproduzir as condições de serviço ao que o material estará sujeito (CALLISTER & RETHWISCH, 2014). O ensaio de tração convencional é considerado um dos mais importantes, visto que é capaz de aferir diversas propriedades mecânicas dos materiais tais como resistência a tração, ductilidade, tenacidade entre outras, mas também pela sua facilidade de execução e a reprodutividade de seus resultados. O ensaio é considerado destrutivo já que resulta quase sempre na ruptura da peça ensaiada.

O ensaio de tração consiste na fixação do corpo de prova, de medidas padronizadas, em uma máquina de ensaio onde ocorre a aplicação de esforços crescentes de tração em sua direção axial sendo feitas medições das deformações correspondentes (SOUZA, 1982). A carga de tração aplicada sobre o CP o deforma levando-o até sua ruptura e assim finalizando o ensaio. O resultado do ensaio de tração, ou seja, a deformação sofrida pelo CP é normalmente registrada em um computador e gera uma curva tensão vs. deformação, curva essa que

relaciona a carga aplicada no corpo de prova com a área da seção transversal inicial do CP (Equação 2.2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:  $\sigma$  = Tensão

F = Carga aplicada

A = Área da seção transversal inicial

A curva tensão vs. deformação pode ser usada para a caracterização de diferentes propriedades mecânicas. Como dito anteriormente, a primeira parte da curva tem um comportamento linear e obedece a lei de Hooke e corresponde a zona elástica do material, onde a tensão é proporcional à deformação, essa linearidade termina no ponto P da Figura 2.1 e é denominado limite elástico ou de proporcionalidade. O limite elástico é definido como sendo a maior tensão que o material pode suportar sem que qualquer deformação permanente aconteça quando o material é descarregado.

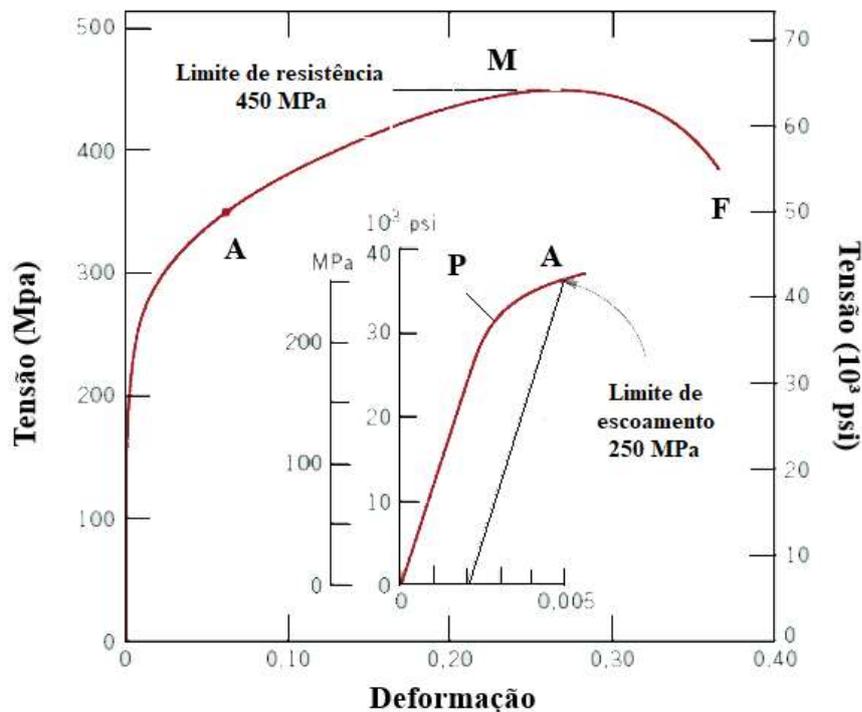


Figura 2.1 - Curva tensão vs. deformação para um corpo de prova de latão (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Pela dificuldade de medição da exata tensão do ponto P foi estabelecida uma convenção, limite de proporcionalidade (n), onde uma linha reta paralela à porção elástica da curva tensão vs. deformação é traçada considerando uma pré-deformação, onde  $n = 0,2\%$  para metais ferrosos e  $n = 0,5\%$  para metais não ferrosos. A tensão equivalente à interseção dessa linha com a curva tensão vs. deformação, ponto A da Figura 2.1, é denominada limite de escoamento (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Passado o limite de escoamento a curva entra no regime plástico, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma constante de proporcionalidade e se ocorrer o descarregamento do material até a tensão nula resultará em uma deformação permanente ou residual. O valor da tensão nessa região aumenta até chegar a um valor máximo, representado pelo ponto M na Figura 2.1, esse ponto é conhecido como limite de resistência e representa a tensão máxima que uma estrutura sob tração pode sustentar.

Segundo SOUZA (1982) praticamente todas as deformações que acontecem no corpo de prova submetido ao ensaio de tração convencional são uniformemente distribuídas em todo seu corpo até ser atingida a carga máxima suportada pelo material, por isso ao fazer que a carga cresça com uma velocidade razoavelmente lenta permite que a resistência mecânica do material seja medida de forma satisfatória assim como a variação da deformação em função da tensão aplicada. Após atingir o ponto de carga máxima a tensão diminui e o corpo de prova evolui rapidamente para seu colapso (ruptura). O momento da fratura da origem ao ponto denominado tensão limite de ruptura, representado na Figura 2.1 pela letra F. Também é a partir do ponto de carga máxima que ocorre o fenômeno de estrição que consiste na formação de um “pescoço”, diminuição da seção transversal da amostra, em um determinado ponto do CP, que é onde, posteriormente, ocorre a sua ruptura.

Todas as correlações mostradas na Figura 2.1 utilizam as medidas da seção transversal inicial dos corpos de prova. Existe outro método que considera valores instantâneos da seção transversal que está sofrendo a deformação a cada instante (CALLISTER & RETHWISCH, 2014). Esse método é intitulado curva verdadeira de tensão vs. deformação (Figura 2.2).

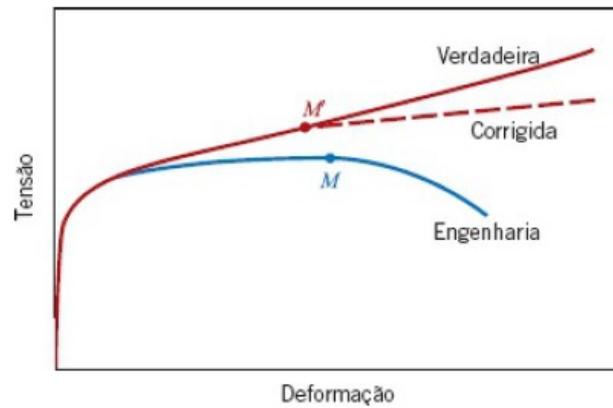


Figura 2.2 - Curva de tração de engenharia vs. curva verdadeira de tração (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

De acordo com a norma E8 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) a velocidade de ensaio é definida em termos taxa de deformação ou taxa de tensão do corpo de prova. Nesse trabalho foi usado o método que avalia a taxa de deformação.

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6892 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) assim como as normas ASTM E8 e a ASTM A370 definem dimensões e geometrias padronizadas para os corpos de prova a serem utilizados em ensaios de tração convencionais. A região do CP denominada comprimento útil é onde se fazem as medições das propriedades mecânicas do material e a cabeça, que pode ou não ser roscada, é a parte que se fixa a máquina de ensaio. Os CPs podem ter geometria circular ou retangular como mostrado na Figura 2.3.

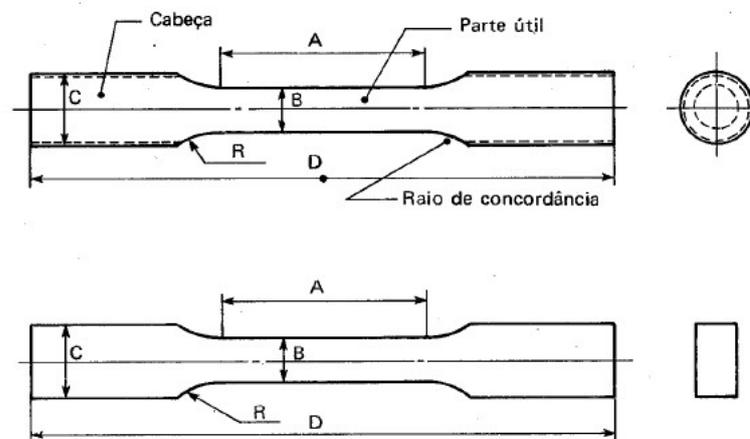


Figura 2.3 - Corpos de prova de ensaio de tração convencional (SOUZA, 1982).

As dimensões ilustradas na Figura 2.3 (A, B, C, D e R) são padronizadas pelas normas citadas acima. As normas também tem a alternativa de ensaios com corpos de prova reduzidos, que tem proporcionalidade com os CPs convencionais. Essas reduções têm como objetivo principal tornar viável a avaliação de equipamentos ainda em serviço.

## 2.3 Small Punched Test

O desenvolvimento dos ensaios mecânicos em miniatura visa à caracterização das propriedades mecânicas dos materiais fazendo uso de corpos de prova com diferentes formas e com um volume de material muito inferior se comparado aos ensaios mecânicos convencionais e por esse motivo, de acordo com HYDE *et al.* (2010), são considerados ensaios não destrutivos. A diminuição de material necessário para a realização dos ensaios constitui em uma redução dos custos, fazendo o ensaio miniatura mais vantajoso do ponto de vista econômico (MANAHAN *et al.*, 1981).

A primeira literatura de uma técnica de ensaio com amostras com geometria de disco do mesmo tamanho de um espécime para microscopia eletrônica de transmissão (MET) foi apresentado por MANAHAN *et al.* (1981). O teste então denominado *Miniaturized Disc Bend Test* (MDBT) foi desenvolvido para a avaliação das propriedades mecânicas de componentes da indústria nuclear e verificar a ação de diferentes níveis de radiação na degradação dos equipamentos. O MDBT é capaz de determinar a resposta de tensão/força biaxial, ductilidade biaxial, comportamento de relaxamento de tensão, resposta de fluência biaxial e ductilidade de fluência biaxial. Para os testes eram usadas amostras com dimensões de 3,0 mm de diâmetro e com 0,25 mm de espessura. Os ensaios eram realizados em uma máquina de tração convencional usando uma adaptação, que consiste em um dispositivo para encaixe do disco com um punção para compressão uniaxial do CP (Figura 2.4.a). A partir desse ensaio é possível obter uma curva de deslocamento do punção vs. Carga aplicada (Figura 2.4.b). Com esse trabalho também foram obtidas algumas informações importantes como a influência da temperatura no ensaio, a influência do diâmetro da ponta do punção e a taxa de deslocamento do mesmo para resultados mais acurados..

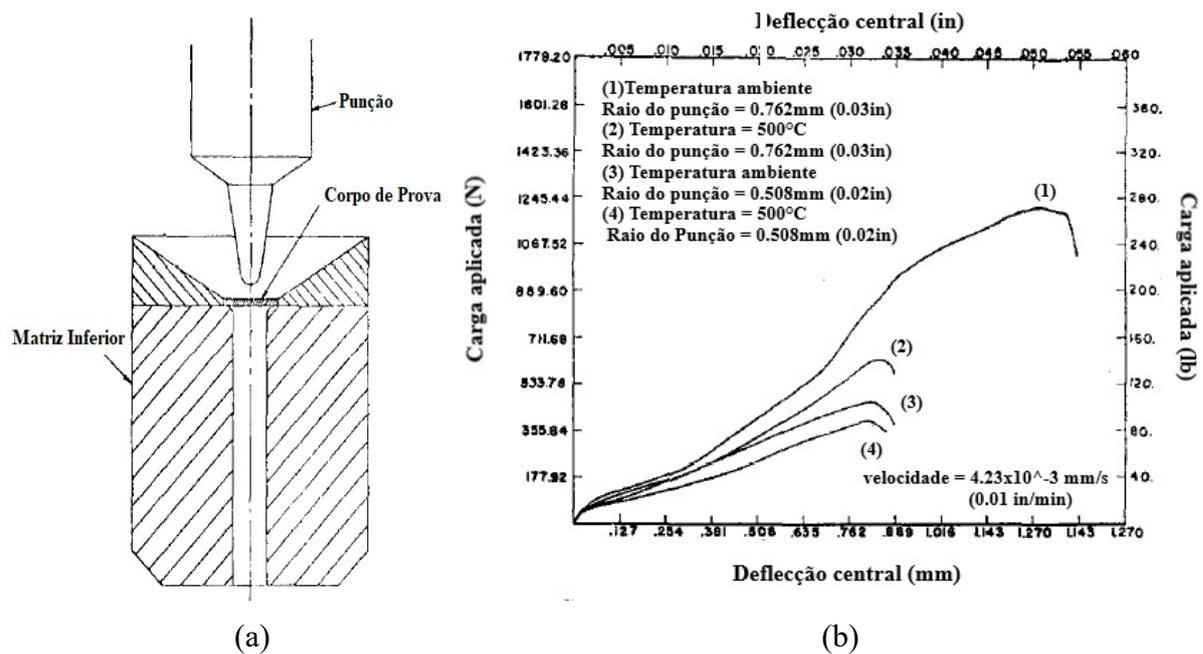


Figura 2.4 – (a) Esquema do *Miniaturized Disc Bend Test*; (b) curva obtida através do ensaio MDBT com diferentes temperaturas e diâmetros de punção (MANAHAN *et al.*, 1981).

Em 1986 foi registrada a patente (MANAHAN *et al.*, 1986) do ensaio denominado *Miniaturized Bend Test* (MBT), que é um ensaio em miniatura para a obtenção de propriedades mecânicas de materiais metálicos. A patente explica todo equipamento necessário para a realização dos ensaios, as dimensões dos corpos de prova (3,0mm de diâmetro e 0,25mm de espessura) e como são demarcadas as zonas da curva obtida através dos ensaios.

Nos dias atuais o ensaio vem sendo chamado de *Small Punched Test* (SPT) e está sendo estudado como uma alternativa aos ensaios convencionais para análise das propriedades mecânicas e resistência a fluência. A Comissão Europeia de Normalização (CEN) criou o documento CWA 15627:2006 que apresenta um conjunto de normas de práticas para a realização do SPT, visando produzir um padrão para a indústria e uma metodologia de teste. O código de prática expõe recomendações de parâmetros de ensaio, análise dos dados obtidos pelo mesmo e geometrias possíveis para corpos de prova. A CWA 15627:2006 prevê um corpo de prova com diâmetro (D) de 8,0 mm e espessura ( $t_0$ ) de 0,5 mm como mostra na Figura 2.5, mas também podem ser usados corpos de prova quadrados e variações de espessura entre 0,2 e 0,6 mm. Os CPs quadrados não são tão utilizados, pois possuem uma tendência ao dobramento durante o processo, podendo afetar de maneira negativa os resultados dos ensaios, os CPs circulares são mais homogêneos e por isso preferíveis.

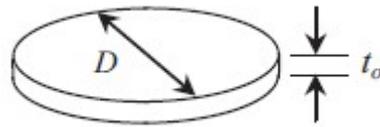


Figura 2.5 - Geometria padrão das amostras para os testes *Small Punched* (HYDE *et al.*, 2012).

A norma CWA 15627:2006 *Part B* mostra uma tecnologia de preparação de amostras por corte mecânico denominada *Scoop Cutter Sampling*. A amostra é retirada da superfície a ser analisada de modo similar a uma colher de sorvete (Figura 2.6), saindo com as dimensões próximas as exigidas pelo ensaio SPT. A utilização dessa tecnologia reduz a quantidade de material retirado do equipamento e diminui o tempo utilizado para o preparo das amostras.

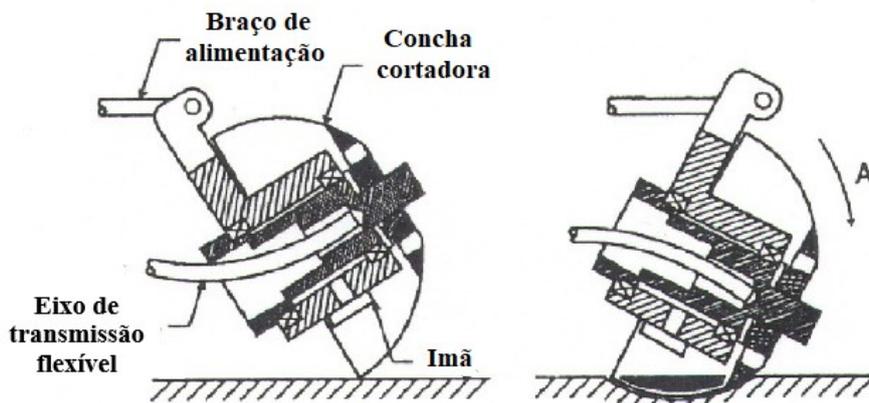


Figura 2.6 - Esquema do funcionamento do *Scoop Cutter Sampling* (CWA 15627 *Part B*, 2006).

Desde a sua criação a técnica vem sendo amplamente estudada de modo a encontrar parâmetros que relacionem os dados obtidos com ensaios convencionais e também muito utilizada para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais, tais quais tensão limite de resistência, resistência à fluência e módulo de elasticidade.

Na pesquisa realizada por RODRIGUEZ *et al.* (2009) foi apresentado o esquema do dispositivo usado (Figura 2.7), onde o corpo de prova fica preso na matriz inferior enquanto o punção aplica uma carga na face superior do CP e em sua região central. A carga aplicada pelo punção é transmitida através da matriz superior. No esquema apresenta-se o

extensômetro, um dos métodos de determinação, de forma contínua, do deslocamento do punção durante a realização do ensaio que é utilizado na medição da deflexão do disco.

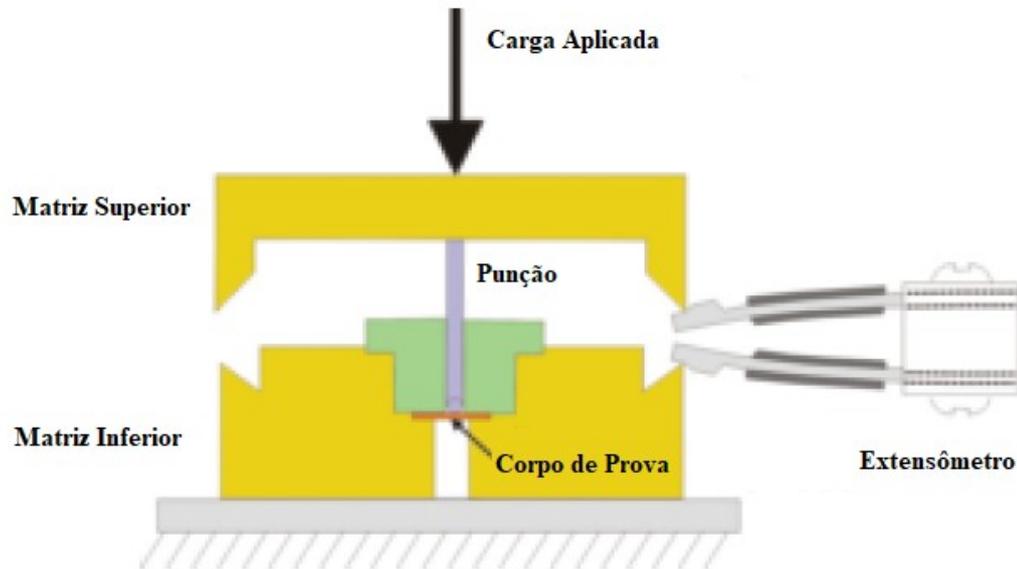


Figura 2.7 - Representação esquemática do equipamento SPT (RODRÍGUEZ *et al.*, 2009).

Na Figura 2.8 tem-se uma típica curva de carga vs. deslocamento do punção para uma liga metálica dúctil mostrando as diferentes regiões de deformação. A primeira região (I) corresponde à flexão elástica da amostra, onde ela sofre deformação elástica juntamente com a indentação da superfície pelo contato com o punção. A região II descreve a progressão da deformação plástica por toda a amostra, indo do centro do corpo de prova aumentando na direção da espessura e na direção radial. A partir de um determinado ponto a deformação plástica passa para um comportamento de membrana que ocorre devido ao deslizamento das camadas do corpo de prova e predomina pela maior parte do ensaio, correspondendo à região III. Aproximando-se da carga máxima, a inclinação da curva começa diminuir, pois os mecanismos de falha (em escala microscópica) começam a se desenvolver (estiramentos e fissuras), originando-se a quarta região (IV), onde o estiramento e então uma ruptura são produzidos até a falha total da amostra (GARCÍA *et al.*, 2014).

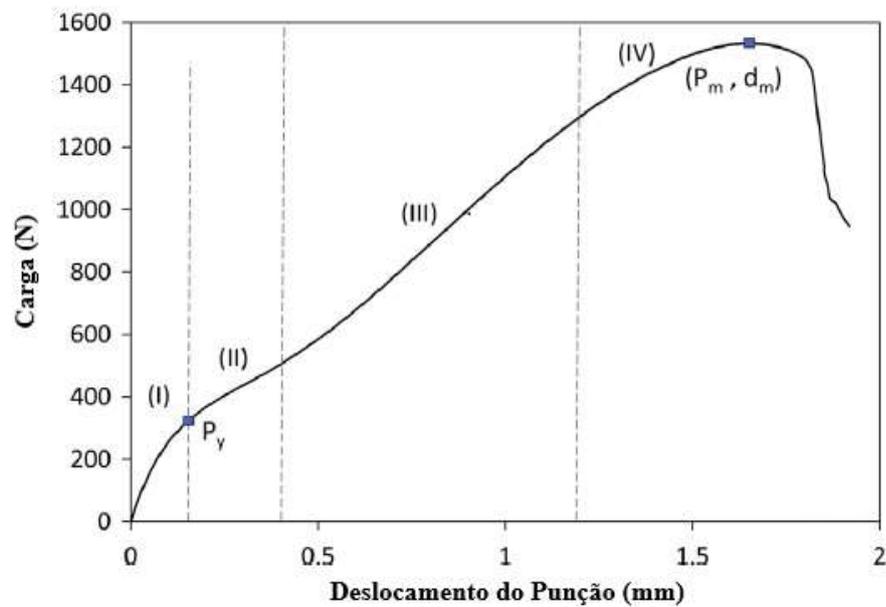


Figura 2.8 - Curva obtida através do ensaio SPT para um material dúctil em temperatura ambiente (GARCÍA *et al.*, 2014).

Em alguns estudos mais recentes como o de PRAKASH & ARUNKUMAR (2015) a divisão das regiões do gráfico típico de ensaio são diferentes. A região III como descrita acima é dividida em duas regiões distintas: a região de membrana e a região de instabilidade plástica, sendo representadas respectivamente pelas regiões III e IV na Figura 2.9. Com essa nova divisão o ponto de carga máxima e o ponto de ruptura do corpo de prova ficam localizados na região V.

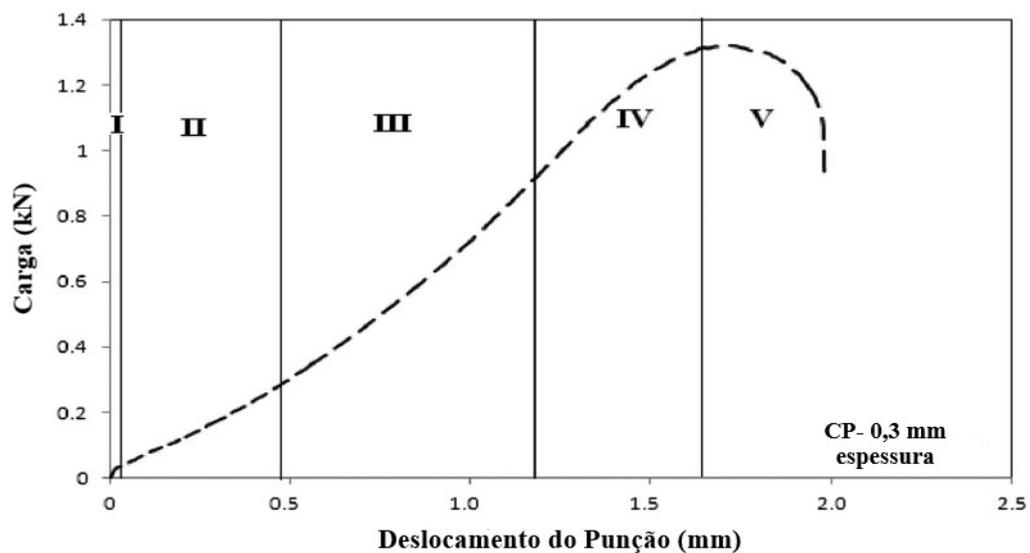


Figura 2.9 - Curva obtida através do ensaio SPT (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015).

Nos ensaios de *Small Punched* alguns pontos são de grande importância e estão apresentados na Figura 2.8:

- $P_y$  é a carga onde se considera o início da deformação plástica (existem vários meios para a obtenção desse valor).
- $P_m$  é a carga máxima obtida durante a realização do ensaio, usada para o cálculo da tensão limite de resistência.
- $d_m$  é o deslocamento relativo ao ponto de ruptura do material, usado para o cálculo do alongamento.

Com o uso de algumas correlações empíricas e analíticas pode-se estabelecer uma correspondência entre os resultados obtidos por ensaio de tração convencional e os obtidos pelo Small Punched Test e assim adquirir algumas das propriedades mecânicas dos materiais analisados. GARCÍA et al. (2014) apresentam resumidamente 5 métodos para a determinação de  $P_y$  (Figura 2.10), dado utilizado na correlação com a tensão limite de escoamento ( $\sigma_{L.E.}$ ), baseando-se em pesquisas realizadas anteriormente.

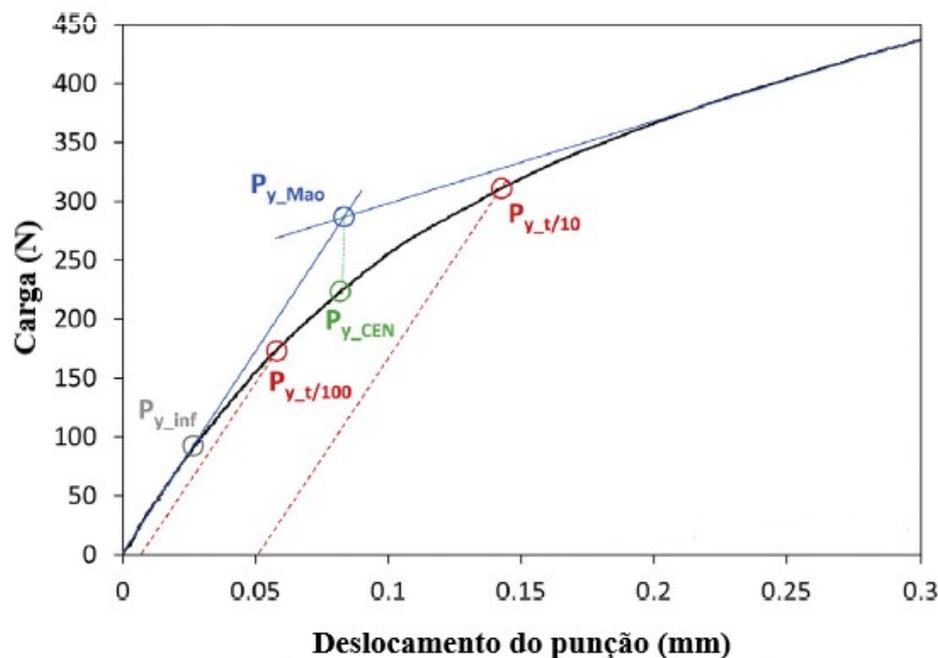


Figura 2.10 - Diferentes formas de determinação de  $P_y$  (GARCÍA et al., 2014).

MAO & TAKAHASHI (1987) definem  $P_y$  como o ponto de cruzamento de duas tangentes definidas no regime elástico (Região I) e o regime plástico (Região II), denominado

$P_{y\_Mao}$ . O código de práticas do CEN contém uma pequena modificação em relação ao proposto por MAO & TAKAHASHI (1987), ele define  $P_y$  como sendo a projeção vertical do ponto de interseção entre duas tangentes definidas entre as Regiões I e II ( $P_{y\_CEN}$ ). Autores como CONTRERAS *et al.* (2008) e RODRÍGUEZ *et al.* (2009) definem a carga  $P_y$  como sendo o ponto de interseção entre a curva SPT e uma linha reta paralela a inclinação do gráfico, com um deslocamento de  $t/10$  ou  $t/100$  ( $P_{y,t/10}$  e  $P_{y,t/100}$ , respectivamente), onde  $t$  é a espessura do corpo de prova utilizado no ensaio. Em uma proposta mais recente de LACALLE *et al.* (2009) determinam que a carga  $P_y$  corresponde ao primeiro ponto de inflexão localizado na região I ( $P_{y\_inf}$ ).

Apesar das diferentes maneiras de determinação da carga  $P_y$  existe uma concordância entre pesquisadores em relação à correlação da mesma com a tensão limite de escoamento ( $\sigma_{L.E.}$ ). A equação é uma relação linear (Equação 2.3) e depende da espessura inicial da amostra, da carga  $P_y$  e de duas constantes de ensaio ( $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ ). As constantes de ensaio são determinadas experimentalmente e dependem principalmente do tipo de material, das dimensões do CP e dos parâmetros de ensaio.

$$\sigma_{L.E.} = \alpha_1 * \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2 \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:  $\alpha_1, \alpha_2$  são constantes de ensaio

$t$  = espessura inicial do corpo de prova

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

$P_y$  = carga associada a tensão limite de escoamento

Em CHICA *et al.* (2018) um método de correlação melhorado para a tensão limite de escoamento foi obtido usando a inclinação inicial da curva SPT. Este método mostrou, numericamente e experimentalmente um nível inferior de desvios e erro padrão se comparados com os métodos anteriormente abordados, como o de MAO & TAKAHASHI (1987), o do Código de Práticas CEN, o de CONTRERAS *et al.* (2008) entre outros. O método da inclinação inicial (Slope<sub>in</sub> method) só precisa de dados de deslocamento de carga da Região I e a parte inicial da Região II da curva SPT para ser obtida, ou seja, muito menos informação que os outros métodos que precisam de dados das Regiões I, II e III. A

necessidade de uma menor quantidade de dados adiciona uma vantagem a nova técnica principalmente em materiais que apresentam comportamento frágil e falhas prematuras.

Para o valor de  $P_m$  todos os autores já citados descrevem como sendo o da carga máxima observada durante o ensaio. Como há uma dificuldade na determinação do ponto de ruptura do corpo de prova, o valor de  $d_m$  será definido como o valor do deslocamento onde ocorre a carga máxima. A carga máxima está ligada a tensão limite de resistência ( $\sigma_{L.R.}$ ) e em GARCÍA *et al.* (2014) são apresentadas duas correlações obtidas experimentalmente para a determinação desta propriedade. Primeiramente foi desenvolvida a Equação 2.4 e depois de pesquisas mais recentes a Equação 2.5 como uma alternativa para o cálculo da tensão limite de resistência, com base na espessura da amostra e no valor do deslocamento no ponto de carga máxima.

$$\sigma_{L.R.} = \beta_1 * \frac{P_m}{t^2} + \beta_2 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$\sigma_{L.R.} = \beta'_1 * \frac{P_m}{(t*d_m)} + \beta'_2 \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:  $\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2$  são constantes de ensaio

$t$  = espessura inicial do corpo de prova

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

$P_m$  = carga máxima do ensaio

$d_m$  = deslocamento do punção no ponto de carga máxima

Segundo GARCÍA *et al.* (2016) o parâmetro  $P_m/(t * d_m)$  provê uma melhor estimativa para a tensão limite de resistência quando trabalhando com materiais dúcteis e conforme FERNÁNDEZ *et al.* (2015) o parâmetro mais indicado para estimar a tensão limite de resistência em materiais que apresentam comportamento de frágil é o  $P_m/t^2$ . Ainda de acordo com GARCÍA *et al.* (2016) a adequação de diferentes parâmetros para se estimar a tensão limite de resistência, dependendo do comportamento do material estudado, pode ser justificado pela localização da fratura que ocorre na amostra durante o ensaio SPT. A Figura 2.11 mostra os tipos de fratura (a) materiais dúcteis e (b) materiais frágeis.

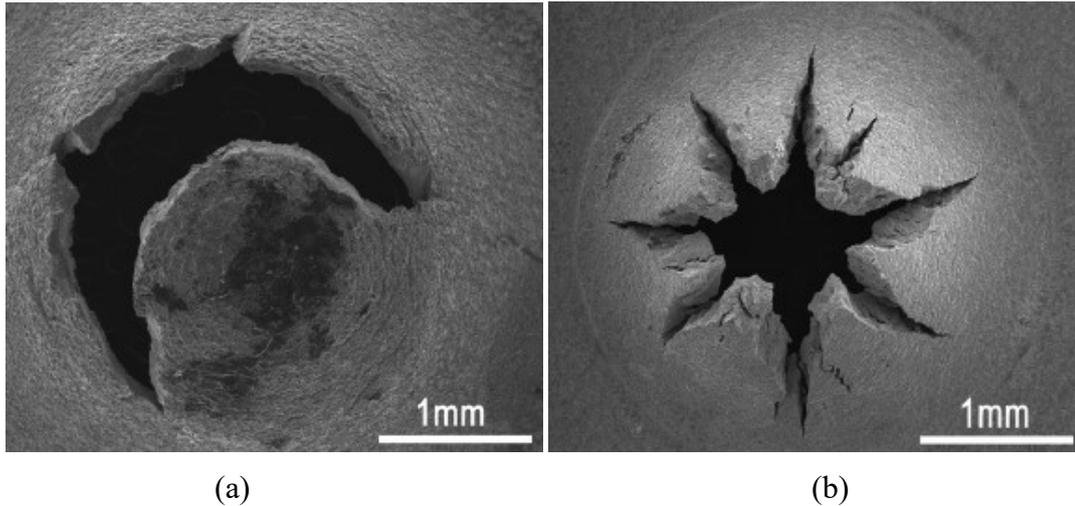


Figura 2.11 - Tipos de fratura que ocorrem durante o ensaio STP (a) materiais dúcteis, (b) materiais frágeis (GARCÍA *et al.*, 2016).

Duas relações diferentes podem ser encontradas na literatura para a determinação do alongamento percentual (A). FLEURY & HA (1998) obtiveram uma relação linear, descrita na Equação 2.6, onde o alongamento do corpo de prova depende do deslocamento do punção do ponto de carga máxima, enquanto RODRIGUEZ *et al.* (2009) propõem que esta propriedade não está somente relacionada ao deslocamento do punção no momento de carga máxima, mas também a espessura do corpo de prova utilizado durante o ensaio, apresentada na Equação 2.7.

$$A = \gamma * d_m \quad \text{Equação 2.6}$$

$$A = \gamma' * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:  $\gamma, \gamma'$  são constantes de ensaio

$t$  = espessura inicial do corpo de prova

$A$  = alongamento (%)

$d_m$  = deslocamento do punção no ponto de carga máxima

A taxa de deslocamento do punção ( $v$ ) durante os ensaios é um dos parâmetros definidos pela norma CWA 15627:2006 *Part B*. Na Equação 2.8 encontra-se uma estimativa para o deslocamento levando em conta a geometria recomendada pelo CEN. De modo geral a velocidade do punção (deslocamento do punção) fica no intervalo entre 0,2 a 2,0 mm/min.

$$v = \frac{\epsilon_{\text{máx}}}{1000} \quad \text{Equação 2.8}$$

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

$\epsilon_{\text{máx}}$  = Deformação máxima ( $s^{-1}$ )

De acordo com GARCÍA *et al.* (2016) e ARROYO *et al.* (2017) o SPT é viável para estimar a degradação das propriedades mecânicas em atmosferas fragilizantes, apresentando o mesmo formato de curva carga vs. deslocamento do punção. Segundo CHEN & HYDE (2016) o *Small Punch Multi-Step Loading Test* é um método qualitativo para a avaliação do comportamento de transição dúctil-frágil dos materiais.

## 2.4 Aço AISI 304

O AISI 304 é um aço inoxidável (Cr-Ni), de microestrutura austenítica, não temperável e não magnético. Sua resistência à oxidação vai até a temperatura de 850 °C, entretanto sua resistência à corrosão intercrystalina só é garantida até a temperatura de 300 °C. Apresenta boa conformabilidade a frio, embora necessite de maiores esforços de conformação do que os aços não ligados. Possui composição química de 18% de cromo e 8% de níquel e apresenta boa soldabilidade. Este aço é aplicado na fabricação de válvulas, tubos, recipientes, equipamentos hospitalares e farmacêuticos, peças para a indústria química, petrolífera, têxtil, de laticínios, frigorífica e de tintas. É indicado para a fabricação de peças que devem resistir ao ataque de um grande número de substâncias corrosivas, tais como o ácido nítrico, soluções alcalinas e soluções salinas (Favorit,2018). Na Figura 2.12 pode-se observar a microestrutura esperada de um aço AISI 304.

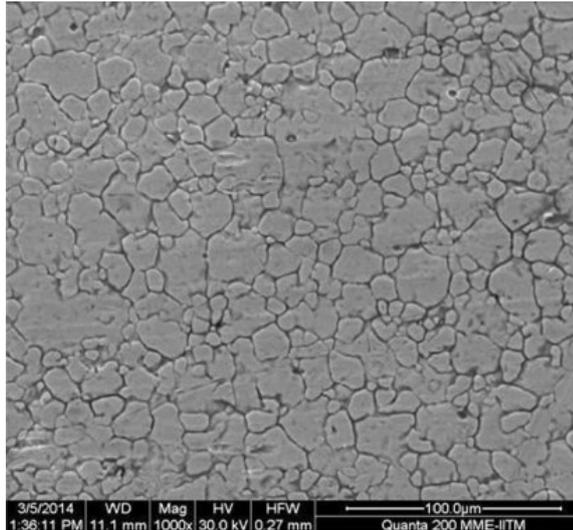


Figura 2.12 –Microestrutura do aço AISI 304 (PRAKASH & ARUNKUMAR, 2015).

Os aços inoxidáveis austeníticos mantêm a sua microestrutura da temperatura ambiente até seu ponto de fusão não podendo ser endurecidos por tratamentos térmicos de têmpera, como aços carbono simples ou que tenham baixo teor de elementos de liga. Consequentemente, esses aços são geralmente trabalhados a frio a fim de obter uma dureza mais elevada. Na Figura 2.13 observa-se a formação de maclas de deformação de estrutura martensítica em um aço AISI 304 após sofrer trabalho a frio (BRAMFITT & BENSCOTER, 2002).

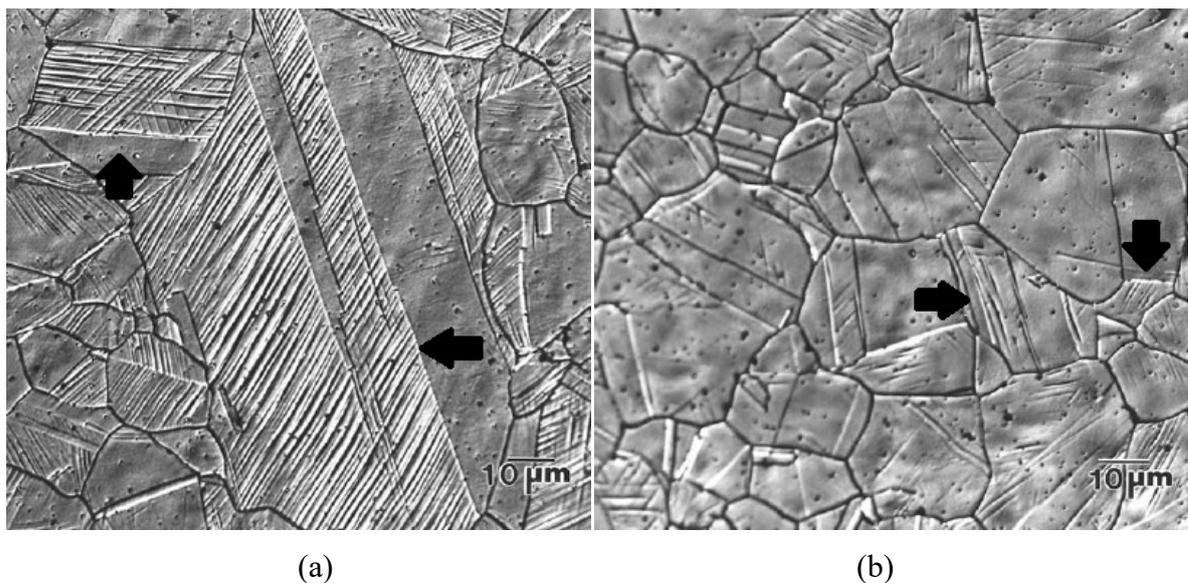


Figura 2.13 - Maclas de deformação resultando em estrutura martensítica de um aço AISI 304 deformado a frio, (a) região perto da superfície do tarugo e (b) região central do tarugo (BRAMFITT & BENSCOTER, 2002).

## 2.5 Aço ASTM A335 P92

O ASTM A335 P92 é um aço liga ferrítico-martensítico (9% de cromo, 1,75% de tungstênio, 0,5% de molibdênio) micro-ligado com vanádio e nióbio, e tem teores de boro e nitrogênio controlados de acordo com ASTM A335, A213 ou EN 10216-2 padrão sob a designação X10CrWMoVNB9-2. Esse aço é normalmente utilizado em usinas movidas a combustíveis fósseis, sendo principalmente usado para tubulações de alta temperatura, como em tubos de superaquecedores e reaquecedores, tubulações de vapor (vapor principal e reaquecimento quente) e tubos de comunicação (Vallourec,2018).

O aço ASTM A335 P92 possui excelente resistência a temperaturas elevadas e comportamento de fluência até 600 °C. Seu teor de cromo oferece ótima resistência à corrosão e a oxidação. Além disso, o peso reduzido dos componentes da caldeira e tubulações resultante do desempenho superior do aço em comparação com outros aços padrão permite maior resistência à fadiga térmica. Em comparação com os aços austeníticos, o aço ASTM A335 P92 apresenta maior transferência de calor e menores coeficientes de expansão térmica (Vallourec,2018).

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

Antes da realização do procedimento experimental de *Small Punched Test* foi preciso passar por algumas etapas tais como: a modificação do sistema de adaptação e o preparo das amostras. Esse capítulo destina-se a detalhar os materiais, equipamentos e métodos empregados durante o projeto.

#### 3.1 Dispositivo

Em um trabalho anterior feito por LOYOLA (2017) houve o desenvolvimento de um dispositivo (Figura 3.1) para a realização dos testes experimentais. Esse aparato foi usinado no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) e na empresa Transcional, especializada em usinagem de precisão, de modo a se acoplar na servo-hidráulica do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ e garantir a fixação da amostra não deixando que a mesma se movimente durante a realização dos ensaios. Esse conjunto é composto por uma matriz inferior, uma matriz superior, estojo e punção.



Figura 3.1 - Dispositivo desenvolvido por LOYOLA, 2017

Durante o trabalho de LOYOLA (2017) foi observado um enrugamento nas amostras após a realização dos ensaios e por isso foi proposta uma modificação no conjunto original,

que consistiu em um estreitamento do furo da matriz superior, por onde entra o punção, de modo a deixá-lo com um diâmetro inferior ao diâmetro do corpo de prova transformando essa peça em um prensa-chapa, impedindo assim a formação das rugas que interferem no resultado final.

### 3.2 Materiais Testados

Ao realizar o *Small Punched Test* (SPT) foram usados dois tipos de materiais distintos obtendo-se um maior número de dados, que foram usados para comprovar a eficiência da técnica. Os corpos de prova foram fabricados em aço ASTM A335 P92, com diâmetro externo de 323 mm e 60 mm de espessura de parede, e aço AISI 304, com diâmetro de 76,2 mm (3 in). Nas Tabelas 3.1 e 3.2 estão apresentadas as composições químicas dos materiais. Os dados da Tabela 3.1 foram obtidos através de análise química e retirados do trabalho do LOYOLA (2017), os dados da Tabela 3.2 obtidos através de análise química realizada no Centro Tecnológico do Exército (CTEx).

Tabela 3.1 - Composição química do aço ASTM A335 P92 (em % de peso).

<b>C</b>	<b>V</b>	<b>Mn</b>	<b>W</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,11	0,23	0,30	1,62	9,62	0,10	0,50

Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI 304 (em % de peso).

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>N</b>
0,04	1,56	0,025	0,025	0,55	8,45	18,00	0,022

As propriedades mecânicas dos materiais apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4 foram obtidas através das informações contidas nas normas ASTM A335 P92 e AISI 304 e por resultados experimentais de ensaios de tração convencional, a temperatura ambiente (apenas para o aço ASTM A335 P92).

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A335 P92.

	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	Alongamento (%)
<b>Norma ASTM A335 P92</b>	> 440	> 620	20
<b>Ensaio de Tração Convencional</b>	485	675	26,3

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 304.

	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	Alongamento (%)
<b>Norma AISI 304</b>	205 – 350	515 – 770	35 – 65

### 3.3 Preparação de Amostras

Foram usados para o preparo das amostras cilindros dos aços ASTM P92 e AISI 304 com o diâmetro de 8,0 mm usinados no LABUS. Para a obtenção de CPs com a espessura ( $t_0$ ) igual a 0,5 mm requerida pelo ensaio *Small Punched* foram feitos cortes com o auxílio de uma máquina de corte de precisão a baixa velocidade e carga controlada do modelo Minitom da marca Struers situada do LAMAT.

Terminado o corte as amostras se encontravam com uma espessura de aproximadamente 0,8 mm. Com uma tolerância desejada de  $\pm 1\%$  da espessura final foi então primeiramente feito um lixamento utilizando a lixadeira automática Arotec, modelo Aropol 2V, utilizando lixa de granulometria de 320 até chegar a uma espessura de cerca de 0,6 mm e então foi feita a troca para lixamento manual para a finalização do processo fazendo uso da lixa de granulometria de 600. A medição dos corpos de prova foi feita com um micrômetro externo 0-25 mm Digimess IP54 de exatidão  $\pm 0,001$  mm. Para este trabalho foram confeccionados um total de 36 CPs, 21 de aço ASTM A335 P92 e 15 de aço AISI 304 (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Amostras confeccionadas durante a realização do trabalho.

### 3.4 Montagem do Sistema

O dispositivo criado para a realização dos testes *Small Punched* foi acoplado a um equipamento de ensaio servo-hidráulico modelo 8801 da Instron com célula de carga de 5kN que se encontra no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ. A matriz inferior é encaixada no atuador inferior da máquina e a carga é aplicada com o acionamento deste comprimindo a matriz SPT contra a placa fixa (Figura 3.3). Todos os ensaios foram executados a temperatura ambiente e sem utilizar qualquer tipo de lubrificação.

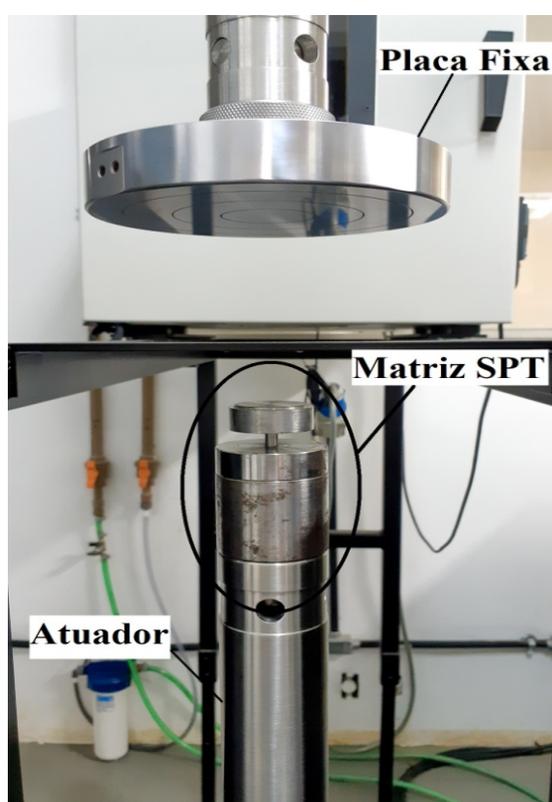


Figura 3.3 - Sistema montado para a realização dos ensaios SPT.

Não se fez necessário à utilização de um extensômetro na coleta de dados, em seu lugar foi empregado o *software* Bluehill, que viabilizou a coleta e armazenamento dos dados de força aplicada, em Newtons, e do deslocamento do punção, em milímetros. Em uma primeira fase foram feitos 12 ensaios com os aços AISI 304 e ASTM A335 P92, aplicando três velocidades de ensaio distintas; 0,2 mm/min, 0,4mm/min e 0,6 mm/min. Para cada velocidade duas amostras de cada material foram ensaiadas. Após a análise dos resultados obtidos na primeira fase foi realizada uma segunda fase com 18 ensaios, aplicando os mesmos

materiais e as mesmas velocidades, nessa fase foram usadas três amostras de cada material para cada uma das velocidades.

O objetivo principal é analisar como a velocidade de ensaio influencia os resultados do SPT, mas também, fazer uma comparação entre resultados obtidos no trabalho anterior feito por LOYOLA (2017) devido à modificação produzida na matriz superior do aparato de ensaio.

### **3.5 Preparo de Amostras para Análise Microestrutural**

Foram preparadas três amostras do aço AISI 304 para análise microestrutural devido a um comportamento anômalo apresentado pelas amostras durante os ensaios, selecionou-se uma amostra de cada uma das velocidades de ensaio estudadas.

Primeiro foi feito um corte transversal na amostra usando a máquina de corte de precisão a baixa velocidade e carga controlada do modelo Minitom da marca Struers situada do LAMAT, após o corte a amostra foi embutida em baquelite condutora usando a embutidora modelo PRE-30 da marca Arotec.

Com as amostras embutidas começou-se o processo de lixamento, usando a lixadeira automática Arotec, modelo Aropol 2V, passando pelas lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200. Terminado o lixamento passou-se para o pano de polimento usando as pastas de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Terminado o polimento foi feito o ataque químico das amostras usando o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) a 60% pelo método eletrolítico.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussão

Para esse trabalho foram feitas avaliações das propriedades mecânicas de dois materiais, o aço inox austenítico AISI 304 e o aço Cr-Mo ASTM A335 P92, em duas etapas de ensaio separadas. Após a realização de todos os ensaios os dados foram tratados de modo a exprimi-los em curvas de carga vs. deslocamento do punção. Na Figura 4.1 pode-se ver que os resultados obtidos são compatíveis com os de outros autores como CHICA *et al.* (2018), MORENO *et al.* (2016) e GARCÍA *et al.* (2014) para materiais dúcteis. A região I se caracteriza pela área de deformação elástica do corpo de prova, a deformação plástica ocorre na região II. A região III está associada com a tensão de membrana, é o intervalo onde não se tem mais um comportamento de deformação e encruamento próprio da região plástica. O comportamento de membrana acontece devido ao deslizamento das camadas do material devido à deformação localizada em pontos específicos do CP. Na região IV começa a ocorrer o estiramento do corpo de prova e por fim sua ruptura, nesse trecho também se localiza o ponto de carga máxima do ensaio.

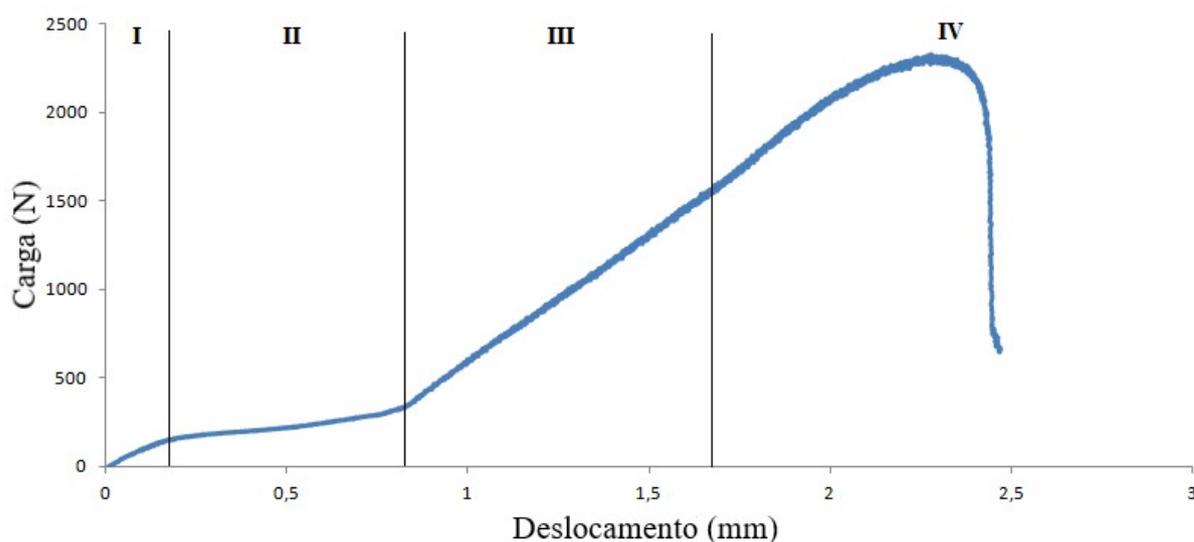


Figura 4.1 - Curva carga vs. deslocamento para o aço AISI 304 obtida por SPT.

Encontra-se na Figura 4.2 a comparação entre as curvas resultantes de cinco ensaios SPT com velocidade de deslocamento de punção de 0,4 mm/min para o aço ASTM A335

P92. Observa-se na figura uma similaridade na geometria das curvas obtidas em ensaios realizados com a mesma velocidade de deslocamento de punção, mostrando que o *Small Punch Test* apresenta uma eficiente taxa de repetitividade. Assim pode-se ver com clareza a pouca variação no delineado da curva carga vs. deslocamento do punção, especialmente em pontos de maior importância como o ponto de carga máxima e a extensão no ponto de carga máxima.

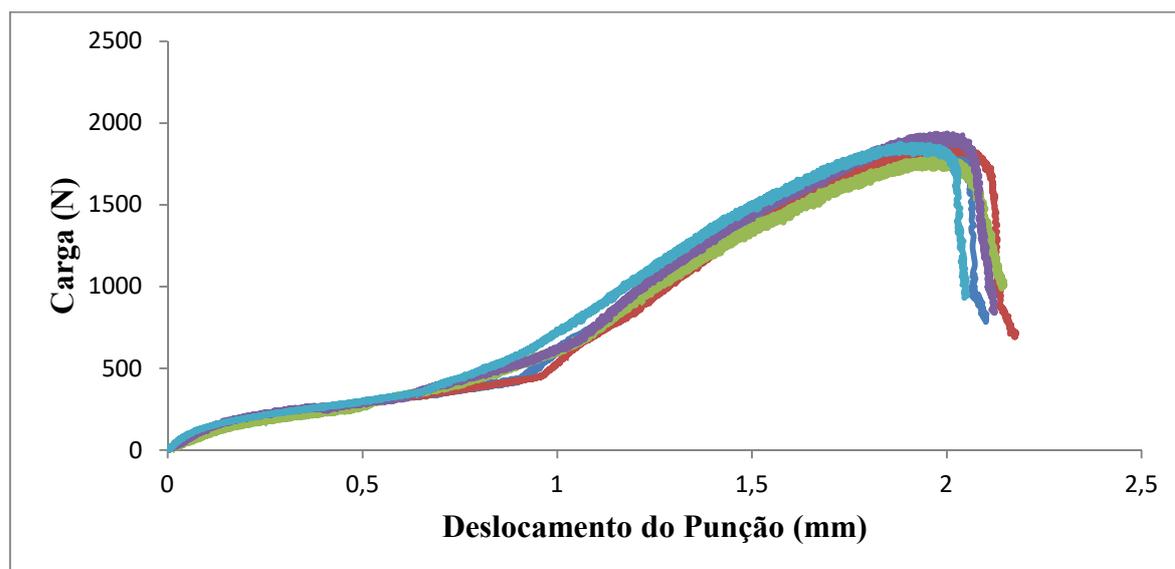
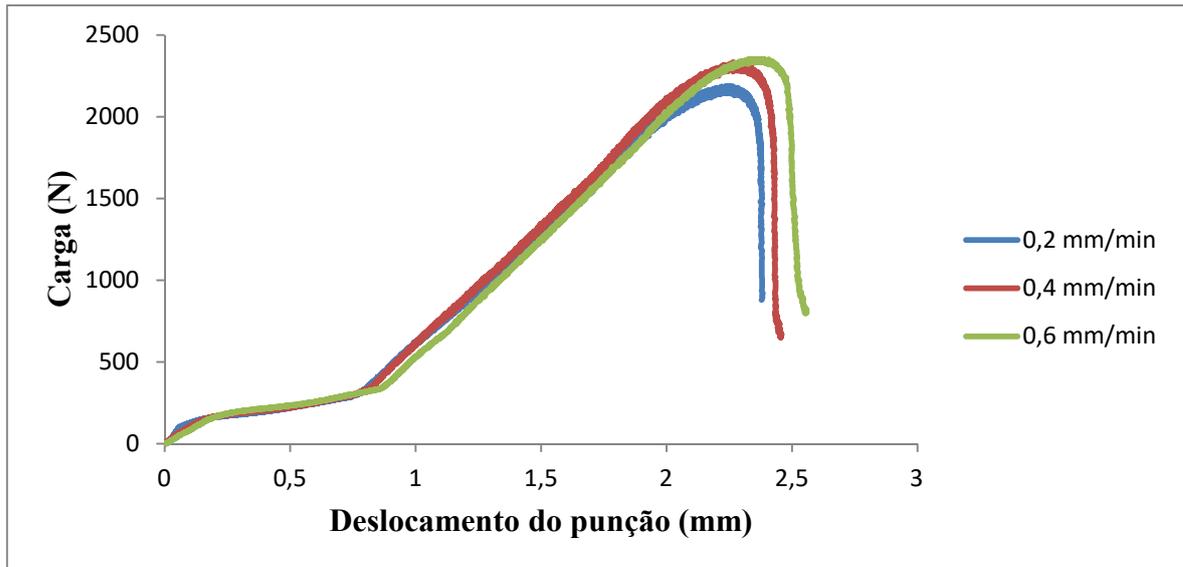
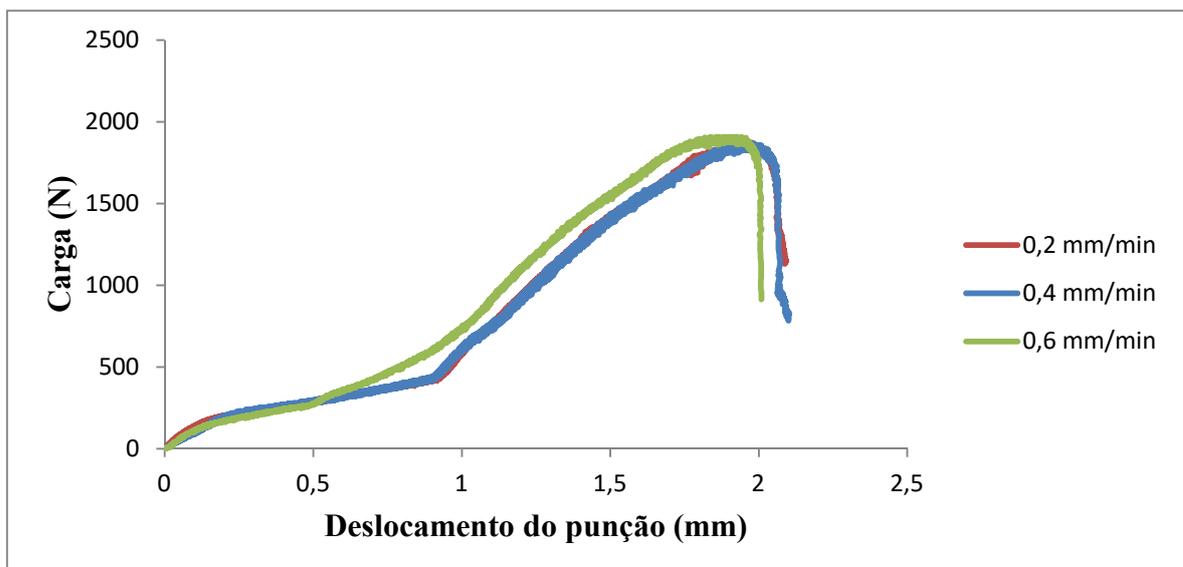


Figura 4.2 - Curvas carga vs. deslocamento do punção para aço ASTM A335 P92 para SPT com velocidade de 0,4 mm/min.

A avaliação da influência da velocidade de deslocamento do punção é um dos objetivos principais desse trabalho. Na Figura 4.3 está sendo mostrada a comparação entre as curvas obtidas para cada material, (a) AISI 304 e (b) ASTM A335 P92, nas três velocidades estudadas. Através dos gráficos pode-se observar que o valor de carga máxima é diretamente proporcional à velocidade aplicada durante o ensaio, esse comportamento também é encontrado durante a realização de ensaios de tração convencionais, isso ocorre devido a um aumento da quantidade de empilhamento de discordâncias que com velocidades mais altas, ou seja, uma taxa de deformação superior provoca um maior encruamento, aumentando assim o valor de carga máxima obtida.



(a)



(b)

Figura 4.3 - Curvas carga vs. deslocamento do punção para as diferentes velocidades de ensaio (a) aço AISI 304 e (b) aço ASTM A335 P92.

Foram realizados trinta ensaios, cinco amostras de cada um dos materiais foram submetidas a cada uma das velocidades de deslocamento de punção escolhidas para esse trabalho. Após os testes foi então feita uma análise dos dados e obtiveram-se os valores para carga máxima ( $P_m$ ), deslocamento máximo do punção ( $d_m$ ) e a carga associada à tensão limite de escoamento ( $P_y$ ) para cada um dos CPs utilizados. Na Tabela 4.1 encontram-se os valores de  $P_m$ ,  $d_m$  e  $P_y$ , usando os métodos de MAO & TAKAHASHI (1987), Código de Práticas do

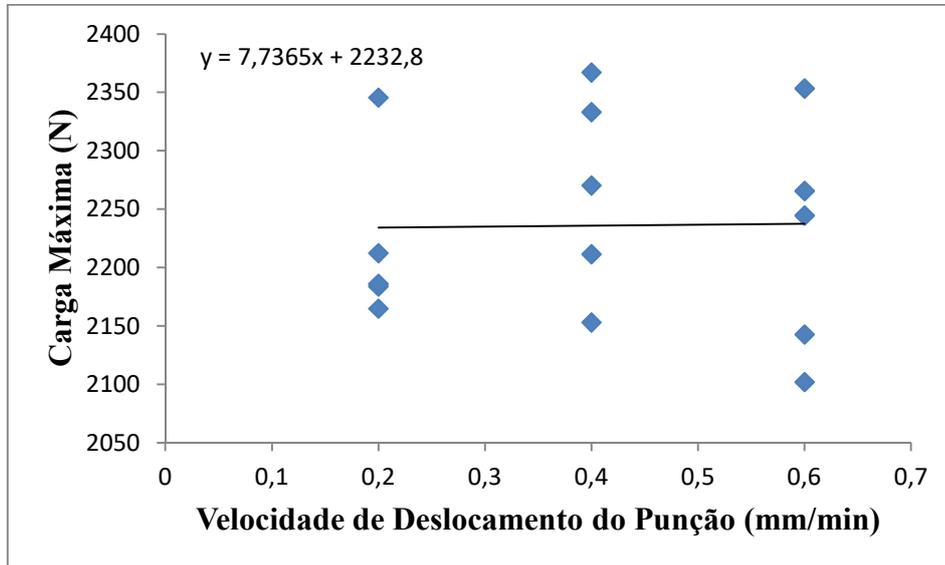
CEN e CONTRERAS *et al.* (2008), para todos os corpos de prova, separados por material e velocidades.

Tabela 4.1 - Valores de  $P_m$ ,  $d_m$  e  $P_y$ , para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 obtidos em ensaio SPT a diferentes velocidades.

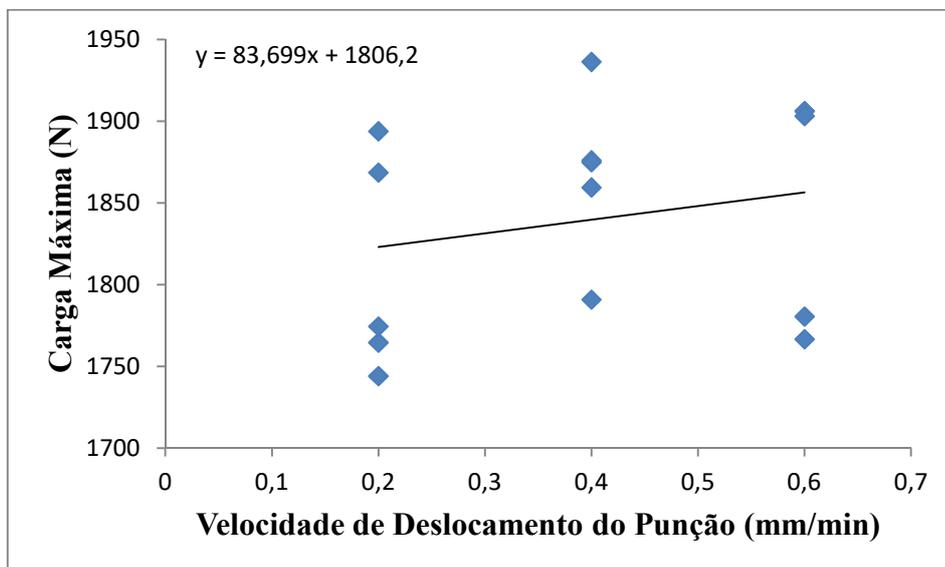
Material	Velocidade (mm/min)	Amostra	$P_m$ (N)	$d_m$ (mm)	$P_{y\_MAO}$ (N)	$P_{y\_CEN}$ (N)	$P_{y\_t/10}$ (N)
AISI 304	0,2	1	2346	2,24	105	90	137
		2	2213	2,46	78	70	56
		3	2184	2,37	49	46	71
		4	2165	2,25	80	78	104
		5	2186	2,25	147	118	220
	0,4	1	2367	2,40	135	124	140
		2	2270	2,34	88	81	116
		3	2212	2,36	81	75	111
		4	2333	2,27	157	145	179
		5	2153	2,42	81	68	87
	0,6	1	2102	2,42	53	45	103
		2	2143	2,42	81	74	109
		3	2266	2,24	69	57	111
		4	2245	2,29	119	108	142
		5	2354	2,34	172	164	221
ASTM A335 P92	0,2	1	1869	1,92	148	138	144
		2	1765	2,11	168	142	105
		3	1894	2,01	219	196	228
		4	1744	2,01	144	135	191
		5	1774	1,98	167	146	177
	0,4	1	1876	1,93	217	198	250
		2	1859	1,98	226	201	247
		3	1791	1,95	153	140	178
		4	1936	2,00	182	164	199
		5	1875	1,88	167	146	169
	0,6	1	1593	1,74	48	45	78
		2	1906	1,86	157	137	164
		3	1767	1,96	159	148	183
		4	1903	2,00	203	181	227
		5	1780	1,94	152	126	195

O valor correspondente ao de deslocamento máximo deveria ser o relativo ao ponto de ruptura do corpo de prova, entretanto como a determinação desse ponto no decorrer do ensaio *Small Punch* se torna difícil empregou-se o deslocamento equivalente à carga máxima para a

realização desse trabalho. Na Figura 4.4 estão apresentadas correlações entre carga máxima, (a) para AISI 304 e (b) para ASTM A335 P92.



(a)



(b)

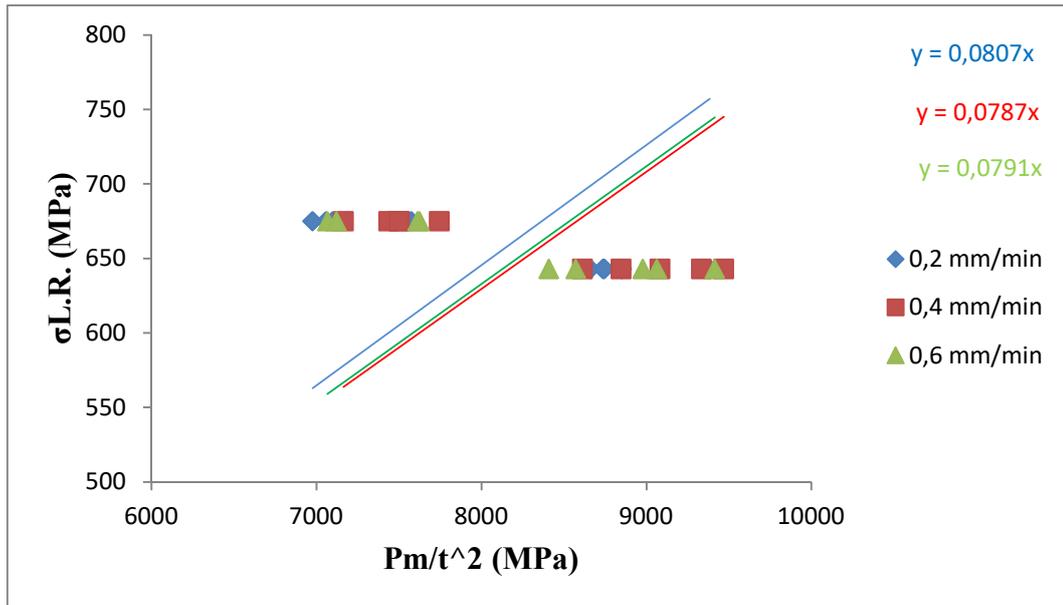
Figura 4.4 - Carga máxima de ensaio vs. velocidade de deslocamento do punção (a) aço AISI 304 e (b) aço ASTM A335 P92 obtidos por SPT.

Pode-se observar através das correlações das cargas máximas para os dois aços, apresentadas na Figura 4.4, que a carga máxima tende a aumentar com o aumento da velocidade de ensaio, como dito anteriormente esse comportamento é compatível com o

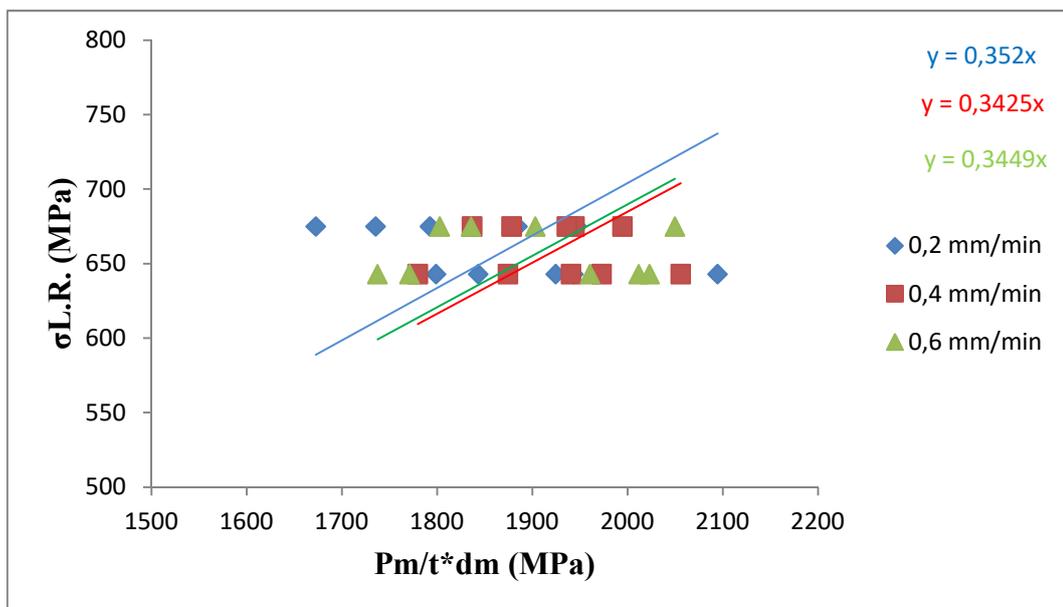
constatado em ensaios de tração convencional, mas também se pode perceber que a dispersão dos dados é bastante significativa, para ambos os materiais.

#### 4.1 Tensão Limite de Resistência

Na determinação da tensão limite de resistência foram usadas as Equações 2.4 e 2.5. A Equação 2.4 correlaciona a carga máxima ( $P_m$ ) com a espessura do corpo de prova ( $t_0$ ) mediante o uso das constantes experimentais  $\beta_1$  e  $\beta_2$ . A Equação 2.5 faz uso do deslocamento do punção no ponto de carga máxima ( $d_m$ ), da espessura do CP ( $t$ ) com as constantes  $\beta'_1$  e  $\beta'_2$ . Como anteriormente mostrado por LOYOLA (2017) os valores recomendados por autores como GARCÍA *et al.* (2014), se mostraram inapropriados para os materiais propostos para esse trabalho, já que quando inseridos nas equações foram encontrados resultados muito disparees das tensões limite de resistência encontrados através de ensaios de tração convencionais. Com isso, novas constantes foram calculadas para as três velocidades escolhidas de modo que os valores de tensão limite de resistência, tensão limite de escoamento e alongamento percentual se assemelhem aos resultados encontrados nos ensaios de tração convencionais. A Figura 4.5 demonstra o primeiro método usado para obter as novas constantes a serem aplicadas nas equações de tensão limite de resistência, Equação 2.3 (a) e Equação 2.4 (b). As constantes  $\beta_2$  e  $\beta'_2$  foram definidas como zero, essa simplificação iguala ao zero de tensões nos dois ensaios.



(a)



(b)

Figura 4.5 - Determinação das constantes experimentais para tensão limite de resistência através da (a) Equação 2.3, e (b) Equação 2.4.

Terminado o desenvolvimento das constantes de ensaio  $\beta_1$  e  $\beta_1'$ , foi então possível o cálculo da tensão limite de resistência para os ensaios. As Equações 4.1, 4.2 e 4.3 foram baseadas na Equação 2.4, e as Equações 4.4, 4.5 e 4.6 foram baseadas na Equação 2.5, correlacionando com as velocidades de deslocamento do punção 0,2; 0,4 e 0,6 mm/min respectivamente.

Referente à Equação 2.4:

$$\sigma_{L.R.} = 0,0807 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,0787 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.2}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,0791 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.3}$$

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

Referente à Equação 2.5:

$$\sigma_{L.R.} = 0,352 * \frac{P_m}{t*d_m} \quad \text{Equação 4.4}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,3425 * \frac{P_m}{t*d_m} \quad \text{Equação 4.5}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,3449 * \frac{P_m}{t*d_m} \quad \text{Equação 4.6}$$

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

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores de tensão limite de resistência provenientes das Equações 4.1 a 4.6 e das constantes experimentais encontradas.

Tabela 4.2 - Resultados da tensão limite de resistência por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 usando o método gráfico para obtenção das constantes experimentais.

Material	$\sigma_{L.R.}$ Convencional (MPa)	Velocidade (mm/min)	$P_m/t^2$	$P_m/(t * d_m)$
			$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)
AISI 304	515-770	0,2	$716 \pm 24$	$676 \pm 40$
		0,4	$714 \pm 27$	$659 \pm 36$
		0,6	$703 \pm 32$	$656 \pm 47$
ASTM A335 P92	675	0,2	$584 \pm 22$	$636 \pm 39$
		0,4	$588 \pm 16$	$657 \pm 21$
		0,6	$582 \pm 24$	$650 \pm 34$

Analisando os dados obtidos na Tabela 4.2 observa-se que os valores de tensão limite de resistência mostram uma faixa compatível com os resultados de ensaios de tração convencionais. Como uma segunda forma de obtenção das constantes experimentais foram separados os materiais estudados, calculando para cada amostra uma nova constante fazendo então a média para os corpos de prova submetidos à mesma velocidade de ensaio gerando assim novas equações (Equações 4.7 a 4.18).

Equações Referentes à Equação 2.4:

1. AISI 304

$$\sigma_{L.R.} = 0,0725 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.7}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,0710 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.8}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,0727 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.9}$$

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

## 2. ASTM A335 P92:

$$\sigma_{L.R.} = 0,0930 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.10}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,0905 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.11}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,0947 * \frac{P_m}{t^2} \quad \text{Equação 4.12}$$

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

## Equações Referentes à Equação 2.5:

## 1. AISI 304

$$\sigma_{L.R.} = 0,3302 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.13}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,3358 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.14}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,3427 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.15}$$

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

## 2. ASTM A335 P92:

$$\sigma_{L.R.} = 0,3744 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.16}$$

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

$$\sigma_{L.R.} = 0,3557 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.17}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.R.} = 0,3568 * \frac{P_m}{t * d_m} \quad \text{Equação 4.18}$$

para  $v = 0,6 \text{ mm/min}$ .

Com as Equações 4.7 a 4.18 foi possível então calcular as tensões limite de resistência para cada material em cada uma das velocidades de ensaio estudada. Os resultados encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados da tensão limite de resistência por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 usando o método numérico para obtenção das constantes experimentais.

Material	$\sigma_{L.R.}$ Convencional (MPa)	Velocidade (mm/min)	$P_m/t^2$	$P_m/(t * d_m)$
			$\sigma_{L.R.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)
AISI 304	515-770	0,2	$643 \pm 21$	$640 \pm 35$
		0,4	$644 \pm 25$	$646 \pm 35$
		0,6	$694 \pm 86$	$651 \pm 47$
ASTM A335 P92	675	0,2	$673 \pm 25$	$676 \pm 41$
		0,4	$676 \pm 19$	$682 \pm 22$
		0,6	$678 \pm 49$	$672 \pm 35$

Após a obtenção das constantes, um novo CP de cada material, para cada velocidade, foi ensaiado e as Equações 4.7 a 4.18 foram utilizadas para obter os valores de tensão de resistência afim de verificar os valores obtidos. A Figura 4.6 apresenta os valores obtidos para os novos CPs ensaios, comparando com os dados dos ensaios convencionais.

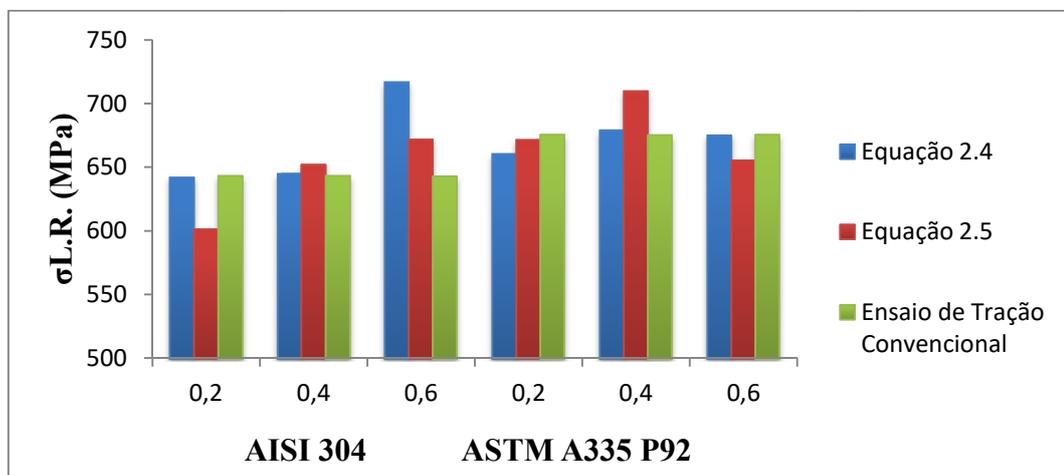
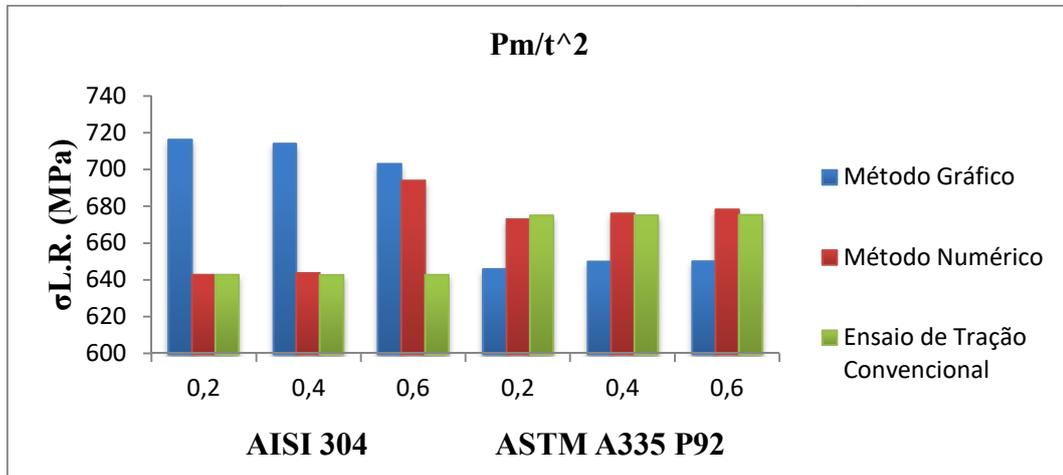
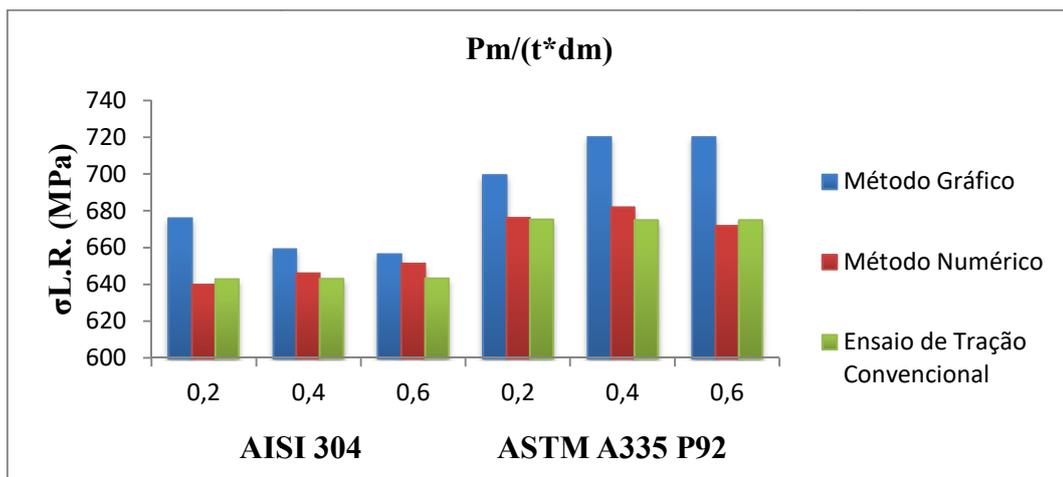


Figura 4.6 - Resultados de tensão limite de resistência obtidos para os novos CPs ensaiados.

Na Figura 4.7 têm-se a comparação entre os resultados obtidos com as novas constantes, as encontradas pelo método gráfico e os valores obtidos por ensaios de tração convencionais.



(a)



(b)

Figura 4.7 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para a tensão limite de resistência (a) referente à Equação 2.4 e (b) referente à Equação 2.5.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 e nos gráficos da Figura 2.7 é possível perceber que separar as classes de materiais exige resultados mais próximos aos encontrados em ensaios de tração convencional. Pode-se também verificar que para as Equações 2.4 e 2.5 os valores obtidos são muito próximos não sendo possível distinguir o melhor método de cálculo para a tensão limite de resistência.

Terminadas as análises foi possível à comparação dos resultados com os alcançados pelo trabalho de LOYOLA (2017) para o aço ASTM A335 P92, que estão apresentados na Figura 4.8. Como pode ser observado os resultados de ambos os trabalhos são bem aproximados, embora os resultados atuais sejam mais próximos aos de ensaios de tração convencionais.

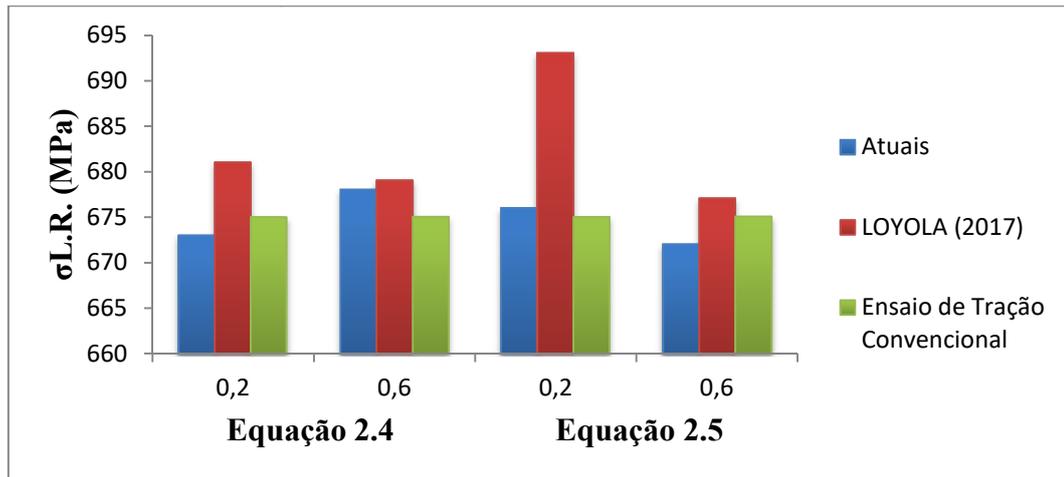


Figura 4.8 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para a tensão limite de resistência.

## 4.2 Alongamento

Para a base de cálculo do alongamento foram utilizadas as Equações 2.6 e 2.7, sendo usadas as constantes de ensaio  $\gamma$  e  $\gamma'$ . A Equação 2.6 relaciona a constante  $\gamma$  com o deslocamento no ponto de carga máxima, e a Equação 2.7 faz uso da constante  $\gamma'$ , o deslocamento no ponto de carga máxima e a espessura do corpo de prova. Foram empregados os mesmos dois métodos apresentados no item anterior para a determinação dos valores das constantes experimentais. Através do método gráfico foram obtidas as Equações 4.19, 4.20 e 4.21 referentes à Equação 2.6 e as Equações 4.22, 4.23 e 4.24 referentes a Equação 2.7.

Referente à Equação 2.6:

$$A(\%) = 21,637 * d_m$$

Equação 4.19

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

$$A(\%) = 21,85 * d_m \quad \text{Equação 4.20}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 22,704 * d_m \quad \text{Equação 4.21}$$

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

Referente à Equação 2.7:

$$A(\%) = 10,88 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.22}$$

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

$$A(\%) = 10,988 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.23}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 11,386 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.24}$$

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

Na Tabela 4.4 encontram-se os resultados obtidos por meio as Equações 4.19 a 4.24 para os dois aços estudados nas diferentes velocidades de ensaio empregadas.

Tabela 4.4 - Resultados dos alongamentos percentuais para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método gráfico de obtenção das constantes de experimentais

Material	A convencional (%)	Velocidade (mm/min)	$\gamma * d_m$	$\gamma * (d_m/t)$
			A (%)	A(%)
AISI 304	35-65	0,2	$50,1 \pm 2,1$	$50,2 \pm 2,2$
		0,4	$51,5 \pm 1,3$	$51,6 \pm 1,3$
		0,6	$53,2 \pm 1,8$	$53,4 \pm 1,8$
ASTM A335 P92	26,3	0,2	$43,4 \pm 1,5$	$43,3 \pm 1,5$
		0,4	$42,6 \pm 1,0$	$42,5 \pm 1,0$
		0,6	$44,0 \pm 1,3$	$43,9 \pm 1,3$

Como no item anterior foram calculados novos valores para  $\gamma$  e  $\gamma'$  para cada um dos materiais em cada uma das velocidades de ensaio estudadas. As Equações 4.25 a 4.30 são relativas à Equação 2.6 e as Equações 4.31 a 4.36 relativas a Equação 2.7.

Referente à Equação 2.6:

1. AISI 304

$$A(\%) = 21,966 * d_m \quad \text{Equação 4.25}$$

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

$$A(\%) = 21,177 * d_m \quad \text{Equação 4.26}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 21,253 * d_m \quad \text{Equação 4.27}$$

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

2. ASTM A335 P92

$$A(\%) = 13,083 * d_m \quad \text{Equação 4.28}$$

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

$$A(\%) = 13,387 * d_m \quad \text{Equação 4.29}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 13,956 * d_m \quad \text{Equação 4.30}$$

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

Referente à Equação 2.7:

1. AISI 304

$$A(\%) = 14,596 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.31}$$

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

$$A(\%) = 10,521 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.32}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 10,616 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.33}$$

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

## 2. ASTM A335 P92

$$A(\%) = 6,587 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.34}$$

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

$$A(\%) = 6,740 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.35}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$A(\%) = 7,031 * \frac{d_m}{t} \quad \text{Equação 4.36}$$

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

Aplicando as Equações 4.25 a 4.36 calcularam-se os resultados para o alongamento percentual dos aços AISI 304 e ASTM A335 P92 nas três velocidades aplicadas durante os ensaios. As soluções se encontram na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados dos alongamentos percentuais para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método numérico de obtenção das constantes de experimentais

Material	A convencional (%)	Velocidade (mm/min)	$\gamma * d_m$	$\gamma * (d_m/t)$
			A (%)	A(%)
AISI 304	35-65	0,2	$50,8 \pm 2,1$	$50,9 \pm 2,2$
		0,4	$49,9 \pm 1,2$	$49,9 \pm 1,3$
		0,6	$49,8 \pm 1,7$	$49,8 \pm 1,7$
ASTM A335 P92	26,3	0,2	$26,2 \pm 0,9$	$26,2 \pm 0,9$
		0,4	$26,1 \pm 0,6$	$26,1 \pm 0,6$
		0,6	$27,1 \pm 0,8$	$27,1 \pm 0,8$

Como feito no item anterior com as novas constantes foi feito um novo ensaio de cada material, para cada velocidade, e usando as Equações 4.25 a 4.36 foram obtidos os valores de alongamento percentual de modo a verificar a confiabilidade das mesmas. A Figura 4.9 apresenta os valores obtidos para os novos CPs ensaiados, comparando com os dados dos ensaios convencionais.

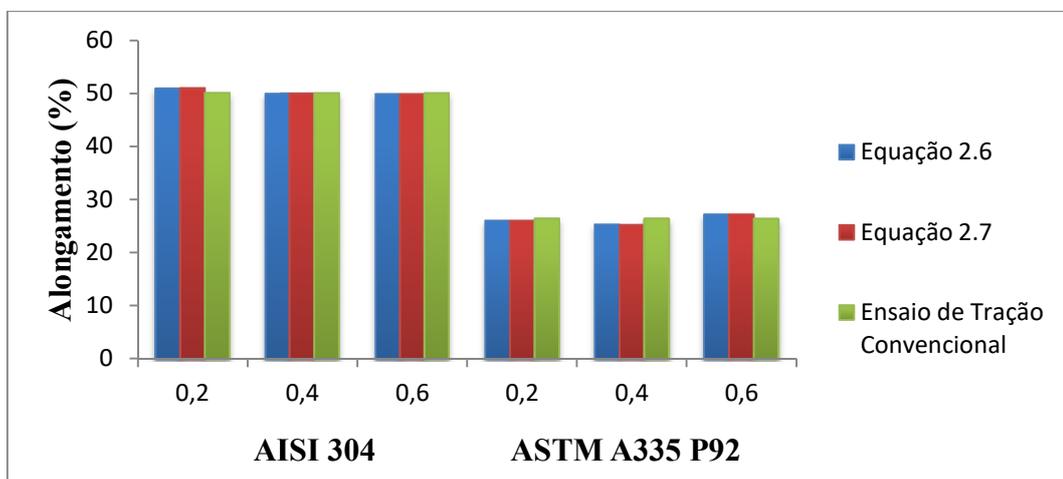
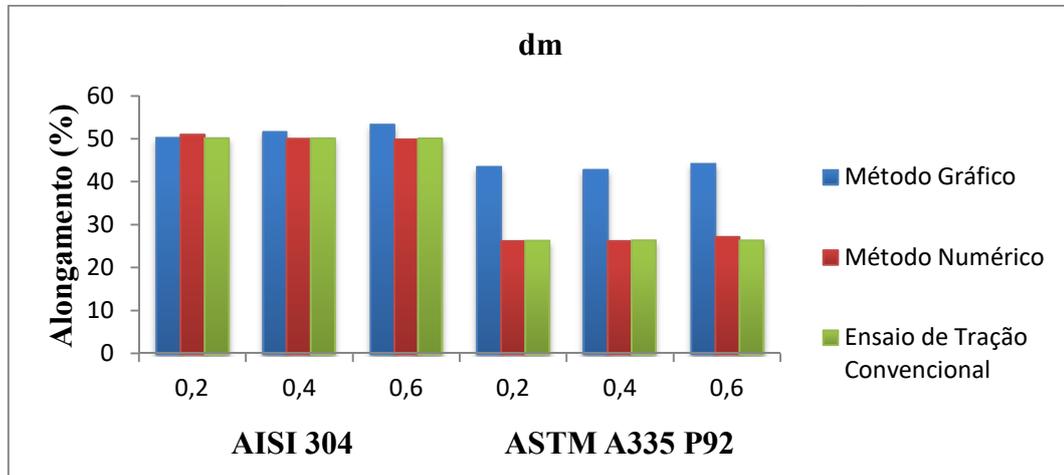


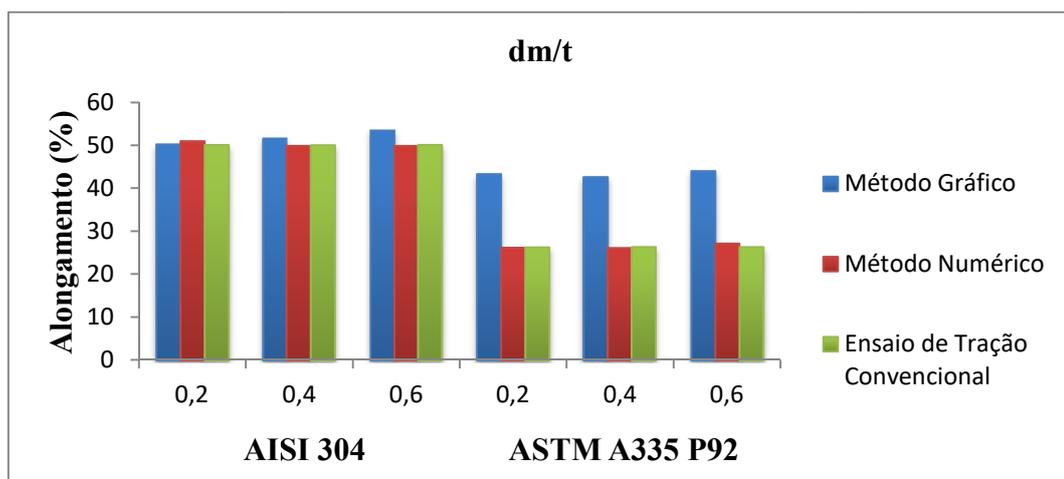
Figura 4.9 - Resultados de alongamento percentual obtidos para os novos CPs ensaiados.

Os resultados para os novos corpos de prova mostram que o método é válido e bastante eficiente para o cálculo do alongamento percentual, obtendo valores bem próximos aos de ensaios de tração convencional.

Foram gerados gráficos para a comparação entre os métodos de obtenção das constantes experimentais de modo a facilitar a avaliação dos mesmos. Os gráficos se encontram na Figura 4.10 sendo o (a) referente à Equação 2.6 e (b) referente à Equação 2.7.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para o alongamento percentual (a) referente à Equação 2.6 e (b) referente à Equação 2.7.

Assim como no item anterior, ao analisar as Tabelas 4.4 e 4.5 e os gráficos da Figura 4.10, pode-se perceber que os resultados adquiridos pelo método individual de obtenção de constantes experimentais se provaram muito mais similares aos adquiridos por ensaios de tração convencional no que se refere ao aço ASTM A335 P92, para o aço AISI 304 ambos métodos são válidos. Foi observado também que não tem uma velocidade mais indicada para

a realização do ensaio, pois em todas as três velocidades estudadas apresentam resultados semelhantes em ambos os métodos.

Os atuais resultados para o alongamento percentual também foram comparados aos encontrados por LOYOLA (2017) a fim de definir se a modificação feita na parte superior da matriz, para que a mesma funcione como um prensa-chapas foi eficiente ao deixar os resultados mais coerentes com os dos ensaios de tração convencionais. A comparação está apresentada na Figura 4.11.

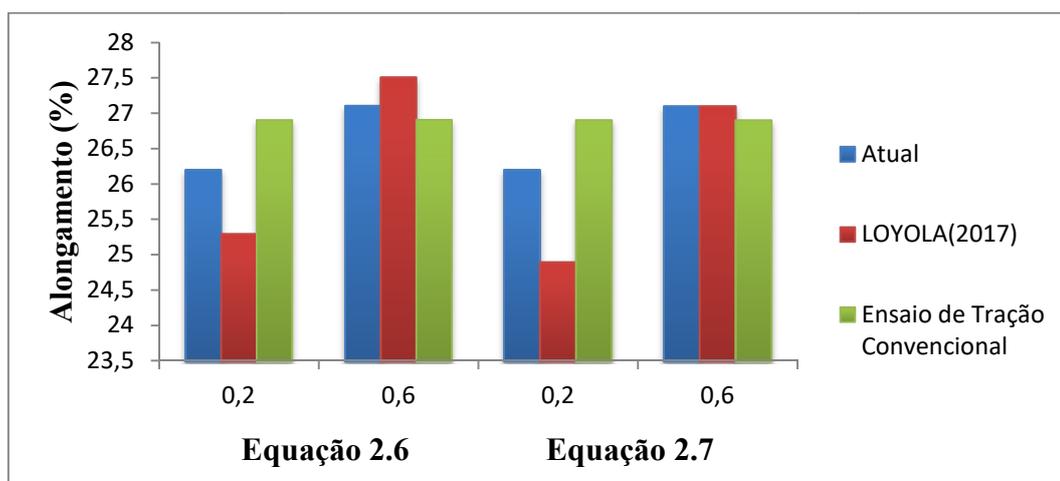


Figura 4.11 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para o alongamento percentual.

Ao verificar os resultados dos dois trabalhos percebe-se que os do atual trabalho tem uma maior semelhança com os de ensaios convencionais do que o trabalho anterior, provando que a modificação sofrida pela matriz impactou nos resultados.

### 4.3 Tensão Limite de Escoamento

Como visto anteriormente no item 2.3.2 existem alguns métodos propostos para a determinação de  $P_y$ . Ao estudar essa propriedade, foi decidido o uso das técnicas apresentadas por MAO & TAKAHASHI (1987), pelo Código de Práticas CEN e por CONTRERAS *et al.* (2008). A Figura 4.12 mostra a transição entre as Regiões I e II, passagem da área de deformação elástica para a deformação plástica, de uma curva carga vs. deslocamento do punção de um ensaio SPT para o aço AISI 304. A partir dela pode-se observar como foram encontrados os valores de  $P_y$  pelas técnicas escolhidas.

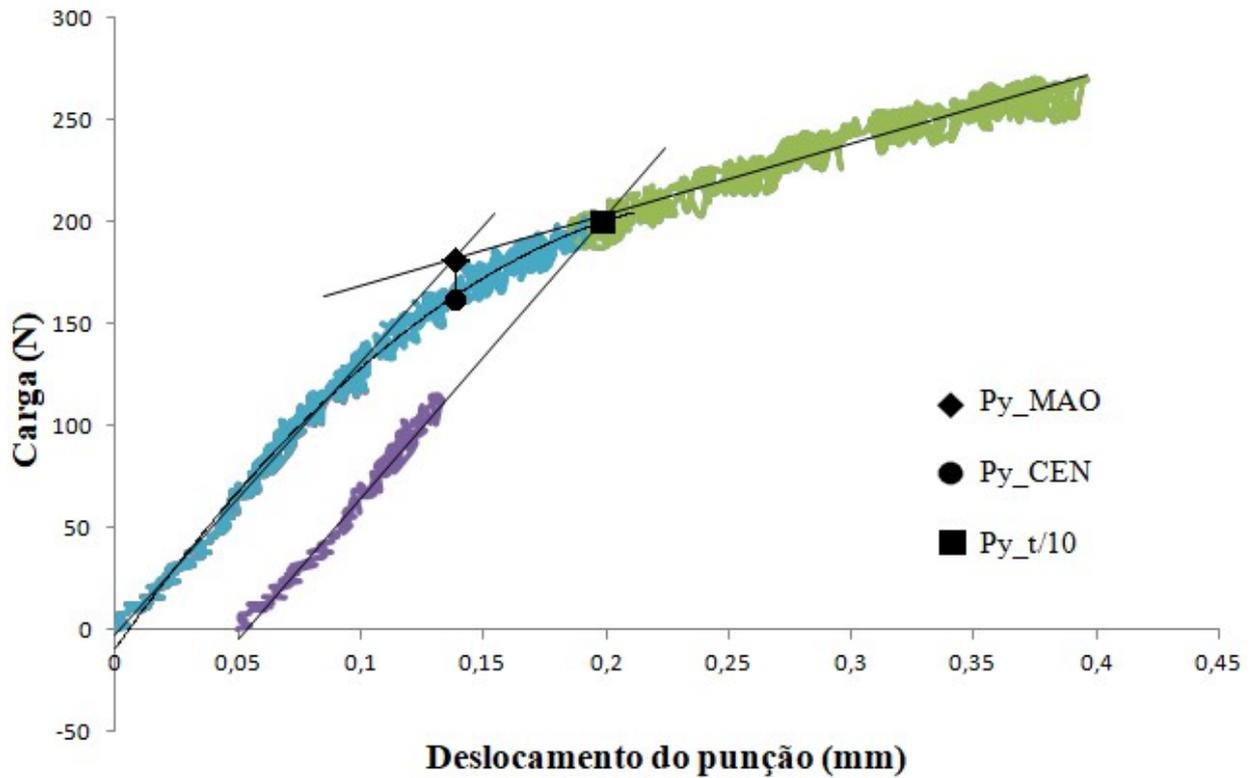


Figura 4.12 - Diferentes técnicas para determinação de  $P_y$  no ensaio SPT.

Para chegar ao valor de tensão limite de escoamento foi utilizada a Equação 2.3, que associa a carga  $P_y$  com a espessura do corpo de prova e as constantes experimentais  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ . Empregando os mesmos métodos já citados no cálculo da tensão limite de resistência e alongamento percentual para a determinação das constantes experimentais, foram desenvolvidas novas constantes que foram relacionadas com os três métodos de determinação de  $P_y$ . A constante  $\alpha_2$  foi considerada nula como meio de simplificação apresentado por GARCÍA *et al.*, 2014. As Equações a seguir foram desenvolvidas pelo método gráfico, as Equações 4.37, 4.38 e 4.39 para o método de obtenção de  $P_y$  descrito por MAO & TAKAHASHI (1987), as Equações 4.40, 4.41 e 4.42 pelo método descrito pelo Código de Práticas CEN e as Equações 4.43, 4.44 e 4.45 pelo método descrito por CONTRERAS *et al.* (2008).

1. Técnica de MAO & TAKAHASHI (1987)

$$\sigma_{L.E.} = 0,7349 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2}$$

Equação 4.37

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,6583 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2} \quad \text{Equação 4.38}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,7245 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2} \quad \text{Equação 4.39}$$

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

## 2. Técnica do código de praticas CEN

$$\sigma_{L.E.} = 0,8333 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad \text{Equação 4.40}$$

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,7283 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad \text{Equação 4.41}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,801 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad \text{Equação 4.42}$$

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

## 3. Técnica de CONTRERAS *et al.* (2008)

$$\sigma_{L.E.} = 0,6475 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.43}$$

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,5894 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.44}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,6043 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.45}$$

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

Os resultados obtidos para as tensões limite de escoamento para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 para as diferentes velocidades de deslocamento do punção, fazendo uso das constantes desenvolvidas, pelo método gráfico, para esse trabalho estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados da tensão limite de escoamento por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método gráfico de obtenção das constantes de experimentais.

Material	$\sigma_{L.E.}$ Convencional (MPa)	Velocidade (mm/min)	MAO	CEN	t/10
			$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)
AISI 304	205-350	0,2	270 ± 107	269 ± 89	305 ± 169
		0,4	285 ± 92	287 ± 99	299 ± 82
		0,6	286 ± 138	287 ± 153	331 ± 119
ASTM A335 P92	485	0,2	498 ± 88	505 ± 84	438 ± 121
		0,4	497 ± 83	495 ± 83	492 ± 90
		0,6	486 ± 69	475 ± 76	464 ± 64

Igualmente ao realizado nos dois itens anteriores foram calculadas novas constantes experimentais. Com os valores obtidos para a constante  $\alpha_1$  têm-se então as equações para calcular as tensões limite de escoamento para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92. As Equações 4.46 a 4.51 são referentes à técnica de MAO & TAKAHASHI (1987), as Equações 4.52 a 4.57 referentes à técnica do Código de Práticas CEN e as Equações 4.58 a 4.63 referentes à técnica de CONTRERAS *et al.* (2008).

#### 1. Técnica de MAO & TAKAHASHI (1987)

##### a. AISI 304

$$\sigma_{L.E.} = 0,8571 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2} \quad \text{Equação 4.46}$$

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,6679 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2} \quad \text{Equação 4.47}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,8967 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2}$$

Equação 4.48

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

b. ASTM A335 P92

$$\sigma_{L.E.} = 0,7336 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2}$$

Equação 4.49

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,6394 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2}$$

Equação 4.50

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,7110 * \frac{P_{y\_MAO}}{t^2}$$

Equação 4.51

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

## 2. Técnica do código de praticas CEN

a. AISI 304

$$\sigma_{L.E.} = 0,9387 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2}$$

Equação 4.52

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,7479 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2}$$

Equação 4.53

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 1,0324 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2}$$

Equação 4.54

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

b. ASTM A335 P92

$$\sigma_{L.E.} = 0,8126 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2}$$

Equação 4.55

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,7052 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad \text{Equação 4.56}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,7914 * \frac{P_{y\_CEN}}{t^2} \quad \text{Equação 4.57}$$

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

### 3. Técnica de CONTRERAS *et al.* (2008)

#### a. AISI 304

$$\sigma_{L.E.} = 0,6176 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.58}$$

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,5772 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.59}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,5645 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.60}$$

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

#### b. ASTM A335 P92

$$\sigma_{L.E.} = 0,7904 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.61}$$

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

$$\sigma_{L.E.} = 0,5659 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.62}$$

para  $v = 0,4$  mm/min.

$$\sigma_{L.E.} = 0,6462 * \frac{P_{y\_t/10}}{t^2} \quad \text{Equação 4.63}$$

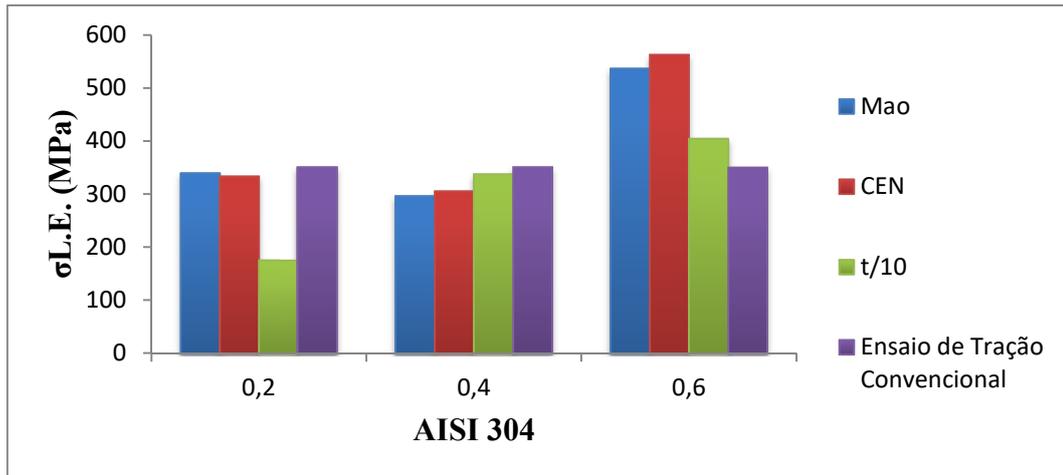
para  $v = 0,6$  mm/min.

Usando as Equações 4.46 a 4.63 foram então calculadas as tensões limite de escoamento para os materiais estudados nas diferentes velocidades de deslocamento do punção. Na Tabela 4.7 estão especificados os resultados.

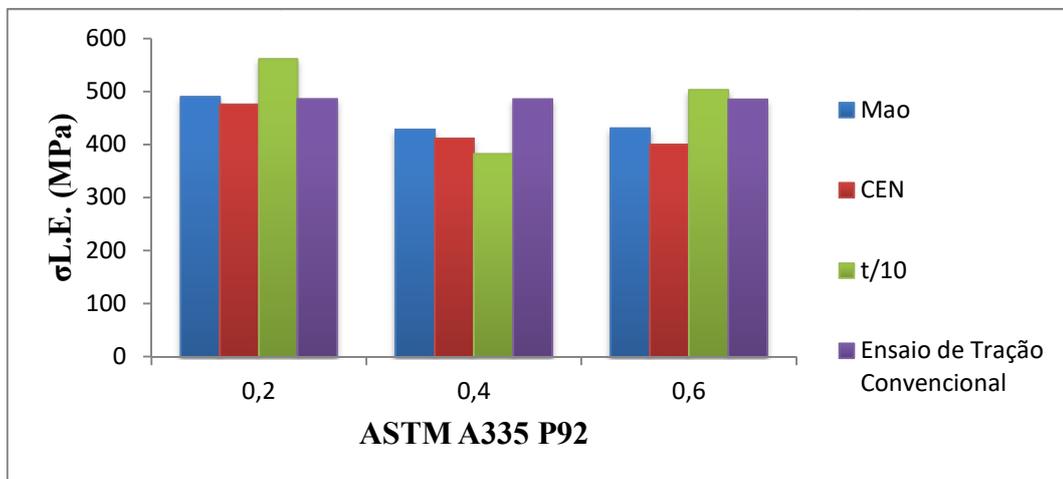
Tabela 4.7 - Resultados da tensão limite de escoamento por SPT para os aços AISI 304 e ASTM A335 P92 pelo método numérico de obtenção das constantes de experimentais.

Material	$\sigma_{L.E.}$ Convencional (MPa)	Velocidade (mm/min)	MAO	CEN	t/10
			$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)
AISI 304	205-350	0,2	315 ± 125	303 ± 100	290 ± 161
		0,4	290 ± 94	295 ± 101	292 ± 80
		0,6	354 ± 170	369 ± 197	310 ± 112
ASTM A335 P92	485	0,2	497 ± 88	492 ± 82	534 ± 148
		0,4	483 ± 80	479 ± 81	473 ± 86
		0,6	477 ± 68	469 ± 75	496 ± 69

Novamente foi feito um novo ensaio de cada material, para cada velocidade, e usando as Equações 4.46 a 4.63 foram obtidos os valores de tensão limite de escoamento. A Figura 4.13 apresenta os valores obtidos para os novos CPs ensaiados, comparando com os dados dos ensaios convencionais.



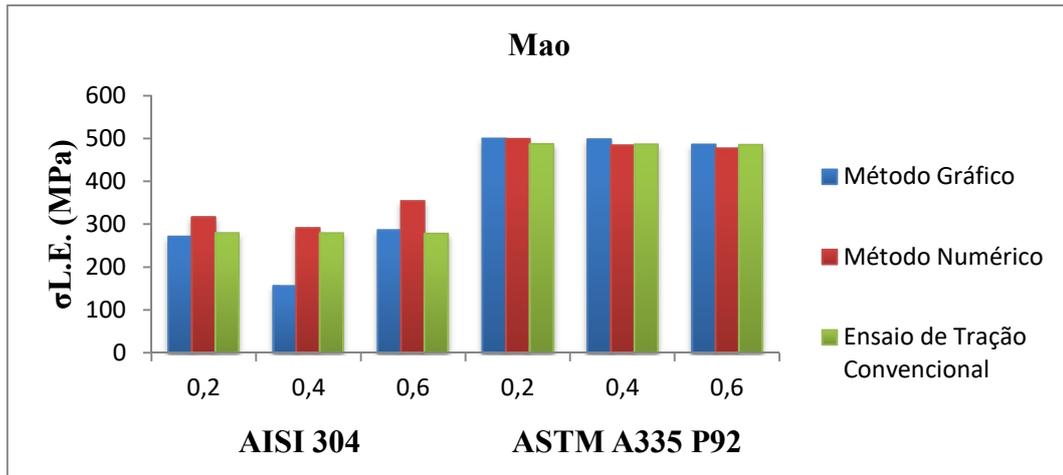
(a)



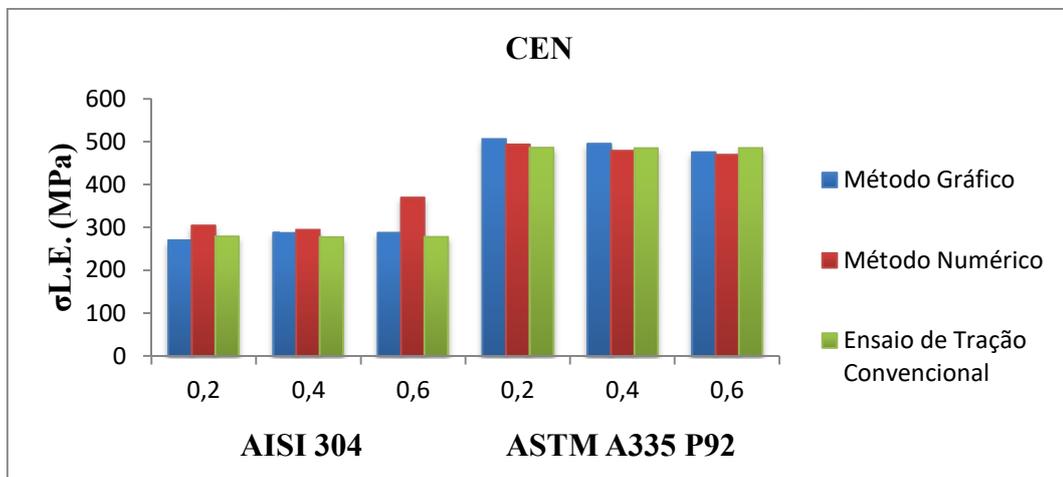
(b)

Figura 4.13 - Resultados de tensão limite de escoamento obtidos para os novos CPs ensaiados.

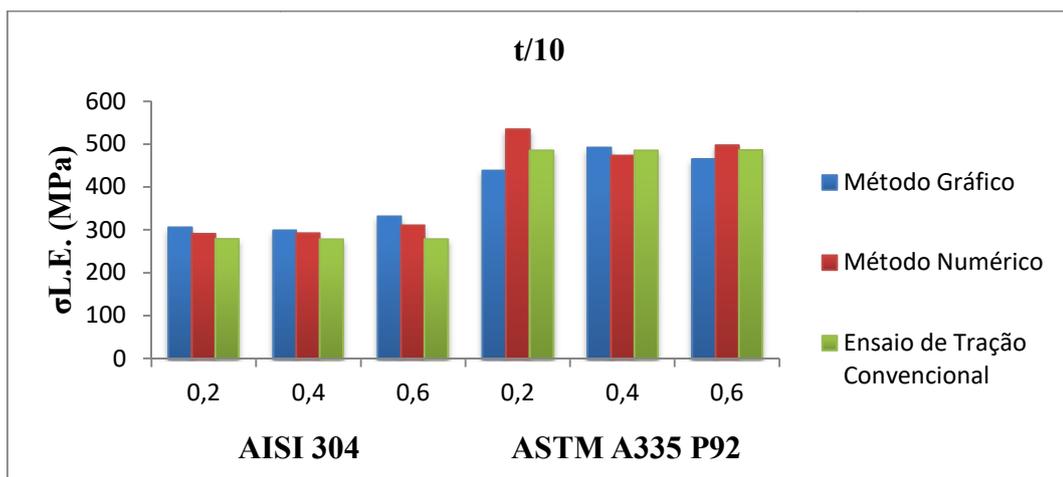
Como nos itens anteriores foram plotados gráficos para a avaliação dos métodos usados para adquirir as constantes de ensaio que estão apresentados na Figura 4.14, onde (a) se refere à Técnica de MAO & TAKAHASHI (1987), (b) Técnica do Código de Práticas CEN e (c) Técnica de CONTRERAS *et al.* (2008).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.14 - Gráfico de comparação entre os métodos gráfico e numérico de obtenção de constantes experimentais para a tensão limite de escoamento (a) referente à Técnica de MAO & TAKAHASHI (1987), (b) referente ao Código de Práticas CEN e (c) referente à Técnica de CONTRERAS *et al.* (2008).

Ao analisar as Tabelas 4.6 e 4.7 e os gráficos da Figura 4.14 percebe-se que para o aço ASTM A335 P92 os dois métodos apresentam resultados para a tensão limite de escoamento condizentes com os de ensaios de tração convencional, para o aço AISI 304 houve muita dispersão dos dados não podendo ser indicado um método mais eficiente.

Assim como para as outras propriedades mecânicas estudadas não foi possível definir uma velocidade de ensaio mais indicada a ser usada durante os ensaios SPT, com exceção da velocidade 0,6 mm/min para o aço AISI 304 que apresenta resultados com características muito diferenciadas quando comparadas as outras velocidades de ensaio.

Assim como nos dois itens anteriores foi feita a comparação entre os dois trabalhos, o atual e o realizado por LOYOLA (2017), que está demonstrada na Figura 4.15.

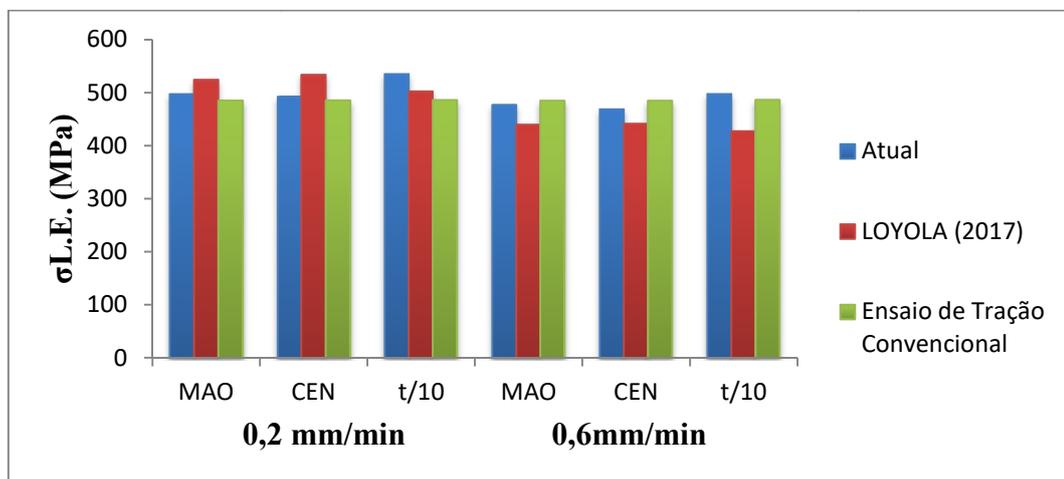


Figura 4.15 - Comparação entre resultados do trabalho atual e o de LOYOLA (2017) para a tensão limite de escoamento.

Em todas as velocidades de ensaio e para todas as técnicas de obtenção do parâmetro  $P_y$  o trabalho atual apresentou valores mais fidedignos para as tensões limite de escoamento do que o trabalho anterior, junto com o que foi observado nos outros dois itens anteriores é correto afirmar que a modificação realizada na matriz foi de fato eficiente e fez com que os resultados encontrados por esse trabalho se assemelhassem mais aos de ensaios de tração convencionais.

#### 4.4 Análise Microestrutural

Durante a realização dos ensaios *Small Punched* foi observado que nos corpos de prova do aço AISI 304, quando o material fazia a transição entre Região I e a Região II, da fase de deformação elástica para a fase de deformação plástica, ocorria um ruído, que resultava em um espessamento da curva carga vs. deslocamento do punção. Segundo SPENCER *et al.* (2004) e COSTA *et al.* (2016) esse ruído pode ser explicado pela formação de martensita induzida por deformação.

Com o intuito de verificar que houve alguma modificação microestrutural nos CPs de aço inox, foram feitas imagens de três amostras do aço, cada uma correspondente a uma das velocidades de ensaio utilizadas durante o trabalho.

A Figura 4.16 apresenta a microestrutura do aço 304 como recebido onde é possível observar sua estrutura austenítica, pode-se perceber também algumas maclas de recozimento.

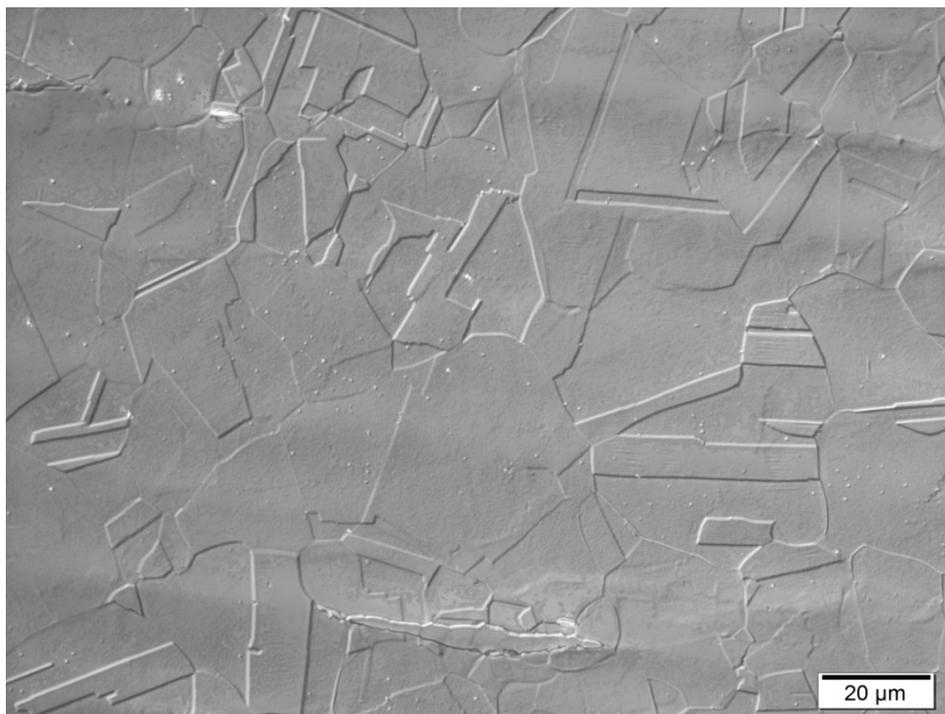


Figura 4.16 - Microestrutura do aço 304 como recebido.

A Figura 4.17 mostra as imagens obtidas na região próxima ao empescoçamento dos CPs para todas as velocidades de ensaio, onde as setas indicam a martensita induzida por deformação plástica.

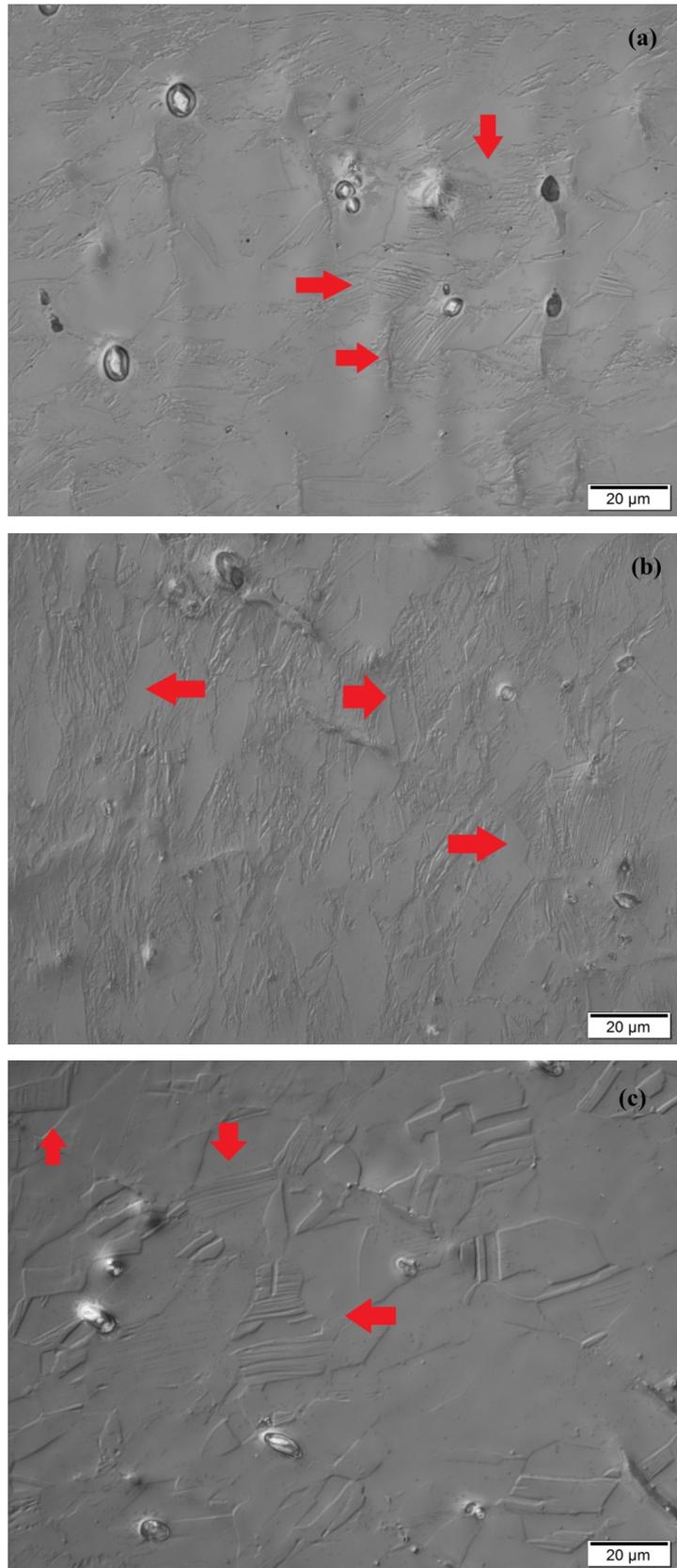


Figura 4.17 - Microscopia do aço AISI 304 nas áreas próximas ao empescoçamento para (a) 0,2 mm/min, (b) 0,4 mm/min e (c) 0,6 mm/min. Aumento: 1000x.

Como pode ser observado na Figura 4.17 os corpos de prova apresentam maclas de deformação com aparência similar as encontradas por BRAMFITT & BENSCOTER (2002) podendo ser um indício formação de martensita. Foi possível verificar com as microscopias que houve modificações microestruturais que podem ter impactado diretamente nos valores das propriedades mecânicas analisadas.

## Capítulo 5

### Conclusões

O *Small Punched Test* é ainda considerado uma tecnologia de ensaio recente de modo que ainda deve ser estudada para a consolidação do conhecimento da técnica. Com a avaliação dos resultados adquiridos durante a realização desse trabalho e o conhecimento atual sobre o ensaio, concluiu-se que:

1. As curvas carga vs. deslocamento do punção resultantes do ensaio SPT provaram-se análogas as de ensaios de tração convencionais de forma qualitativa, também apresentando boa repetitividade.
2. A modificação feita no sistema de ensaio se provou eficiente, já que no comparativo com o trabalho feito anteriormente por LOYOLA (2017) obteve-se valores de propriedades mecânicas com maior similaridade com os de ensaios convencionais de tração.
3. Para a determinação quantitativa das propriedades mecânicas ficou evidente que é necessário separar os materiais por classe, a fim de obter resultados mais próximos aos dos ensaios convencionais.
4. Foi observado que para materiais que possam sofrer algum tipo de modificação microestrutural por deformação plástica, como o aço AISI 304, o *Small Punched Test* pode não reproduzir bem alguma das propriedades mecânicas do material, nesse caso a tensão limite de resistência.

## Capítulo 6

### Sugestões para Trabalhos Futuros

- a. Desenvolver um dispositivo para uso das lixadeiras de modo a oferecer um menor risco para o operador e apresentar corpos de prova mais regulares.
- b. Realizar o *Small Punched Test* com novos materiais, principalmente em metálicos não ferrosos.
- c. Produzir amostras tanto no sentido de laminação quanto no sentido transversal de laminação para comparação de resultados.
- d. Desenvolver um novo dispositivo para ensaios em altas temperaturas.

## Referências Bibliográficas

- ANDRÉS, D.; LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J.A.; “Creep property evaluation of light alloys by means of the Small Punch Test: Creep master curves”, *Material and Design*, v. 96, pp. 122-130, Feb. 2016
- ARROYO, B.; ÁLVAREZ, J.A.; LACALLE, R.; URIBE, C.; GARCÍA, T.E.; RODRÍGUEZ, C.; “Analysis of key factors of hydrogen environmental assisted cracking evaluation by small punch test on medium and high strength steels”, to appear in *Materials Science & Engineering A*, Mar. 2017
- 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.
- BRAMFITT, B.L.; BENSCOTER, A.O.; *Metallographer’s Guide Practices and Procedures for Irons and Steels*, 1 ed. Estados Unidos da América, ASM International, Mar. 2002.
- 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.
- CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G.; *Ciência e Engenharia de Materiais*, 9 ed. New York, John Wiley & Sons Inc., 2014.
- CEN. Workshop Agreement Small Punch Test Method for Metallic Materials. CWA 15627:2006.
- CHEN, H.; HYDE, T.H.; “Use of multi-step loading small punch test to investigate the ductile-to-brittle transition behavior of thermally sprayed CoNiCrAlY coating”, to appear in *Materials Science & Engineering A*, Oct. 2016
- CHICA, J.C.; DÍEZ, P.M.B.; CALZADA, M.P.; “Development of an improved prediction method for the yield strength of steel alloys in the Small Punch Test”, to appear in *Material and Design*, Mar. 2018
- 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.

- 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.
- COSTA, D.C.T.; CARDOSO, M.C.; FONSECA, G.S.; MOREIRA, L.P.; MARTINY, M.; MERCIER, S.; “Strain-induced martensite formation of AISI 304L steel sheet: experiments and modeling”, *Materials Science Forum*, v. 869, pp. 490-496, Mar. 2016.
- FERNÁNDEZ, M.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; GARCÍA, T.E.; “Use of small punch test to estimate the mechanical properties of power metallurgy products employed in the automotive industry”, *Power Metallurgy*, v. 58, n. 3, pp. 171-177, Jul. 2015.
- 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.
- GARCÍA, T.E.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F.J.; CUESTA, I.I.; “Effect of hydrogen embrittlement on the tensile properties of CrMoV steels by means of the small punch test”, *Materials Science & Engineering A*, v.664, pp. 165-176, Mar. 2016
- 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.
- 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.
- HYDE, T. H., SUN, W.; BRETT, S. J.; “Application of impression creep test data in life assessment of power plant materials at high temperatures”, *In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Material: Design and Applications*, v. 222, pp. 175-1182, Jun. 2008.
- 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.
- 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, 2012.
- 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.

- HYDE, T. H.; SUN, W.; “Some considerations on specimen types for small sample creep tests”, *In: Journal of Materials at High Temperatures*, v. 27, n. 3, pp. 157-165, 2010.
- LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J.A.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F.; “Análisis de aspectos fundamentales para la interpretación de los resultados del ensayo small punch”, *In: Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 2, pp. 515-520, Santander, Jan. 2007.
- 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.
- LOYOLA, V. S.: “Análise das propriedades mecânicas de materiais metálicos através de ensaios mecânicos em miniatura”, Rio de Janeiro, Jun. 2017
- 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.
- 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. 49
- Mao,X. & Takahashi, H. “Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk ( $\phi$  0,3 mm) *Small Punch Test*”, *In: Journal of Nuclear Materials*, vol.150, pp. 42-52,1987.
- MARTÍNEZ-PAÑEDA, E.; GARCÍA, T.E.; RODRÍGUEZ, C; “Fracture toughness characterization through notch small punch test specimens”, to appear in *Materials Science & Engineering A*, Jan.2016
- MORENO, M.F.; BERTOLINO, G.; YAWNY, A.; “The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test”, *Material and Design*, v. 95, pp. 623-631, Jan.2016
- 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.
- 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*
- 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.

- RABENBERG, E.; *Small Specimen Test Techniques for Evaluating Radiation-induced Changes in Mechanical Properties*, M.Sc. Dissertation, Boise State University, Idaho, USA, 2012.
- RODRIGUEZ, C.; GACÍA CABEZAS, J.; CÁRDENAS, E.; 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.
- SAMANTARAY, D.; KUMAR, V.; BHADURI, A.K.; DUTTA, P.; “Microstructural evolution and mechanical properties of type 304 L stainless steel processed in semi-solid state”, *international Journal of Metallurgical Engineering*, v. 2, pp.149-153, 2013.
- SOUZA, S. A.; *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos*, 5 ed. São Paulo, Blücher, 1982.
- SPENCER, K.; EMBURY, J.D.; CONLON, K.T.; VÉRON, M.; BRÉCHET, Y.; “Strengthening via the formation of strain-induced martensite in stainless steels”, *Materials Science & Engineering A*, v. 387-389, pp. 873-881, 2004.
- VAN VLACK, L.H.; *Princípios de Ciência dos Materiais*, 1 ed. São Paulo, Blücher, 1970.
- 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.